

Міністерство освіти і науки України
Національний авіаційний університет

Міністерство освіти і науки України
Національний авіаційний університет

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Карабецький Денис Петрович

УДК 004.896:621.311.243(043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

Автоматизоване проектування гібридних сонячних енергетичних систем

05.13.12 – Системи автоматизації проектувальних робіт

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

_____ Д.П. Карабецький

Науковий керівник:

Синеглазов Віктор Михайлович, доктор технічних наук, професор

Київ - 2021

АНОТАЦІЯ

Карабецький Д. П. Автоматизоване проектування гібридних сонячних енергетичних систем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.12 «Системи автоматизації проектувальних робіт». Національний авіаційний університет МОН України, Київ, 2021.

Однією з основних тенденцій останніх десятиліть є пошук і впровадження відновлювальних джерел енергії, в тому числі і сонячної енергії. Враховуючи, що цей вид енергії стає все більш привабливим і більш доступним з кожним роком, проблеми залежності від умов навколишнього середовища так само стають все більш актуальними. Так як окремі джерела енергії не в змозі забезпечити виконання вимог навантаженні внаслідок невизначеності умов навколишнього середовища, слід розглядати гібридизацію системи, в сторону використання додаткових джерел енергії (в тому числі і резервних) в поєднанні з системами акумулювання енергії.

Гібридна сонячна енергетична система (ГСЕС) – система, яка використовує відновлювану енергію Сонця в комбінації з традиційними джерелами енергії (наприклад, дизель-генератори використовують дизельне паливо і в деяких випадках має доступ до енергомережі для продажу і купівлі електричної енергії), а також із застосуванням системи акумулювання енергії. Дана система має ряд переваг, так як вона може використовуватися в незалежному режимі, що дозволяє впроваджувати її в місцях, де немає доступу до енергомережі, так і підвищувати загальну якість електроенергії при експлуатації у разі виникнення проблем на підстанція в режимі з підключенням до енергомережі.

Отже, при побудові даного виду систем вимагається застосування методів багатокритеріальної структурно-параметричної оптимізації з дотриманням набору технічних і економічних обмежень, що потребує більш детального вивчення, побудови моделей процесів, які протікають в елементах ГСЕС і розроблення системи автоматизованого проектування.

В результаті дисертаційного дослідження було розроблено систему автоматизованого проектування ГСЕС, яку було впроваджено для вирішення задач проектування ГСЕС на ДП «ВО Київприлад» з урахуванням багатьох поставлених проектних цілей.

Перший розділ дисертації присвячений використанню відновлювальної енергетики, вводиться поняття гібридних сонячних енергетичних систем та їх важливість. Зазначаються перелік проблем при проектуванні ГСЕС, у вирішенні яких може допомогти спеціалізований САПР.

Другий розділ вводить структуру САПР для проектування ГСЕС, опис функціональної частини підсистем. Описується набір елементів ГСЕС, їх функціональна частина, проблеми кожного елемента підсистем, методи розв'язання, принципові схеми, математичні моделі, імітаційні моделі, а також результати дослідження характеристик. Крім того, в даному розділі вводиться одна з основних завдань сонячних енергетичних систем - відстеження точки максимальної потужності, класифікація методів пошуку, вводиться поняття умов часткового затінення, їх проблем та рішення в контексті пошуку точки максимальної потужності, огляд відомих методів, а так само пропонований алгоритмічний метод пошуку з урахуванням умов часткового затінення, який більш детально описано і досліджено в третьому розділі. Особлива уваги приділяється елементу ГСЕС – гібридній системі акумулювання енергії.

Третій розділ присвячено вирішенню задачі структурно-параметричного синтезу ГСЕС, яка включає сонячні панелі, набір перетворювачів постійного та змінного струму, систему пошуку точки максимальної потужності, систему акумулювання енергії, дизель генератор і систему управління. Розроблено метод пошуку робочої точки, відповідний отримання максимальної потужності, на основі мета-евристичного алгоритму мінного вибуху.

Четвертий розділ присвячений оптимального проектування безпілотних літальних апаратів, забезпечених гібридними сонячною енергетичною установкою і гібридною системою акумулювання енергії, що забезпечують максимально тривалий безпосадочний політ. Описується структура і конструкція даного типу БПЛА, розроблені математичні моделі його елементів, запропоновано розширення

підходу до концептуального проектування представленому в роботах ETHZ (Швейцарія), запропоновано підхід до розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації з використанням генетичного алгоритму SPEA2.

Ключові слова: гібридна сонячна енергетична система, сонячна енергетична система, пошук точки максимальної потужності, система автоматизованого проектування, гібридна система акумулювання енергії, алгоритм мінного вибуху, безпілотний літальний апарат з використанням сонячної енергії.

ABSTRACT

Karabetskyi D.P. Computer-aided design of hybrid solar power systems. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of the candidate of technical sciences (doctor of philosophy) on a specialty 05.13.12 "Systems of automation of design works". National Aviation University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

One of the main trends of recent decades is the search for and implementation of alternative energy sources, including solar energy. Given that this type of energy is becoming more attractive and more accessible every year, the problems of dependence on environmental conditions are also becoming increasingly important. As individual energy sources are unable to meet load requirements due to uncertainties in the environment, hybridization of the system should be considered in the direction of using additional energy sources (including backup) in combination with energy storage and storage systems.

Hybrid Solar Power System (HSPS) is a system that uses renewable solar energy in combination with traditional energy sources (e.g. diesel generators that use diesel fuel and in some cases has access to the grid to sell and buy electricity), as well as using energy storage and storage systems. This system has a number of advantages, as it can be used in independent mode, which allows you to implement it in places where there is no access to the grid, and improve the overall quality of electricity during operation in case of problems with the substation in the mode with grid connection.

Therefore, the construction of this type of systems requires the use of multicriteria structural-parametric optimization with a set of technical and economic constraints, which requires more detailed study, construction of models of processes occurring in the elements of HSPS and development of computer-aided design.

As a result of the dissertation research, a system of automated design of the HSPS was developed, which was implemented to solve HSPS's design problems at the DP "VO Kyivprilad" taking into account many of the project objectives.

The first section of the dissertation is devoted to the use of alternative energy, the concept of hybrid solar energy systems and their importance is introduced. The list of problems at designing of HSPS in the decision of which the specialized CAD can help is specified.

The second section introduces the structure of CAD for the design of HSPS, a description of the functional part of the subsystems. The set of HSPS elements, their functional part, problems of each element of subsystems, methods of the decision, schematic schemes, mathematical models, simulation models, and also results of research of characteristics are described. In addition, this section introduces one of the main tasks of solar energy systems - tracking the maximum power point, classification of search methods, introduces the concept of partial shading conditions, their problems and solutions in the context of finding the maximum power point, review of known methods, as well as the proposed algorithmic the method of search taking into account the conditions of partial shading, which is described in more detail and studied in the third section. Particular attention is paid to the HSPS element - a hybrid energy storage system.

The third section is devoted to solving the problem of structural-parametric synthesis of HPPs, which includes solar panels, a set of DC and AC converters, maximum power point search system, energy storage system, diesel generator and control system. A method for finding a operating point corresponding to obtaining maximum power has been developed on the basis of a meta-heuristic mine explosion algorithm.

The fourth section is devoted to the optimal design of unmanned aerial vehicles equipped with a hybrid solar power plant and a hybrid energy storage system, providing the longest non-stop flight. The structure and construction of this type of UAV are described, mathematical models of its elements are developed, the expansion of the

approach to conceptual design presented in ETHZ (Switzerland) is offered, the approach to the problem of multicriteria optimization using genetic algorithm SPEA2 is offered.

Keywords: hybrid solar power system, solar power system, maximum power point tracking, computer-aided design system, hybrid energy storage system, mine blast algorithm, unmanned aerial vehicle with solar energy system.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Karabetsky, D., Sineglazov, V. (2021) “MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF HYBRID ENERGY SYSTEM OF SOLAR RECHARGEABLE AIRCRAFT,” *Věda a perspektivy*, 1(1). doi: 10.52058/2695-1584-2021-1(1)-200-213
(Закордонне видання (Чехія) індексується в наукометричних базах Google Scholar).
2. Sineglazov, V., Karabetsky, D. and Chumachenko, O. (2021) “Multicriteria optimization in the problem of computer-aided design of hybrid solar energy systems”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(2 (111)), pp. 67–78. doi: 10.15587/1729-4061.2021.234202.
(Видання індексується в наукометричних базах SCOPUS).
3. Sineglazov, V. M. and Karabetsky, D. P. (2013) “Computer-aided design of solar power plant,” *Electronics and Control Systems*, 2(36). doi: 10.18372/1990-5548.36.5853.
(Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, EBSCOhost, Crossref, Google Scholar, SSM, RSCI).
4. Sineglazov, V. M. and Karabetsky, D. R. (2014) “Computer-aided design of motor driver for solar power plant,” *Electronics and Control Systems*, 1(39). doi: 10.18372/1990-5548.39.7328.
(Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, EBSCOhost, Crossref, Google Scholar, SSM, RSCI).
5. Sineglazov, V. M. and Karabetsky, D. P. (2014) “Analysis of solar power plant’s efficiency,” *Electronics and Control Systems*, 3(41). doi: 10.18372/1990-5548.41.7802.
(Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, EBSCOhost, Crossref, Google Scholar, SSM, RSCI).
6. Sineglazov, V. M. and Karabetsky, D. P. (2015) “Computer-aided design of solar power trackers,” *Electronics and Control Systems*, 1(43). doi: 10.18372/1990-5548.43.8857.
(Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, EBSCOhost, Crossref, Google Scholar, SSM, RSCI).

7. Karabetsky, D. P. (2016) “ANALYSIS OF SOLAR CHARGE CONTROLLERS,” *Electronics and Control Systems*, 1(47). doi: 10.18372/1990-5548.47.10290.
(Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, EBSCOhost, Crossref, Google Scholar, SSM, RSCI).
8. Karabetsky, D. P. (2018) “Conceptual design of solar unmanned aerial vehicle,” *Electronics and Control Systems*, 2(56). doi: 10.18372/1990-5548.56.12938.
(Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, EBSCOhost, Crossref, Google Scholar, SSM, RSCI).
9. Sineglazov, V. M., Karabetsky, D. P. and Klanovets, O. V. (2020) “MAXIMUM POWER POINT TRACKING FOR PHOTO MODULES,” *Electronics and Control Systems*, 1(63). doi: 10.18372/1990-5548.63.14518.
(Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, EBSCOhost, Crossref, Google Scholar, SSM, RSCI).
10. Karabetsky, D. (2016) “Solar rechargeable airplane: Power system optimization,” in *2016 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. IEEE, pp. 218–220.
(Закордонне видання (США), індексується в наукометричних базах Scopus).
11. Karabetsky, D. (2017) “Conceptual design of maximum power point tracking for solar rechargeable airplane,” in *2017 IEEE 4th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*. IEEE, pp. 58–60.
(Закордонне видання (США), індексується в наукометричних базах Scopus).
12. Karabetsky, D. M. (2015) “Flying range of solar airplane,” in *2015 IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*. IEEE, pp. 48–49.
(Закордонне видання (США), індексується в наукометричних базах Scopus).
13. Karabetsky, D. and Sineglazov, V. (2018a) “Analysis of solar rechargeable airplane,” in *2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. IEEE, pp. 16–19.
(Закордонне видання (США), індексується в наукометричних базах Scopus).

14. Karabetsky, D. and Sineglazov, V. (2018b) “Conceptual design of solar power system,” in *2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. IEEE, pp. 275–278.
(Закордонне видання (США), індексується в наукометричних базах Scopus).
15. Karabetsky, D. and Sineglazov, V. (2019) “Conceptual design of solar rechargeable airplane,” in *2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*. IEEE, pp. 17–20.
(Закордонне видання (США), індексується в наукометричних базах Scopus).
16. Karabetsky, D. and Sineglazov, V. (2020) “Path planning for solar rechargeable aircraft,” in *2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. IEEE, pp. 126–128.
(Закордонне видання (США), індексується в наукометричних базах Scopus).
17. Sineglazov, V. M. and Karabetsky, D. P. (2013a) “Energy system design of solar aircraft,” in *2013 IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD)*. IEEE, pp. 9–11.
(Закордонне видання (США), індексується в наукометричних базах Scopus).
18. Sineglazov, V. M. and Karabetsky, D. P. (2013b) “Flying wing design for solar rechargeable aircraft” in *2013 IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD)*. IEEE, pp. 56–58.
(Закордонне видання (США), індексується в наукометричних базах Scopus).
19. Sineglazov, V. and Karabetsky, D. (2020a) “HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEMS,” in *8. EUROPEAN CONFERENCE on RENEWABLE ENERGY SYSTEMS (ECRES)*. ISTAMBUL, TURKEY, pp. 596–600.
(Закордонне видання (Туреччина)).
20. Sineglazov, V. and Karabetsky, D. (2020b) “MAXIMUM POWER POINT TRACKING UNDER PARTIAL SHADING CONDITIONS USING NOVEL MINE BLAST ALOGRITHM,” in *8. EUROPEAN CONFERENCE on RENEWABLE ENERGY SYSTEMS (ECRES)*. ISTANBUL, TURKEY, pp. 590–595.
(Закордонне видання (Туреччина)).

Зміст

Зміст	10
Вступ.....	13
Розділ 1. Перспективи розвитку сонячної енергетики.....	18
1.1. Поточний стан та перспективи розвитку відновлювальної сонячної енергетики у світі.....	18
1.2. Гібридна енергетична система як спосіб підвищення ефективності використання сонячної енергії	21
1.3. Структура гібридної сонячної енергетичної системи	27
1.4. Необхідність застосування системи автоматизованого проектування для побудови гібридної сонячної енергетичної системи.....	30
1.5. Огляд відомих систем автоматизованого проектування гібридних енергетичних систем та їх недоліки	33
1.6. Розв'язувані задачі та структура дисертації.....	37
Висновки до розділу 1.....	38
Список використаних джерел до розділу 1	38
Розділ 2. Автоматизоване проектування гібридних сонячних енергетичних систем.....	41
2.1. Постановка задачі автоматизованого проектування гібридних сонячних енергетичних систем	41
2.2. Структура системи автоматизованого проектування гібридних сонячних енергетичних систем	42
2.3. Математичні моделі елементів САПР гібридних сонячних енергетичних систем	45
2.3.1. Математична модель сонячної енергетичної системи.....	45
2.3.2. Математична модель блоку пошуку точки максимальної потужності.....	58
2.3.3. Математична модель процесу управління дизель-генератором	63
2.3.4. Математичні моделі процесів гібридної системи акумулювання енергії.....	64

Висновки до розділу 2.....	70
Список використаних джерел у розділу 2	70
Розділ 3. Оптимізація гібридної сонячної енергетичної системи.....	72
3.1. Оптимізація конфігурації гібридної сонячної енергетичної системи	72
3.1.1. Мета та завдання дослідження	75
3.1.2. Розробка математичних моделей структурних елементів і критеріїв якості гібридної сонячної енергетичної системи.....	76
3.1.3. Розробка алгоритму управління елементами гібридної сонячної енергетичної системи.....	82
3.1.4. Структурно-параметричний синтез гібридних сонячних енергетичних систем з використанням багатокритеріальної оптимізації....	84
3.1.5. Результати застосування багатокритеріальної оптимізації в задачі автоматизованого проектування сонячних енергетичних систем	92
3.2. Відстеження точки максимальної потужності в умовах часткового затінення з використанням нового удосконаленого алгоритму мінного вибуху	94
3.2.1. Дослідження характеристик сонячних панелей в умовах частинного затінення	98
3.2.2. Класичні алгоритми пошуку точки максимальної потужності	102
3.2.3. Алгоритм мінного вибуху	103
3.2.4. Результати моделювання.....	107
Висновки до розділу 3.....	118
Список використаних джерел у розділу 3	120
Розділ 4. Безпілотний літальний апарат з використанням сонячної енергетичної системи.....	127
4.1. Використання сонячної енергії у безпілотному літальному апараті	127
4.2. Проблеми побудови безпілотних літальних апаратів на сонячній енергії.....	128
4.3. Конструкція безпілотного літального апарату на сонячній енергії	130
4.4. Система автоматизованого проектування безпілотного літального апарату на сонячній енергії.....	132

4.5. Проектування безпілотного літального апарату з використанням сонячної енергетичної системи	135
Висновки до розділу 4.....	143
Список використаних джерел у розділу 4	143
Висновки.....	145
Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	147
Додаток Б. Акт про практичне впровадження результатів дисертаційного дослідження (ДП «ВО Київприлад»).....	149

Вступ

Актуальність теми. Однією з основних тенденцій останніх десятиліть є пошук і впровадження відновлювальних джерел енергії, в тому числі і сонячної енергії. Враховуючи, що цей вид енергії стає все більш привабливим і більш доступним з кожним роком, проблеми залежності від умов навколишнього середовища так само стають все більш актуальними. Так як окремі джерела енергії не в змозі забезпечити виконання вимог навантаження внаслідок невизначеності умов навколишнього середовища, слід розглядати гібридизацію системи, в сторону використання додаткових джерел енергії (в тому числі і резервних) в поєднанні з системами акумулювання енергії.

Гібридна сонячна енергетична система (ГСЕС) – система, яка використовує відновлювану енергію Сонця в комбінації з традиційними джерелами енергії (наприклад, дизель-генератори використовують дизельне паливо і в деяких випадках мають доступ до енергомережі для продажу і купівлі електричної енергії), а також із застосуванням системи акумулювання енергії. Дана система має ряд переваг, так як вона може використовуватися в незалежному режимі, що дозволяє впроваджувати її в місцях, де немає доступу до енергомережі, так і підвищувати загальну якість електроенергії при експлуатації у разі виникнення проблем на підстанціях в режимі з підключенням до енергомережі.

З метою підвищення ефективності вимагається застосування методів багатокритеріальної структурно-параметричної оптимізації з дотриманням набору технічних і економічних обмежень, що потребує більш детального вивчення, побудови моделей процесів, які протікають в елементах ГСЕС і розроблення системи автоматизованого проектування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконувалось відповідно до планів НДР, програм і договорів, що виконувались у Національному Авіаційному Університеті:

- НДР 996-ДБ15 «Інтегрована система автоматизованого проектування енергетичних установок для використання енергії вітру та Сонця» 2015-2016р.

Мета дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності гібридних сонячних енергетичних систем, а так само як і її елементів, за рахунок створення системи автоматизованого проектування на основі використання інтелектуальних підходів, зокрема, багатокритеріальних методів оптимізації.

Завдання дослідження. Основні завдання, які слід вирішити для досягнення мети роботи:

- визначити типову структуру гібридної сонячної енергетичної системи, включаючи сонячну енергетичну систему (сонячні панелі, перетворювачі постійного і змінного струму, система пошуку точки максимальної потужності), гібридну систему акумуляування енергії, мережеве джерело енергії, резервне джерело енергії (дизель-генератор);
- визначити структуру системи автоматизованого проектування гібридної сонячної енергетичної системи;
- розробити інтелектуальну підсистему автоматизованого проектування для визначення оптимальної структури ГСЕС і параметрів її елементів;
- визначити структуру і параметри блоку пошуку точки максимальної потужності на підставі використання методу мінного вибуху;
- визначити структуру і параметри блоку гібридної системи накопичення енергії на підставі використання генетичних алгоритмів;
- розробити систему автоматизованого проектування БПЛА на сонячній енергії;
- розробити підсистему імітаційних моделей ГСЕС і БПЛА на сонячній енергії.

Об'єктом дослідження система автоматизованого проектування ГСЕС.

Предметом дослідження є методи, моделі і алгоритми, на основі яких відбувається енергетична і структурно-параметрична оптимізація ГСЕС.

Методи дослідження базуються на положеннях:

- теорії оптимізації, дискретної математики і лінійної алгебри, що дозволило провести структурно-параметричний синтез;

- теорію мета-евристичних алгоритмів, що дозволило провести пошук точки максимальної потужності в умовах часткового затінення;
- імітаційного та комп'ютерного моделювання, що дозволило підтвердити достовірність отриманих результатів, а так само виконати перевірку рішення при структурно-параметричній оптимізації;

Як засіб розв'язання поставлених завдань використовувалося математичне та комп'ютерне моделювання. У дослідженнях використовувались програмні пакети Matlab, Simulink, а також мова програмування Java.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розроблена система автоматизованого проектування ГСЕС, яка відрізняється від відомих тим, що дозволяє оптимізувати структуру і параметри ГСЕС на підставі використання методів багатокритеріальної оптимізації, що дозволяє мінімізувати вартість системи, збільшити надійність, мінімізувати дефіцит енергії для споживачів, мінімізувати забруднення навколишнього середовища.

2. Розроблена структура сонячної енергетичної системи (СЕС) для безпілотного літального апарату (БПЛА) на сонячній енергії до складу якої входить гібридна система акумуляування енергії, яка відрізняється від відомих тим, що до її складу входять акумуляторні батареї і суперконденсатори, параметри яких визначаються в результаті рішення оптимізаційної задачі, що дозволяє підвищити надійність, збільшити час польоту, збільшити пікову максимальну потужність енергетичної системи БПЛА.

3. Розроблено новий алгоритм відстеження точки максимальної потужності (*англ.* MPPT) який відрізняється від відомих тим, що для його реалізації використаний еволюційний метод мінного вибуху (Mine Blast Algorithm), що дозволяє підвищити ефективність і швидкість знаходження точки максимальної потужності в умовах часткової затіненості.

4. Розроблена система імітаційних моделей елементів ГСЕС, яка відрізняється від відомих тим, що до її складу входять елементи СЕС (сонячні панелі, набір перетворювачів постійного та змінного струму), дизель-генератор,

гібридна система акумулювання енергії, енергомережа, що дозволяє перевірити результати проектування.

Наукові результати і висновки, отримані у дисертації, підкріплено порівняльними тестами результатів запропонованих методів з відомими.

Практичне значення одержаних результатів. На підставі розробленого математичного забезпечення:

1. спроектована і побудована гібридна сонячна енергетична система на даху 5 корпусу НАУ, що дозволило перевірити ефективність системи автоматизованого проектування для побудови ГСЕС;

2. розроблена і побудована сонячна енергетична система з поворотною платформою дозволяє підвищити ефективність відбору сонячної енергії на 30%;

3. використання системи автоматизованого проектування гібридних сонячних енергетичних на ДП «ВО Київприлад», що дозволило оптимізувати структуру і параметри проєктованих відновлювальних систем, і тим самим скоротити вартість, збільшити надійність, скоротити дефіцит енергії та забруднення навколишнього середовища для споживачів (акт впровадження від 20.04.2021).

Особистий внесок здобувача. Всі результати, які відносяться до захисту, отримані автором особисто. Низку робіт надруковано у співавторстві.

В [2, 6] здобувачем виконана постановка задачі структурно-параметричного синтезу ГСЕС. В [2, 3-5] розробка стратегії керування СЕС на поворотній платформі та її елементами. В [2, 14] здобувач розробив імітаційні моделі СЕС та її елементів. В [7, 9, 11] виконана постановка задачі пошуку точки максимальної потужності та виконано порівняльний аналіз методів пошуку. В [20] запропоновано підхід до пошуку точки максимальної потужності на основі мета-евристичного алгоритмом мінного вибуху. В [8] здобувачем виконана постановка задачі структурно-параметричного синтезу ГСЕС. В [19] запропоновано генетичний алгоритм розв'язку задачі структурно-параметричного синтезу гібридної системи накопичення енергії. В [1, 10] здобувач запропонував критерій оптимізації БПЛА на сонячній енергії. В [2, 13, 15] здобувач розробив імітаційні

моделі СЕС та її елементів. В [1, 12, 16-18] здобувач розробив імітаційні моделі енергетичної системи БПЛА її елементів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідалися і обговорювалися на наступних міжнародних науково-технічних конференціях:

- 2nd, 3rd, 4th, 5th International Conference ACTUAL PROBLEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES DEVELOPMENT (APUAVD) Kyiv, Ukraine (2013, 2015, 2017, 2019);
- 4th, 5th, 6th IEEE International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC) Kyiv, Ukraine (2016, 2018, 2020);
- 8th EUROPEAN CONFERENCE on RENEWABLE ENERGY SYSTEMS (ECRES) Istanbul, Turkey (24-25 Aug 2020)

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 20 наукових праць, у тому числі 9 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття – у закордонному виданні ЕС та ОЕСР, 7 статей у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз, та 1 стаття у періодичному науковому фаховому виданні України, яка включена до SCOPUS та віднесена до 3-го квартилю (Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank), 11 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій (з них 11 включені до міжнародних наукометричних баз та SCOPUS).

Структура та обсяг дисертації. Робота складається із анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списків використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 149 сторінок друкованого тексту, включаючи 60 рисунків, 20 таблиць, 83 використаних джерел, 2 додатків.

Розділ 1. Перспективи розвитку сонячної енергетики

1.1. Поточний стан та перспективи розвитку відновлювальної сонячної енергетики у світі

Відновлювана енергетика — енергетична галузь, що спеціалізується на отриманні та використанні енергії з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). До яких належать періодичні (або сталі) потоки енергії, що розповсюджуються в природі і обмежені лише стабільністю Землі як космопланетарного елемента: променева енергія Сонця, вітер, гідроенергія, природна теплова енергія тощо [1].

З економічної точки зору ВДЕ можна розглядати як ефективний засіб стимулювання інноваційної й ділової активності в національних економіках.

До основних типів ВДЕ належать [2]:

- сонячна й вітрова енергія;
- енергія від використання біомаси;
- гідроелектрична та геотермальна енергія;
- хвильова енергія, включаючи енергію течій, припливів і відливів, температурних перепадів океану;
- енергія залишкового тепла землі.

Одним із ключових векторів сталого розвитку високотехнологічних країн став вибір екологічно чистої енергетики майбутнього, який включає [3]:

- застосування інноваційних принципів виробництва відновлюваної енергії, що сприяє її ефективному використанню, дасть додатковий імпульс охороні навколишнього середовища, забезпечить надійне енергопостачання й підвищення конкурентоспроможності економіки;
- енергозбереження на благо екологічно чистого майбутнього, враховуючи, що викопне паливо довгий час буде затребуване світовою енергетикою, дасть пріоритет тим інноваційним технологіям, які будуть спрямовані на зниження його шкідливого впливу на навколишнє середовище;
- стимулювання науково-дослідних розробок, спрямованих на впровадження екологічно чистої енергетики;

- створення джерел фінансування ВДЕ шляхом удосконалення ринкових інструментів, включаючи податкові;
- пом'якшення наслідків кліматичних змін, шляхом вироблення необхідних заходів для розвитку ринків технологій «чистої» енергетики, підвищення їх доступності для країн, що розвиваються.

За прогнозом Міжнародного енергетичного агентства [4] (МЕА) згідно основного сценарію у 2021 року потужності ВДЕ виростуть на 218ГВт. У порівнянні до 2020 року, це на 10% більше.

Сонячна і вітрова енергетика стали ключовими секторами електроенергетики, а не тільки по частині ВДЕ, даний факт підтверджує прогноз встановленої потужності за типом палива і використовуваної технології (рис. 1.1).

Очікується, що скорочення витрат та постійна політична підтримка сприятимуть сильному розвитку зростання відновлюваних джерел енергії після 2022 року, також відновлювані джерела енергії обженуть виробництво за рахунок вугілля, щоб стати найбільшим джерелом електроенергії у світі до 2025 році. Також очікується, що до 2025 року частка ВДЕ у загальному обсязі виробництва електроенергії складе 33%.

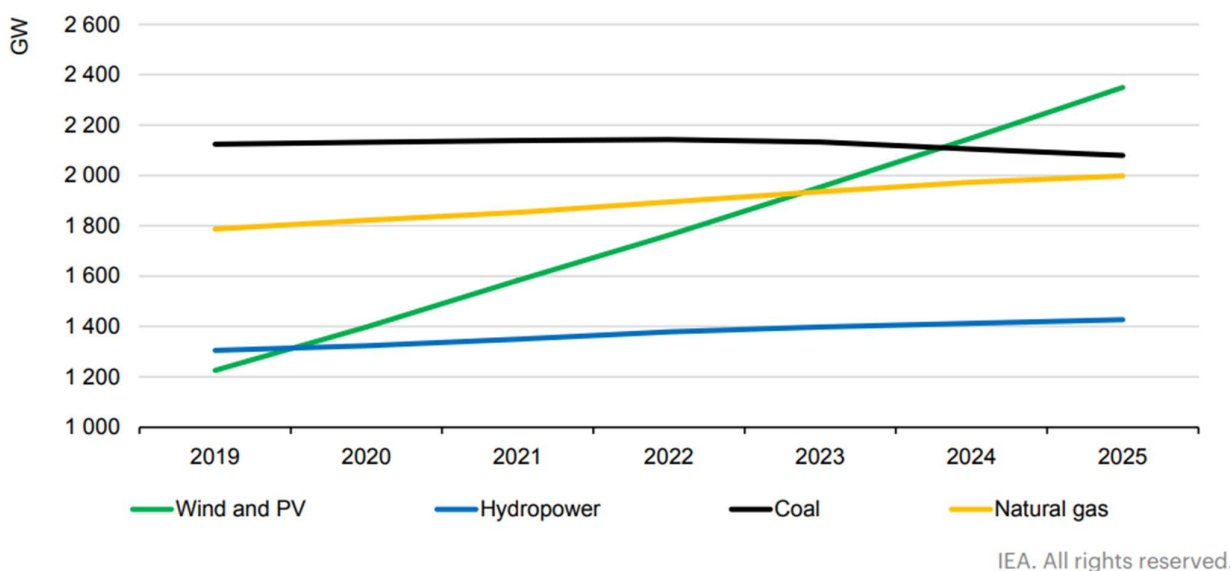


Рис. 1.1 – Загальна встановлена потужність за паливом та технологіями 2019-2025pp [4]

Виробництво електроенергії з ВДЕ до 2025 року зросте майже на 50% майже до 9745ТВт-год.

Гідроенергетика залишається найбільшим джерелом виробництва відновлюваної електроенергії, але її частка вперше в 2024 році впаде нижче 50%. Поєднана генерація вітрової та сонячної фотоелектрики майже вдвічі збільшується майже до 4000 ТВт-год [4]

Наявність технологічних інновацій призвело до впровадження поліпшених виробничо-споживчих продуктів ВДЕ з меншими витратами ресурсів. В умовах достатнього вітрового і сонячного потенціалу й не завжди передбачуваних цін на нафту, а також дорогої інфраструктури для їхнього застосування, ВДЕ починають успішно конкурувати із традиційною енергетикою.

Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії (IRENA) опублікувало щорічного доповідь по економіці електроенергетики «Вартість виробництва електроенергії з поновлюваних джерел в 2020 році» [5].

Згідно з доповіддю витрати на виробництво ВДЕ різко впали за останні 10 років завдяки постійному вдосконаленню технологічної бази, економії за рахунок масштабування, конкурентоспроможним ланцюжкам поставок та покращенню досвіду розробників систем. Витрати на сонячну електроенергію впали на 85% між 2010 та 2020 роками.

Починаючи з 2010 року у всьому світі до загальної сукупності 644ГВт відновлюваної електроенергетичної потужності додається розрахункова вартість, яка була нижчою, ніж найдешевший варіант використання викопного палива в кожному відповідному році [5].

Також у доповіді IRENA зазначено, що 800ГВт існуючої потужності, що працює на вугіллі, мають експлуатаційні витрати вище, ніж нові сонячні та вітрові енергетичні системи, а сами 0,005\$/кВт-год включаючи витрати на інтеграцію. Заміна цих вугільних установок дозволить скоротити щорічні витрати на 32 млрд. дол. США на рік та скоротити річні викиди CO₂ приблизно на 3 гігатонни CO₂.

Вартість генерації в секторі ВДЕ згідно доповіді IRENA (наведено у табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Вирівняна вартість електроенергії по технологіям [5]

Джерело енергії	2010р. (\$/кВт-год)	2020р. (\$/кВт-год)	Зміна у відсотках (%)
Біомаса	0.076	0.076	0%
Геотермальна енергетика	0.049	0.071	45%
Гідроенергетика	0.038	0.044	18%
Сонячна енергія	0.381	0.057	-85%
Концентрація сонячної енергії	0.340	0.108	-68%
Вітрова енергетика (берегова)	0.089	0.039	-56%
Вітрова енергетика (морська)	0.162	0.084	-48%

Таким чином, збільшення обсягів виробництва ВДЕ і їх частки в енергетичних балансах сприяє підвищенню ефективності господарської діяльності різних за обсягом споживачів енергії та зміцненню довіри усередині країни – між державою, бізнесом і громадянським суспільством.

Світове співтовариство обрало шлях використання ВДЕ, визнало безальтернативність її інноваційного розвитку, прогнозовані світові витрати на ВДЕ до 2030 року складуть 7 трильйонів доларів [6].

Доведено, що збільшення обсягів виробництва ВДЕ і їх частки в енергетичних балансах сприяє підвищенню ефективності господарської діяльності різних за обсягом споживачів енергії й зміцненню довіри між країнами, що включили ВДЕ в перелік стратегічних пріоритетів свого розвитку.

1.2. Гібридна енергетична система як спосіб підвищення ефективності використання сонячної енергії

Автономні системи ВДЕ не є надійними через непостійну доступність та зміни кліматичних умов. В останні роки системи з відновлюваними джерелами енергії, такі як автономні сонячні фотоелектричні, вітрові системи були впроваджені по усьому світу в порівняно більших масштабах. Ці незалежні системи не можуть забезпечити безперервне джерело енергії оскільки вони сезонні по своїй природі, фотоелектрична енергетична система не може забезпечити надійною потужністю в несонячні дні, автономна вітрова система не може задовольнити вимогам постійного навантаження внаслідок значних флуктуацій

величини швидкостей вітру від години до години протягом року. Очевидно, що комбінація двох або більше відновлюваних джерел енергії більш ефективна, ніж система з одним джерелом з погляду ціни, ефективності й надійності. Така система називається гібридною відновлюваною енергетичною системою (ГВЕС) і стає елементом ринку, що найбільш швидко розвивається в усьому світі.

Як результат, використання вітрової й сонячної фотоелектричної генерації енергії стає реальністю. Однак не можна відмовлятися від інших джерел відновлюваної енергії (ВЕ), технологій генерації, таких як океанська хвиля й припливи, осмотична, геотермальна, паливних елементів (ПЕ) та мікротурбін (МТ).

Гібридна відновлювальна енергетична система (ГВЕС) поєднують два або більше відновлюваних джерел для вироблення енергії, так що кожен з них може компенсувати недоліки іншого при забезпеченні навантаження, а система генерування енергії може забезпечувати безперервне енергопостачання в різних погодних умовах і потенційно покращує ефективність системи і надійність енергопостачання. Очевидно, що комбінація різних поновлюваних ресурсів повинна бути адаптована на основі умов кожного зазначеного місця розташування.

Гібридизація призводить до збільшення надійності системи ВДЕ, однак передбачає оптимальний вибір джерел енергії та технологій їх відбору, що буде визначати методологію проектування таких систем для покращення експлуатаційних характеристик, розв'язання завдань диспетчеризації й керування. Різні джерела генерації можуть сприяти один одному у досягненні більш високої енергетичної ефективності і/або поліпшувати функціонування.

Короткий огляд різних технологій генерації енергії ВЕ й різних схем акумулювання енергії, які можуть використовуватися в гібридних системах наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2

**Короткий огляд різних технологій генерації енергії ВЕ та різних схем
акумулювання енергії**

Основні технології ВУ /АУ	Варіанти акумулювання енергії
Біомаса	Акумуляторна батарея

Геотермальна	Стиснене повітря
Гідро/мікрогідро	Махове колесо
Океанські припливи/Хвилі	Водень
Сонячні фотоелектричні панелі	Гідравлічні насоси
Вітер	НМСЕ
Паливний елемент	Суперконденсатор

Будь-яка комбінація технологій генерації енергії ВЕ за належного акумулювання і, можливо, у комбінації із традиційною технологією генерації, наприклад, дизель-генератором, може утворювати гібридну енергетичну систему. Наприклад, гібридна система може мати будь-яку комбінацію систем: вітроенергетичної, сонячної на базі фотоелектричних панелей, мікро-гідро, мікротурбіни, звичайного дизель-генератора, акумуляторної батареї й сховища водню, зробленого на основі електролізу, у мережевій або автономній конфігурації.

Гібридні системи електроживлення можуть бути спроектовані як автономні або підключені до мережі системи. Багато параметрів, такі як доступна потужність, вартість електроенергії та індивідуальні метеорологічні характеристики бажаного місця. Системи, підключені до мережі, спроектовані таким чином, щоб вони могли покривати місцеві енергетичні вимоги, і залежно від доступної потужності виробляється надлишкова потужність яка може бути продана в мережу для передачі в інші місця попиту [11]. Крім того, у разі нестачі енергії при виробництві відновлюваних ресурсів, необхідна потужність може бути забезпечена мережею, таким чином, цим системам не потрібна окрема система акумулювання для підтримки надійності, оскільки мережа буде працювати як нескінченна резервна система.

З іншого боку, автономні гібридні поновлювані системи є найбільш перспективним рішенням для доставки електроенергії у віддалені місця. Тим не менш, оскільки для цих систем відсутня підключення до мережі, їм потрібен резервний або допоміжний блок, такий як акумуляторні батареї або звичайні дизельні генератори, для допомоги у підтримці надійності.

Як у випадку підключення до мережі, так і в окремих випадках інвестиційні витрати на забезпечення електроенергією з поновлюваних джерел і надійність проєктованої системи зазвичай є проблемами, які мають першорядне значення при

довгостроковому плануванню енергетичних систем і, як наслідок, при виборі кращого поновлюваного джерела енергії; Важливе значення має оптимальне рішення серед різних можливих комбінацій поновлюваних джерел енергії. [9]

ГВЕС, в основному, ділиться на три типи: системи з прив'язкою до постійного струму, системи з прив'язкою до змінному струму і системи з одночасною прив'язкою до постійному і змінному струму (гібридної прив'язкою).

Системи з прив'язкою до постійному струму — це системи, які повністю побудовані на основі пасивних джерел вироблення електроенергії. Всі ці системи підключаються до головної шини постійного струму до того, як вона підключиться до мережі. BESS підключений до контролера, який здатний постачати електроенергію з необхідними характеристиками, по струму і напрузі. Рис. 1.2 ілюструє найбільш просту систему з контролером заряду, який збирає всю енергію з встановлених поновлюваних джерел енергії. Вихід контролера заряду або двонаправлено підключений до акумуляторної накопичувача енергії (зібрана електроенергія накопичується для автономного використання, коли це необхідно), або до навантажень постійного струму.



Рис. 1.2 – Приклад спрощеної структури ГВЕС постійного струму

Системи з прив'язкою до змінному струму — це системи, які зазвичай з'єднують навантаження з шиною змінного струму. Дана структура зовсім інша в порівнянні з попередньою системою. Система з прив'язкою до змінному струму завжди підключено до мережевого інвертора, як показано на рис. 1.3. Має два режими: 1) нормальний режим роботи і 2) критичний режим. У нормальному режимі, інвертор підключений до мережі дозволяє системі працювати від відновлюваних джерел енергії, а також накопичувати енергію. Критичний режим роботи активується в період відключення живлення, при якому мережевий інвертор використовує накопичувач для підтримки основної системи.

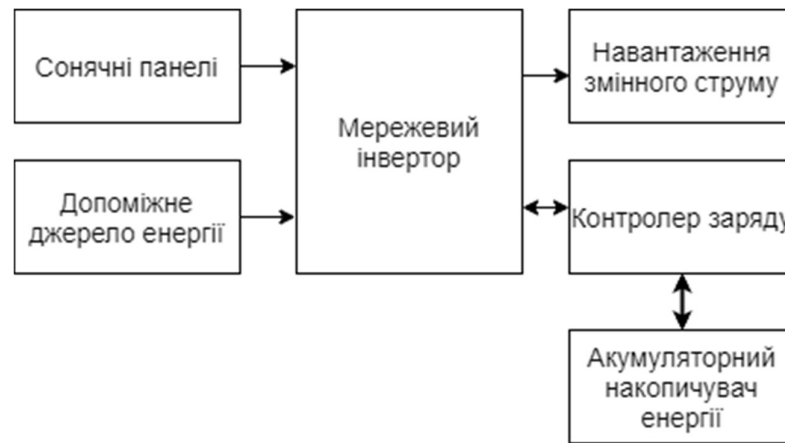


Рис. 1.3 – Приклад спрощеної структури ГСЕС змінного струму

Системи з гібридною прив'язкою, показані на рис. 1.4, включають кілька типів електростанцій, що працюють на викопному паливі, і з використанням доступних поновлювальних джерел енергії. Усі ці компоненти вироблення електроенергії зазвичай підключені до однієї основної системи управління. В наші дні підвищується інтерес до гібридних парних систем для виробництва електроенергії у віддалених місцях. В даній системі електрика постійного струму генерується та використовується для подачі до навантажень постійного струму, а надлишкова енергія накопичується для використання у період пікового навантаження. Коли накопичена електроенергія буде повністю використана, потужність системи буде переключена на генераторну установку.

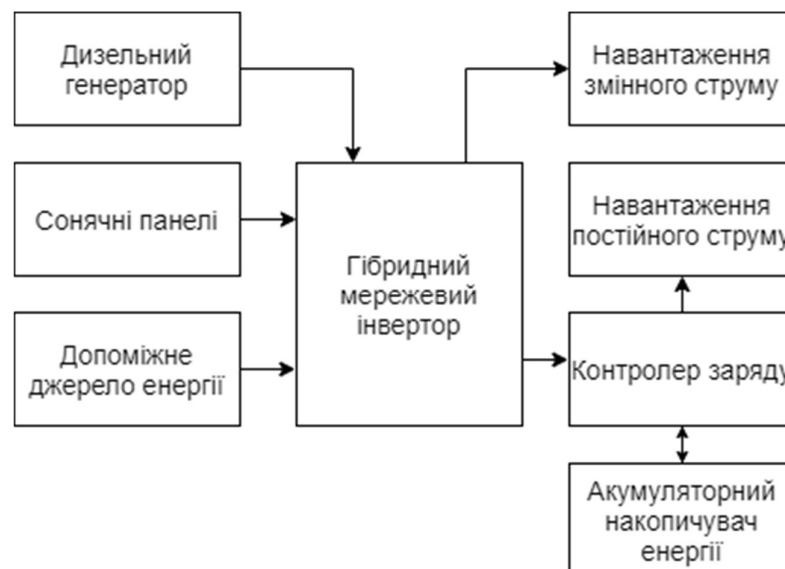


Рис. 1.4 – Приклад спрощеної структури ГСЕС з гібридною прив'язкою

Щоб забезпечити максимальну ефективність усієї системи, одночасно сприяючи максимальному скороченню викидів у навколишнє середовище, разом з тим мінімізуючи витрати на виробництво енергії, необхідно використовувати методи багатокритеріальної оптимізації і керування для визначення структури системи й оптимального розподілу одержуваної енергії з різних джерел.

Джерела ВЕ мають різні робочі характеристики; тому важливо мати чітко визначену й стандартизовану структуру/процедуру для їхнього з'єднання з метою створення гібридної системи або, більш широко, мікромережа, де локальний кластер джерел розподілених джерел енергії, накопичувачів енергії й навантажень інтегруються разом і здатні автономно працювати. Робастна мікромережа також повинна мати можливість реалізації технології «ввімкнув і працюй», відповідно до якої, елементи (ДГ, систему акумулювання енергії або кероване навантаження), можуть бути додані в існуючу систему (microgrid), не вимагаючи реконфігурації системи для виконання своєї розробленої функції, а саме: генерації потужності, забезпечення енергоємності або здійснення контролю навантаження.

Для того, щоб вибрати оптимальну конфігурацію гібридної системи, що відповідає вимозі навантаження, оцінювання повинно проводитись на основі критеріїв надійності електроживлення й вартості системи життєвого циклу.

До складу гібридних систем можуть також входити джерела теплової енергії (біогазові установки, сонячні теплові колектори) і джерела на органічному паливі (дизель-генератори), які виконують роль резервного живлення. Технологічні конфігурації можуть бути класифіковані відповідно до виду напруги у мережі: постійного, змінного струму або змішані лінії.

У гібридній системі постійного струму всі компоненти з вироблення електрики пов'язані з лініями постійного струму, від яких заряджаються батареї. Батареї повинні мати захист (контролер) від перезарядження й повного розряду. Напруга від джерел змінного струму (вітро-гідротурбіни, дизель-генератор) перетворюється в постійну за допомогою конверторів. Напруга яка виробляється у відповідності до попиту подається на навантаження постійного струму. Навантаження змінного струму живляться через інвертор.

У гібридних системах змінного струму основні джерела напруги можуть

бути пов'язані прямо з лінією змінного струму або ж через додаткові конвертори для забезпечення необхідних характеристик змінного струму (актуально у разі з'єднання системи із централізованою електромережою). В обох випадках двонаправлений інвертор контролює подачу енергії для зарядки акумуляторів, а також від акумуляторів на навантаження змінного струму. Навантаження постійного струму можуть забезпечуватися напругою від акумуляторів.

На основі вищенаведеного можна відмітити наступні особливості гібридних систем, які роблять їх високоефективними і конкурентоспроможними:

- гнучкість вибору палива, надійність (використання надлишкових технологій і/або акумуляування енергії), економічність, зменшення шкідливих викидів;

- можливість включення до їх складу теплових, високопотужних й високоефективних пристроїв (паливні елементи, сучасні матеріали, системи охолодження, тощо);

- можливість одночасно забезпечувати підвищення якості і доступності електроенергії;

- можливість в залежності від місця знаходження включати максимальну кількість відновлюваних джерел енергії;

- забезпечення значно нижчого рівня шкідливих викидів в порівнянні з традиційними технологіями, які використовують корисні копалини;

- досягнення бажаних характеристик при найнижчій прийнятній вартості, що є ключем до прийняття ринком.

1.3. Структура гібридної сонячної енергетичної системи

Структура ГСЕС (рис. 1.5) складається з 3 основних підсистем, на які вона орієнтована: підсистема споживачів, модуль постачальників і модуль управління ГСЕС. [10]

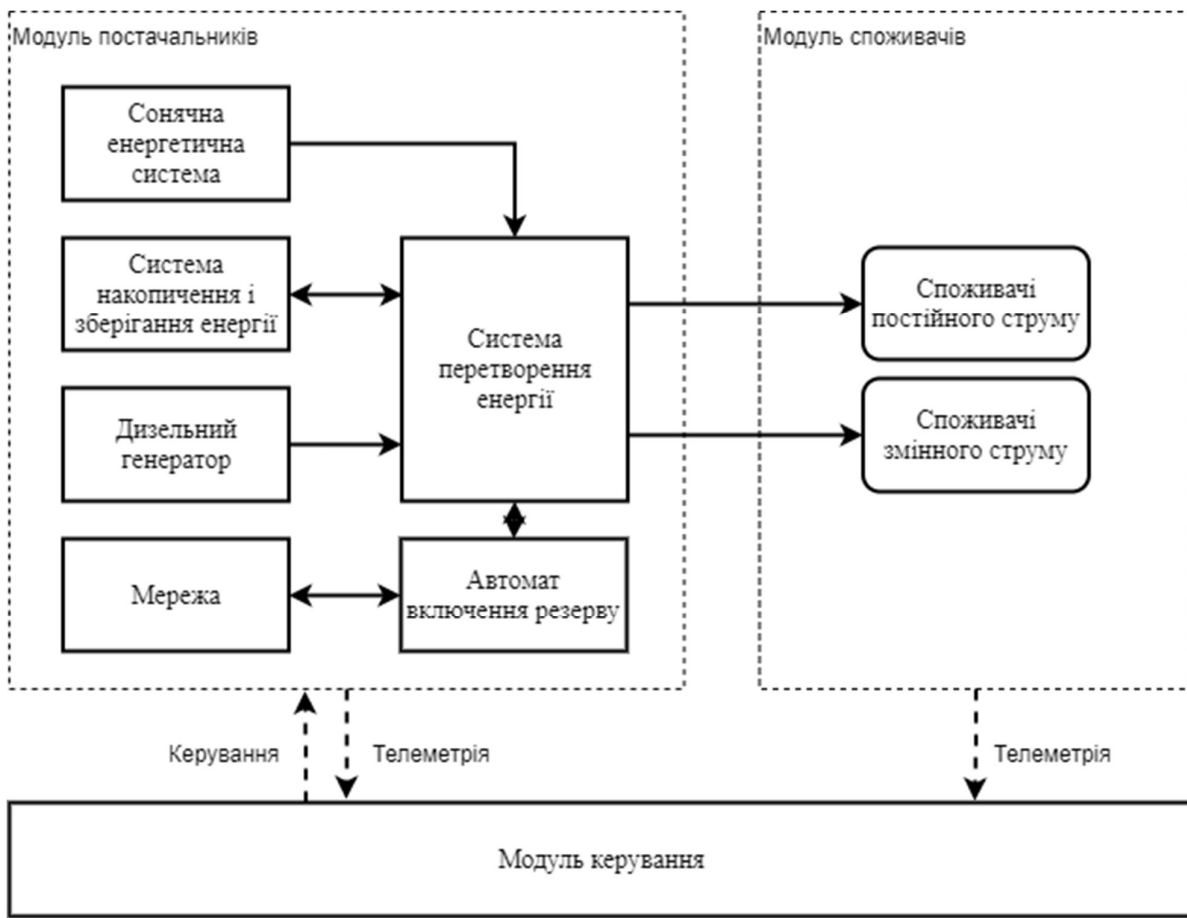


Рис. 1.5 – Структура ГСЕС

У свою чергу, підсистема постачальників електроенергії включає в себе: сонячну енергетичну установку, систему накопичення і акумулювання енергії, дизель-генератори, модуль підключення до енергомережі із застосуванням автомата включення резерву, а також набір допоміжних пристроїв, необхідних для функціонування, з'єднання та об'єднання підсистем вираженому у вигляді системи перетворення енергії.

Підсистема споживачів — це, по суті, набір вимог підключення ГСЕС до кінцевого користувача системи. У спрощеному уявленні, це споживачі постійного і змінного струму.

Підсистема управління здійснює функції контролю підсистем ГСЕС, їх координації та управління, а також збір телеметрії, стану та аналіз як постачальників, так і під'єднаних споживачів. Так само може використовуватися для моніторингу і оптимізації продуктивності системи генерації або передачі енергії.

Дизель-генераторні установки (рис. 1.6) забезпечують енергію за рахунок споживання палива. Вони більшу частину часу використовуються в мережах з поганим енергопостачанням (періодичне відключення електроенергії) або поза мереж в якості резервного або основного енергетичного ресурсу. Їх високі експлуатаційні витрати через постійну потребу в паливі для живлення всього під'єднаного устаткування, але можуть навіть зрости через коливання вартості палива.



Рис. 1.6 – Структура блоку дизель генератора

Сонячна енергетична система (рис. 1.7) являють собою закінчений генератор, що складається з будь-якої кількості фотоелектричних модулів і панелей. Фотоелектричні панелі призначені для поглинання сонячних променів в якості джерела енергії для вироблення електроенергії. Вони використовують сонячну фотоелектричну (PV) технологію, що перетворює сонячну радіацію в постійний струм.

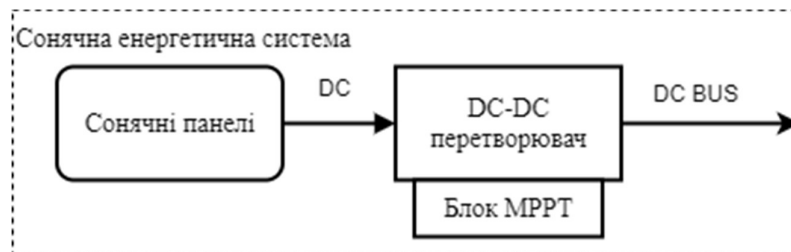


Рис. 1.7 – Структура блоку джерела сонячної енергії

Система перетворення енергії – набір допоміжних пристроїв, необхідних для функціонування, з'єднання та об'єднання підсистем. Є одним з найважливіших елементів ГСЕС, так як бере на себе всю функцію комутації, узгодження рівнів електроенергії та інших характеристик мережі. Як окремий випадок даної системи може виступати інвертор, він перетворює постійний струм (DC) в змінний струм (AC), а так само різного роду перетворювачі змінного і постійного струму.

Блок акумулювання енергії (рис 1.8) може бути доданий для акумулювання надлишкової енергії, що забезпечується системою. Таким чином, використовується при нестачі або відсутності доступної енергії на одному або більше джерелах.



Рис. 1.8 – Структура блоку акумуляторної системи акумулювання

Також, слід звернути увагу, що результуюча структура ГСЕС безпосередньо пов'язана зі сценарієм експлуатації, вимог надійності, а також наявності, можливості підключення до енергомережі.

Автомат ввімкнення резерву – автоматичне ввімкнення резервного джерела живлення для забезпечення безперебійного електропостачання.

Мережа – можливість ГСЕС підключатися до загальної енергомережі для забезпечення безперебійного електропостачання споживачів, а так само в цілях продажу відновлюваної електроенергії.

1.4. Необхідність застосування системи автоматизованого проектування для побудови гібридної сонячної енергетичної системи

При проектуванні ГСЕС слід враховувати безліч технічних і економічних проблем, серед яких вибір розташування системи, оцінка попиту, вибір комплексу технічних засобів, моделювання поведінки системи, розмір системи, а так само підходи до управління. Для того, щоб комплексно вирішити даний набір завдань варто застосовувати системи автоматизованого проектування та розробки, так як проблеми, пов'язані з ГСЕС, вимагають ґрунтовних досліджень в декількох областях. Завдання, які потрібно вирішувати при проектуванні ГСЕС розглянуті нижче [7, 8].

Розташування і попит. Вибір місця розташування ГСЕС дуже важливе завдання так як потенціал відновлюваних джерел енергії безпосередньо залежить

від цього вибору. Сам же енергетичний потенціал системи рідко вивчається при проектуванні систем, так як найчастіше при гібридизації ставиться завдання зменшити залежність від вже доступного джерела енергії, наприклад, мережі або викопного палива, щоб збільшити екологічну стійкість системи і зменшити залежність від палива. Це призводить до того, що місце розташування визначається розміщенням вже доступного джерела енергії.

Вибір джерел енергії. Належне впровадження джерел для досягнення оптимізації операційної системи для стратегії управління енергоспоживанням — це повинно гарантувати, що потужність, що виробляється поновлюваними джерелами, може бути максимально оптимізована без перемикання на використання мережі. Крім того, щоб допомогти ГСЕС працювати на мінімальному рівні виробництва енергії, але все одно бути в змозі працювати з оптимальною продуктивністю, коли виникають переривчасті природні умови.

Вибір комплексу технічних засобів. Дана задача має на увазі, що на етапі проектування розглядаються рішення щодо вибору варіантів структури і конфігурації ГСЕС у відношенні елементів і блоків системи. При вирішенні цієї задачі слід враховувати і оцінювати сценарії використання, ключові вимоги до системи, а також набір різних факторів, у тому числі:

- доступність відновлюваних джерел енергії;
- тип доступних технологій генерації;
- тип навантаження;
- конфігурації з'єднання елементів змінного та постійного струму (набір інверторів, перетворювачів);
- наявність і цілі системи акумулювання енергії (накопичувати і використовувати під час раптової недоступності поновлюваних джерел енергії), у тому числі правильний вибір конфігурації HESS, щоб забезпечити безперервну подачу електроенергії протягом недоступного періоду використання відновлюваних джерел енергії, для акумулювання енергії для компенсації пікових навантажень);
- наявність резерву (дизель генератор);

- наявність підключення до мережі;
- очікуване підвищення ефективності за рахунок контролера/оптимізації системи управління або встановлення механізму стеження для максимізації проникнення енергії з відновлюваних джерел;
- інші нетехнічні аспекти, що враховуються при проектуванні, включають надійність джерела живлення або економічний вплив на вартість енергії до естетики, шуму або прогнозів технічного обслуговування та економії викидів вуглецю.

Моделювання і перевірка рішення. Моделювання - це етап, на якому реальні енергетичні системи виражаються у вигляді моделі або набору моделей, котрий заснований на певних вхідних даних і математичних моделях. Програмна реалізація дає основні очікувані результати роботи системи. Моделювання зазвичай відбувається після вибору проекту та результатів, надаються моделлю, що полегшує прогнозування енергії, що виробляється поновлюваними джерелами і традиційної генерацією, і полегшує розуміння очікуваного робочого поведінки інших компонентів системи, таких як акумуляторні батареї або резервні системи (дизель-генератор).

Розмір системи. Розмір досліджуваних ГСЕС в основному визначається встановленою потужністю генеруючих джерел енергії, загальною і максимальною потужністю, а так само кількісними характеристиками того чи іншого блоку.

Робота системи та стратегії управління. Завдання забезпечення роботи і управління – включає в себе набір алгоритмічних рішень, які спрямовані на забезпечення належного нагляду, координації, управління і контролю різних завдань, призначених для кожної підсистеми, щоб забезпечувати функціонування системи та досягнення високої ефективності з точки зору її роботи та функціональності, а так само, ідентифікацію та адаптацію поведінки системи під вимоги, а так само профіль споживача.

1.5. Огляд відомих систем автоматизованого проектування гібридних енергетичних систем та їх недоліки

У цьому дослідженні представлені додатки і статус 19 програм, а саме HOMER, Hybrid2, RETScreen, iHOGA, INSEL. Представлений порівняльний аналіз цих програм, визначено обмеження, доступність та області для подальших досліджень.

The Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER) - це найбільш широко використовуване, вільно доступне і зручне для користувача програмне забезпечення [12, 15]. Програмне забезпечення підходить для виконання швидкого аналізу здійсненності, оптимізації та аналізу чутливості в декількох можливих конфігураціях системи. Національна лабораторія поновлюваних джерел енергії (NREL) США розробила HOMER як для мережевих, так і для автономних систем у 1993 році, і з моменту випуску HOMER завантажили більше 80 000 чоловік в 193 країнах. HOMER використовує Windows в якості комп'ютерної платформи Visual C ++ в якості мови програмування. У цьому програмному забезпеченні використовується анізотропна модель HDKR (Hau, Davies, Klucher і Reindl) для сонячної фотоелектричної системи. HOMER використовує такі вихідні дані, як різні технологічні опції, інформацію про вартість компонентів, інформацію про доступність ресурсів тощо для моделювання різних конфігурацій системи і генерує результати у вигляді списку можливих конфігурацій, відсортованих по поточної вартості. Це програмне забезпечення може моделювати систему на 8760 годин на рік. HOMER також відображає результати моделювання у вигляді великої кількості таблиць і графіків, які допомагають порівнювати конфігурації і оцінювати їх економічні і технічні переваги. Він може визначати політики обслуговування навантаження з найменшими витратами для задоволення навантаження. HOMER може запропонувати проектування різних систем виходячи з економічних параметрів. Таблиці та графіки, створені за допомогою моделювання HOMER, також можна експортувати. HOMER широко використовувався в літературі для оптимізації гібридних систем відновлюваної енергії та різних тематичних досліджень.

Параметри що беруть участь на вході і виході програмного забезпечення представлені на рис. 1.9.

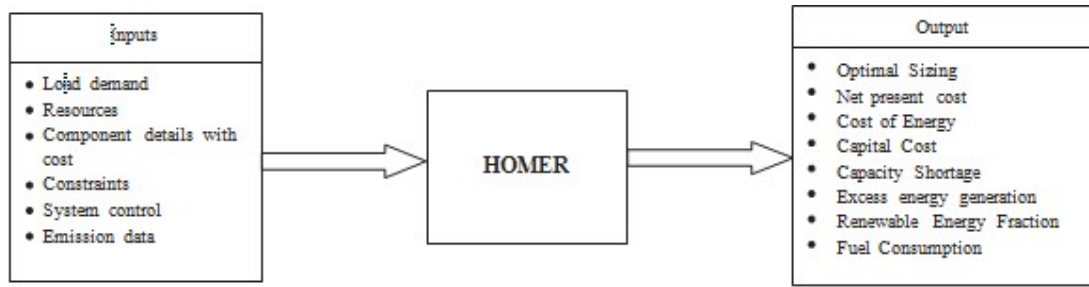


Рис. 1.9 – Входи і виходи HOMER

HYBRID 2 розроблений Дослідною лабораторією поновлюваних джерел енергії (RERL) Массачусетського університету, США, за підтримки Національної лабораторії поновлюваних джерел енергії. Після Hybrid1 в 1994 році, Hybrid2 був розроблений в 1996 році [13]. Деякі зміни були внесені в останню версію HYBRID 2, і були виправлені такі проблеми, як функція підгонки кривої на графіку даних інсоляції, помилка перетікання при моделюванні низькою навантаження і т. д. HYBRID 2 - це імовірна комп'ютерна модель/модель часових рядів, в якій використовуються статистичні методи для обліку варіацій між часовими кроками і можуть виконуватися докладні довгострокові характеристики, економічний аналіз і прогнозування продуктивності різних гібридних систем. HYBRID 2 забезпечує моделювання часових рядів для часових кроків, зазвичай від 10 хв до 1 години. HYBRID 2 дозволяє створювати системи на базі трьох автобусів, які містять вітряні турбіни, фотоелектричну батарею, дизельне паливо, акумуляторну батарею, перетворювачі енергії і самоскидний вантаж. HYBRID 2 в основному складається з чотирьох частин, а саме: графічний інтерфейс користувача (GUI), модуль моделювання, модуль економіки і інтерфейс графічних результатів (GRI). Використовуючи графічний інтерфейс, користувач може легко створювати проекти і підтримувати організовану структуру. Модулі моделювання та економіки дозволяють користувачу запускати моделювання та перевірку помилок введення. Користувачі можуть переглядати докладні графічні вихідні дані через GRI [15]. Параметри що беруть участь на вході і виході програмного забезпечення представлені на рисунку 1.10.

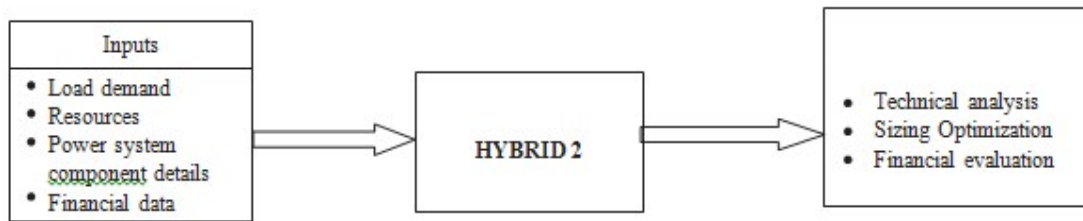


Рис. 1.10 – Входи і виходи HYBRID

RETScreen - це інструмент техніко-економічного обґрунтування та безкоштовно завантажуване програмне забезпечення, розроблене Міністерством природних ресурсів Канади, для оцінки фінансових і екологічних витрат і переваг різних технологій використання поновлюваних джерел енергії для будь-якого місця в світі [17].

Модель *RETScreen PV* також охоплює автономні фотоелектричні системи, а також автономні, гібридні і водонасосні системи. Він має глобальну базу кліматичних даних, що включає більше 6000 наземних станцій (дані про сонячному випромінюванні і температурі за місяць по місяцях), карти енергоресурсів (наприклад, карти вітру), гідрологічні дані, дані про продукти, такі як дані про сонячних фотоелектричних панелей і криві потужності вітрових турбін. Він також надає посилання на кліматичну базу даних НАСА. Програма доступна більш ніж на 30 мовах і має дві окремі версії: *RETScreen 4* і *Plus*. *RETScreen 4* - це програмний інструмент для аналізу енергетичних проектів на основі *Microsoft Excel*, який може визначити технічну і фінансову життєздатність проектів з поновлюваних джерел енергії, енергоефективності та когенерації. Існує ряд таблиць для виконання докладного аналізу проекту, включаючи моделювання енергоспоживання, аналіз витрат, аналіз викидів, фінансовий аналіз, а також таблиці аналізу чутливості та ризиків. *RETScreen* використовується для аналізу різних типів енергоефективних та відновлюваних технологій (RETS), що охоплюють в основному виробництво енергії, витрати на життєвий цикл і скорочення викидів парникових газів. Параметри що беруть участь на вході і виході програмного забезпечення представлені на рис. 1.11.

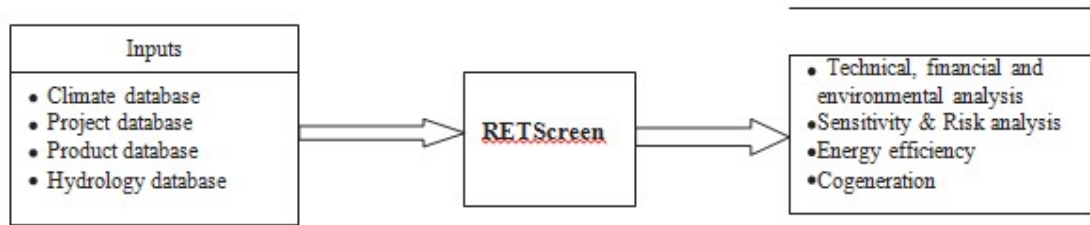


Рис. 1.11 – Входи і виходи RETScreen

Improved Hybrid Optimization by Genetic Algorithm (iHOGA), раніше відома як HOGA (гібридна оптимізація з допомогою генетичного алгоритму), що являє собою програмний інструмент для оптимізації гібридних систем, розроблений Університетом Сарагоси, Іспанія. iHOGA використовується для визначення оптимального розміру гібридної енергетичної системи, яка може включати фотоелектричну систему, вітряні турбіни, гідроелектричні турбіни, паливні елементи, H₂-резервуари і електролізери, системи акумулювання, генеруючі системи на викопному паливі і т. д. з застосуванням багатокритеріальної оптимізації з використанням генетичних алгоритмів, а так само аналіз чутливості з малим часом обчислень. iHOGA може оптимізувати нахил фотоелектричних панелей, розраховувати викиди протягом життєвого циклу і проводити імовірнісний аналіз, а також має варіанти покупки і продажу енергії в електричну мережу з системою вимірювання [16]. Параметри що беруть участь на вході і виході програмного забезпечення представлені на рис. 1.12.

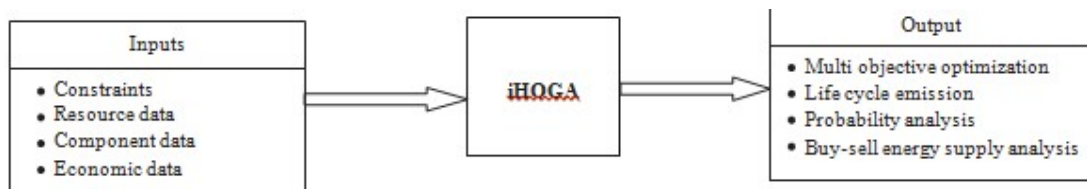


Рис. 1.12 – Входи і виходи HOGA

Серед програмних інструментів HOMER є найбільш широко використовуваним інструментом, оскільки він максимально поєднує в собі системи відновлюваної енергії та виконує оптимізацію та аналіз чутливості, що спрощує і прискорює оцінку безліч можливих конфігурацій системи [14].

1.6. Розв'язувані задачі та структура дисертації

Перший розділ дисертації присвячений використанню відновлювальної енергетики, вводиться поняття гібридних сонячних енергетичних систем та їх важливість. Зазначається перелік проблем при проектуванні ГСЕС, у вирішенні яких може допомогти спеціалізований САПР.

Другий розділ вводить структуру САПР для проектування ГСЕС, опис функціональної частини підсистем. Описується набір елементів ГСЕС, їх функціональна частина, проблеми кожного елемента підсистем, методи розв'язання, принципові схеми, математичні моделі, імітаційні моделі, а також результати дослідження характеристик. Крім того, в даному розділі вводиться одне з основних завдань сонячних енергетичних систем - відстеження точки максимальної потужності, класифікація методів пошуку, вводиться поняття умов часткового затінення, їх проблем та рішення в контексті пошуку точки максимальної потужності, огляд відомих методів, а так само запропонований алгоритмічний метод пошуку з урахуванням умов часткового затінення, який більш детально описано і досліджено в третьому розділі. Особлива увага приділяється елементу ГСЕС – гібридній системі накопичення енергії.

Третій розділ присвячено вирішенню задачі структурно-параметричного синтезу ГСЕС, яка включає сонячні панелі, набір перетворювачів постійного та змінного струму, систему пошуку точки максимальної потужності, систему накопичення енергії, дизель генератор і систему управління. Розроблено метод пошуку робочої точки, відповідний отримання максимальної потужності, на основі мета-евристичного алгоритму мінного вибуху.

Четвертий розділ присвячений оптимальному проектуванню безпілотних літальних апаратів, забезпечених сонячною-енергетичною системою і гібридною системою акумулювання енергії, що забезпечують максимально тривалий безпосадочний політ. Описується структура і конструкція даного типу БПЛА, розроблені математичні моделі його елементів, запропоновано розширення підходу до концептуального проектування представленому в ETHZ (Швейцарія),

запропоновано підхід до розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації з використанням генетичного алгоритму SPEA2.

Висновки до розділу 1

1. Розроблена загальна структура ГСЕС до складу якої входить СЕС (сонячні панелі, перетворювач постійного струму), система акумулювання енергії (з використанням акумуляторних батарей), дизельний генератор, мережа та система управління, що дозволяє у подальшому дослідженні адаптувати її до поставлених цілей та задач.

2. Виконано огляд існуючих САПР ГВЕС включаючи HOMER, HYBRID, RETScreen, HOGA, представлений порівняльний аналіз цих програм, визначено обмеження, доступність та області для подальших досліджень.

Список використаних джерел до розділу 1

1. "Відновлювана енергетика та системи розосередженої генерації," *Крі.іа*. Available at: <https://ep.kpi.ua/uk/node/24>. [Accessed: May 25, 2021].
2. "Renewable energy explained - U.S. Energy Information Administration (EIA)," *Eia.gov*. . Available at: <https://www.eia.gov/energyexplained/renewable-sources/>. (Accessed: May 25, 2021).
3. "Кара-Мурза С.Г. Научная картина мира, экономика и экология," Available at: http://www.hrono.ru/libris/lib_k/ecec7.html. (Accessed: February 03, 2015)
4. International Energy Agency, *Renewables 2020: Analysis and forecast to 2025*. OECD, 2020.
5. "Renewable power generation costs in 2020." Available at: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>. [Accessed: June 20, 2021].
6. "BNEF," Available at: <http://aenergy.ru/3873/> (Accessed: 18.02.2016).
7. Ali, S. and Jang, C.-M. (2020) "Optimum design of hybrid renewable energy system for sustainable energy supply to a remote island," *Sustainability*, 12(3), p. 1280.

8. Aydin, N. Y., Kentel, E. and Sebnem Duzgun, H. (2013) “GIS-based site selection methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from western Turkey,” *Energy conversion and management*, 70, pp. 90–106.
9. Bajpai, P. and Dash, V. (2012) “Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), pp. 2926–2939.
10. Chittala, P., Veeraiah, N. and Naveen, P. (2021) “Mitigation of Uncertainties in Hybrid Renewable Energy Systems,” *International Journal of Engineering and Technical Research*, 10, pp. 300–306.
11. Goel, S. and Sharma, R. (2017) “Performance evaluation of stand alone, grid connected and hybrid renewable energy systems for rural application: A comparative review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, pp. 1378–1389.
12. Lambert, T., Gilman, P. and Lilienthal, P. (2006) “Micropower System Modeling with Homer,” in *Integration of Alternative Sources of Energy*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., pp. 379–418.
13. Manwell, J. F. *et al.* (2006) “Hybrid2--a hybrid system simulation model--theory manual,” *Renewable Energy Research Laboratory, University of Massachusetts*. Citeseer.
14. Panhwar, Í., Sahito, A. R. and Dursun, S. (2017) “Designing off-grid and on-grid renewable energy systems using HOMER pro software,” *Journal of International Environmental Application & Science*, 12(4), pp. 270–276.
15. Ramli, M., Wahid, S. and Hassan, K. (2017) *A comparison of renewable energy technologies using two simulation softwares: HOMER and RETScreen*.
16. Saiprasad, N., Kalam, A. and Zayegh, A. (2018) “Comparative study of optimization of HRES using HOMER and iHOGA software,” *Journal of scientific and industrial research*. Available at: <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/45489> (Accessed: March 3, 2021).
17. Thevenard, D., Leng, G. and Martel, S. (2002) “The RETScreen model for assessing potential PV projects,” in *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE*

Photovoltaic Specialists Conference - 2000 (Cat. No.00CH37036). IEEE, pp. 1626–1629.

Розділ 2. Автоматизоване проектування гібридних сонячних енергетичних систем

2.1. Постановка задачі автоматизованого проектування гібридних сонячних енергетичних систем

В даний час розробка енергетичних систем з використанням поновлюваних джерел енергії (ВДЕ) заснована в цілому на ряді інженерних підходів до проектування окремих компонентів, що свідчить про відсутність науково обґрунтованої методології розробки енергетичних систем з використанням ВДЕ як єдиного цілого. Оптимізація параметрів окремих складових частин і компонентів ускладнена у зв'язку з наявністю збурень, викликаних взаємовпливом компонентів один на одного, їх розміщення і нестабільності умов експлуатації. Вирішення цієї проблеми може полягати в створенні оптимальних технологічних комплексів, побудованих на основі впровадження методології з системним науковим підходом і застосуванням сукупності різних методів, а також з використанням науково обґрунтованих технічних, технологічних та економічних рішень.

Основними критеріями ГСЕС будуть використовуватися вартість системи, як основний економічний критерій, кількість викидів CO₂ дизель-генератором і величина використання непоновлюваної енергії, як екологічні критерії, наявність дефіциту енергії, як критерій надійності, при якому ГСЕС повинен задовольнити вимоги навантаження системи.

Вартість системи – визначається як сума всіх витрат на закупівлю елементів ГСЕС, їх установку, обслуговування, вартість використаних не поновлюваних ресурсів під час експлуатації системи:

$$Cost_{system} = Cost_{buy} + Cost_{maintenance} + Cost_{fuel} + Cost_{grid},$$

де $Cost_{buy}$ – вартість елементів системи, $Cost_{maintenance}$ – вартість обслуговування і заміни елементів, $Cost_{fuel}$ – вартість палива, $Cost_{grid}$ – вартість роботи з енергомережею.

Викиди CO2 – один з екологічних критеріїв, пов'язаний з експлуатацією резервного джерела живлення дизель-генератора. Розрахунок викидів розраховується в наступному вигляді:

$$E_{emission} = \sum_t P_{dgr}(t)K_{CO_2},$$

де K_{CO_2} – коефіцієнт викидів (г/кВтг), P_{dgr} – номінальна потужність дизель-генератора.

Дефіцит енергії – критерій використовується для вимірювання надійності системи, при якому вимірюється величина браку енергії за весь період експлуатації.

$$E_{deficit} = \sum_t E_{load}(t) - E_{available}(t),$$

де E_{load} – необхідна енергія споживачами, $E_{available}$ – енергія доступна в ГСЕС надається системою акумулювання енергії, СЕС та дизель-генератором.

Використання невідновлювальної енергії – енергія яка була взята з енергомережі, а так само, при використанні дизель-генератора.

$$E_{NRE} = \sum_t E_{grid}^+(t) + E_{dg}(t),$$

де E_{grid}^+ - електроенергія взята з енергомережі, E_{dg} – енергія згенерована дизель-генератором.

Необхідно розробити ГСЕС включаючи: склад системи та параметри її елементів, визначити оптимальні складові (підсистеми), включаючи визначення складу та параметри її елементів оптимальні, в сенсі, наведених вище критеріїв.

2.2. Структура системи автоматизованого проектування гібридних сонячних енергетичних систем

Система автоматизованого проектування включає в себе рішення наступних завдань:

- оптимальний вибір структури ГСЕС;
 - вибір критеріїв оптимізації;
 - формування обмежень;

- впровадження алгоритму багатокритеріальної оптимізації;
- автоматизоване проектування системи перетворення сонячної енергії в електричну;
 - визначення типу та кількості сонячних панелей;
 - визначення кута установки панелей;
 - розробка імітаційних моделей;
- автоматизоване проектування блоку перетворювачів;
 - оптимальний вибір типу і кількості перетворювачів постійного струму;
 - вибір типу підключення;
 - оптимальний тип і схеми підключення інверторів;
 - розробка імітаційних моделей;
- автоматизоване проектування блоку МРРТ;
 - розробка алгоритму пошуку;
 - вибір комплексу технічних засобів;
 - імітаційне моделювання;
- автоматизоване проектування системи накопичення і акумулювання енергії;
 - розробка структури;
 - розробка блоку батарей;
 - розробка блоку суперконденсаторів;
 - розробка блоку управління перемикачів;
- підсистема керування дизель генератором;
 - вибір комплексу технічних засобів;
 - імітаційне моделювання
- підсистема моделювання гібридної СЕС.

Згідно з вищевикладеними завданнями структура спеціалізованої САПР має наступний вигляд (рис. 2.1).

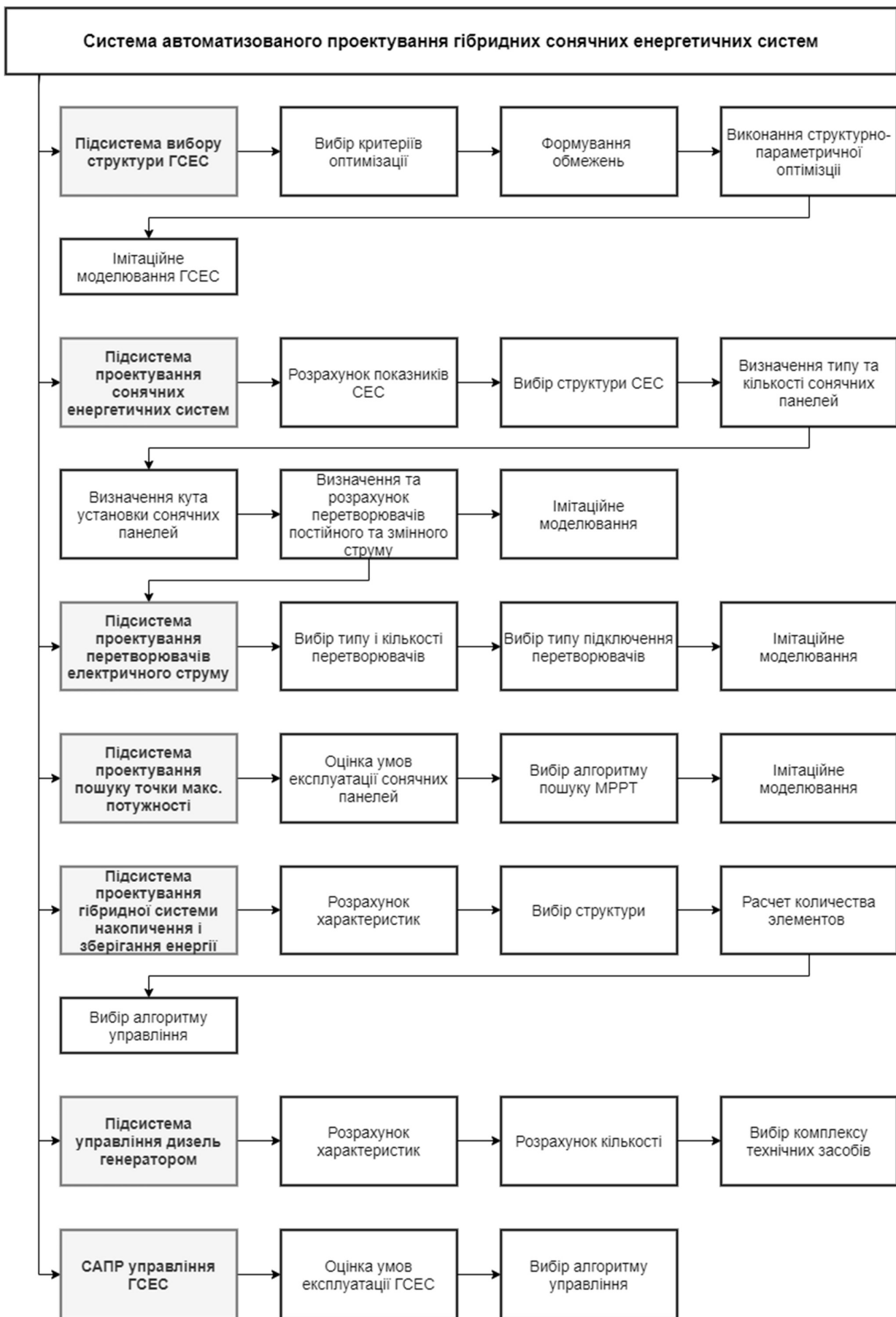


Рис. 2.1 – Структура САПР ГСЕС

2.3. Математичні моделі елементів САПР гібридних сонячних енергетичних систем

2.3.1. Математична модель сонячної енергетичної системи

Перетворювач сонячної енергії (сонячна енергетична система, СЕС) – система складається з однієї або декількох сонячних панелей в поєднанні з набором перетворювачів (перетворювачі постійного і змінного (інвертор) струму) яка використовує енергію Сонця для вироблення електроенергії. В залежності від типу підключення (постійний або змінний струм) до споживачів, потрібно обрати відповідний перетворювач.

Сонячні панелі

Сонячні панелі складаються з набору сонячних елементів (фотоелектричних перетворювачів), основне завдання яких перетворення сонячної енергії в постійний струм, це тихий і екологічно чистий процес перетворення енергії. Цей процес можливий завдяки фотогальванічному ефекту, який викликає поява ЕДС.

При попаданні фотонів сонячного випромінювання на поверхню фотоелементів виникає різниця потенціалів, яка створює ЕРС, в результаті чого спостерігається поява постійного струму на виході з сонячних елементів. Даний процес відбувається внаслідок того, що фотони сонячного світла взаємодіють з напівпровідником, і в разі, якщо енергія фотона перевищує енергію забороненої зони, виникає взаємне переміщення зарядів в n - і p- шарі (генерація електронно-діркових пар). Але, у разі якщо енергія фотона не перевищує енергію забороненої зони, їх енергія буде розсіяна по фотоелементу у вигляді теплової енергії.

Найоптимальнішим кутом падіння сонячного випромінювання є кут в 90° , отже використання двовісних трекерів є кращим, у разі, якщо панелі будуть розташовуватися стаціонарно, оптимальний кут можливо розрахувати використовуючи методологію представлену в роботі [1].

При тестуванні сонячних елементів використовують вольтамперну характеристику (ВАХ), яка демонструє залежність струму від напруги. У випадку з фотоелементами дана залежність є нелінійною. STC (standard test conditions) – тестування в лабораторних умовах, при яких фіксується інтенсивність сонячного

випромінювання і температура навколишнього середовища, так як ці параметри безпосередньо впливають на ВАХ. На рис. 2.2 показано нелінійна ВАХ і залежність потужності від напруги при STC. Важливість ВАХ, її вплив на роботу сонячної підсистеми і спектр завдань буде детально представлено в підрозділі 2.3.2.

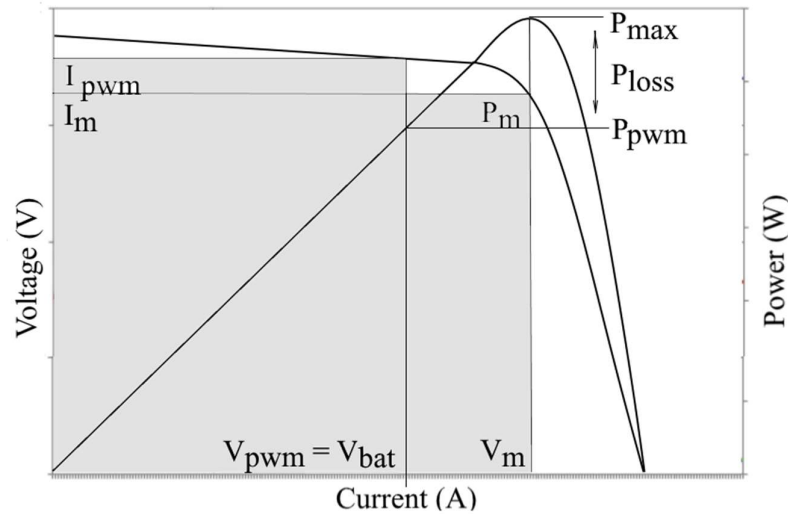


Рис. 2.2 – Вольт-амперна характеристика та крива потужності

Розрахунок кількості сонячних панелей

Першим етапом процесу проектування СЕУ є оцінка навантажень. Для того, щоб оцінити попит споживачів, слід визначити потреби кожного з видів споживачів постійного і змінного струму протягом певного інтервалу часу. Можливі два підходи: часовий ряд (історичні дані) або оцінка на основі характеристик номінальної потужності приладів і часу роботи

Відповідно розрахунок споживаної енергії навантаженнями в перебігу доби:

$$E_{DC} = \sum_{i=1}^n P_i * h,$$

$$E_{AC} = \sum_{i=1}^n P_i * h,$$

де E_{DC} і E_{AC} сумарне енергоспоживання постійного і змінного струму (Вт*год); P_i - потужність кожного окремого навантаження (Вт), h - тривалість використання навантаження протягом дня.

Сумарна споживана енергія підключених навантажень:

$$E_{total} = E_{DC} + E_{AC},$$

Для попередньої оцінки кількості сонячних панелей, слід визначити їх сумарну площу, на основі енергетичних вимог навантаження:

$$S_{SC} = \frac{E_{total}}{\frac{E_{DC}}{E_{total}} W_{day,energy} \eta_{SC} \eta_{DC/DC} + \frac{E_{AC}}{E_{total}} W_{day,energy} \eta_{SC} \eta_{DC/DC} \eta_{DC/AC}}$$

$$= \frac{E_{total}^2}{W_{day,energy} \eta_{SC} \eta_{DC/DC} (E_{DC} + E_{AC} \eta_{DC/AC})'}$$

де $W_{day,energy}$ – енергетична щільність сонячного випромінювання, $\eta_{SC} \eta_{DC/DC} \eta_{DC/AC}$ – ККД сонячних панелей, перетворювача постійного струму перетворювача змінного струму.

Кількість сонячних панелей, визначається як:

$$N_{total} = \frac{S_{SC}}{S_{module}}$$

де S_{module} – площа обраної сонячної панелі, при заданому раніше ККД.

Так само, часто прийнято розраховувати кількість сонячних панелей виходячи з коефіцієнту інсоляції і потужності обраної сонячної панелі:

$$N_{total} = \frac{E_{total}^2}{P_{module} K \eta_{SC} \eta_{DC/DC} (E_{DC} + E_{AC} \eta_{DC/AC})'}$$

Розрахунок конфігурації масиву сонячних панелей розмірністю $N_S * N_P$:

$$N_P = \frac{N_{total} P_{modul}}{P_{max}}$$

$$N_S = \frac{V_{system}}{V_{PVmodule}}$$

де N_P - кількість модулів у паралельному підключенні; N_S - кількість послідовних модулів, P_{max} - максимальна потужність навантаження, V_{system} – необхідну напругу в шини постійного струму СЕС, $V_{PVmodule}$ – напруга сонячної панелі в точці максимальної потужності;

Імітаційна модель сонячної панелі

SDM (Single diode model) - модель являє собою генератор постійного струму, паралельно якому підключають діод, шунтувальний резистор і послідовно резистор. Дана модель має вигляд як показано на рис. 2.3.

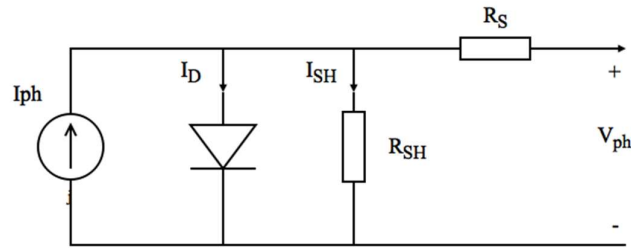


Рис. 2.3 – Принципова схема SDC

Сама модель одного діода математично записується наступними формулами:

$$I_{PH} = \frac{G}{G_{STC}} (I_{PH_{STC}} + K_I \Delta T),$$

$$I_{0_{STC}} = \frac{I_{SC_{STC}}}{\frac{V_{OC_{STC}}}{e^{AV_{t_{STC}}} - 1}},$$

$$I_0 = I_{0_{STC}} \left(\frac{T_{STC}}{T} \right)^3 e^{\frac{qE_B}{Ak} \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T} \right)},$$

$$I_{PV} = N_P \left(I_{PH} - I_0 \left(e^{\frac{q(V_{OUT} + I_L R_S)}{N_S A k T}} - 1 \right) - \frac{V_{OUT} + I_L R_S}{R_{SH}} \right),$$

де $I_{PH_{STC}}$ – струм що генерується світловим потоком при стандартних умовах тестування, K_I – температурний коефіцієнтициент елемента при короткому замиканні, ΔT – різниця температури навколишнього середовища і температури при STC, G і G_{STC} інтенсивність сонячного випромінювання поточна і при STC відповідно (1000 Вт/м^2), $I_{0_{STC}}$ – струм насичення при STC, E_B – енергія забороненої зони, $I_{SC_{STC}}$ – струм короткого замикання при STC, $V_{OC_{STC}}$ – напруга при розімкнутому ланцюзі (холоста напруга) при STC, $V_{t_{STC}}$ – напруга напівпровідника при STC, $N_S * N_P$ – кількість модулів у збірці.

Імітаційна модель розроблена в пакеті Matlab/Simulink і показана на рис. 2.4 на основі моделі одного діода поданої раніше в поєднанні з вбудованими засобами.

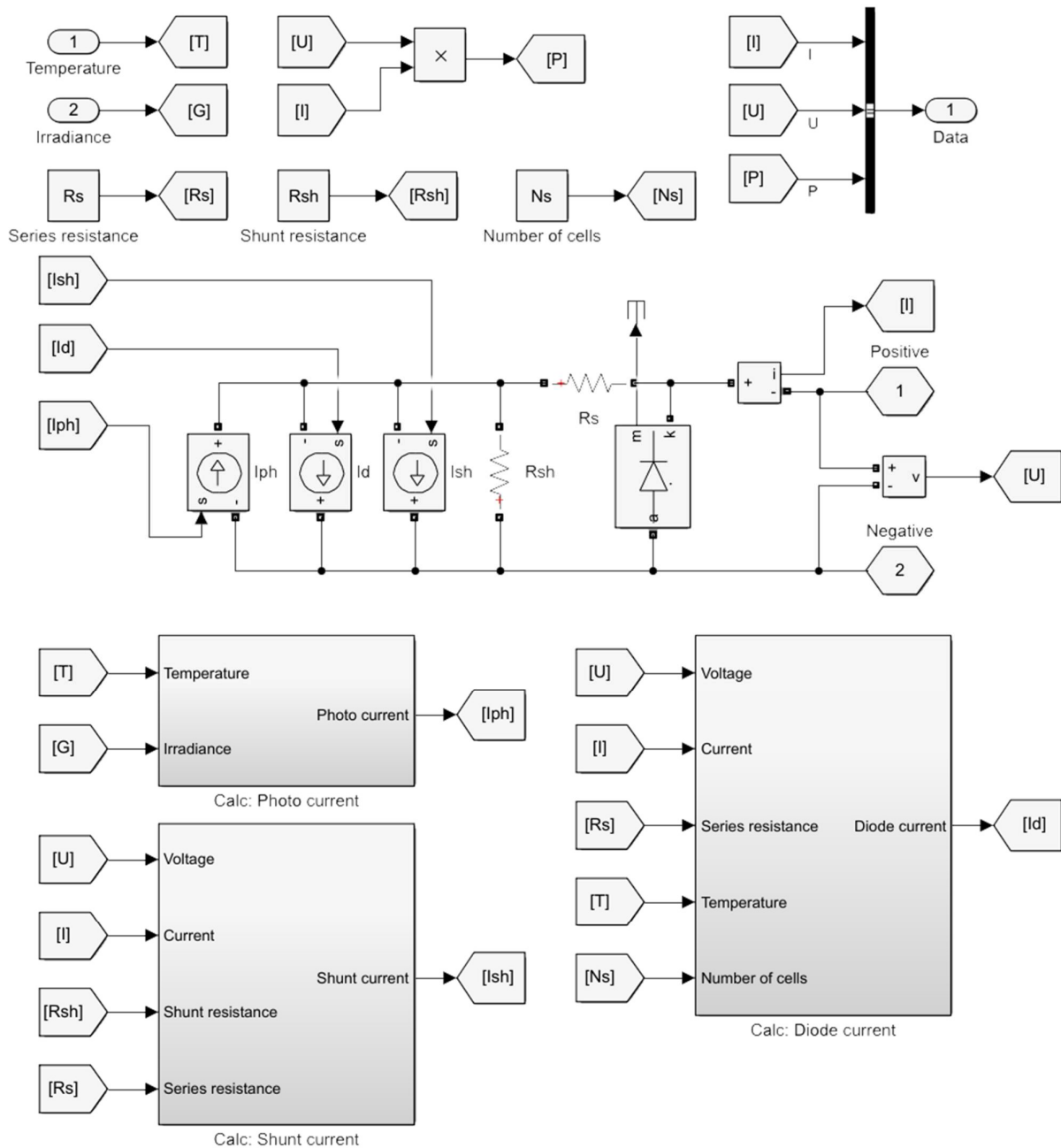


Рис. 2.4 – Імітаційна модель одного діода

Дослідження характеристик імітаційної моделі сонячної панелі з заданими параметрами на рис. 2.5, виробляються з зміною температури навколишнього середовища експлуатації, реакція ВАХ і потужностних кривих показана на рис. 2.6.

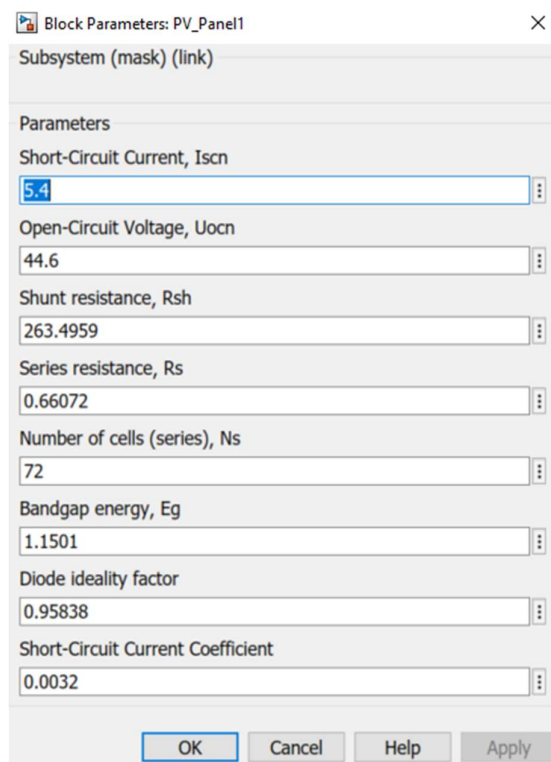


Рис. 2.5 – Вхідні параметри імітаційної моделі

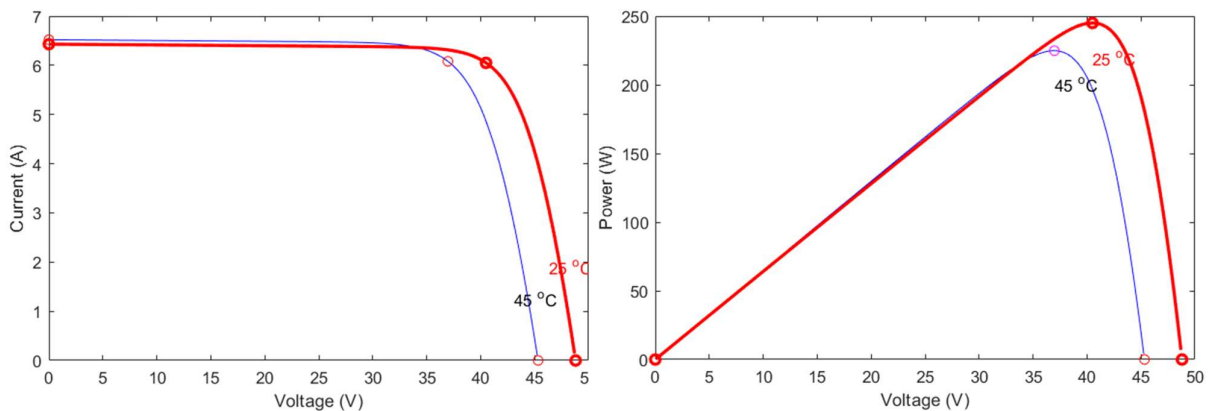


Рис. 2.6 – Дослідження характеристик сонячних панелей

Перетворювачі постійного струму (DC/DC)

Перетворювачі постійного струму (DC/DC конвертер) - електротехнічний пристрій, що перетворює електричну енергію з одними значеннями параметрів і/або показників якості в електричну енергію з іншими значеннями параметрів і/або показників якості. У випадку сонячної енергетичної установки, даний пристрій є необхідним модулем системи, так як надає керований, погоджений з системою споживачів і стабілізований рівень енергії.

Дані перетворювачі можуть мати безліч різних схем зі своїми функціональними особливостями, перевагами і недоліками, основними є:

- Buck (step-down) конвертер, використовується для пониження напруги;
- Boost (step-up) конвертер, використовується для підвищення напруги;
- Buck-boost конвертор, використовується як для підвищення, так і невеликого пониження напруги;

Модель перетворювача постійного струму

SEPIC (Single Ended Primary Inductance Converter) — одна з популярних схем перетворювачів постійного струму, може виконувати як підвищення, так і пониження напруги, що робить її застосування універсальним. Для управління використовується PWM сигнал на ключ S1. Принципова схема показана на рис. 2.7.

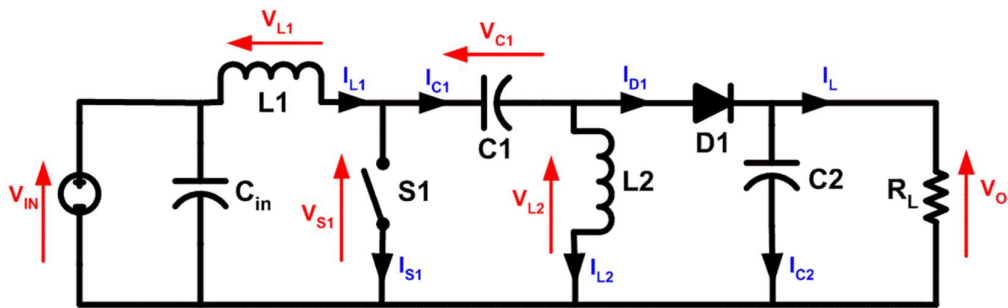


Рис. 2.7 – Принципова схема SEPIC

Перевагами даної схеми є:

- можливість підвищення і пониження вхідної напруги;
- має не інвертований вихід, на відміну традиційного Buck-boost конвертера;
- вхід і вихід конвертора розв'язані;
- при зникненні керуючого сигналу, вихідна напруга дорівнює нулю;
- можуть бути використані не дорогі конденсатори:
- може використовуватися з досить великими коливаннями вхідної напруги;
- вимагає резистори з низьким ESR.

Для розрахунку робочого циклу при PWM управлінні перетворювачем, застосовується наступна формула:

$$D = \frac{V_{out}}{V_{out} + V_{in}}$$

Імітаційна модель SEPIC

Імітаційна модель розроблена в пакеті Matlab/Simulink і показу на рис. 2.8 на основі моделі SEPIC в поєднанні з вбудованими засобами.

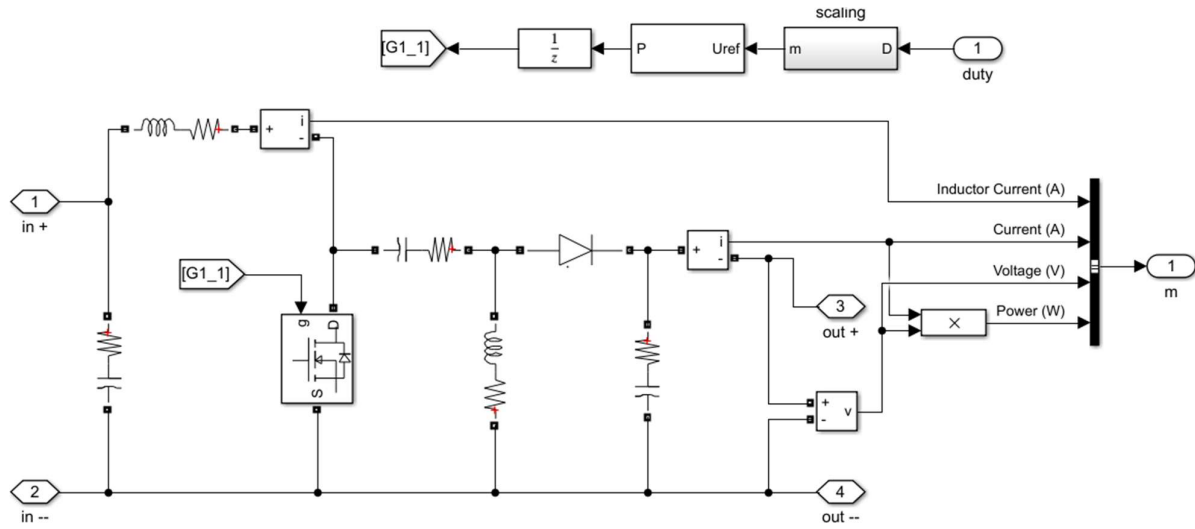


Рис. 2.8 – Імітаційна модель SEPIC

Аналіз чутливості моделі проведено для SEPIC перетворювача (рис 2.9) використовуючи ШІМ управління без зворотного зв'язку набором заданих характеристик: $L1 = L2 = 50\text{мкГн}$, $Cs = 200\text{мкф}$, $C2 = 500\text{мкф}$, $Duty = [0.8, 0.9]$

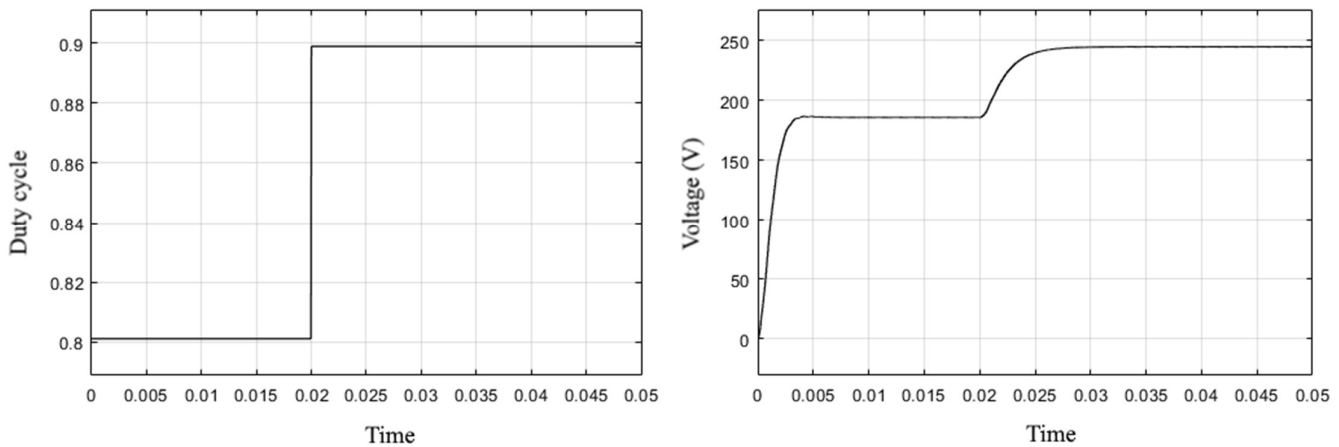


Рис. 2.9 – Аналіз чутливості SEPIC перетворювача

Перетворювач змінного струму

Інвертор – пристрій, призначений для перетворення постійного струму в змінний. У контексті сонячної системи є одним з ключових модулів у випадках підключення навантаження змінного струму і виконують функцію перетворення енергії як з сонячних панелей, так і, в деяких випадках, з акумуляторних батарей.

Перетворення постійного струму в змінний інвертором досягається завдяки різним технікам управління і схемами виконання інверторів.

Головними показниками ефективності роботи інверторів є такі характеристики як: ККД, перевантажувальна здатність, допустимий коефіцієнт потужності навантаження і допустимий хрест-фактор навантаження і якість вихідного сигналу напруги.

Оцінка характеристик інвертора

При підключенні інвертора слід враховувати наступні особливості: вхідна напруга інвертора повинно відповідати напрузі в лінії постійного струму СЕС, вихідний напруга має відповідати характеристиками змінного струму споживачів; здатність до перенапруження, повинна задовольняти вимогам пікових навантажень.

Активна потужність застосовуваного інвертора повинна перевищувати максимальну споживану потужність споживачів змінного струму:

$$P_{A,INV} > P_{MAX},$$

де $P_{A,INV}$ – активна потужність інвертора.

Повна потужність, в свою чергу, повинна перевищувати пікову потужність споживачів змінного струму:

$$P_{INV} > P_{SMAX},$$

де P_{INV} – активна потужність інвертора

Таким чином, розряд відбувається у відповідності з необхідними специфікаціями.

Модель інвертора

За типом застосовуваних індуктивних компонентів інвертори можна розділити на 2 ключові групи: трансформаторні і безтрансформаторні або дросельні.

Хорошим і простим прикладом інверторної схеми є безтрансформаторний інвертор в якому використовуються 4 ключі як показано на рис. 2.10.

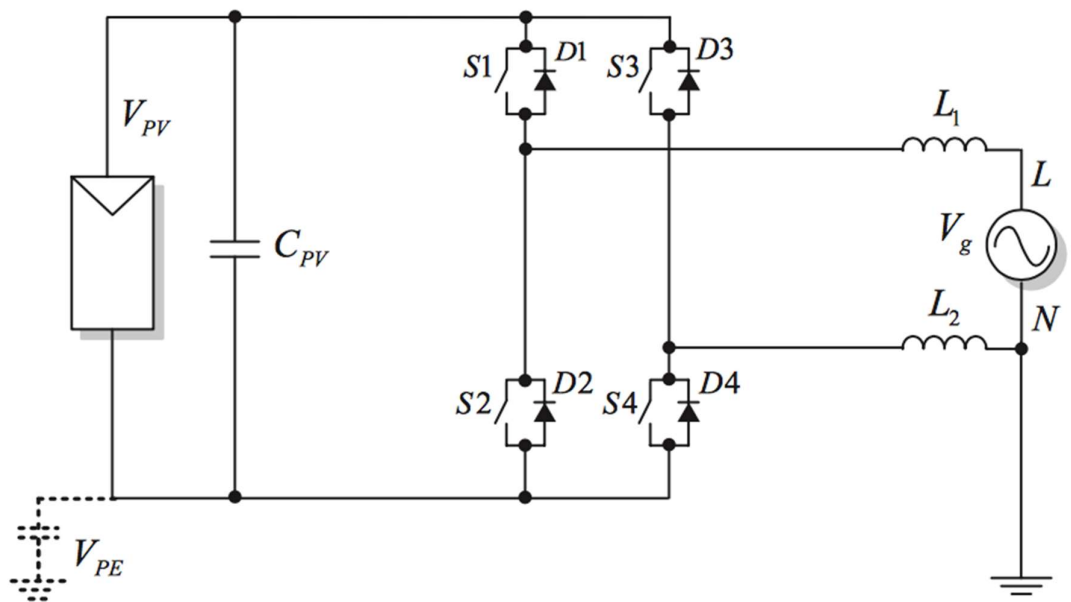


Рис. 2.10 – Схема мостового інвертора

Мостова схема формує змінний струм перемикаючи попарно ключі і в залежності від того які ключі відкриті формується напруга на виході. При відкритому S2 і S3 формується позитивне напруга, при відкритих S1 і S4 формується негативна напруга.

Так як перемикання даної схеми відбувається синхронно і управління відбувається ШІМ-сигналом, так само інвертори класифікуються за типом генерованого сигналу: біполярний, уніполярний і гібридний.

При біполярному ШІМ ключі перемикаються діагонально з високою частотою окремими сигналами з синхронізованою синусоїдою.

При уніполярному ШІМ ключі перемикаються так само діагонально, але синусоїда на кожен з діагональних сигналів дзеркально відображена.

У разі гібридної ШІМ одна сторона використовує перемикання з частотою змінного струму, а з іншого боку будь-якої ШІМ частотою більшою ніж протилежна.

Імітаційна модель інвертора

Використано імітаційну модель [7], яка розроблена в пакеті Matlab/Simulink і показана на рис. 2.11 в поєднанні з вбудованими засобами.

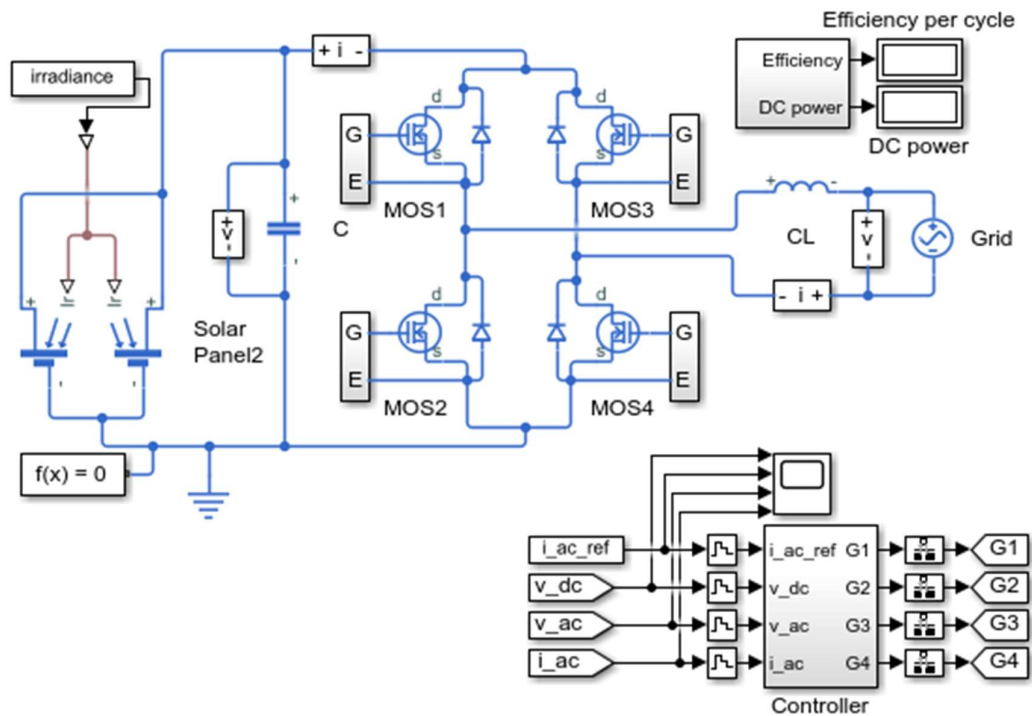


Рис. 2.11 – Імітаційна модель інвертора

Особливості підключення перетворювачів енергії

Централізований інвертор - застосовується один головний (центральний) інвертор, який підключається до основної силової лінії постійного струму. У свою чергу сонячні панелі організують так, щоб забезпечити прийнятну для вибраного інвертора робоче напруження, яке і буде формувати напруга на силовій лінії, без використання проміжних конверторів постійної напруги. Приклад схеми включення показаний на рис. 2.12. Частіше всього застосовується в системах з високою потужністю (від 100кВт).

З недоліків даної схеми включення можна виділити: втрати енергії через велику кількість сонячних панелей (різниця в характеристиках, байпас діоди та інші), частіше за все відсутність МРРТ, низька стійкість до відмови всієї системи при виході з ладу інвертора.

Перевагою даної схеми є її простота і відносна дешевизна рішення.



Рис. 2.12 – Схема включення централізованого інвертора

Інвертор на лінію - поділ масиву сонячних панелей на паралельні лінії включення сонячних панелей, до кожної з яких підключається незалежний інвертор, який в свою чергу підключений до єдиної силової лінії змінного струму. Застосовуються в системах малої потужності до 2кВт. Схема включення показана на рис. 2.13.

З переваг даної схеми можна виділити: більш висока відмовостійкість системи, так як немає центрального інвертора, через застосування меншої кількості сонячних панелей різниця в їх характеристиках не так відчутна, не використовуються захисні діоди на лінію, так як немає паралельного включення;

З недоліків можна виділити її дорожнечу.

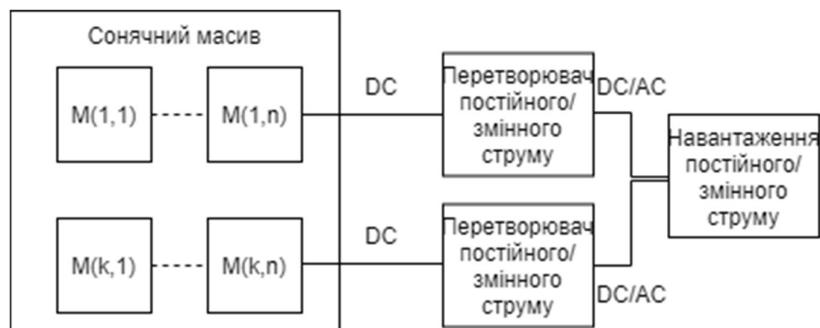


Рис. 2.13 – Схема підключення незалежних інверторів на кожну лінію

Централізований інвертор з мікроконверторами постійного струму - кожна лінія сонячних панелей володіє власним мікроконвертером постійного струму, який може включати в себе як MPPT так і DC-DC перетворювач (рис. 2.14). Далі виходи кожного з мікроконверторів підключаються до централізованого інвертора. Застосовується в системах до 5 кВт.

Для даної топології властиві як переваги так і недоліки розглянутих вище топологій. Унікальною перевагою є застосування MPPT, який дозволяє працювати в точці максимальної потужності кожної з ліній сонячних панелей.

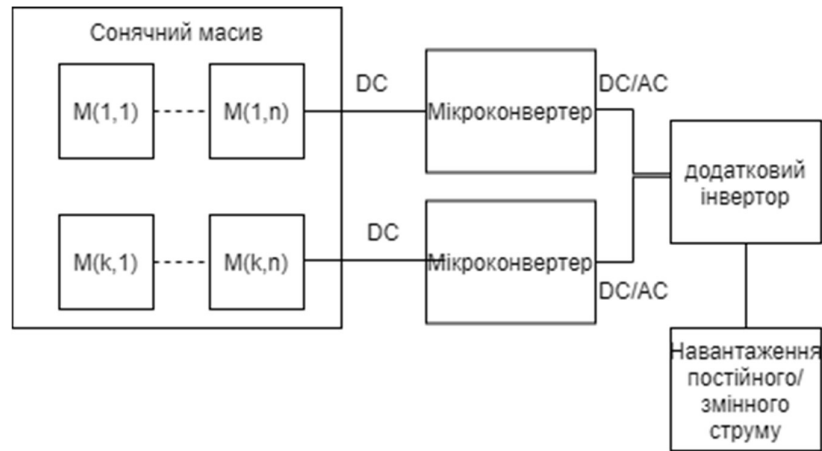


Рис. 2.14 – Схема застосування централізованого інвертора з мікроконверторами на панелях.

Мікроінверторна топологія - розвиток мікроконверторної топології з застосуванням інтегрованого мікроінвертора (рис 2.15).

Включає в себе основні переваги всіх трьох попередніх топологій, з унікальних властивостей даної топології можна виділити: можливість застосування сонячних панелей різних характеристик і технологій, немає втрат від паралельного і послідовного включення сонячних панелей, так як кожна панель має свій конвертор, висока відмовостійкість, так як вихід з ладу однієї з панелей впливає на потужність пропорційно своїй потужності.

Так само дана топологія володіє певними недоліками: дорожнеча рішення, низька ефективність, через застосування інтегрованих DC-DC перетворювачів з-за вимоги високої напруги змінного струму на виході, доцільно використовувати в системах малої потужності.

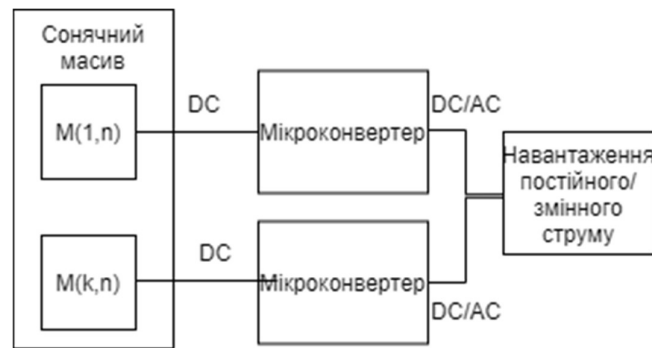


Рис. 2.15 – Схема застосування мікроінверторної топології

2.3.2. Математична модель блоку пошуку точки максимальної потужності

Вихідна потужність сонячної панелі залежить від багатьох параметрів: умов навколишнього середовища, рівня сонячного випромінювання, температури сонячних панелей, підключеного навантаження. Наприклад, зі збільшенням рівня сонячного випромінювання вихідна потужність буде збільшуватися, але при одночасному підвищенні температури сонячних панелей вихідна потужність буде зменшуватися. Виходячи з цього, сонячні елементи мають досить складний взаємозв'язок між параметрами навколишнього середовища і вихідною потужністю; таким чином, вольт-амперна характеристика також змінюється від цих параметрів, тому її можна представити у вигляді певної кривої, яка залежить від конкретних миттєвих значень навколишнього середовища. На ВАХ є певна точка, в якій визначені значення струму і напруги, в залежності від обраного навантаження (згідно із законом Ома), будуть відповідати точці максимальної потужності, яка є глобальним максимумом на фотоелектричній кривій [5].

Для роботи сонячних панелей на максимальній потужності частіше всього використовуються DC-DC перетворювачі, які розміщуються між сонячними панелями і навантаженням (споживачами). Додатковий блок, що забезпечує реалізацію алгоритму знаходження точки максимальної потужності, керує цими DC-DC перетворювачами.

Максимальну потужність панелі в робочій точці можна представити:

$$P_{MPP} = I_{MPP}V_{MPP},$$

де V_{MPP} , I_{MPP} - напруга і струм у точці максимальної потужності відповідно.

У зв'язку з тим, що MPP може переміщатися по кривій потужності в різні моменти часу і роботи системи, через залежності від змінних середовища, для його пошуку в реальному часі повинні застосовуватися алгоритми MPPT, які будуть обговорюватися пізніше у цьому розділі.

Коли справа доходить до збору сонячної енергії у великих масштабах, фотоелектричні модулі розташовуються і підключаються послідовно і паралельно для отримання бажаних напруг і струмів. Звичайні методи MPPT добре працюють при рівномірному сонячному випромінюванні. Однак тіні від різних об'єктів (наприклад, будівель, дерев), хмар і т. Д. Можуть викликати зміни умов експлуатації фотоелектричних панелей, що призводить до явищ часткового затінення.

Під час PSC вихідна потужність може помітно знизитися. Крім того, ці умови можуть чинити фізичний вплив на фотоелементи, наприклад, створення гарячих точок на модулях, тому при об'єднанні осередків в модулі / панелі виробники використовують байпасні діоди. Ці гарячі точки починають з'являтися після втрати потужності клітинки або погіршення в конфігураціях, підключених до ланцюжку. Тому що кожна клітинка в колоні повинна підтримувати постійний струм і частину втраченої енергії, що виділяється у вигляді тепла. Для усунення цих ефектів використовуються пасивні і активні методи.

Активним методом пом'якшення впливу PSC є так звана динамічна реконфігурація масиву PV, яка виходить за рамки даного розділу, але є досить багатообіцяючим підходом для деяких випадків.

Для пасивного методу кожна комірка (в ідеалі) повинна мати зворотне зміщення з допомогою обхідного діода, який відключить затінену або пошкоджену клітинку і врятує клітинку від руйнівних впливів. Але цим методом неможливо повністю уникнути втрат потужності, тому на кривій PV будуть спостерігатися кілька типів піків (рис. 2.16): локальні і глобальні точки максимальної потужності (LMPP і GMPP). Багато традиційних алгоритмів MPPT не можуть точно відстежувати GMPP.

При розробці методу пошуку необхідно вирішити наступні критерії [12]: точність відстеження, швидкість відстеження, швидкість збіжності, коливання навколо MPP, періодичні налаштування, енергоефективність, надійність в PSC, системна незалежність, складність.

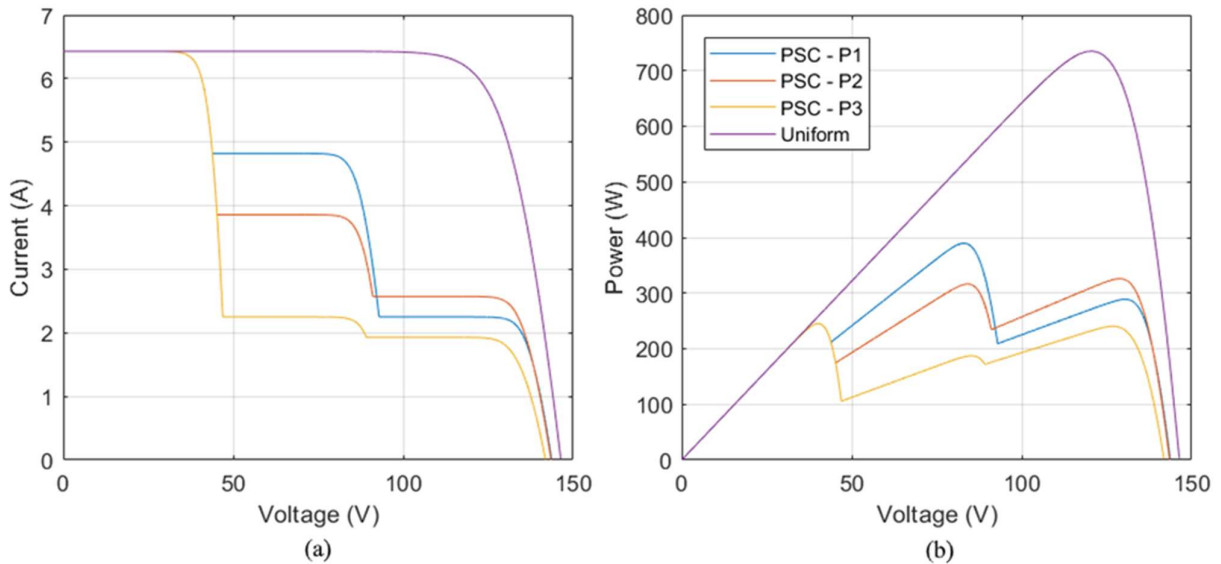


Рис. 2.16 – Характеристики сонячних панелей при STC в умовах часткового затінення.

Існує безліч методів пошуку точки максимальної потужності, порівняння наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Порівняння методів пошуку точки максимальної потужності [2]

Назва методу пошуку	Пошук GMPP	Швидкість пошуку	Швидкість корекції	Колівання	Залежність від параметрів системи	Складність
Стандартні методи MPPT						
Perturb and Observe, Hill Climbing	Немає	Різна	Різна	Загальна	Немає	Низька
Incremental Conductance	Немає	Різна	Різна	Загальна	Немає	Низька
Fractional Short-circuit Current	Немає	Швидка	Швидка	Немає	Та	Низька
Fractional Open-circuit voltage	Немає	Швидка	Швидка	Немає	Та	Низька

Ripple Correlation Control	Немає	Швидка	Швидка	Немає	Немає	Низька
MPP Locus	Немає	Швидка	Швидка	Немає	Та	Помірна
Екстремуму Seeking Control	Немає	Швидка	Швидка	Немає	Ні	Помірна
Sliding Mode Control	Немає	Швидка	Швидка	Немає	Та	Помірна
Load current/voltage maximisation	Немає	Швидка	Швидка	Немає	Немає	Низька
Fuzzy based	Немає	Швидка	Швидка	Немає	Та	Висока
Neural Network based	Немає	Швидка	Швидка	Немає	Та	Висока
Bisection Search	Немає	Різна	Різна	Немає	Немає	Низька
β-method	Немає	Швидка	Швидка	Немає	Ні	Помірна
Метод MPPT з можливістю пошуку глобального максимуму						
Periodic reset	Немає	Різна	Різна	Іноді	Немає	Помірний
Periodic Curve Scanning	Немає	Різна	Різна	Немає	Ні	Помірний
Two stage method	Немає	Різна	Різна	Іноді	Іноді	
Two stage methods (equivalent load line)	Немає	Різна	Різна	Загальне	Та	Помірний
Observations of P-V characteristics	Ймовірно	Різна	Різна	Немає	Так	Помірний
Renewed P-V curve sweeping	Ймовірно	Різна	Різна	Іноді	Так	Помірний
Line Search (DIRECT)	Як правило	Різна	Різна	Немає	Так	Помірний
Line Search (Fibonacci)	Як правило	Різна	Різна	Немає	Так	Помірний
Particle Swarm Optimisation	Як правило	Різна	Різна	Немає	Так	Помірний/Високий
Chaos Search	Як правило	Швидка	Швидка	Немає	Ні	Помірний
Підходи, засновані на силовій електроніці						
Bypass diodes method	Як правило	Повільна	Повільна	Немає	Ні	Високий

Differential power processing	Як правило	Різна	Різна	Іноді	Немає	Помірний
PE equaliser	Як правило	Швидка	Швидка	Немає	Та	Високий
Distributed MPPT	Як правило	Різна	Різна	Іноді	Немає	Помірний

Імітаційна модель системи тестування алгоритмів пошуку максимальної потужності

Імітаційна модель системи тестування алгоритмів пошуку точки максимальної потужності заснована на комбінації 3 основних моделей: моделі сонячних панелей, перетворювача постійного струму, а так само, блоку керування перетворювачем, в який і включений алгоритм пошуку. Модель показана на рис. 2.17.

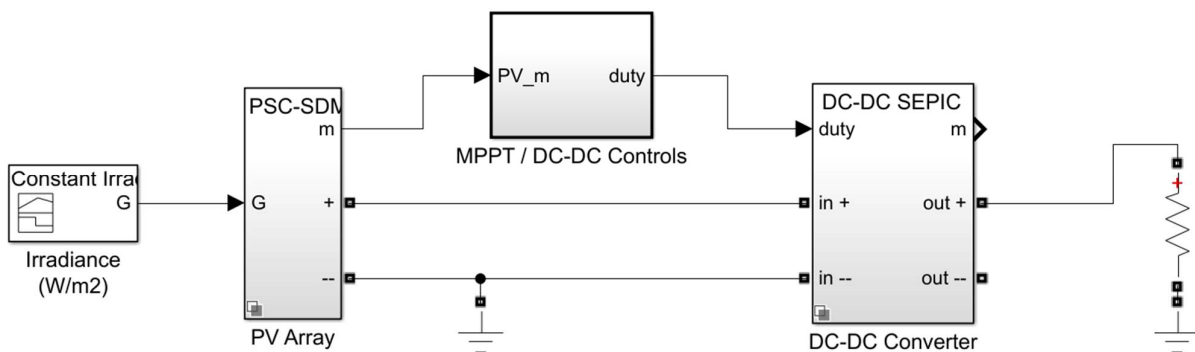


Рис. 2.17 – Імітаційна модель СЕС

При цьому моделюванні (рис. 2.18) використовувався класичний алгоритм пошуку "Perturb and Observe", а так само для оцінки його реакції на 4 секунді виконується підключення доп. навантаження. Запропонований алгоритм пошуку для знаходження глобальної точки максимальної потужності при наявності часткового затінення буде розглянуто в розділі 3.

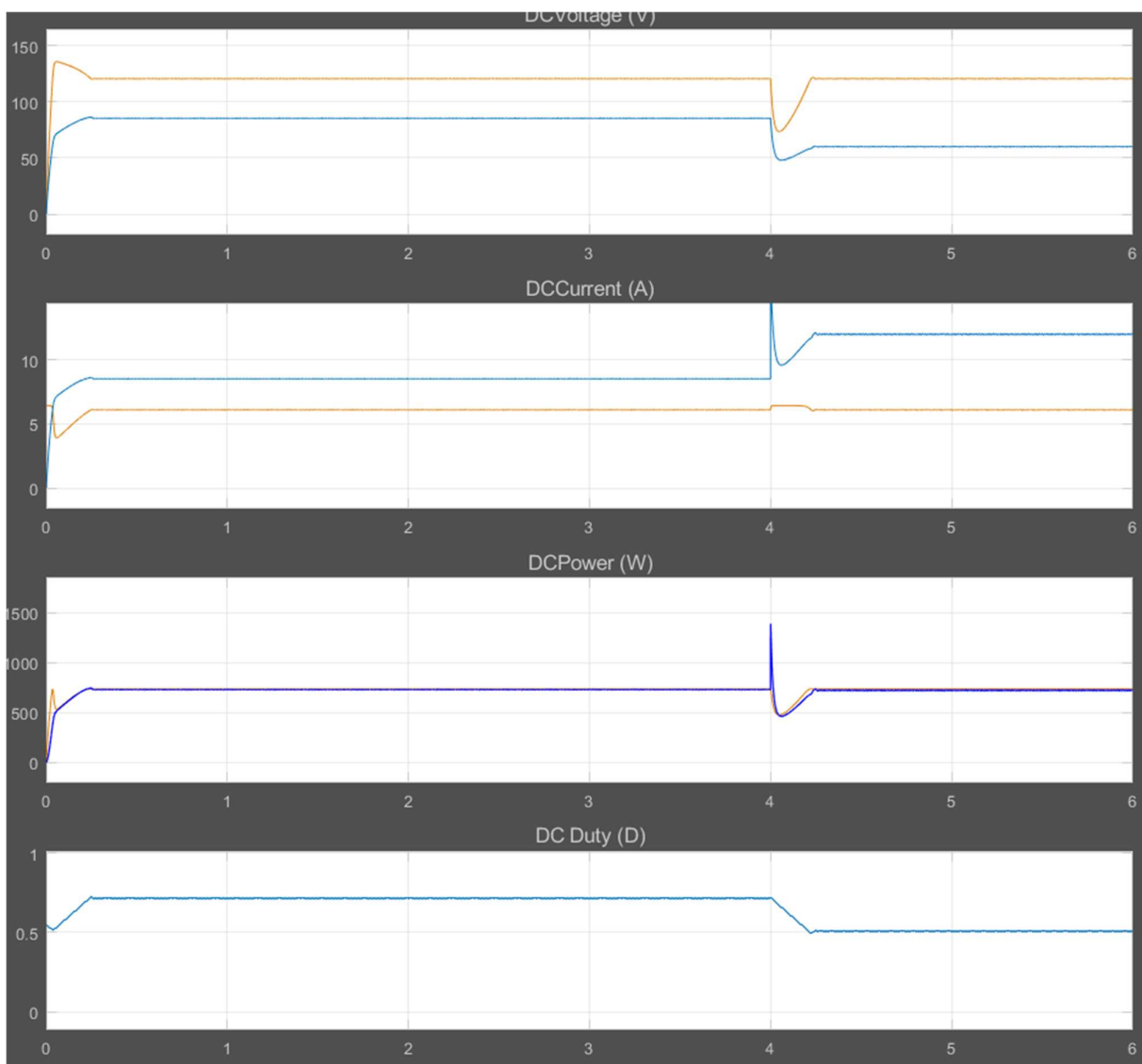


Рис. 2.18 – Пошук точки максимальної потужності (алгоритм P&O)

2.3.3. Математична модель процесу управління дизель-генератором

Дизель генератор - це традиційне джерело енергії, яке використовується в якості резервного для заповнення дефіциту потужності в ГСЕС. Часові витрати палива оцінюється з допомогою наступного рої формули:

$$D_f(t) = \alpha_D P_{DG}(t) + \beta_D P_{DGR},$$

де $D_f(t)$ - часова витрата палива ДГ в л/год, P_{DG} - середня потужність в годину (кВт), P_{DGR} - номінальна потужність (кВт), α_D і β_D - коефіцієнти витрати палива (л/кВтг) відповідно до технічної документації на дизель генератор.

Використання дизель генератора як резервного живлення

У разі якщо потужності що виробляється ГСЕС не вистачає дефіцит не може бути компенсований за рахунок використання гібридної системи акумулювання енергії, отже можливо задіяти резерв у вигляді дизель-генератора, необхідна потужність даної підсистеми може бути розрахована як:

$$P_{DG} = P_{load} - P_{PV} \eta_{DC/DC} \eta_{DC/AC}$$

Умови включення резерву повинні виконуватися одночасно:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{PV} \eta_{DC/DC} \eta_{DC/AC} < P_{load} \\ SOC_{HESS} \leq SOC_{HESS}^{min} \end{array} \right\}$$

2.3.4. Математичні моделі процесів гібридної системи акумулювання енергії

Гібридна система акумулювання енергії (HESS) - поєднують переваги двох або більше технологій акумулювання енергії, які пом'якшують недоліки один одного.

Сценарії використання ГСЕС можуть представляти наступний вигляд:

- потужність навантаження перевищує межі потужності генерації енергії ГСЕС;
- потужність навантаження менше межі потужності генерації енергії;
- потужність навантаження не постійна, може як перевищувати, так бути і менше межі потужності, в різний момент часу.

Для кожного з сценаріїв, накопичувач енергії може виконувати допоміжну функцію для забезпечення характеристик навантаження.

У першому випадку, при перевищенні потужності навантаженням, накопичувач енергії, при наявності запасів, може віддати частину або всю свою енергію в силову шину, забезпечивши часове підвищення максимальної потужності. Даний режим, дозволить на певний інтервал часу, збільшити вихідну потужність ГСЕС, за рахунок миттєвої потужності сонячних панелей, і потужності накопичувача.

У другому випадку, при недостатній потужності навантаження, в силовій шині ГСЕС утворюється вільна енергія, яка не може бути використана в поточний момент. При цьому, можна стверджувати, що сонячні панелі, які є по суті генератором енергії, працюють не на повну потужність. Для того, щоб утилізувати

всю максимальну потужність, залишок енергії можна акумулювати. Це забезпечить максимально ефективну експлуатацію ГСЕС в робочий час, коли сонячні панелі виступають основним генератором енергії.

У третьому випадку, при коливаннях потужності навантаження. У даному режимі експлуатації, накопичувач енергії може виступати як стабілізатор силовий шини, для забезпечення достатньої потужності. Цей підхід є комбінацією першого і другого режиму використання.

Враховуючи дані трьох режимів використання, можна виділити проблеми, які можливі при експлуатації СЕУ з модулем накопичувача енергії:

- утилізація енергії, коли потужність генерації перевищує потужність навантаження;
- підтримка вихідної потужності, при коливаннях потужності генерації, в наслідок часового перевищення потужності споживачем (пікові навантаження), а так само при несподіваній зміні умов навколишнього середовища або роботи в нічний час.

В даному підрозділі буде розглядатися гібридна система акумулювання на основі суперконденсаторів і акумуляторних батарей.

Порівняння характеристик елементів акумулювання енергії представлено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Характеристики систем акумулювання енергії [3]

Характеристика	Суперконденсатори	Свинцево-кислотні АКБ	Літій-іонні АКБ
Енергетична щільність (Втч/кг)	0.05-5	30-50	75-350
Щільність потужності (Вт/кг)	100000	75-300	150-2000
Вартість (\$/кВт)	100-300	300-600	1200-4000
Вартість (\$/кВтг)	300-2000	200-400	600-2500
Саморозряд (%/добу)	20-40	0.1-0.4	0.03-0.3
Циклів розряду\заряду	50000	500-4500	1000-4500
Ефективність	0.75-0.83	0.7-0.9	0.8-0.95
Температура роботи	-40; 75	-5;40	-30;60

Структура гібридної системи акумулювання енергії на основі суперконденсаторів та акумуляторних батарей

Структура гібридної системи акумулювання представлена на рис. 2.19 складається з трьох основних підсистем:

- елементи акумулювання енергії, які включають в себе набір суперконденсаторів і акумуляторних батарей (N_{sc} і N_{bat} відповідно);
- набір двонаправлених перетворювачів постійного струму, виконують функцію узгодження характеристик змінного струму з шиною споживачів, а так само, можуть виконувати балансування і розподіл енергії та потужності заряду і розряду елементів живлення;
- система управління, відповідає за зчитування стану елементів акумулювання енергії, оцінку миттєвих енергетичних вимог до HESS, а так само прийняття рішень по заряду і розряду елементів, розподілу потужності і балансування енергії.



Рис. 2.19 – Структура HESS

Завдання управління енергоспоживанням полягає у підвищенні ефективності роботи системи, продовження терміну служби елементів, задоволенні потреби навантаження, а так само підтримка заряду системи в розумних межах. Правильна система управління повинна знайти оптимальний компроміс між цими завданнями.

У літературі існує безліч методів управління на основі строго заданих правил [], методів нечіткої логіки [], динамічного програмування [], нейронних мереж [].

Імітаційне моделювання

Імітаційна модель HESS розроблена відповідно структурі представленої на рис. 2.20. У розробленій моделі HESS двонаправлений перетворювач постійного

струму використовується для сполучення суперконденсаторів і акумуляторних батарей з шиною постійного струму.

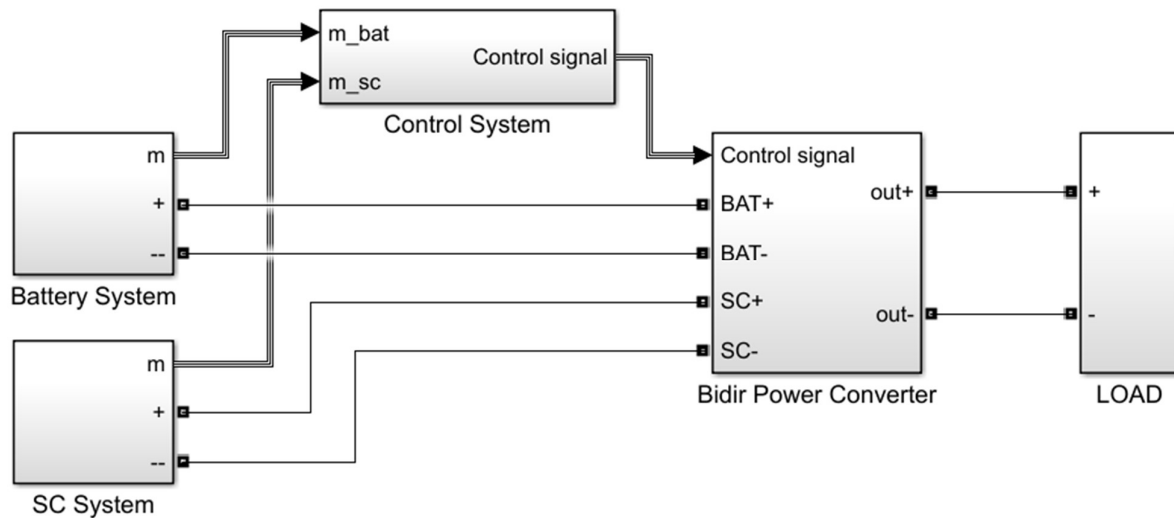


Рис. 2.20 – Імітаційна модель HESS

Блок акумуляторних батарей використовує вбудовану в пакет Matlab/Simulink модель "Generic battery model" яка підтримує безліч характеристик акумуляторних елементів живлення (ємність, внутрішній опір, номінальна напруга тощо) [5].

Блок суперконденсаторів використовує так само вбудовану в пакет Matlab/Simulink модель "Generic Supercapacitor model" яка підтримує введення параметрів суперконденсаторів (ємність, еквівалентну опір, кількість суперконденсаторів в збірці тощо). [6]

Блок двостороннього перетворювача постійного струму спроектований на основі конвертора представленого в роботі [4]. Він складається з індуктивності, двох конденсаторів і двох керуючих МДН-транзистора з інтегрованими діодами, принципова схема представлена на рис. 2.21. Дана схема, що дозволяє струму протікати в двох напрямках в залежності від стану керуючого сигналу, відповідно можливо як розряджати так і заряджати елементи HESS.

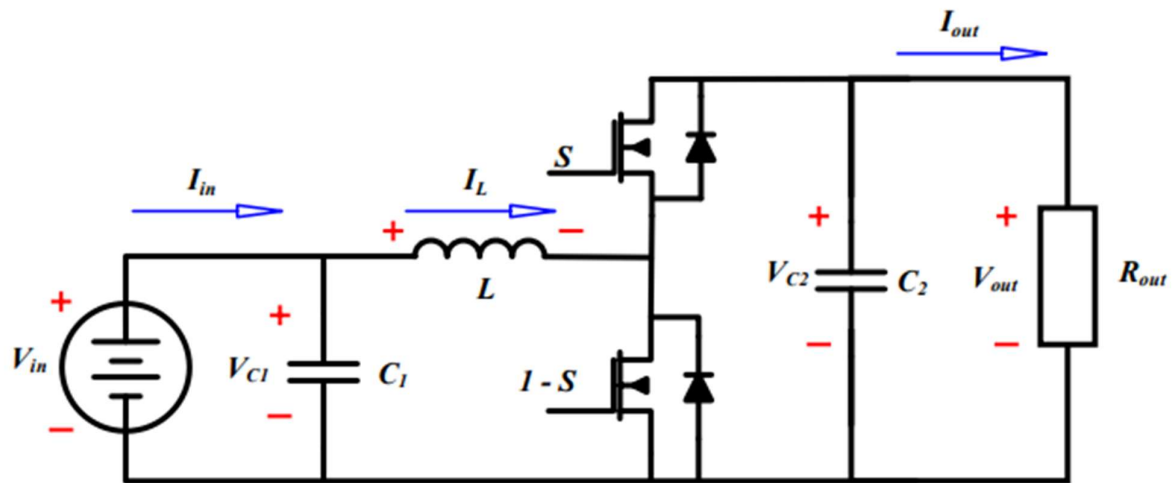


Рис. 2.21 – Двосторонній перетворювач постійного струму

Результати імітаційного моделювання

Імітаційне моделювання виконано в середовищі Simulink для сценарію при якому необхідна енергія від HESS має наступну форму часового ряду в Ватт: [1000 1250 1250 1250 500500]. Результати показані на рис. 2.22.

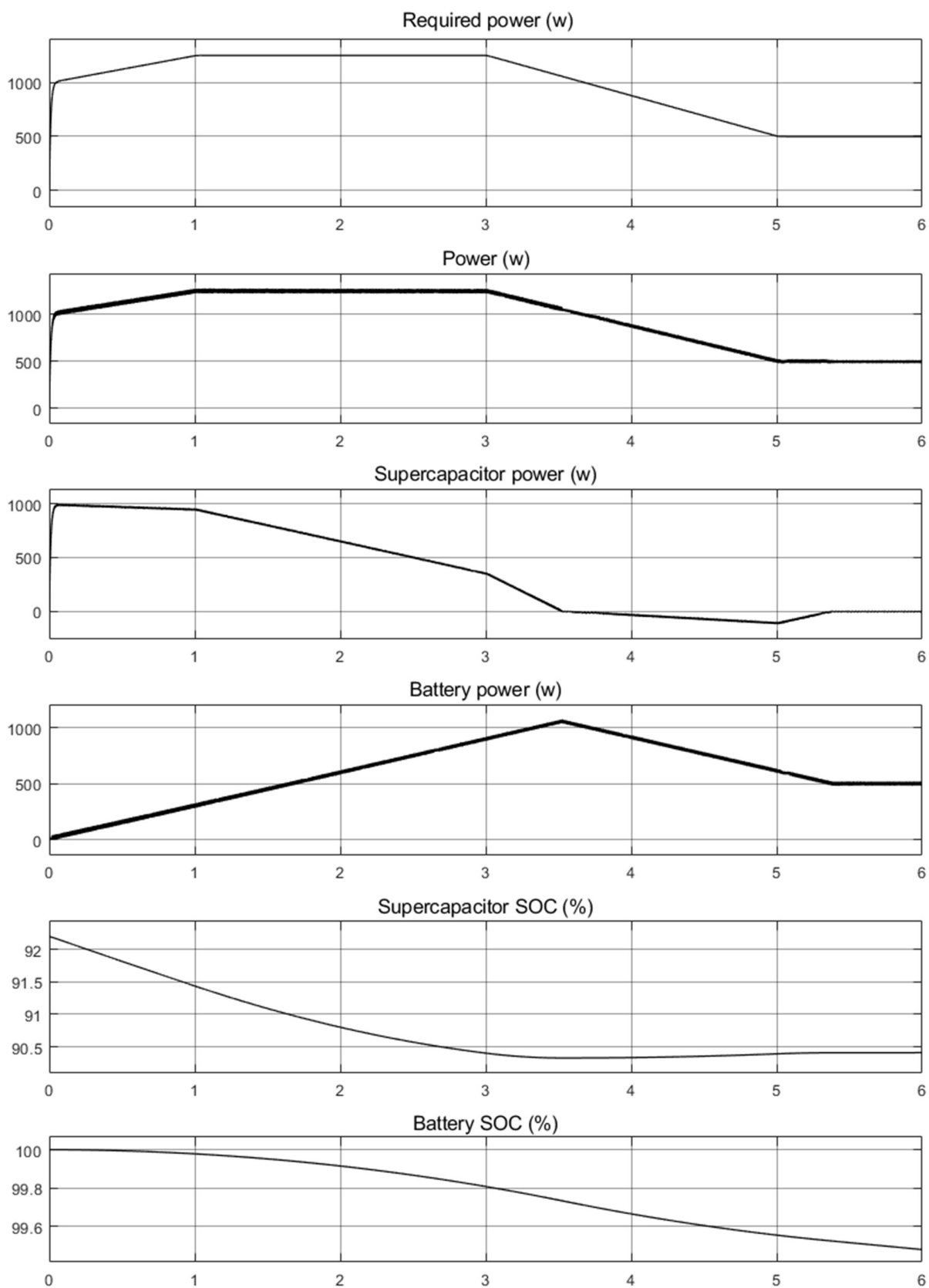


Рис. 2.22 – Результати імітаційного моделювання HESS

Висновки до розділу 2

1. Розроблена структура системи автоматизованого проектування ГСЕС, що дозволяє оптимізувати структуру і параметри ГСЕС на підставі використання методів багатокритеріальної оптимізації, що дозволяє мінімізувати вартість системи, збільшити надійність, мінімізувати дефіцит енергії для споживачів, мінімізувати забруднення навколишнього середовища.

2. Розроблена система імітаційних моделей елементів ГСЕС, до її складу входять елементи СЕС (сонячні панелі, набір перетворювачів постійного та змінного струму), дизель-генератор, гібридна система акумулювання енергії, енергомережу, що дозволяє перевірити результати проектування.

Список використаних джерел у розділу 2

1. Marion, B. (2017) “Numerical method for angle-of-incidence correction factors for diffuse radiation incident photovoltaic modules,” *Solar energy (Phoenix, Ariz.)*, 147(C), pp. 344–348.

2. Lynden, S. L. (2015) *A Simulated annealing global maximum power point tracking method for photovoltaic systems experiencing non-uniform environmental conditions*. University of Tasmania.

3. Khalid, M. (2019) “A review on the selected applications of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for microgrids,” *Energies*, 12(23), p. 4559.

4. Darbali-Zamora, R. *et al.* (2018) “Viability assessment of a real-time simulation model for a residential DC microgrid network to compensate electricity disturbances in Puerto Rico,” in *2018 IEEE ANDESCON*. IEEE, pp. 1–6.

5. *Generic battery model - Simulink* (no date) *Mathworks.com*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html> (Accessed: March 1, 2021).

6. *Implement generic supercapacitor model - Simulink* (no date) *Mathworks.com*. Available at:

<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/supercapacitor.html>
(Accessed: March 1, 2021).

7. *Solar Power Inverter - MATLAB & Simulink* (no date) *Mathworks.com*.
Available at: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/solar-power-inverter.html> (Accessed: March 2, 2021).

Розділ 3. Оптимізація гібридної сонячної енергетичної системи

В даному розділі розглядаються підходи для збільшення продуктивності ГСЕС, так як з одного боку при оптимізації необхідно враховувати одночасно безліч критеріїв (мінімізація витрат, мінімізація шкоди екології, максимізація надійності системи і максимізація використання поновлюваних джерел енергії), а з іншого так само виконувати оптимальне управління системою, в тому числі, з використанням оптимального алгоритму пошуку точки максимальної потужності.

3.1. Оптимізація конфігурації гібридної сонячної енергетичної системи

Гібридні системи останнім часом стають все більш популярними, так як їх, можливо, використовувати в мережевому і автономному режимах. Автономні системи дозволяють впроваджувати їх у віддалених районах, де немає доступу до електричної мережі. Системи, що працюють в мережевому режимі, здатні так само поліпшувати загальну якість для об'єктів соціального значення.

Гібридна сонячна енергетична система (ГСЕС) – це система, яка використовує сонячну енергетичну систему (СЕС) для перетворення сонячної енергії (СЕ) в електричну, в поєднанні з традиційними джерелами енергії. В якості традиційних джерел енергії можуть виступати міська електрична мережа (для продажу і купівлі електричної енергії) та дизельні генератори (ДГ), що використовують дизельне паливо.

Впровадження систем акумулювання енергії (САЕ) з використанням акумуляторних батарей (АКБ) збільшує рівень проникнення ВДЕ та підвищує надійність за рахунок забезпечення балансу в енергосистемі [1].

Підключення САЕ все більшою мірою ускладнює процес проектування ГСЕС, так як виникає додаткове завдання управління потоком енергії. Так само ускладнюється процес моделювання, так як застосування АКБ і ДГ вимагає наявності системи управління для забезпечення енергобалансу [1]. Погано спроектовані системи можуть мати серйозні недоліки, зокрема, неможливість

задовольнити енергетичний попит споживачів системи в критичних ситуація, наприклад, в період пікових навантажень.

Класичні постановки завдань для побудови систем автоматизованого проектування далекі від реальних умов функціонування об'єкта. Не враховуються можливі збої в забезпеченні електроенергії, мінливості погодних умов, внаслідок чого з'являється необхідність надмірності як використовуваного обладнання, так і програмного забезпечення, що викликає додаткові витрати.

Таким чином, актуальним є створення нових підходів для вирішення зазначених проблем, як у постановці задачі, так і в її вирішенні із застосуванням математичного моделювання. Які дають можливість оцінити роботу системи на етапі проектування, що дозволяє оптимізувати вибір комплексу технічних засобів і програмного забезпечення побудованої системи.

Внаслідок зростаючої зацікавленості у ГСЕС та інших видах гібридних систем з ВДЕ зростає і кількість досліджень оптимальної конфігурації. Існує безліч літературних джерел, в яких розглядаються гібридні системи, що використовують ВДЕ. Варіанти інтеграції різних ВДЕ, САЕ докладно описані в роботі [1].

Предложено безліч підходів побудови ГСЕС на основі рішення задачі багатокритеріальної оптимізації (БКО) з використанням еволюційних алгоритмів із застосуванням різних екологічних і техніко-економічних критеріїв [2–5]. Незважаючи на застосування деталізованих математичних моделей елементів ГСЕС для поліпшення якості розрахунку критеріїв, особлива уваги приділяється розробці і впровадженню алгоритмів системи управління в процедуру оптимізації. Такий крок суттєво підвищує якість моделювання і дозволяє враховувати особливості роботи системи.

В роботі [6] формалізовано безліч різних критеріїв, які використовуються при проектуванні, включаючи технологічні, економічні та екологічні. Одночасний, облік великої кількості критеріїв значно ускладнює пошук оптимальної структури ГСЕС, тому вибір та оптимізація кількості критеріїв є окремим завданням. Відповідно, автори визначають методологічні підходи до вирішення задачі пошуку оптимальної конфігурації.

В роботі [7] представлено ГСЕС, яка оптимізована з урахуванням капітальної вартості системи і паливних витрат із застосуванням алгоритму рою частинок. Але автори зупинилися тільки на оцінці економічних критеріїв, що є явним недоліком, так як потрібен додатковий облік безлічі факторів надійності системи. Саме такий підхід використовувався в роботі [8], де авторами використовувався алгоритм для рішення БКО на основі лінійного програмування. Оптимізаційна задача вирішувалася з урахуванням економічних обмежень та обмежень, накладених на купівлю і продаж електроенергії. Представлена модель ГСЕС включала в себе використання ДГ для задоволення попиту в пікові періоди, а таксамо компенсувати недолік генерації енергії фотоелектричної системи. Автори представили результати імітаційного моделювання, які включали в себе роботу всіх компонентів гібридної системи.

У роботі [9] автори провели дослідження використання множини економічних і екологічних критеріїв при проектуванні систем на СЕ з урахуванням підключення до електромережі міста. Але фактор використання САЕ не порушувалося. Наявність даної системи має величезний вплив на результати проектування, а також на значення використовуваних критеріїв.

В роботі [10] використовувався програмний комплекс HOMER (США) для покращення економічних і технічних факторів при проектуванні гібридних систем електромережі великого готелю, що включає 15 будівель. Незважаючи на те, що проєктована система розглядалася для поліпшення якісних характеристик енергомережі, застосування САЕ не розглядалося.

У роботі [11] автори провели оптимізацію структури ГСЕС, використовуючи різні мета-евристичні алгоритми з урахуванням ряду техніко-економічних критеріїв. Набір критеріїв включав: мінімізацію загальної річної вартості системи і витрат на обслуговування, мінімізацію ймовірності втрати живлення. Незважаючи на те, що в роботі детально описано підхід до імітаційного моделювання, як і результати моделювання, запропоноване рішення має істотний недолік. Безліч вибраних критеріїв було узагальнено у вигляді однієї складної цільової функції. Відповідно при вирішенні багатокритеріальної задачі даний підхід не дозволяє охопити всі оптимальні за Парето рішення.

У результаті аналізу досліджень [2–11] можна стверджувати, що багатокритеріальні методи оптимізації, завдяки їх гарній продуктивності з урахуванням компромісів, широко застосовуються для проектування ГСЕС. Найбільш популярним підходом, запропонованим для вирішення таких проблем, є використання генетичних і еволюційних алгоритмів для вирішення БКО, при проектуванні багатьох гібридних енергетичних систем.

Незважаючи на те, що в дослідженнях [2–4, 7, 11] розглядаються ГСЕС, що працюють в автономному режимі, для підвищення надійності також може виконуватися підключення до мережі. У ряді ситуацій даний підхід може призвести до економічної вигоди від продажу відновлюваної електроенергії та зниження вартості системи.

У багатьох практичних завданнях проектні змінні повинні відповідати доступною елементної бази (наприклад, інформація з специфікації сонячних панелей) і, отже, не можуть приймати довільні значення. Обмеження, які повинні бути дотримані для вирішення проблеми, називаються проектними обмеженнями, і формуються виходячи з поставленої задачі. Обмеження при проектуванні системи функціонують як кордону, що накладаються на параметри оптимізації і, отже, є ключем до пошуку оптимального рішення [12].

Систематизація результатів наведених досліджень дозволяє вважати, що при проектуванні ГСЕС потрібно, щоб вартість була мінімальною, виконувалися екологічні норми, система володіла надійністю, за умови задоволення вимог по навантаженню. Таксамо ГСЕС повинна мати можливість підключення до мережі, внаслідок чого її оптимальна конфігурація може відрізнитися на увазі наявності додаткового резерву.

3.1.1. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є оптимізація структури ГСЕС із застосуванням підходів автоматизованого проектування з можливістю роботи як в автономному, так і в незалежній режимах, з одночасним урахуванням технологічних, економічних, екологічних цілей.

Для досягнення поставленої цілі необхідне рішення наступних завдань:

- розробити моделі елементів ГСЕС враховуючи параметри процедури оптимізації, а також формалізувати набір критеріїв для вирішення технологічних, економічних, екологічних цілей;
- розробити алгоритм керування елементами ГСЕС та побудувати відповідні імітаційні моделі, що дозволяють перевірити поведінку заданої структури ГСЕС;
- виконати структурно-параметричний синтез ГСЕС з використанням БКО на основі генетичних алгоритмів з метою практичного підтвердження можливості використання запропонованого підходу для рішення прикладних задач.

3.1.2. Розробка математичних моделей структурних елементів і критеріїв якості гібридної сонячної енергетичної системи

Базова структура ГСЕС (рис. 3.1) складається з набору наступних блоків: сонячна енергетична система (СЕС), дизель-генератор(и), САЕ, мережа і споживачі, які підключені до єдиної шини змінного струму. Управління ГСЕС виконується системою управління, яка отримує інформацію з усіх блоків про їх поточний стан і на основі цих даних стежить за виконанням накладених обмежень. Стан блоків – інформація про внутрішні характеристики блоку (стан заряду АКБ, вимога навантаження блоку споживачів), так і зовнішніх (заміри споживаної/генерується миттєвої потужності).

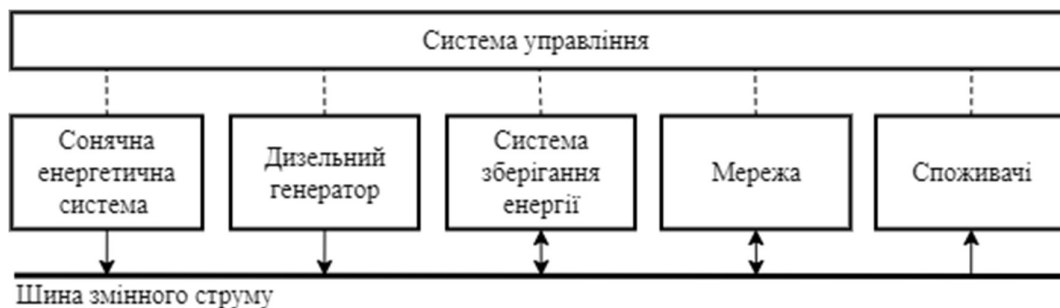


Рис. 3.1 – Структура гібридної сонячної енергетичної системи

САЕ включає в себе набір акумуляторних батарей (АКБ), а також набір двонаправлених перетворювачів для виконання функцій заряду і розряду елементів живлення. Використовується для акумулювання миттєво надлишкової енергії, яка

може бути в подальшому використана при нестачі або відсутності енергії від основних джерел.

Дизельний генератор виступає як блок резерву, активується за сигналом блоку стратегії управління, що забезпечує систему енергією за рахунок використання дизельного палива.

Споживачами виступає набір енергетичних вимоги, що формуються за рахунок аналізу пристроїв кінцевих споживачів системи.

Система управління виконує функції контролю (збір і аналіз телеметричних даних про стан) елементів ГСЕС, їх координацію та управління, щоб задовольнити попит споживачів, захистити систему від перевантажень і оптимізувати продуктивність системи генерації. Логіка управління реалізується за рахунок впровадження алгоритму управління.

Сонячні панелі (СП) широко використовуються завдяки своїй безпеці і відсутності забруднення навколишнього середовища. Припускаючи, що фотоелектрична масив об'єднує N_s панелей послідовно і N_p паралельно, максимальна вихідна потужність може бути розрахована як [13,14]:

$$P_{СП}(t) = N_s N_p P_{СП,СУВ} f_{СП} \frac{G(t)}{G_{СУВ}} (1 + K_{ТР} (T_C(t) - T_{C,СУВ})),$$

де $P_{СП,СУВ}$ – потужність при стандартних умовах випробувань (СУВ) згідно специфікації сонячних панелей; $f_{СП}$ – коефіцієнт втрат потужності, який включає коефіцієнти втрат потужності за забруднення панелей, умов часткового затінення тощо; $K_{ТР}$ – температурний коефіцієнт зміни потужності (характеристики панелі), $T_C(t)$ – поточна температура сонячних панелей; $T_{C,СУВ}$ – температура на СУВ (25C); $G(t)$ – поточна сонячна радіація; $G_{СУВ}$ – константа сонячна радіація при СУВ.

Модель навколишнього середовища. Оскільки для моделювання роботи СП потрібна наявність значень сонячної радіації і температури навколишнього середовища, пропозагаемая модель включає в себе заданий часовий ряд, обмежений терміном служби системи [15]. Так само, значення часового ряду можуть бути згенеровані синтетично [16].

Приклад часового ряду сонячної радіації (рис. 3.2) і температури навколишнього середовища (рис. 3.3) отриманий для Києва за 2015м,

використовуючи програмний комплекс PVGIS розроблений Європейською комісією.

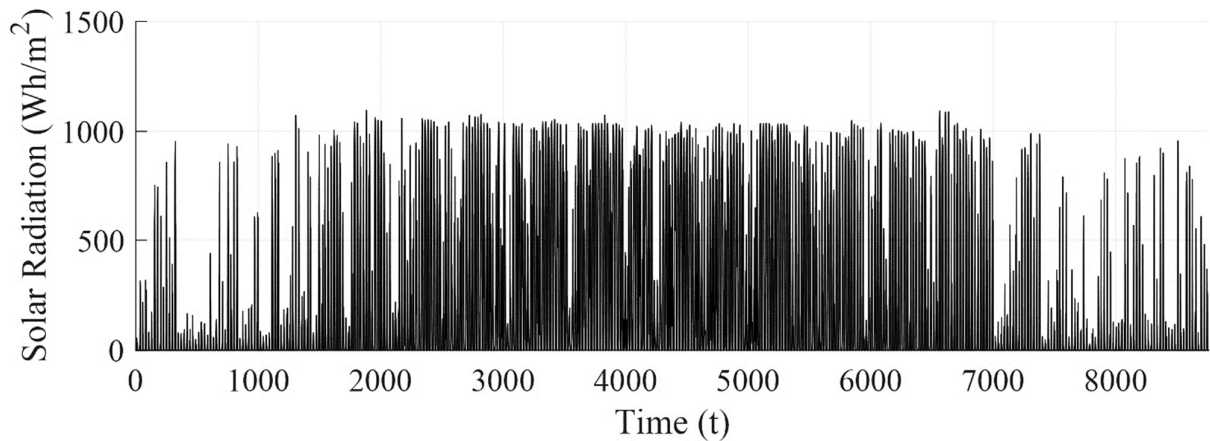


Рис. 3.2 – Доступне сонячне випромінювання на протязі 1 року

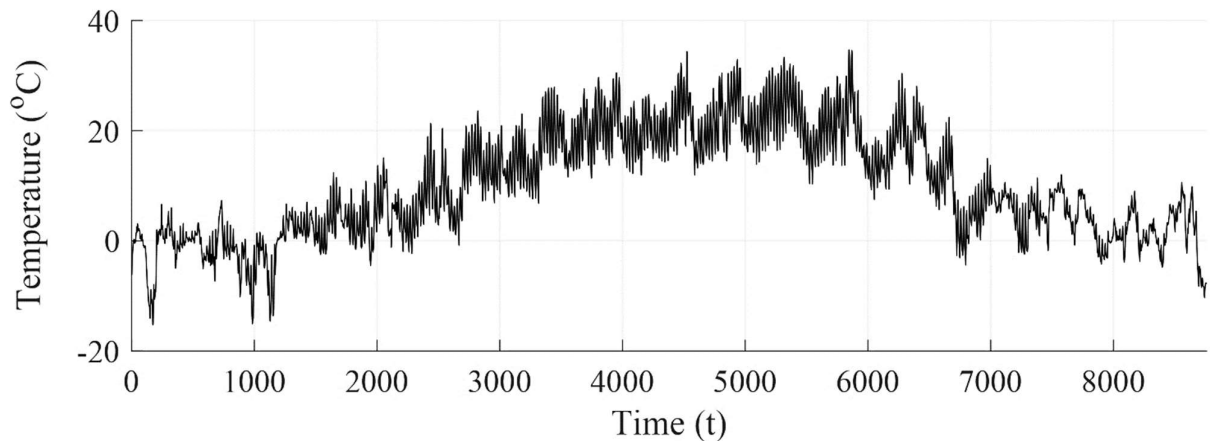


Рис. 3.3 – Температура навколишнього середовища протягом 1 року

Система акумулювання енергії. Акумуляторні батареї часто використовуються в ГСЕС в якості елемента акумулювання. Потужність заряду і розряду залежить не тільки від вимог навантаження, але і від стану заряду [17]. Стан заряду (СЗ) – це рівень заряду АКБ щодо її ємності, одиниці СЗ – відсоткове значення, де 0% – АКБ повністю розряджений, а 100% – повністю заряджений. Під час моделювання СЗ може бути розрахований, використовуючи наступну формулу [18, 19]:

$$S_{\text{АКБ}}(t) = S_{\text{АКБ}}(t - 1) + \frac{E_{\text{АКБ}}(t)}{N_{\text{АКБ}} C_{\text{АКБ}} U_{\text{АКБ}}} \eta_{\text{АКБ}},$$

де $E_{\text{АКБ}}(t)$ – потік енергії в/з акумулятора (позитивний при зарядці і негативний

при розрядці), $\eta_{\text{АКБ}}$ – ефективність заряду/розряду, $N_{\text{АКБ}}$ – кількість АКБ, $Z_{\text{АКБ}}$ – ємність кожного АКБ, $U_{\text{АКБ}}$ – напруга акумулятора.

Модель батареї зберігає значення СЗ між нижньою межею (S_{\min}) і верхньою межею (S_{\max}), щоб забезпечити безпечну роботу і термін служби батареї. Відповідно, потужність заряду і розряду акумулятора визначається як [20]:

$$P_{\text{АКБ}}^{\text{разр}}(t) = \min \left\{ 0, \frac{N_{\text{АКБ}} U_{\text{АКБ}} C_{\text{АКБ}}}{\Delta t} (S_{\min} - S_{\text{АКБ}}(t)) \right\},$$

$$P_{\text{АКБ}}^{\text{зар}}(t) = \max \left\{ 0, \frac{N_{\text{АКБ}} U_{\text{АКБ}} C_{\text{АКБ}}}{\Delta t} (S_{\max} - S_{\text{АКБ}}(t)) \right\},$$

де $N_{\text{АКБ}}$ – кількість батарей, $Z_{\text{АКБ}}$ – ємність кожної батареї, $U_{\text{АКБ}}$ – напруга батареї.

Оскільки кількість циклів заряду-розряду і глибина розряду в кожному циклі впливають, може застосовуватися оцінка терміну служби батареї [21].

Дизельний генератор зазвичай діє як резервне джерело енергії, і його витрата палива D_m визначається як [22]:

$$D_m(t) = (\alpha P_{\text{ДГ}}(t) + \beta P_{\text{ДГ,н}}) N_{\text{ДГ}},$$

де $P_{\text{ДГ,н}}$ і $P_{\text{ДГ}}(t)$ – номінальна та фактична потужність, α і β – коефіцієнти витрати палива, $N_{\text{ДГ}}$ – кількість дизельний генераторів.

Модель навантаження. Як і у випадку температури навколишнього середовища, а також сонячного випромінювання, дані про навантаження можуть бути тимчасовими рядами, обмеженими терміном служби системи [22]. Також можливо, що часові ряди будуть згенеровані програмним шляхом, використовуючи інструмент Artificial Load Profile Generator (ALPG), розроблений Університетом Твенте. Приклад згенерованого ряду для квартири на двох осіб представлений на рис. 3.4.

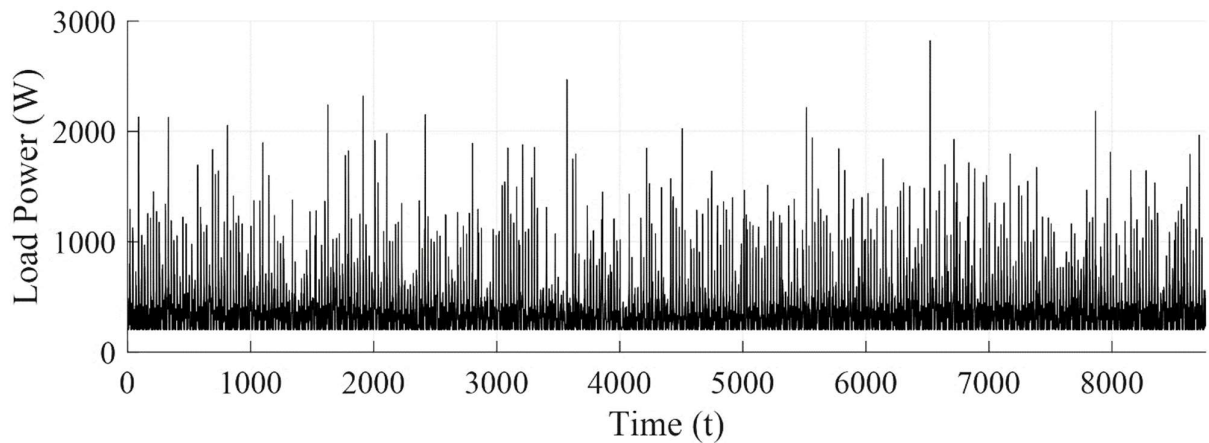


Рис. 3.4 – Миттєва припустиме навантаження на протязі 1 року

Економічним критерієм, прийнятим в даній статті, є загальна вартість системи. Загальна вартість системи – визначається як сума всіх витрат на придбання елементів ГСЕС, їх монтаж, технічне обслуговування, вартість невідновлюваних ресурсів, використовуваних у процесі роботи системи [23], що виражається в наступному вигляді:

$$C_{\text{ГСЕС}} = C_{\text{елем}} + C_{\text{обсл}} + C_{\text{палив}} + C_{\text{ес}},$$

де $C_{\text{елем}}$ – вартість елементів ГСЕС, $C_{\text{обсл}}$ – вартість обслуговування і заміни елементів, $C_{\text{палив}}$ – вартість палива, $C_{\text{ес}}$ – вартість роботи з мережею.

Вартість всіх елементів системи визначається у вигляді:

$$C_{\text{ел}} = N_{\text{СП}} C_{\text{СП}} + N_{\text{ДГ}} C_{\text{ДГ}} + N_{\text{АКБ}} C_{\text{АКБ}} + C_{\text{доп}},$$

де $N_{\text{СП}}$, $Z_{\text{СП}}$ – кількість і вартість сонячних панелей, $N_{\text{ДГ}}$, $Z_{\text{ДГ}}$ – кількість і вартість дизель-генераторів, $N_{\text{АКБ}}$ і $Z_{\text{АКБ}}$ – кількість і вартість акумуляторів, $Z_{\text{двп}}$ – вартість допоміжного обладнання (перетворювачі постійного струму, інвертори тощо).

Вартість палива, необхідного для роботи дизель-генератора визначається у вигляді:

$$C_{\text{палив}} = \sum_t D_T(t) C_T^L,$$

де $D_T(t)$ – витрата палива за період часу t , C_T^L – вартість палива.

Нормальна робота ГСЕС залежить від терміну служби сонячних панелей і передбачає обслуговування (періодичну контактну чистку панелей від бруду). У разі виходу з ладу -- заміну обладнання, що вимагає додаткових витрат.

Вартість роботи з мережею – це загальна вартість купівлі-продажу електроенергії з урахуванням обмежень прийнятності тарифу і тарифних зон:

$$C_{\text{ел}} = \sum_t C_{\text{ел}}(t)$$

$$C_{\text{эл}}(t) = \begin{cases} C_{\text{эл}}^{T1} E_{\text{эс}}(t) & P_{\text{д}}(t) > 0, \quad t \in T_{T1} \\ C_{\text{эл}}^{T2} E_{\text{эс}}(t) & P_{\text{д}}(t) > 0, \quad t \in T_{T2}, \\ C_{\text{эл}}^{T3} E_{\text{эс}}(t) & P_{\text{д}}(t) < 0, \end{cases}$$

де $E_{\text{эл}}(t)$, $E_{\text{эс}}(t)$ – вартість і обсяг електроенергії за проміжок часу t , $C_{\text{эл}}^{T1}$, $C_{\text{эл}}^{T2}$, $C_{\text{эл}}^{T3}$ – тарифи покупки (двох зонна тарифікація T1 – день, T2 – ніч) і продажу електроенергії (T3 – зелений тариф), $P_{\text{д}}(t)$ – дефіцит потужності.

Вартість обслуговування і заміни елементів:

$$C_{\text{обсл}} = \sum_t \sum_i C_{\text{обсл},i}(t),$$

де $C_{\text{обсл},i}$ – вартість обслуговування елемента ГСЕС протягом заданого часу t .

Екологічний критерій може бути розрахований на основі викидів залишків робочого палива з ДГ. Викиди CO_2 є одним з екологічних критеріїв, пов'язаних з роботою резервного джерела живлення дизельного генератора. Розрахунок викидів розраховується наступним чином [24]:

$$CO_{2\text{ем}} = \sum_t P_{\text{ДГ}}(t)K,$$

де K - коефіцієнт викидів (г/кВт), $P_{\text{ДГ}}$ – потужність (Вт) дизельгенератора в момент часу t .

Ще одним екологічним критерієм, є кількість використаної непоновлюваної енергії, це – енергія, отримана з мережі, а також при використанні дизельного генератора(ів):

$$E_{NRE} = \sum_t E_{\text{эс}}^+(t) + E_{\text{ДГ}}(t),$$

де $E_{\text{эс}}^+$ – куплена електроенергія з мережі, $E_{\text{ДГ}}$ – енергія, що виробляється дизельними генераторами.

Надійність електропостачання споживачів відіграє життєво важливу роль уследствие того, що поновлювані джерела енергії не є постійними за своєю

природою. Відповідно, при підключенні ГСЕС до енергетичної мережі споживача, технічної метою буде є мінімізація дефіциту енергії. Дефіцит енергії – критерій, який використовується для вимірювання надійності системи, який вимірює величину дефіциту енергії за весь період експлуатації:

$$E_d = \sum_t E_n(t) - E_{\text{дост}}(t),$$

де E_n – енергія, необхідна споживачам (навантаження), $E_{\text{дост}}$ – енергія, що доступна в ГСЕС, забезпечується системою акумуляування енергії, СЕС і ДГ.

3.1.3. Розробка алгоритму управління елементами гібридної сонячної енергетичної системи

В автономному режимі система не підключена до мережі. Енергія, вироблена фотоелектричними панелями, безпосередньо подається на навантаження. Якщо енергія перевищує загальні вимоги по навантаженню, надлишкова енергія накопичуватиметься в батареях. Якщо ГСЕС не може задовольнити вимоги по навантаженню, батареї будуть використовуватися для підтримки потужності з урахуванням глибини розряду. Якщо раніше, спостерігається нестача електроенергії, в якості додаткового джерела енергії використовуються дизельні генератори. При використанні даного режиму мається на увазі додаткове обмеження: $E_{\text{св}}(t)=0$, яке обмежує зв'язок з електромережею.

У режимі підключення до електромережі, коли вироблена енергія перевищує необхідну кількість, а також батареї заряджені до максимуму, надлишкова енергія буде продана в мережу, щоб отримати прибуток та компенсувати вартість ГСЕС. Якщо вироблена енергія не може задовольнити навантаження, як і у випадку автономної роботи, використовуються акумуляторні батареї і дизельний генератор. Якщо все-таки батареї з дизель-генератором не зможуть покрити дефіцит енергії, необхідна потужність буде закуплена у електромережі з урахуванням сприятливої тарифної зони і тарифних обмежень.

На основі опису режимів роботи ГСЕС, пропонується алгоритм системи управління з набором заданих правил, псевдокод алгоритму представлений нижче по тексту.

Ініціалізація моделювання (введення параметрів і обмежень, що накладаються)

Для кожного t з кроком Δt в інтервалі $[0; T]$

Розрахунок потужності СЕС: $P_{СП}(t)$

Якщо $P_{СП}(t) > P_n(t)$ (є надлишкова потужність)

Задіяти заряд системи акумулювання енергії

Оцінка потужності заряду АКБ: $P_{АКБ}(t)$

Оцінка нового СЗ: $S_{АКБ}(t)$

Якщо $S_{АКБ}(t) < S_{max}$

Провести заряд АКБ

Інакше

Розрахунок та продаж невикористаної енергії в електромережу: $E_{ec}(t)$

Розрахунок прибутку з продажу: $Z_{ec}(t)$

Інакше (немає надлишкової потужності)

Оцінити дефіцит потужності $P_\delta(t)$

Якщо $P_\delta > 0$ (існує дефіцит)

Задіяти розряд системи акумулювання енергії

Оцінка потужності розряду: $P_{АКБ}(t)$

Оцінка нового СЗ: $S_{АКБ}(t)$

Якщо $S_{АКБ}(t) > S_{min}$

Провести розряд АКБ

Корекція дефіциту потужності: $P_\delta(t) = P_\delta(t) - P_{АКБ}(t)$

Якщо $P_\delta(t) > 0$ (існує дефіцит)

Задіяти дизельний генератор $P_{ДГ}(t)$

Корекція дефіциту потужності: $P_\delta(t) = P_\delta(t) - P_{ДГ}(t)$

Якщо $P_\delta(t) > 0$ (існує дефіцит)

Задіяти покупку дефіциту у електромережі

Якщо $c_{\text{за}}(t) < c_{\text{за}}^{\text{max}}$ (тариф прийнятний)

Зробити покупку електроенергії $P_{ec}(t)$

Розрахунок $E_{NRE}(t)$

Корекція дефіциту потужності: $P_\delta(t) = P_\delta(t) - P_{ec}(t)$

Розрахунок кінцевого дефіциту енергії $E_\delta(t)$

Розрахунок обслуговування та зносу елементів ГСЕС

Представлений алгоритм управління дозволяє зв'язати всі енергетичні моделі та моделі стану елементів ГСЕС. В результаті даної інтеграції стає можливим виконати імітаційне моделювання для періоду часу T з заданою дискретністю (кроком) Δt .

3.1.4. Структурно-параметричний синтез гібридних сонячних енергетичних систем з використанням багатокритеріальної оптимізації

Основними критеріями при БКО в процесі проектування виступають: загальна вартість системи ($Z_{ГСЕС}$), кількість викидів CO_2 ($EM_{ДГ}$), загальний дефіцит енергії (E_d) і використання відновлюваної енергії (E_{NRE}).

В результаті завдання БКО представляється у вигляді:

$$\text{minimize } (C_{ГСЭС}, EM_{ДГ}, E_d, E_{NRE}),$$

параметри процедури оптимізації: $N_{СП}$, $N_{АКБ}$, $N_{ДГ}$; з урахуванням накладених обмежень на елементи ГСЕС:

$$S_{min} \leq S_{АКБ}(t) \leq S_{max},$$

$$|P_{АКБ}(t)| \leq P_{АКБ,зар},$$

$$|P_{АКБ}(t)| \leq P_{АКБ,разр},$$

$$P_{ДГ}(t) \leq P_{ДГ,н},$$

$$C_{эл}(t) \leq C_{эл}^{max},$$

де $S_{АКБ}(t)$ – стан заряду АКБ повинно бути в заданих допустимих пресправах (S_{min} ; S_{max}), $P_{АКБ}(t)$ – миттєва потужності заряду\розряду АКБ повинна не перевищувати допустиму максимальну потужність заряду ($P_{АКБ,зар}$) і розряду ($P_{АКБ,разр}$), $P_{ДГ}(t)$ – потужність дизельного генератора не повинна перевищувати номінальну потужність ($P_{ДГ,н}$), $C_{эл}(t)$ – тариф на купівлю електроенергії в момент часу t не повинен перевищувати максимальну допустиму тариф ($C_{эл,max}$).

Існує безліч стохастичних алгоритмів оптимізації багатокритеріальних, таких як NSGA-II, SPEA2, які зберігають архів найкращих знайдених особин на кордоні Парето. Ці два алгоритму безпосередньо конкурують між собою, оснащені механізмом підтримки різноманітності і використовують принцип елітарності. Але алгоритм NSGA-II має меншу обчислювальну складність.

Розроблений ряд моделей, алгоритм системи управління ГСЕС були використані для створення системи імітаційного моделювання в середовищі MATLAB. Для вирішення завдання БКО використовувався генетичний алгоритм NSGA-II с розміром популяції равним 100.

Генетичний алгоритм сортування без домінування II (NSGA-II) має наступні особливості: використовує принцип елітарності, тісний дистанцію і підкреслює недомінуючі рішення. Алгоритм NSGA-II детально описаний у роботі [11].

Оператором схрещування обраний цілочисельний імітуючий двійковий кросовер, з наступними параметрами: індекс розподілу дорівнює 20, швидкість 0.8. Оператором мутації була обрана цілочисельна поліноміальна мутація з індексом розподілу 20 і швидкістю 0.33. Відбір особин проводився за рахунок використання бінарної турнірної селекції.

ГСЕС проектується використовуючи історичні дані про довкілля для м. Київ (Україна). Використовуючи програмний комплекс PVGIS розроблений Єврокомісією, були отримані часові ряди для 2015р. Сонячної радіації (рис. 3.2), а також температури навколишнього середовища (рис. 3.3). Використовуючи інструмент ALPG розроблений Університетом Твенте, був згенерований тимчасовий ряд вимог до потужності для квартири з двома дорослими мешканцями, який представлений на рис. 3.4.

Набір вхідних параметрів для етапу оптимізації включає інформацію щодо вартості та обслуговуванні елементів ГСЕС (табл. 3.1), параметрів елементної бази ГСЕС (табл. 3.2).

Таблиця 3.1

Інформація о вартості елементів гібридної сонячної енергетичної системи

Елемент	Вартість (шт.)	Технічне обслуговування (за місяць)
Сонячні батареї	200	5
Акумулятори	100	10
Дизель-генератор	800	20
Конвертер	300	10
Інвертор	350	10

Таблиця 3.2

Параметри конфігурації елементів гібридної сонячної енергетичної системи

Параметр	Значення
Параметри СЕС	
Коефіцієнт втрат потужності (f_{sp})	0,85

Потужність панелі при СУВ ($P_{СП,СУВ}$)	320Вт
Температурний коефіцієнт зміни потужності (K_{TR})	-0,35 %/°C
Параметри САЕ	
Ємність АКБ ($Z_{АКБ}$)	225Ач
Напруга на акумуляторі ($U_{АКБ}$)	12В
ККД перетворення система акумуляування енергії ($\eta_{АКБ}$)	0,98
Мінімальний рівень СЗ (S_{min})	10%
Максимальний рівень СЗ (S_{max})	95 %
Параметри ДГ	
Номінальна потужність дизельного генератора ($P_{ДГ,н}$)	1000Вт
Коефіцієнт витрати палива (α)	0,08
Коефіцієнт витрати палива (β)	0,25
Коефіцієнт викидів дизельного генератора (K_{CO_2})	2,8
Ціна дизельного палива ($Z_{топл}$)	1%/л
Параметри електросеті	
Купівля електроенергії, денний тариф ($C_{эл}^{T1}$)	0,062\$/кВтГ
Купівля електроенергії, нічний тариф ($C_{эл}^{T2}$)	0,031\$/кВтГ
Купівля електроенергії, максимальна ціна ($C_{эл}^{max}$)	0,04\$/кВтГ
Продаж електроенергії, зелений тарифу ($C_{эл}^{T3}$)	0,15\$/кВтГ
Параметри моделювання	
Моделювання часу (T)	8760г
Крок моделювання (Δt)	1р

Рішення оптимізаційної задачі пошуку оптимальної структури ГСЕС в мережевому режимі проводиться в двох варіантах: з активованим і деактивованим обмеженням (20), яке регулює максимально допустимий тариф для купівлі електроенергії. У разі, якщо це обмеження деактивовано, ГСЕС в мережевому режимі може вільно компенсувати дефіцит енергії за рахунок купівлі електроенергії. Якщо це обмеження буде активовано, і виставлено на кордоні денний і нічний зони тарифікації (табл. 3.2), тоді ГСЕС буде компенсувати дефіцит тільки в нічний час доби, так як денний тариф буде неприйнятний для покупки.

Як було сказано раніше, для того щоб провести оптимізацію ГСЕС в автономному режимі, слід активувати додаткове обмеження $E_{ec}(t)=0$.

Виконавши процедуру оптимізації, знайдені рішення, представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Результати структурної оптимізації ГСЕС

$N_{СП}$	$N_{АКБ}$	$N_{ДГ}$	$C_{ГСЭС}$	$EM_{ДГ}$	E_{δ}	E_{NRE}
Автономний режим						
19	7	2	15780	950	0	339470
Мережевий режим ($C_{ел}^{max} = 1\\$/кВтг$)						
14	6	0	8523	0	0	483924
Мережевий режим ($C_{ел}^{max} = 0.04\\$/кВтг$)						
4	1	2	7726	4935	1773	1762618

Відповідні множини Парето, сформовані в результаті процедури оптимізації, представлені на рис. 3.5–3.7.

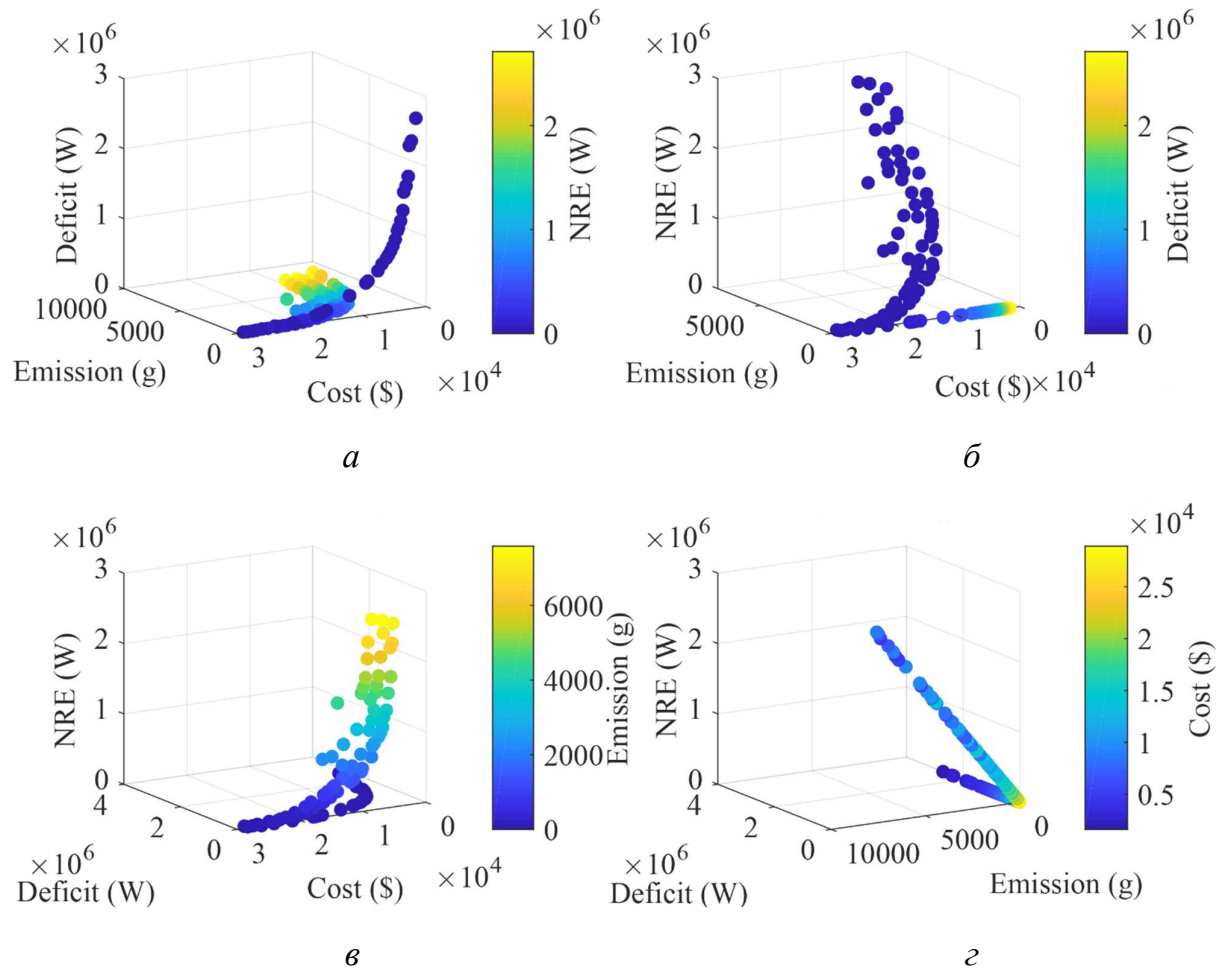


Рис. 3.5 – Проекції множини Парето (оптимізація гібридної сонячної енергетичної системи для незалежного режиму): *a* – простір критеріїв вартість – емісія CO_2 – дефіцит енергії; *б* – простір критеріїв вартість – емісія CO_2 – використання

невідновлюваної енергії; ν – простір критеріїв вартість – дефіцит енергії – використання невідновлюваної енергії; ζ – простір критеріїв емісія CO_2 – дефіцит енергії – використання невідновлюваної енергії

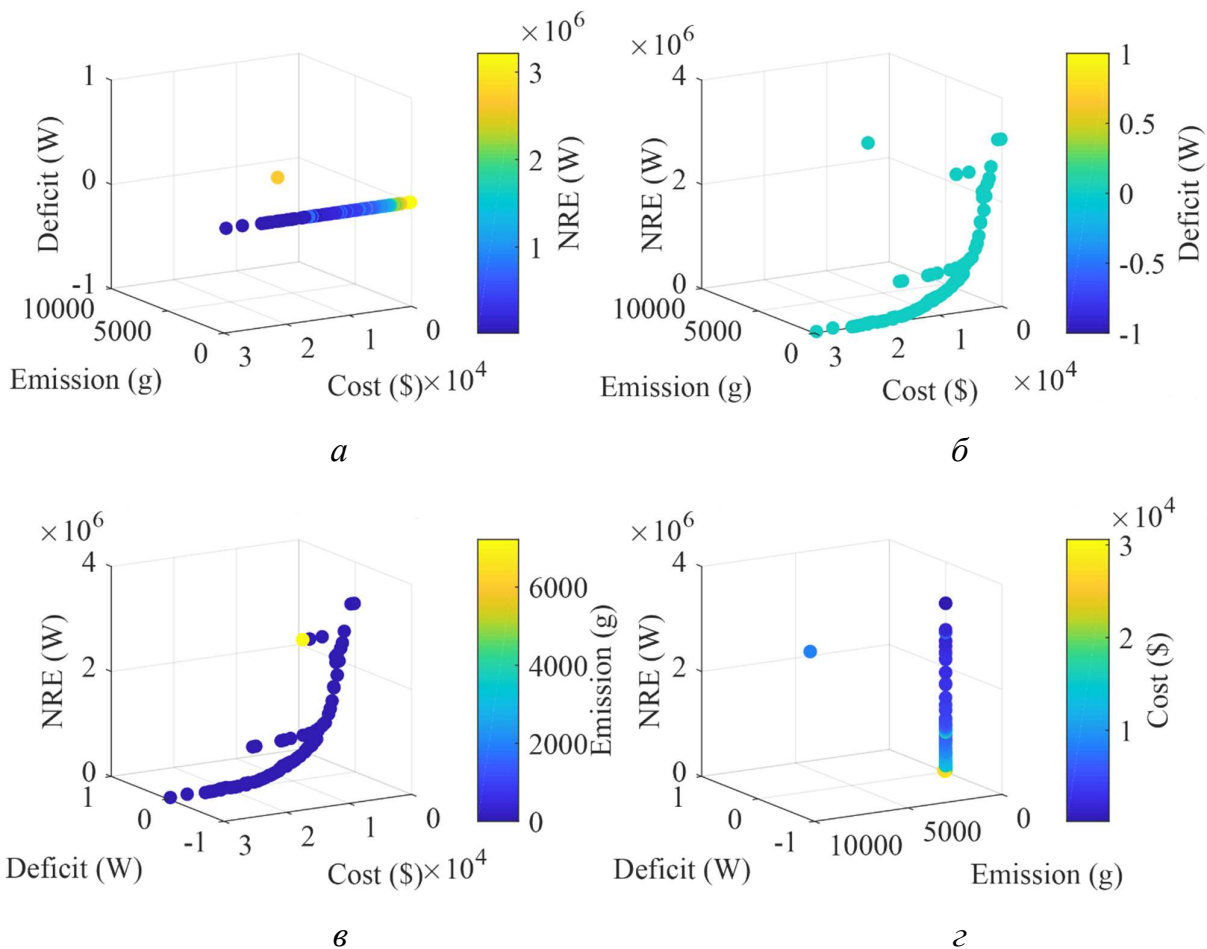


Рис. 3.6 – Проекції множини Парето (оптимізація гібридної сонячної енергетичної системи для мережевого режиму без обмежень на купівлю електроенергії): *a* – простір критеріїв вартість – емісія CO_2 – дефіцит енергії; *б* – простір критеріїв вартість – емісія CO_2 – використання невідновлюваної енергії; *в* – простір критеріїв вартість – дефіцит енергії – використання невідновлюваної енергії; *з* – простір критеріїв емісія CO_2 – дефіцит енергії – використання невідновлюваної енергії

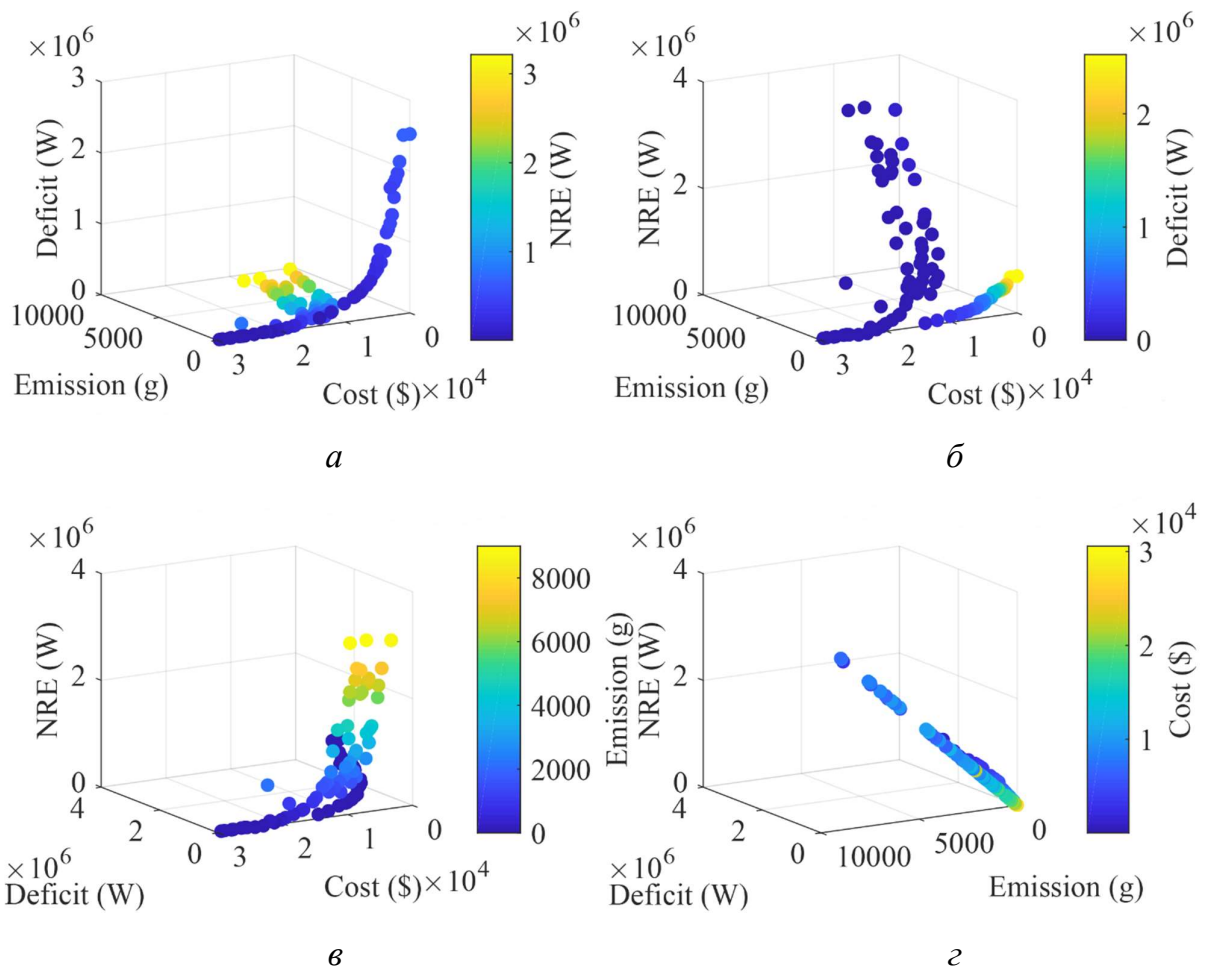


Рис. 3.7 – Проекції множини Парето (оптимізація гібридної сонячної енергетичної системи для мережевого режиму з обмеженнями на купівлю електроенергії за денним тарифом): *a* – простір критеріїв вартість – емісія CO_2 – дефіцит енергії; *б* – простір критеріїв вартість – емісія CO_2 – використання невідновлюваної енергії; *в* – простір критеріїв вартість – дефіцит енергії – використання невідновлюваної енергії; *г* – простір критеріїв емісія CO_2 – дефіцит енергії – використання невідновлюваної енергії

Так як для кожного проміжного рішення при оптимізації проводиться моделювання року роботи, на рис. 3.8-3.10 відображені результати роботи вищевказаних рішень.

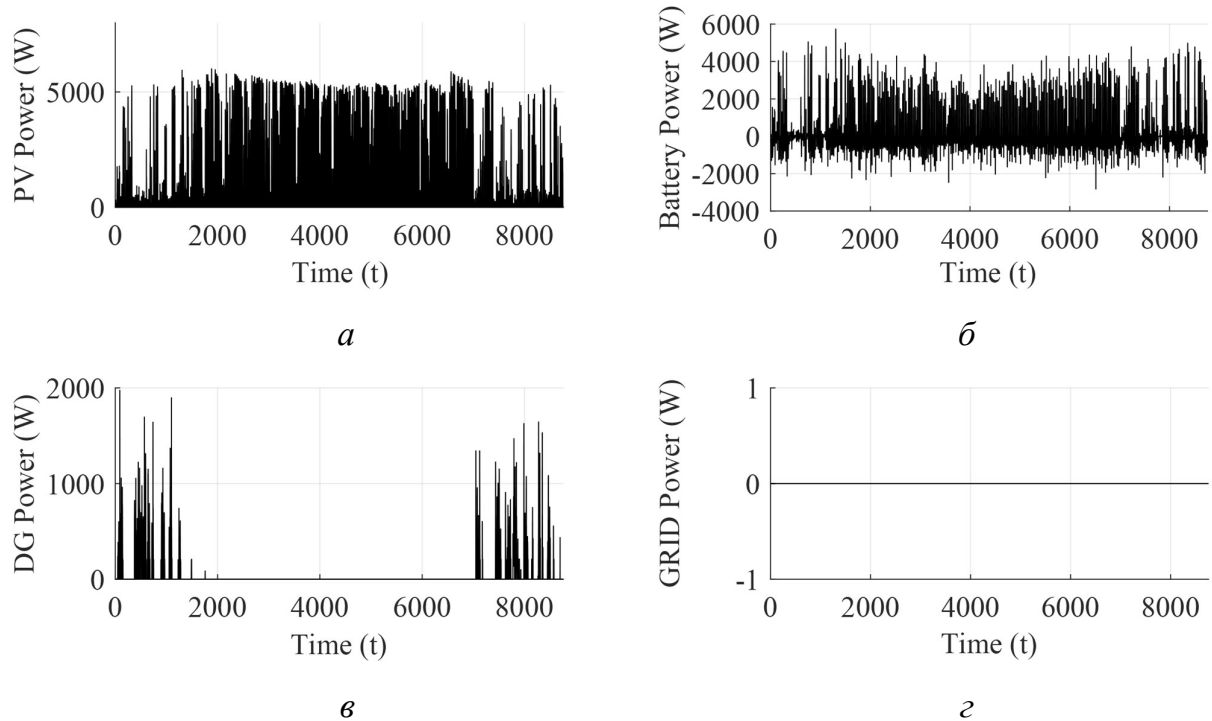
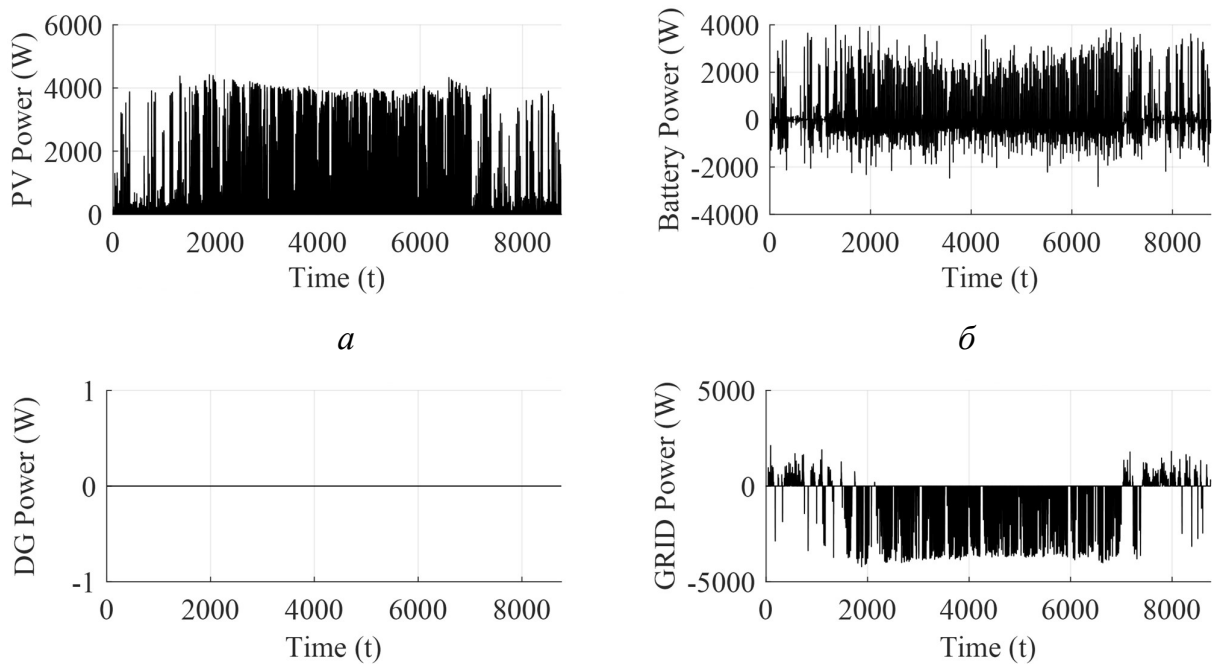


Рис. 3.8 – Моделювання року роботи гібридної сонячної енергетичної системи (запропоноване рішення в незалежному режимі): *a* – потужність сонячної енергетичної системи; *б* – потужність системи акумулювання енергії; *в* – фактична потужність дизельного генератора; *г* – потужність взаємодії з електромережою



*в**г*

Рис. 3.9 – Моделювання року роботи гібридної сонячної енергетичної системи (запропоноване рішення в мережевому режимі без обмежень на купівлю електроенергії): *а* – потужність сонячної енергетичної системи; *б* – потужність системи акумулявання енергії; *в* – фактична потужність дизельного генератора; *г* – потужність взаємодії з електромережою

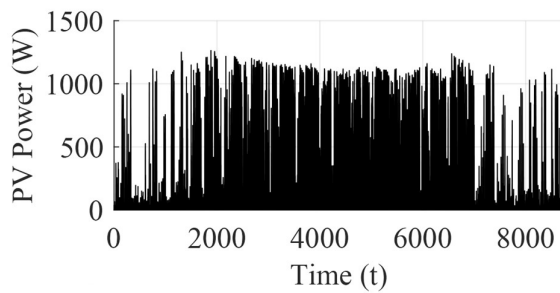
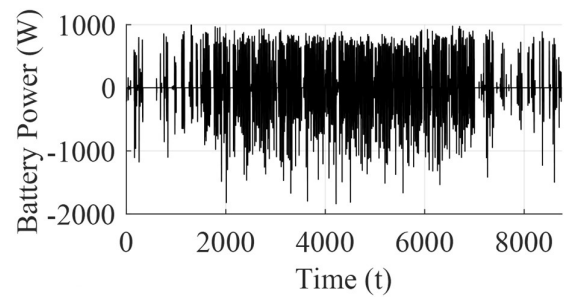
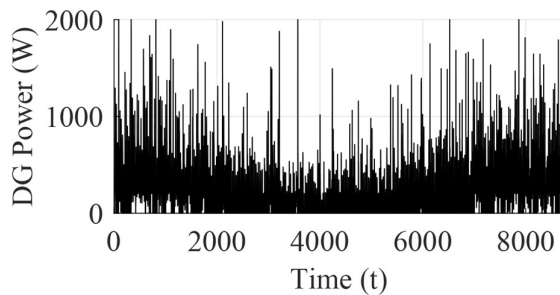
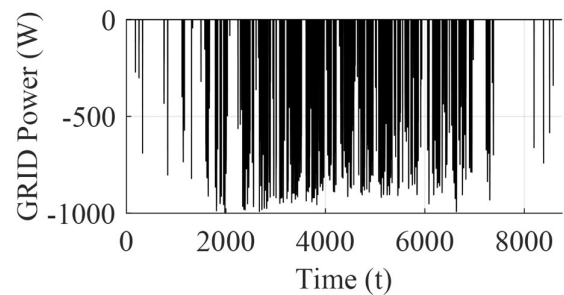
*а**б**в**г*

Рис. 3.10 – Моделювання року роботи гібридної сонячної енергетичної системи (запропоноване рішення в мережевому режимі з обмеженням на купівлю електроенергії за денним тарифом): *а* – потужність сонячної енергетичної системи; *б* – потужність системи акумулявання енергії; *г* – фактична потужність дизельного генератора; *п* – потужність взаємодії з електромережою

Дані представлені в результатах включають часові ряди миттєвої потужності кожної з підсистем: СЕС, ДГ, САЕ, ЕМ; що дозволяє проектувальнику оцінити роботу ГСЕС.

3.1.5. Результати застосування багатокритеріальної оптимізації в задачі автоматизованого проектування сонячних енергетичних систем

Отримані результати пояснюються наступними моментами. Введенням додаткових критеріїв: мінімізація дефіциту енергії, мінімізація використання невідновлюваних джерел енергії, мінімізація вартості системи, мінімізація викидів CO_2 . Моделі та часові ряди дозволяють врахувати сезонні, статистичні дані, умови експлуатації, на основі історичних даних. Енергетичні моделі за умови наявності алгоритму управління ГСЕС дозволяють провести математичне моделювання роботи системи, внаслідок чого можлива точна оцінка критеріїв. Використання БКО з генетичним алгоритмом дозволяє отримати Парето-оптимальні точки, що дає проектувальнику висловити свої уподобання з отриманим рішенням.

Отримані результати структурної оптимізації ГСЕС, представлені в табл. 3.3, свідчать про те, що запропонована процедура автоматизованого проектування з застосуванням підходу багатокритеріальної оптимізації дозволяє проектувальнику знаходити субоптимальні структури ГСЕС. Отримані в результаті БКО множини Парето (рис. 3.5-3.7), дозволяють знайти таку оптимальною структуру ГСЕС, при якій значення кожного критерію, що характеризує систему, не може бути поліпшена без погіршення інших. Сам же проектувальник, на підставі цих даних, може прийняти рішення, оцінивши безліч критеріїв для вибору оптимальної структури, базуючись на поставлених задачах.

Наприклад, при проектуванні ГСЕС у віддаленій районі в незалежному режимі бажано щоб ГСЕС не мала дефіциту енергії, викиди CO_2 не перевищували строгий поріг з урахуванням обмеження бюджету. У результаті аналізу отриманих результатів, виявляється, що для того, щоб проектована система під час роботи не мала дефіциту енергії, потрібно перевищити бюджет. Дана умова неможливо виконати, відповідно, пошук рішення зміщується у бік пошуку компромісу за рахунок погіршення інших критеріїв, в тому числі і екологічних. Результати енергетичного моделювання представлені на рис. 3.8 для обраної оптимальної структури ГСЕС в незалежному режимі. Якщо є можливість підключення до енергомережі і продажу електроенергії в цілях отримання прибутку, розраховане

нове Парето-безліч (рис. 3.6) з збереженням параметрів проектування. На основі проведеного аналізу, обрано нове субоптимальне рішення, результати енергетичного моделювання представлені на рис. 3.8. Дане рішення володіє відносною дешевизною, не використовує ДГ, так як мережа виступає основним резервним джерелом, що дозволяє прибрати повністю викиди CO_2 і дефіцит енергії. Використання невідновлюваної джерела енергії все так само присутній, так як компенсація дефіциту енергії відбувається за рахунок мережі. Для перевірки можливості додаткового зниження вартості системи, за рахунок заборони закупівлі електроенергії з денним тарифом (закупівля можлива тільки в нічний час за нічним тарифом). Вводиться додаткове обмеження, в результаті аналізу множини Парето (рис. 3.7), виявляється, що компромісне рішення знайти неможливо для заданих параметрів проектування. Зниження вартості можливе тільки з урахуванням повернення використання ДГ, частковою відмовою від СЕ для зменшення вартості системи і погіршенням всіх екологічних критеріїв. Результати моделювання отриманого рішення показано на рис. 3.10.

Для вирішення задачі автоматизованого проектування використаний цілий ряд нових критеріїв. В якості використовуваних математичних моделей використані як динамічні, так і статичні моделі, часові ряди, що описують мінливість умов експлуатації і поведінку (енергетичні вимоги) споживачів. Реалізація нового підходу автоматизованого проектування дозволило на етапі проектування промодельовати можливі ситуації роботи гібридної сонячної енергетичної системи, а саме: енергетичний баланс усіх елементів системи. Для вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації використовується Парето-оптимізації, що дозволяє проектувальнику визначити найбільш оптимальну структуру системи в рамках розв'язуваної задачі.

Запропонований інструмент автоматизованого проектування (САПР), із застосуванням БКО на основі генетичного алгоритму NSGA-II володіє перевагою швидкого розрахунку безлічі рішень, що дозволяє переглядати та обирати будь-які рішення без значних розрахункових затримок.

Очевидними обмеженнями САПР ГСЕС є деталізація використовуваних моделей, а також набір спочатку заданих критеріїв. Деталізація моделей обмежує

точність моделювання, але, з іншого боку, зменшує час розрахунків і є певним паритетом.

Необхідно зазначити, що запропонований метод пошуку, в силу особливостей рішення БКО, не надає найкраще рішення, а лише так зване субоптимальне. Даний факт свідчить про очевидний недолік підходу, що вимагає від проектувальників розуміння поставлених завдань при проектуванні для прийняття аналітичного рішення.

Дані обмеження є одночасно і недоліками поточного дослідження. Будь-яка САПР зобов'язана надавати максимальну гнучкість на етапі проектування, для того щоб оцінити вплив різноманітних параметрів на результат проектування. Так як набір критеріїв, алгоритм БКО, алгоритм управління ГСЕС, моделі елементів ГСЕС строго задані, даний фактор позбавляє САПР бажаної гнучкості. В перспективі, слід запропонувати більш деталізовані моделі, що дозволить на етапі проектування вибирати між швидкістю і точністю. Ввести базу даних критеріїв, альтернативних алгоритмів управління і моделей ГСЕС.

Розвитком поточної роботи може служити порівняльне дослідження алгоритмів БКО, швидкості роботи і вплив на отримані результати. Розвитком же експериментальної частини, полягає в поліпшенні програмної та математичної складової САПР ГСЕС, для зняття всіх вище зазначених обмежень. Пов'язане з їх усуненням напрямок подальшого розвитку САПР повинно бути орієнтовано на визначення точного набору критеріїв з бази даних відповідно до поставлених завдань.

3.2. Відстеження точки максимальної потужності в умовах часткового затінення з використанням нового удосконаленого алгоритму мінного вибуху

Фотоелектрична енергія (ФЕ) є одним з найбільш затребуваних джерел енергії завдяки своїй доступності, стійкості, простоті обслуговування та екологічності. Найважливішими проблемами фотоелектричних систем є низька ефективність перетворення та оптимальне використання наявної потужності.

Ефективність перетворення можна покращити, використовуючи нові матеріали та конструкції під час виробництва фотоелементів. Висока залежність від параметрів навколишнього середовища (таких як опромінення, температура навколишнього середовища) та нелінійних ВАХ (I-V) та кривої потужності (P-V) створює проблему оптимального вилучення наявної потужності. Наприклад, із збільшенням рівня опромінення вихідна потужність збільшується, однак при одночасному підвищенні температури сонячних панелей вихідна потужність зменшується. Виходячи з цього, фотоелементи мають досить складний взаємозв'язок між параметрами навколишнього середовища та вихідною потужністю. Цю проблему можна було б вирішити, застосувавши методи для поліпшення роботи фотоелектричної системи.

Кожен масив сонячних панелей в однакових умовах через нелінійний характер ВАХ має єдину точку максимальної потужності (MPP) [26]. Отже, для того, щоб знайти MPP на кривій I-V, слід застосовувати техніку відстеження точки максимальної потужності (MPPT). Звичайні алгоритми відстеження можуть бути ідеально використані для відстеження MPP на кривій P-V. Однак, коли на масиві сонячних панелей виникає умови часткового затінення (PSC), його крива P-V має кілька локальних точок максимальної потужності (LMPP) та лише одну глобальну точку максимальної потужності (GMPP) завдяки використанню байпасних діодів для усунення впливу гарячих точок на фотоелементи [27]. Наявність безлічі піків вимагає використання більш вдосконалених алгоритмів, які здатні відстежувати GMPP серед появ багатьох LMPP, щоб підтримувати максимальну потужність, що вилучається з ФЕ-системи.

У літературі запропоновано різноманітні методи MPPT. Ахмад та Муртаза [28] надали вичерпний огляд широкого набору алгоритмів: збурення та спостереження (P&O), сходження на пагорб (HC), інкрементальна провідність (INC), дробовий струм короткого замикання (FSCC), дробова напруга розімкнутого ланцюга (FOCV) та ін. Ці методи мають велику перевагу: вони відносно прості та легкі у впровадженні. Недоліком звичайних методів MPPT є повільне відстеження та коливання поблизу MPP. Вони здатні відстежувати MPP лише за однакових

умов, і вони обмежені відстеженням GMPP під час багатопікової кривої P-V. Цю проблему продемонстрували у роботі [29].

Було представлено багато підходів для пом'якшення впливу PSC на фотоелектричні системи з метою відстеження GMPP. Серед них модифіковані звичайні алгоритми [30, 31], штучні нейронні мережі (ANN) [32], управління нечіткою логікою (FLC) [33] та оптимізація на основі викладання та навчання (TLBO) [34]. Ці алгоритми здатні відслідковувати GMPP під час багатопікової кривої P-V та підтримувати максимальну потужність вилучення з ФЕ-системи.

Для вирішення проблеми відстеження GMPP було застосовано багато метаевристичних алгоритмів, які були прийняті для використання з MPPT. У порівнянні з іншими методами, мета-евристичні алгоритми мають певні переваги [35]: ідентифікація PSC не потрібна, вони готові до відстеження GMPP і мають просту алгоритмічну структуру.

Sundareswaran [36] запропонував алгоритм Штучної Бджолоїної Колонії (ABC) для поліпшення продуктивності P&O під PSC. ABC використовувався для сканування P-V кривої та пошуку GMPP. Потім P&O закінчує відстеження, щоб поліпшити точність. Цей метод порівнювали з алгоритмом оптимізації рою частинок (PSO) та вдосконаленим P&O. Результати показують, що він отримав збільшений час відстеження як недолік через перемикання між методами.

Лю та співавтори [37] запропонували застосування модифікованого PSO до MPPT з урахуванням апаратних обмежень, враховується змінна вага інерції, когнітивний та соціальний коефіцієнт для прискорення критеріїв конвергенції. Запропонований метод показав хороші показники, але використання додаткових коефіцієнтів збільшує його складність та швидкість обчислення.

Ishaque та Salam запропонували модифікувати алгоритм PSO [38]. Вони додали можливість сприйняття частинки під час пошуку для підвищення точності. Результати показують гарне підвищення точності порівняно зі звичайними PSO, однак його застосування під час PSC не передбачалося.

Чаухан та співавтори [39] успішно застосували вдосконалену мультівселенну оптимізацію (IMVO) для досягнення MPPT під PSC. Запропонований алгоритм забезпечує чудову продуктивність відстеження

потужності. Було проведено порівняння з традиційними P&O та вдосконаленими методами PSO.

Jiyang та інші [40] запропонували оптимізацію колонії мурашок (ACO). Продуктивність алгоритму була досить схожа на PSO, який використовувався як алгоритм для порівняння, результати порівнювались з чотирма шаблонами затінення, де три з них - PSC, а один - рівномірний. Метод ACO може бути використаний як альтернатива PSO з тією перевагою, що його конвергенція не залежить від фази ініціалізації, але він має набагато більше параметрів налаштування, які досить складно правильно налаштувати.

Дарабан та інші застосували модифікований генетичний алгоритм (GA) із вбудованим P&O [41]. GA використовує три хромосоми: напругу, напрямок пошуку та розмір кроку. Результати порівнювали з різними алгоритмами в рамках PSC, і вони продемонстрували незначне зменшення коливань та зменшили загальну кількість ітерацій та розміри сукупності.

Lyden та Naqee запропонували відстеження MPPT під PSC з використанням алгоритму імітованого відпалу (SA) [42]. Цю техніку порівнювали з P&O та PSO. Залежно від часу конвергенції та кількості ітерацій, він має кращі показники, незважаючи на високу складність.

Різницю між усіма підходами, доступними в літературі, можна описати як сукупність характеристик [43, 44]: точність відстеження, швидкість відстеження, швидкість конвергенції, коливання навколо MPP, складність та витрати. Методи MPPT здатні відстежувати GMPP, контролюючи робочий цикл перетворювача постійного струму. Існує багато топологій перетворювачів: Buck, Boost, SEPIC, Zeta та ін. Комплексний огляд та оцінка різних типів перетворювачів постійного струму наведено в посиланні [45].

За всіх можливих умов роботи проблема MPPT стає надзвичайно важливою через високу вартість фотоелектричних систем та відносно низьку ефективність перетворення, а також високу залежність від параметрів навколишнього середовища.

Цей підрозділ має на меті описати застосування нового алгоритму ІМВА для відстеження MPPT. Цей нещодавній алгоритм був успішно застосований для

вирішення багатьох інженерних конструкцій та обмежених задач оптимізації, він вимагає меншої кількості параметрів, має хорошу точність та швидкий час обчислень. У цій роботі його застосування використовується для відстеження GMPP кривої PV з кількома піками під PSC. Пропонуються додаткові модифікації оригінального алгоритму IMBA для фази експлуатації: адаптивне зменшення до початкової відстані під час розрахунку положення міні та модифікація розрахунку положення осколків націлена на покращення знань про найкращі глобальні рішення для кожного з рішень. Ці модифікації не впливають на загальну точність відстеження IMBA, але зменшують загальну втрату потужності під час пошуку. Результати, перевірка та порівняння щодо двох популярних методів відстеження P&O та PSO, виконаних в модельованому середовищі, побудованому за допомогою програмного забезпечення MATLAB та SIMULINK. Цей тип середовища має велику перевагу для оцінки методів MPPT, оскільки він може бути сконфігурований для забезпечення абсолютно однакових умов (таких як опромінення, шаблон PSC, температура навколишнього середовища) з фіксованим часом для методів відстеження. Це дозволяє порівняти ефективність та будь-які інші характеристики з високою точністю. Це дослідження стосується ефективності відстеження як основної характеристики ефективності.

3.2.1. Дослідження характеристик сонячних панелей в умовах частинного затінення

Зазвичай ФЕ-система складається з набору сонячних панелей, де сонячна панель містить набір сонячних елементів. Кожний фотоелемент може бути виражен як субеквівалентна модель, наприклад, як однодіодна модель (SDM). SDM є моделлю еквівалентної схеми (рис. 3.11) сонячної панелі [46] і є одним із багатьох типів моделей, який описаний у роботах та літературі. Ця модель була обрана завдяки ідеальному балансу між простотою та точністю [47]. Модель використовує один діод, який розміщений паралельно джерелу струму для емуляції PN-переходу, коли на джерело струму впливає сонячне опромінення та температура навколишнього середовища.

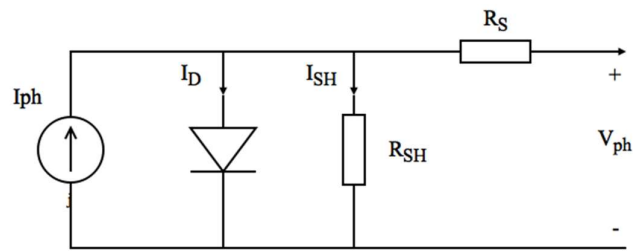


Рис. 3.11 – Еквівалентна схема фотоелементів (модель з одним діодом)

Наступне рівняння представляє вихідний струм фотоелемента:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \exp \left(\frac{q(V_{ph} + IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{SH}},$$

де I_{ph} - струм фотоелемента, I_0 - зворотний струм насичення діода, R_s, R_{SH} - серія та шунтуючий (паралельний) опір, n - коефіцієнт ідеальності, k - постійна Больцмана, q - заряд електрона, T - температура.

Зазвичай фотоелектричні панелі збираються у вигляді масиву однакових фотоелементів для збільшення вихідної потужності. У цьому випадку можна описати вихідний струм панелі:

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left(\exp \exp \left(\frac{q(V_{ph} + IR_s)}{N_s nkT} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{SH}},$$

де N_p і N_s - кількість фотоелементів паралельно і послідовно відповідно.

Під час роботи фотоелектричних панелей вихідна потужність може помітно зменшитися через затінення, яке може з'явитися через хмари, дерева та бруд, це так званий PSC. Крім того, ці умови можуть мати фізичний вплив на фотоелементи, наприклад, створення гарячих точок [32]. Ці гарячі точки починають з'являтися після втрати або погіршення потужності комірки в конфігураціях, пов'язаних із струнами, оскільки кожна комірка в струні повинна підтримувати постійний струм і частина втраченої потужності генерується як тепло. Для усунення цих ефектів використовуються пасивні та активні методи. Для активного методу пом'якшення впливу PSC використовується динамічна реконфігурація PV-масиву [33], що виходить за рамки цього дослідження, але є досить перспективним напрямком [34]. Для пасивного методу кожна комірка (в ідеалі) повинна бути зворотно зміщена байпасним діодом, який вимкне затінену або пошкоджену комірку і вбереже модуль від руйнівного впливу. Але за допомогою цього методу неможливо

повністю уникнути втрат потужності, це причина, чому крива PV зазнає декількох типів піків: LMPP та GMPP [35].

Щоб продемонструвати ефект PSC була вибрана 3S1P конфігурація масиву сонячних панелей, на рис. 3.12 показана модель Simulink, яка складається з трьох панелей з параметрами опромінення та температури..

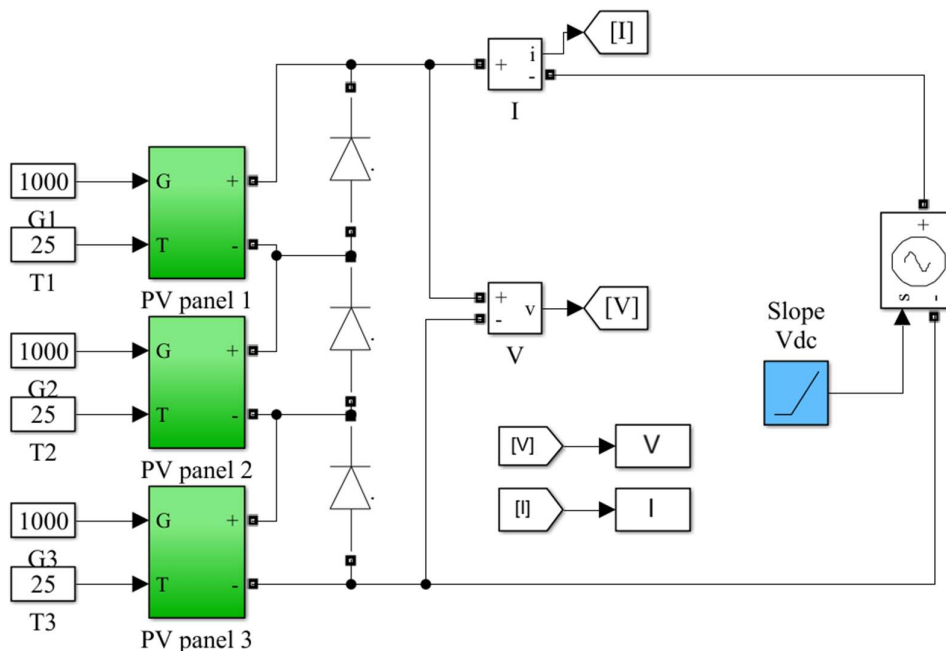


Рис. 3.12 – Імітаційна модель масиву 3S1P для дослідження характеристик

У табл. 3.4 наведено параметри моделей фотоелектричних панелей, які використовуються в цьому дослідженні (еквівалентно трьом сонячним панелям SunPower E20-245).

Таблиця 3.4

Параметри імітаційної моделі PV-панелі

Параметри (сонячна панель)	Значення
Максимальна потужність (STC)	245W
Напруга при максимальній потужності	40,5V
Струм при максимальній потужності	6.05A
Напруга відкритого ланцюга	48,8V
Струм короткого замикання	6.43A
Кількість фотоелектричних модулів	72S1P
Темп. коефіцієнт струму короткого замикання	-0,05%/K

Було обрано чотири схеми затінення, Шаблон Uniform - найпростіший шаблон, без затінення (без PSC). Шаплони PSC-1, PSC-2, PSC-3 використовуються

для моделювання трьох різних сценаріїв PSC, де крива P-V має 3 піки з більш-менш помітним GMPP. Таблиця 3.5 містить опромінення для кожної PV-панелі в підсистемі, яка буде використана під час оцінки ефекту PSC на кривих PV та IV.

Таблиця 3.5

Шаблони затінення для моделювання PV-масиву

Параметр	Світловий ефект
Шаблон PSC-1	G1 = 700 Вт / м ² G2 = 1000 Вт / м ² G3 = 350 Вт / м ²
Шаблон PSC-2	G1 = 400 Вт / м ² G2 = 1000 Вт / м ² G3 = 600 Вт / м ²
Шаблон PSC-3	G1 = 1000 Вт / м ² G2 = 350 Вт / м ² G3 = 300 Вт / м ²
Шаблон Uniform	G1 = 1000 Вт / м ² G2 = 1000 Вт / м ² G3 = 1000 Вт / м ²

Ідея використовувати чотири шаблони затінення під час моделювання полягала в тому, щоб мати різні GMPP. Параметри з табл. 3.5 були застосовані до G1-G3 відповідно конфігурацією шаблону затінення. На рис. 3.13 показані криві I-V та P-V як результат моделювання для всіх чотирьох моделей затінення. У табл. 3.6 наведено значення GMPP для кожного зразка шляхом виконання сканування кривої. Показано, що багатопікові криві PV представлені для трьох моделей PSC лише з одним справжнім GMPP; рівномірна крива PV має лише один пік, який є GMPP.

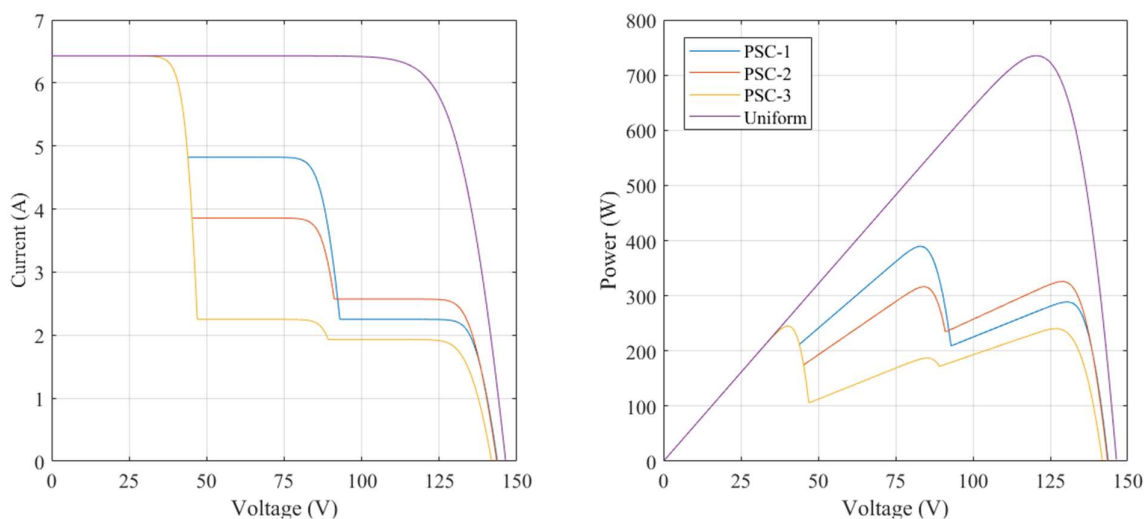


Рис. 3.13 – Характеристики PV-масиву при рівномірному опроміненні та при PSC: I-V (ліворуч) та P-V (праворуч) криві

Таблиця 3.6

PV-масив GMPP для різного шаблону затінення

Параметр	GMPP Значення
Шаблон PSC-1	389.5861W
Шаблон PSC-2	325.8155W
Шаблон PSC-3	240.9640W
Шаблон Uniform	735.0410W

Для ефективної роботи фотоелектричних панелей слід використовувати різні алгоритми відстеження, які використовуються поверх перетворювачів постійного струму для оптимізації роботи фотоелектричних систем.

3.2.2. Класичні алгоритми пошуку точки максимальної потужності

P&O є одним з найпопулярніших та найбільш широко використовуваних алгоритмів, який описаний у багатьох роботах [48], [49]. Цей метод вимагає лише датчиків напруги та струму для вимірювання миттєвої вихідної потужності ФЕ-системи. Потужність порівнюється з попередньо відібраною миттєвою потужністю, після чого приймається рішення про нахил кривої та напрямок збурення робочого циклу. Метод *P&O* можна визначити за таким рівнянням:

$$D(t+1) = \begin{cases} D(t) + \Delta D, & \text{якщо } P(t) > P(t-1) \\ D(t) - \Delta D, & \text{якщо } P(t) < P(t-1) \end{cases}$$

де $D(t)$ - робочий цикл в момент часу t , ΔD - розмір кроку робочого циклу, $P(t)$ - потужність в момент часу t .

Ця методика не покладається на знання характеристик фотоелектричної системи, вона дуже проста у впровадженні та має низьку вартість. Однак, коли опромінення швидко змінюється, метод може сплутати і почати відстежувати в неправильному напрямку. Він не здатний розрізнити справжній GMPP, коли присутня багатопікова характеристика PV (при PSC).

PSO - це метаевристичний підхід, заснований на колективній мудрості. Цей метод набув популярності за останні роки завдяки своїй здатності ефективно вирішувати різні проблеми науки та техніки [37, 38]. Він також дуже ефективний для відстеження GMPP з мультипіковими характеристиками P-V та під PSC з хорошою надійністю, його головна перевага - проста алгоритмічна структура.

Цей метод можна використовувати для цілей MPPT, де частинки відповідають за робочий цикл. Частинки починають збирати миттєву вихідну потужність за допомогою датчиків напруги та струму, а потім порівнюють досягнуті результати. Частинки з вищим значенням вихідної потужності привертають інші частинки ближче до свого положення. Шлях і положення кожної частинки можна обчислити відповідні рівняння:

$$v_{i+1}^k = wv_i^k + c_1rand_1(P_{i,best}^k - d_i^k) + c_2rand_2(G_{i,best} - d_i^k),$$

$$d_{i+1}^k = d_i^k + v_{i+1}^k,$$

де w - маса інерції, v_i^k - прискорення частинки i , c_1 і c_2 - коефіцієнти прискорення, $P_{i,best}$ - найкраще приватне рішення частинки i , $G_{i,best}$ - найкраще глобальне рішення, k - число рою, $rand_1$ і $rand_2$ - випадкові значення в інтервалі $[0, 1]$, d_i^k - положення частинки i .

PSO не покладається на знання характеристик P-V, він має просту логіку, простий у впровадженні, низьку вартість і здатний відстежувати GMPP під PSC.

3.2.3. Алгоритм мінного вибуху

У цій статті автори переймають підхід Mine Blast Algorithm (MBA), який спочатку пропонувався у посиланні [50] та його вдосконалена версія у посиланні

[51]. Цей алгоритм використовується для вирішення великого розмаїття задач з обмеженнями. Його головне завдання - зменшити обчислювальний час, підвищити точність і використовувати меншу кількість параметрів.

Ідея алгоритму виражається в тому, що прийнята концепція вибуху міни в реальному світі. Осколки від вибуху, які летять в різні боки, з різною швидкістю, на різну відстань і час, що спричиняє подальший вибух у певній зоні. Це зіткнення призводить до того, що виявляється найбільш вибухонебезпечна міна, яку можна розглядати як фітнес цільової функції в місці розміщення бомби.

Алгоритм починається з визначення вихідної точки, де буде здійснено вибух першої міни X_0 . Перший вибух визначатиме початкову популяцію, і ця кількість дорівнює кількості осколків N_s .

Можна розрахувати першу точку вибуху:

$$X_0 = LB + rand * (UB - LB),$$

де X_0 - перша точка пострілу, LB та UB - нижня і верхня межа задачі, $rand$ - це число, що генерується генератором випадкових чисел.

Поточне місце розташування шахтної бомби:

$$X = \{X_m\}, m = 1 \dots N_s,$$

де N_s - розмірність простору пошуку, яка дорівнює кількості незалежних змінних.

Початкове найкраще рішення X_{best} вважається X_0 .

З метою проведення дослідження проектного простору було введено коефіцієнт розвідки (μ). Цей фактор розділяє дві фази алгоритму: розвідку та експлуатацію. Основна різниця між ними полягає в тому, як вони впливають на процес пошуку, щоб знайти рішення. Якщо воно вище ітераційного числа (t), починається розвідка.

Дослідження простору на етапі t має вигляд:

$$X_t = d_t rand n^2 * \cos(\theta), t = 0 \dots \mu,$$

$$X_t = X_{best} + X_t, t \leq \mu,$$

де d_t - вектор відстані одержуваної осколка щодо напрямку, θ - кут падіння осколка.

В процесі оптимізації для досягнення кращого пошуку розглядається, що μ визначає інтенсивність процесу пошуку. Кут осколка можна визначити як:

$$\theta = k \frac{360^\circ}{N_s}, k = 0.. N_s - 1,$$

На етапі експлуатації ІМВА та етапі зменшення відстані для осколків дещо змінено, кількість осколків, вироблених вибухом під час фази експлуатації:

$$X_t = d_t + \text{randn} * \cos(\theta), t > \mu,$$

$$X_t = X_{best} + X_t, t > \mu,$$

$$X_t = d_t + \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}\right) * \text{rand} * (X_{best} - X_{best-1}), t > \mu,$$

де D - евклідова відстань між двома останніми найкращими рішеннями.

Відстань осколків шрапнелі та їх адаптивне зменшення під час кожної ітерації процесу оптимізації:

$$d_t = \frac{d_t}{\exp\left(\frac{t}{\alpha}\right)}, t = 0, 1, 2, 3 \dots,$$

де α - коефіцієнт зниження (визначений користувачем параметр ІМВА).

В якості критеріїв завершення можуть бути використані деякі змінні, такі як час процесора, або поріг різниці між двома останніми результатами, або максимальна кількість ітерацій.

Початкові параметри ІМВА можна обрати за наступними правилами:

Коефіцієнт зменшення (α) залежить від складності завдання оптимізації, його слід обрати таким чином, щоб зробити майже нульову відстань на останній ітерації пошуку. У посиланні [39] автор запропонував використовувати його не менше ніж розрахункове значення за формулою:

$$\alpha = \frac{M^2 + M}{2 \ln\left(\frac{d_0}{\epsilon}\right)}, t = 0, 1, 2, 3 \dots,$$

де ϵ - точність, d_0 - початкова відстань, M - максимальне число ітерацій.

Коефіцієнт дослідження (μ) впливає на кількість ітерацій, необхідних між перемиканням фаз ІМВА, якщо він занадто високий, може призвести до пошуку лише локального рішення, автори рекомендують призначити його максимальному

числу ітерацій, поділеному на постійне значення, в даному випадку, це 5, що означає, що перші 20% ітерацій були б на фазі розвідки, а 80% ітерацій хвоста вважалися б експлуатацією.

Максимальна кількість ітерацій та розмір популяції (кількість осколків) суворо залежить від завдань оптимізації та поділяє методологію відбору з будь-якими метаевристичними алгоритмами на основі популяції.

Відстеження максимальної потужності точки з використанням вдосконаленого алгоритму мінного вибуху

Відповідно до застосування МРРТ для масиву сонячних панелей, ІМВА може бути перетворений таким чином: крива P-V - це простір пошуку ІМВА; розташування осколка (X_t) представляє робочий цикл перетворювача постійного струму; відстань між мінами (d_t) представляє "розмір кроку" та напрямок.

Під час застосування ІМВА до МРРТ пропонується змінити розрахунок положення осколків під час фази експлуатації, при цьому кожному рішення на етапі експлуатації буде корисно знання про найкращі глобальні, а не про єдиний попередній. Модифікація рівняння має наступну форму:

$$X_t = d_t + \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{D}}\right) * rand * (X_{best} - X_t), t > \mu,$$

Крім того, пропонується додати додаткове адаптивне зменшення відстані під час розрахунку положення міни, щоб співвіднести з поточним числом ітерацій. Ця модифікація має на меті зробити фазу експлуатації більш орієнтованою на зменшення втрат потужності під час відстеження та прискорення конвергенції. Оновлення до положення міни показано в наступному рівнянні:

$$X_t = \frac{t * dt}{maxIt} + randn * \cos(\theta), t > \mu,$$

Псевдокод реалізації ІМВА для контролера МРРТ із запропонованими змінами записаний у табл. 3.7.

Таблиця 3.7

Псевдокод реалізації МРРТ ІМВА

Ініціалізація параметрів алгоритму ($\alpha, N_s, max_iteration$)
--

```

Ініціалізація змінної ітерації:  $t = 0$ 

Розрахунок початкової відстані осколка ( $d_0$ ) та початкової міни ( $X_0$ )
Розрахунок початкового робочого циклу ( $DC = X_0$ ) та очікування реакції сонячного масиву ( $I, V$ )
Розрахунок попереднього найкращого рішення:  $X_{t,prev} = X_0, F_{t,prev} = I * V$ 
Збереження найкращого рішення:  $X_{t,best} = X_0, F_{t,best} = I * V$ 

while ( $t < max\_iteration$  АБО конвергентність досягнуто) {
    for  $i = 1 .. N_s$  (для кожного осколку)
        if  $t < \mu$  (розпочати розвідку)
            Розрахунок положення осколків:  $X_t$ 
        else (розпочати експлуатацію)
            Розрахунок положення вибухнутих мін:  $X_t$ 
            Розрахунок положення осколків:  $X_t$ 
        end
        Перевірити обмеження
        Встановити робочий цикл ( $DC = X_t$ ) і очікувати на відповідь PV ( $I, V$ ),
        if  $F_{t,best} < I * V$ 
             $F_{t,prev} = F_{t,best}$ 
             $X_{t,prev} = X_{t,best}$ 
             $F_{t,best} = I * V$ 
             $X_{t,best} = X_t$ 
        end
        Розрахунок нового кута осколка:  $\theta$ 
    end,
    if  $F_{t,найкраще} < F_{t,prev}$ 
        Адаптивно зменшити відстань осколка:  $d_t$ 
    end
end

Розглянемо  $X_{t,best}$  як GMPP, встановлення робочого циклу ( $DC = X_{t,best}$ )

```

Для етапу перевірки обмеження слід зазначити, що робочий цикл будь-якого перетворювача DC-DC підлягає обмеженню:

$$D_{\text{хв}} < D_i < D_{\text{макс}},$$

де D_i - значення робочого циклу, D_{min} і D_{max} - верхня та нижня межі робочого циклу.

3.2.4. Результати моделювання

Для оцінки та аналізу методів відстеження GMPP проводиться дослідження на розробленій моделі ФЕ-системи в програмі MATLAB/Simulink, яка показана на

рис. 3.14. Ця модель PV-системи має 3 основні підсистеми: масив сонячних панелей, перетворювач постійного струму, алгоритм MPPT та резистивне навантаження. Масив сонячних панелей має 3 послідовно з'єднані фотоелектричні панелі (конфігурація 3S1P) з налаштованими входами для опромінення та температури навколишнього середовища, це дозволяє налаштувати ФЕ-систему для моделювання поведінки PSC. Перетворювач постійного струму, реалізований за допомогою buck топології, параметри: конденсатори $C_{in} = C_{out} = 400\mu F$, індуктор $L = 1mH$, частота перемикання $f = 25кГц$.

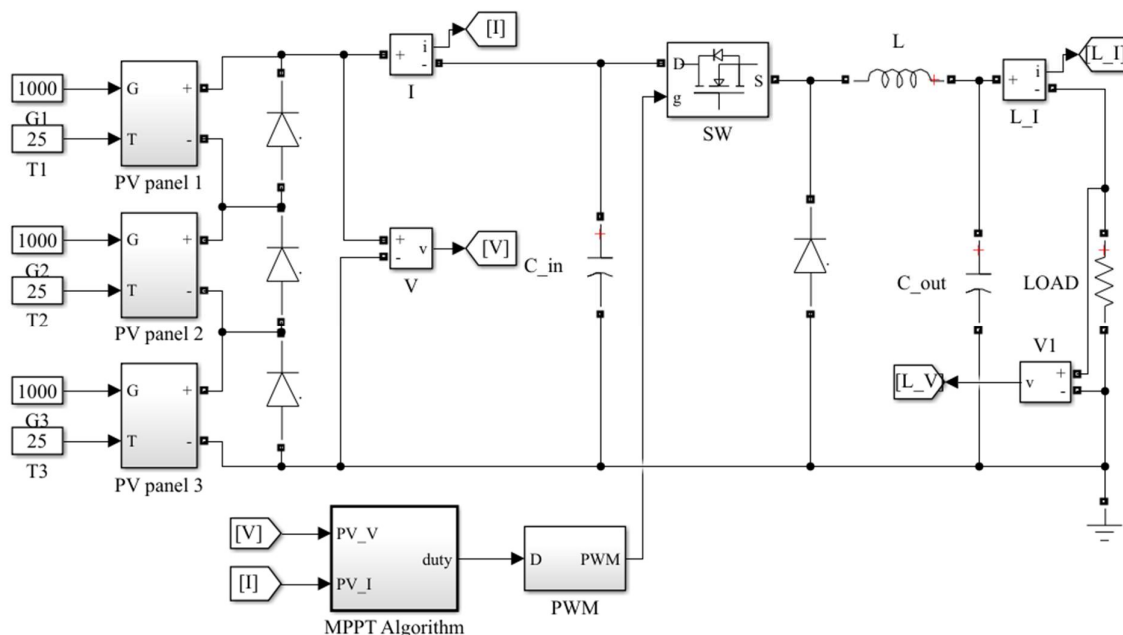


Рис. 3.14 – Імітаційна модель PV-масиву 3S1P для дослідження продуктивності MPPT.

За допомогою цієї моделі Simulink оцінюються чотири методи MPPT: P&O, PSO, IMBA, IMBA-2. Струм та напруга для підсистеми MPPT Algorithms відбираються для забезпечення стабільності системи під час відстеження. P&O налаштовано з розміром кроку 0,005, інтервал часу вибірки встановлений на 0,01с. PSO реалізовано та налаштовано відповідно до посилання [38], де інерційна вага встановлена на 0,4, коефіцієнти прискорення $c_1 = 1,2$ і $c_2 = 1,6$, кількість частинок дорівнює 3. IMBA та IMBA-2, налаштовані відповідно до рекомендацій, викладених у посиланні [51], вибрані параметри: коефіцієнт зниження встановлений на 3, коефіцієнт розвідки встановлений на 20, кількість осколків

встановлено на 3. Таблиця 3.8 містить параметри конфігурації для всіх чотирьох алгоритмів.

Таблиця 3.8

Параметри моделювання алгоритмів МРРТ

Параметр	Значення
Алгоритм P&O	
Час вибірки	0,01
Розмір кроку	0,005
Алгоритм PSO [38]	
Час вибірки	1,6
Кількість частинок	3
Маса інерції	0,3
Коефіцієнт прискорення 1	1,2
Коефіцієнт прискорення 2	2
Максимальна ітерація	16
Алгоритм IMBA & IMBA-2	
Час вибірки	0,1 с
Кількість осколків	3
Максимумальна ітерація	15
Коефіцієнт зменшення	20
Коефіцієнт дослідження	3

Для оцінки алгоритмів МРРТ використовуються чотири шаблони затінення, де перші три моделі представляють PSC, а останній - однакові умови. Значення опромінення для конфігурації масиву 3S1P встановлюються відповідно до табл. 3.5, криві P-V показані на рис. 3.15.

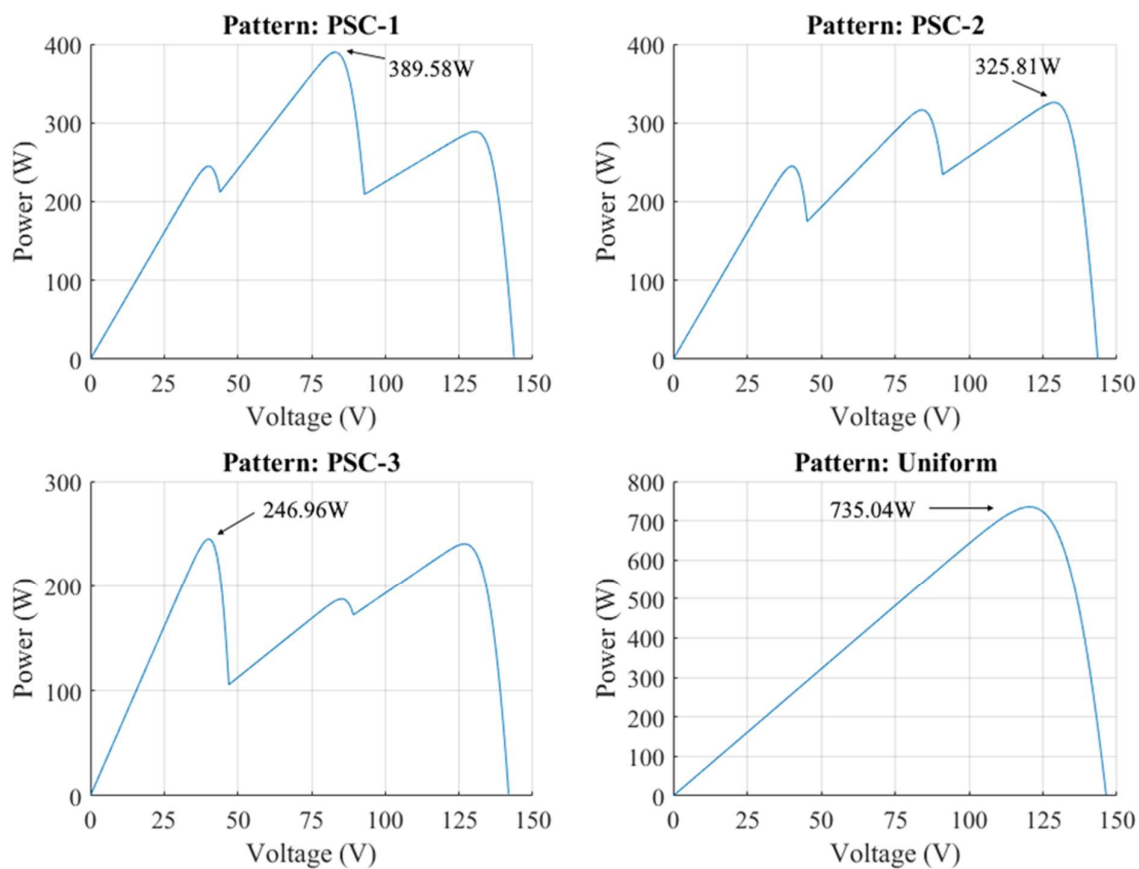


Рис. 3.15 – P-V криві чотирьох шаблонів затінення.

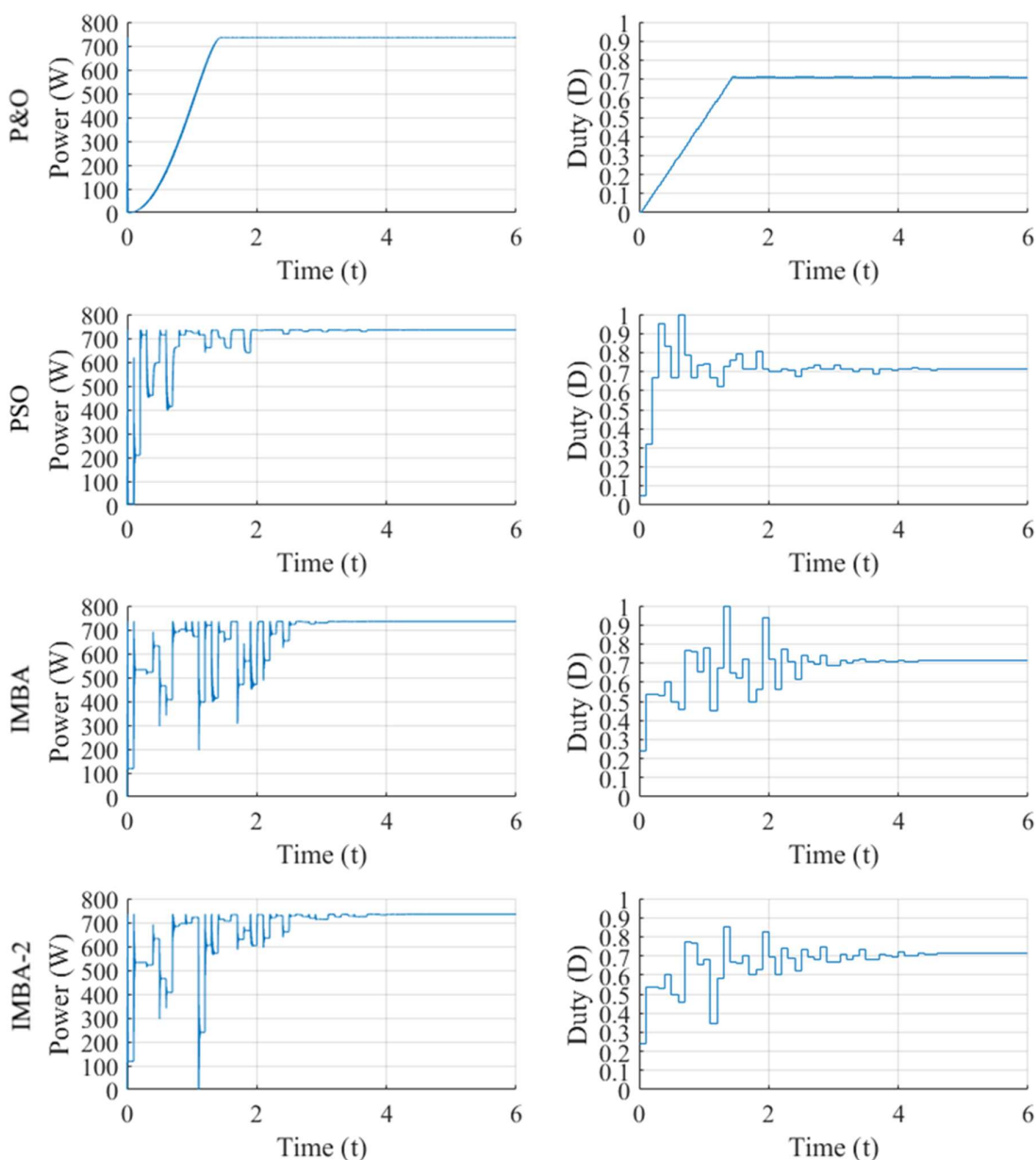


Рис. 3.16 – Результати моделювання: PV-система за уніфікованим зразком

Для рівномірного шаблону затінення опромінення встановлено на $1000\text{Вт}/\text{м}^2$. Для всіх фотоелектричних панелей у конфігурації 3S1P. Моделювання, проведене для кожного алгоритму з обраними параметрами (таблиця 3.8). Деталі та результати моделювання наведені на рис. 3.16 та в табл. 3.9 відповідно. Результати показують, що всі чотири алгоритми можуть відстежувати справжній GMPP для обраного шаблону, ефективність відстеження близько 100%, IMBA-2 та методи PSO досягли менших втрат потужності, ніж оригінальні IMBA.

Таблиця 3.9

Результати моделювання: PV-система під рівномірним шаблоном затінення

Алгоритм	Фактична потужність (Вт)	Гусенична потужність (Вт)	Ефективність відстеження (%)	Втрата потужності (%)
P&O	735.04W	734.64W	99.95%	17.33%
PSO	735.04W	735.04W	100%	8.82%
IMBA	735.04W	735.04W	100%	11.50%
IMBA- 2	735,04W	735,04W	100%	9,48%

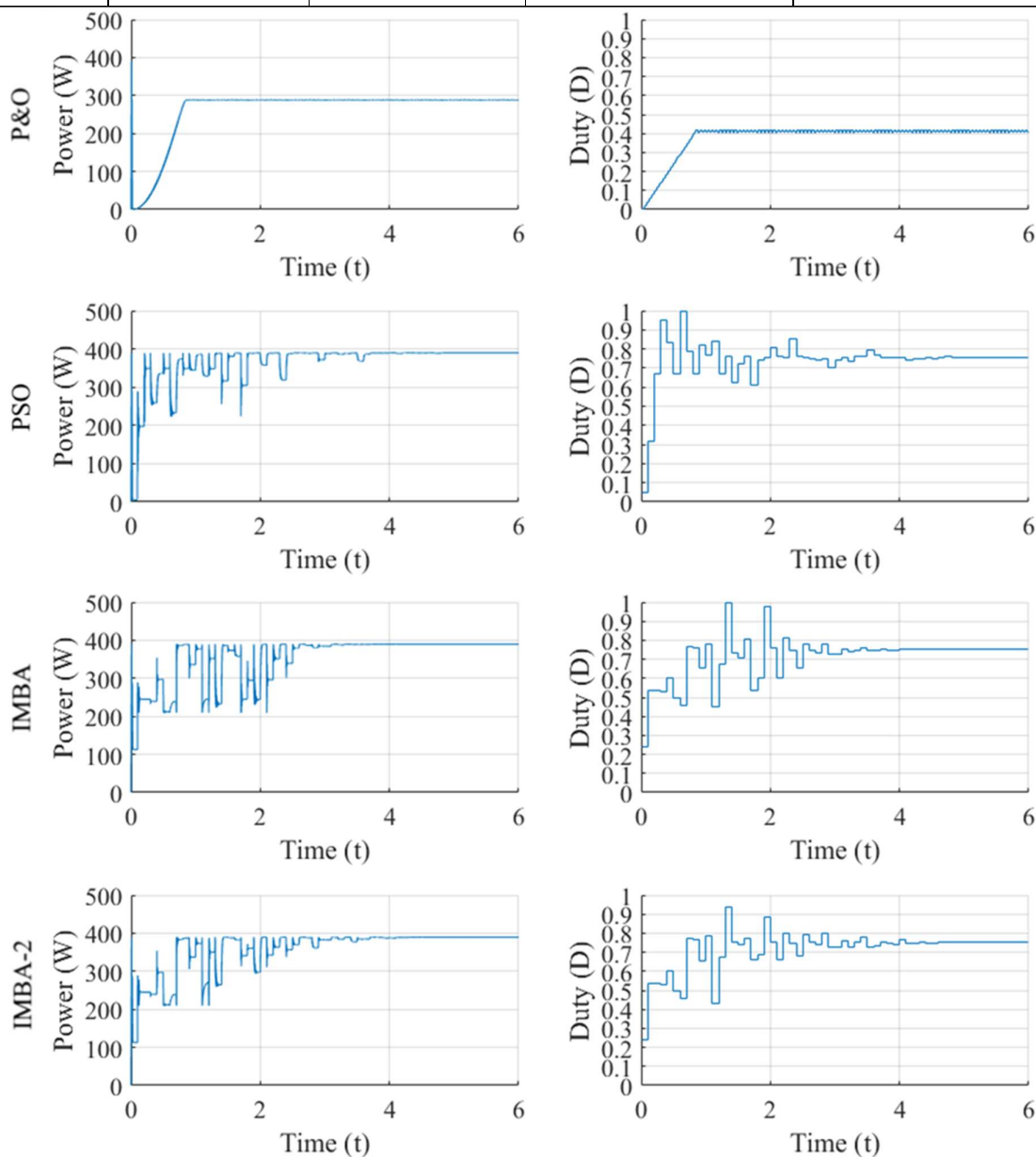


Рис. 3.17 – Результати моделювання: PV система за схемою PSC-1

Для схеми затінення PSC-1 опромінення встановлюється на 700, 1000, 350 Вт/м² у конфігурації 3S1P. Цей шаблон вводить багатопікову криву PV, де другий пік є справжнім GMPP. Моделювання, проведене для кожного алгоритму з обраними параметрами (таблиця 3.8). Деталі та результати моделювання наведені

на рис. 3.17 та в табл. 3.10 відповідно. Результати показують, що звичайні P&O не можуть відстежувати GMPP і потрапляють у пастку LMPP через багатопікову криву PV, ефективність відстеження для PSO, IMBA, IMBA-2 близько 99,99%, рейтинг втрат потужності покращений для IMBA-2 над IMBA.

Таблиця 3.10

Результати моделювання: PV-система за шаблоном затінення PSC-1

Алгоритм	Фактична потужність (Вт)	Гусенична потужність (Вт)	Ефективність відстеження (%)	Втрата потужності (%)
P&O	389,58W	287,86W	73,88%	33,97%
PSO	389,58W	389,57W	99,99%	9,43%
IMBA	389,58W	389,58W	99,99%	12,66%
IMBA-2	389,58W	389,58W	99,99%	10,26%

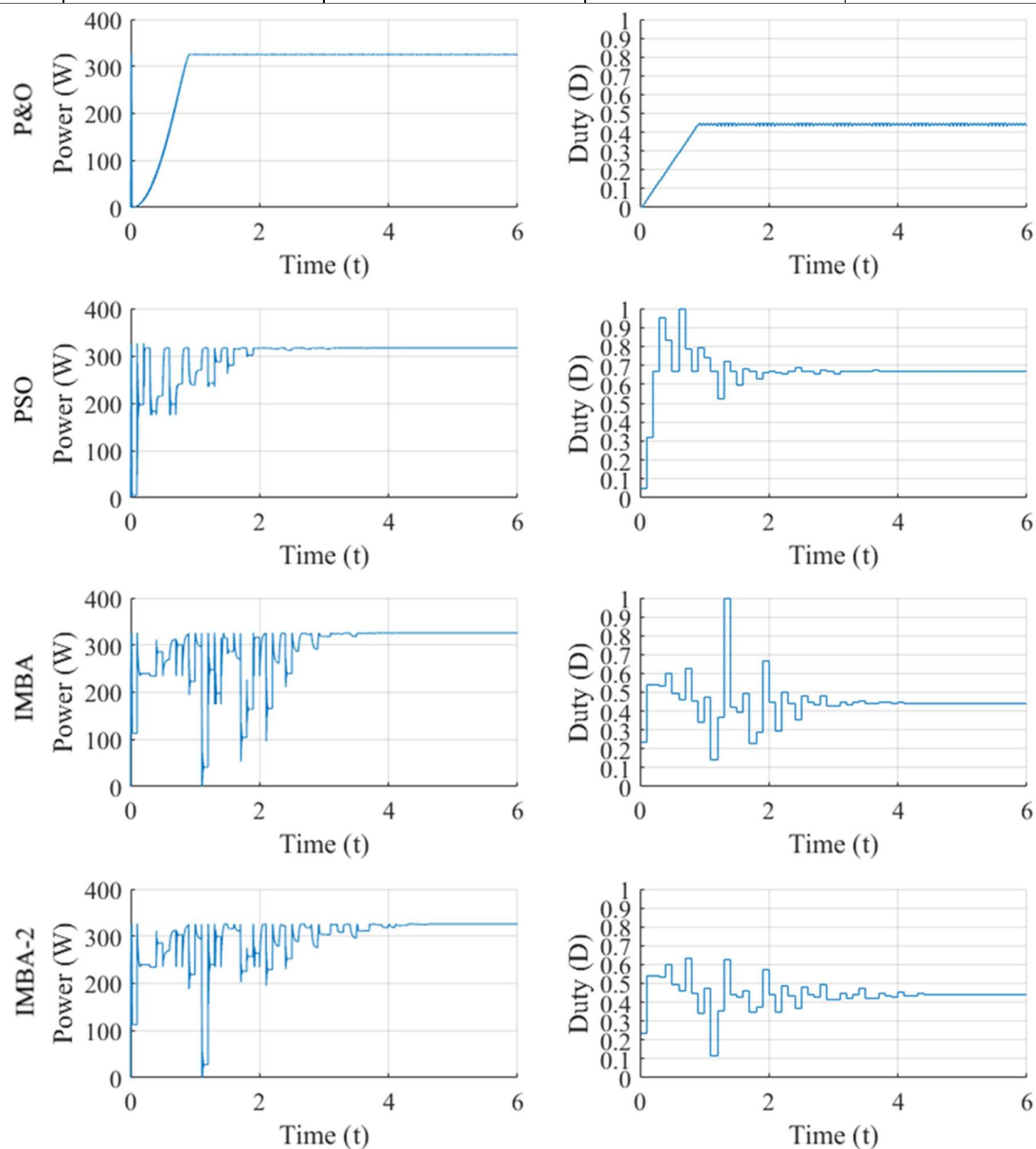


Рис. 3.18 – Результати моделювання: PV система за схемою PSC-2..

Для схеми затінення PSC-2 опромінення встановлено на 400, 1000, 600 Вт/м² у конфігурації 3S1P. Ця схема вводить багатопікову криву PV, де третім піком є справжній GMPP. Моделювання, виконане для кожного алгоритму з обраними параметрами як в табл. 3.8. Деталі та результати моделювання наведені на рис. 3.18 та в табл. 3.11 відповідно. Результати показують, що алгоритм PSO потрапив у пастку LMPP через багатопікову криву PV на шаблоні затінення PSC-2. LMPP і GMPP дуже близькі за потужністю, тому ефективність відстеження все ще перевищує 97%. IMBA та IMBA-2 змогли відстежувати справжній GMPP, рейтинг втрат потужності покращений для IMBA-2 порівняно з IMBA.

Таблиця 3.11

Результати моделювання: PV-система за схемою затінення PSC-2

Алгоритм	Фактична потужність (Вт)	Гусенична потужність (Вт)	Ефективність відстеження (%)	Втрата потужності (%)
P&O	325.81W	324.25W	99.52%	11.63%
PSO	325.81W	316.33W	97.09%	11.55%
IMBA	325.81W	325.81W	100%	13.31%
IMBA- 2	325.81W	325.73W	99.97%	11.39%

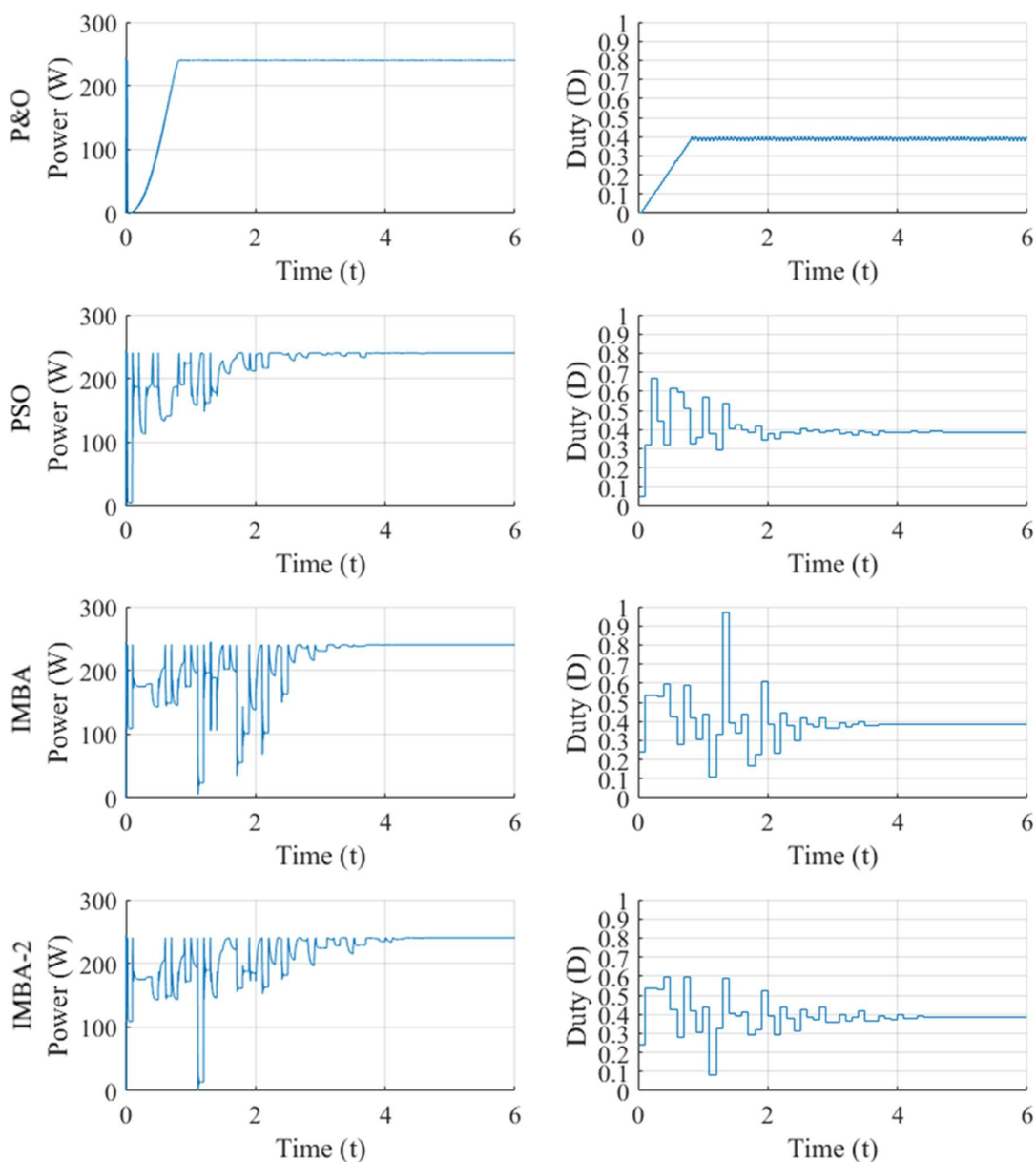


Рис. 3.19 – Результати моделювання: PV система за схемою PSC-3.

Для схеми затінення PSC-3 опромінення встановлено на 1000, 350, 300 Вт/м² у конфігурації 3S1P. Ця схема вводить багатопікову криву PV, де перший пік є справжнім GMPP. Моделювання, виконане для кожного алгоритму з обраними параметрами (таблиця 3.8). Деталі та результати моделювання наведені на рис.3.19 та в табл. 3.12 відповідно. Результати показують, що всі чотири алгоритми не змогли відстежувати справжній GMPP і були затримані на LMPP, що за рівнем потужності дуже близьке до GMPP. IMBA-2 отримав покращений рейтинг втрат потужності порівняно з IMBA.

Результати моделювання: PV-система за шаблоном затінення PSC-3

Алгоритм	Фактична потужність (Вт)	Гусенична потужність (Вт)	Ефективність відстеження (%)	Втрата потужності (%)
P&O	244.96W	239.39W	97.73 %	12.20%
PSO	244.96W	240.35W	98.11 %	12.79%
IMBA	244.96W	240.35W	98.11 %	17.49%
IMBA-2	244.96W	240.33W	98.11 %	15.39%

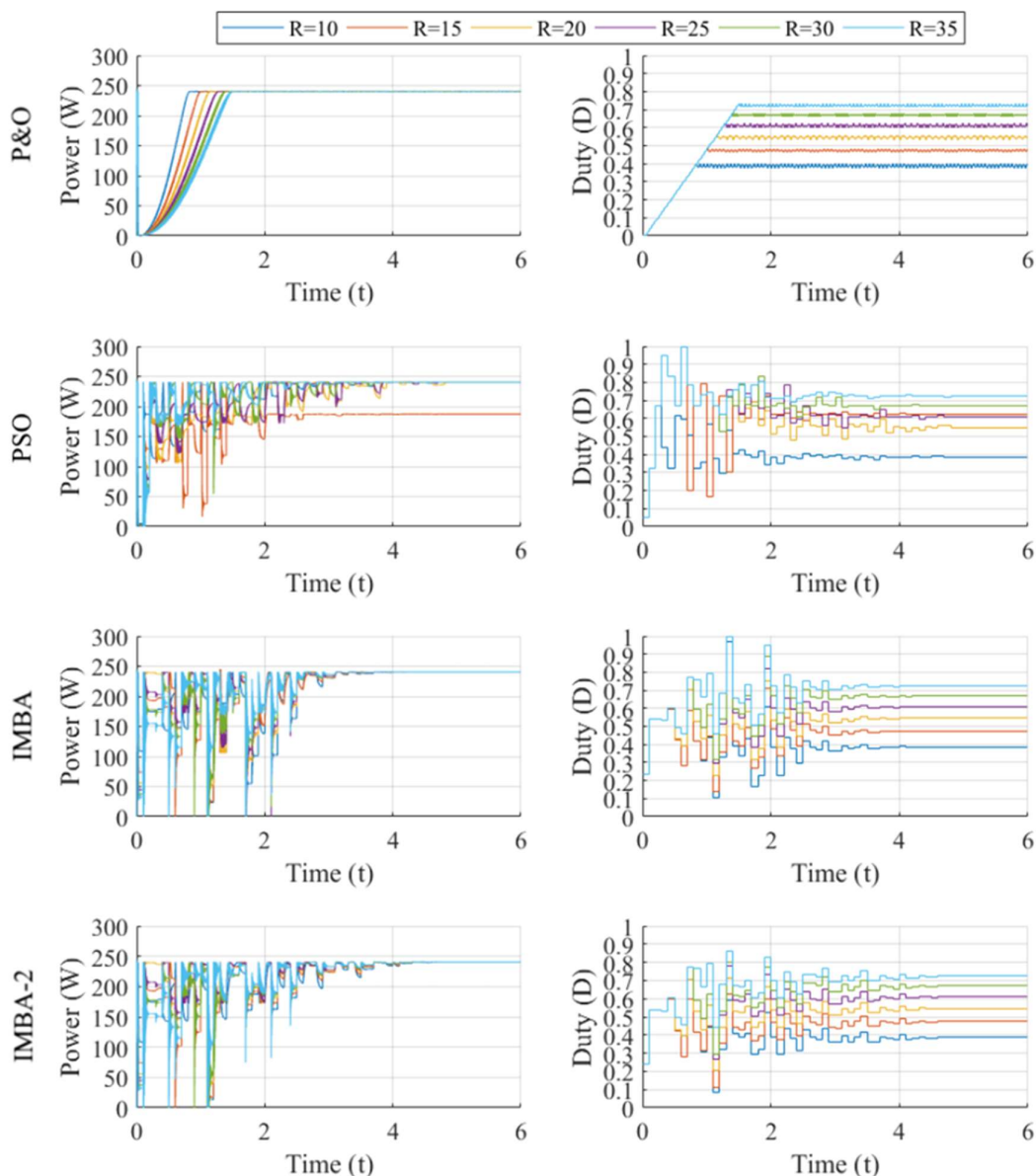


Рис. 3.20 – Результат моделювання: PV система (модель PSC-3) при різному резистивному навантаженні.

Було проведено додаткове моделювання для фотоелектричної системи (схема затінення PSC-3) при різному вихідному резистивному навантаженні з

кроком 50м. Це моделювання зроблено для перевірки здатності алгоритмів реагувати на зміщення робочого циклу за тієї ж початкової конфігурації та при однаковій роботі генератору випадкових значень. З детального моделювання, показаного на рис. 3.20, всі чотири алгоритми все ще не можуть відстежувати справжній GMPP. Помітно, що PSO не зміг відстежити LMPP, близький до GMPP за номінальною потужністю, і був затриманий іншим LMPP з найнижчою потужністю (другий пік на кривій PV). Загальна здатність відстежувати та рейтинг втрат потужності не сильно змінилася під час різного резистивного навантаження. Середнє та медіана знаходяться в межах очікуваних значень. ІМВА-2 підтверджує незначне покращення порівняно з ІМВА як для ефективності відстеження, так і для оцінки втрат потужності. У табл. 3.13 узагальнено результати моделювання.

Таблиця 3.13

Результати моделювання: PV система за шаблоном PSC-3

Характеристика	Навантаження	P&O	PSO	ІМВА	ІМВА-2
Ефективність відстеження (%)					
	R=10	97.72	98.12	98.11	98.11
	R=15	98.11	76.41	98.11	98.11
	R=20	98.10	97.98	98.12	98.11
	R=25	98.01	98.11	98.09	98.11
	R=30	98.10	98.12	98.09	98.11
	R=35	98.09	98.12	98.09	98.11
	Average	98.02	94.48	98.10	98.11
	Median	98.10	98.11	98.09	98.11
Втрата потужності (%)					
	R=10	12.20	12.79	17.49	15.39
	R=15	13.29	31.32	18.29	15.43
	R=20	14.94	18.26	15.94	12.18
	R=25	17.31	16.97	15.81	12.64
	R=30	19.97	13.66	17.00	14.27
	R=35	17.17	11.91	14.64	12.52
	Average	15.81	17.49	16.53	13.74
	Median	16.05	15.31	16.47	13.45

Результати показують що алгоритми PSO, ІМВА, і запропоноване ІМВА-2 роблять відмінну роботу з відстеження MPP. Алгоритми можуть виявити належну максимальну потужність точки; перейти в стабільний стан в кінці пошуку,

використовуючи найкраще рішення відстежене протягом інтервалу часу пошуку. ІМВА та ІМВА-2 можуть забезпечити велику ефективність відстеження GMPP, яка перевищує 99% завдяки фазі експлуатації, що надзвичайно ефективно закінчує відстеження після фази розвідки. Фаза дослідження використовується для сканування простору пошуку та максимального визначення MPP, коли експлуатація використовується для додання точності відстеження та виявлення GMPP.

Ефективність відстеження використовується як основна характеристика для порівняння здатності відстеження алгоритмів. Ця характеристика показує, наскільки наближається відстежуваний GMPP до реального GMPP, оцінений за рівнянням:

$$\eta_{tracking} = \frac{P_{GMPP}^{Algo}}{P_{GMPP}^{Array}}$$

Рейтинг втрат потужності використовується для визначення того, скільки енергії втрачається внаслідок поведінки відстеження алгоритму MPPT на обраному інтервалі часу, обчисленого за рівнянням:

$$CP_{loss}^{Algo} = \left(1 - \frac{\int_{t_{start}}^{t_{end}} P(t) dt}{P_{GMPP}^{array}} \right) 100\%.$$

Через природу методів мета-евристичної оптимізації слід зазначити, що алгоритми PSO та МВА є методами спрямованого випадкового пошуку, ці алгоритми не гарантують точного знаходження GMPP (оптимального), будь-який результат слід розглядати як суб-оптимальний для даної ітерації.

Висновки до розділу 3

1. Формалізований набір основних критеріїв, які включають безліч проектних цілей, у тому числі: мінімізація вартості системи за рахунок обліку амортизації і факторів експлуатації, збільшення надійності за рахунок мінімізації дефіциту енергії, мінімізація впливу на довкілля за рахунок зменшення викидів CO₂ і пріоритетного використання ВДЕ. Розроблені моделі елементів ГСЕС враховують параметри процедури проектування, що дозволяє в подальшому

вирішити задачу структурно-параметричного синтезу і тим самим підвищити енергоефективність розробленої системи.

2. Розроблено алгоритм управління елементами ГСЕС, який включає в себе набір правил поведінки системи з урахуванням двох можливих режимів експлуатації: автономному і з підключенням до електромережі. Передбачені особливості роботи САЕ (контроль рівня і максимальної потужності заряду/розряду), контроль енергетичного балансу (підключення, відключення та відстеження стану джерел енергії згідно енергетичним вимогам), облік тарифних зон при взаємодії з електромережою. Впровадження алгоритму системи управління дозволяє отримати розв'язок задачі структурно-параметричного синтезу ГСЕС близьке до оптимального.

3. Використовуючи розроблені математичні моделі та алгоритм управління, був виконаний пошук оптимальної конфігурації з застосуванням БКО з набором заданих критеріїв і обмежень. Для розв'язання задачі структурно-параметричного синтезу застосовується генетичний алгоритм NSGA-II, який володіє перевагою швидкого розрахунку множини Парето-оптимальних конфігурацій з метою їх подальшого аналізу. Розроблений інструмент автоматизованого проектування впроваджено на ДП «ВО Київприлад» (акт впровадження від 20 квітня 2021), який дозволив визначити оптимальну структуру ГСЕС для домогосподарства на двох осіб (м. Київ, Україна) складається з 19СП, 7АКБ і 2ДГ. Рішення включає оціночну вартість з урахуванням першого року роботи \$15780, відсутність дефіциту енергії, 950г емісії CO₂ і використання 340кВт·год непоновлюваної енергії. При наявності можливості продажу електроенергії за зеленим тарифом протягом року, можливо знизити оціночну вартість системи до \$8523 (на 45%). Таке рішення включає виконання всіх поставлених енергетичних вимог при використанні 14СП, 6АКБ і 0ДГ. Вслідстві того, що ДГ не застосовуються, відсутня емісія CO₂, але зростає використання невідновлюваної енергії до 483кВт·год з-за зменшення СЕС і САЕ.

4. Представлено застосування метаевристичного алгоритму ІМВА для МРРТ, який може відстежувати GMPP в умовах часткового затінення. Для підвищення ефективності відстеження та зменшення втрат потужності під час відстеження були запропоновані додаткові модифікації оригінального алгоритму ІМВА. Ці

модифікації застосовані до фази експлуатації: адаптивне зменшення до початкової відстані та модифікація розрахунку положення осколків для покращення знань про найкращі глобальні рішення для кожного з проміжних рішень. Ефективність запропонованих алгоритмів оцінювалась використовуючи MATLAB/Simulink, які представляють автономну фотоелектричну систему з 4 різними моделями затінення: від хорошого випадку з рівномірним опроміненням і до найгіршого випадку з кількома MPP, близькими за номінальною потужністю. Запропонований алгоритм MPPT може виявити належний GMPP і перейти в стабільний стан за критерієм збіжності, встановленими максимальним числом ітерацій. Його порівняно з найпопулярнішими методами MPPT: P&O та PSO. Моделювання показує наступні результати: IMBA та IMBA-2 можуть легко працювати в рамках PSC для вдосконалення вироблення фотоелектричної енергії, з хорошою ефективністю відстеження та відносно невеликим рейтингом втрат потужності через природу відстеження мета-евристичних алгоритмів та використання випадкових чисел під час ітерацій. Головною перевагою IMBA перед PSO є фаза експлуатації, яка використовується для отримання найкращого оптимізаційного рішення, результат цього чітко спостерігається під час моделювання з однаковими початковими числами. Основним моментом для вдосконалення IMBA та запропонованого IMBA-2 є підвищення стабільності відстеження справжнього GMPP, може бути введена додаткова фаза ініціалізації. Під час цієї фази алгоритм може сканувати початкову область відстеження під час першої ітерації алгоритму, що мінімізує вплив генератора випадкових чисел на виявлення проміжних MPP, також майбутня робота може бути зосереджена, щоб мінімізувати втрати потужності під час відстеження.

Список використаних джерел у розділу 3

1. Farret, F. A., & Godoy Simoes, M. (2017). *Integration of renewable sources of energy* (2nd ed.). Nashville, TN: John Wiley & Sons.
2. Aziz, A., Tajuddin, M., Adzman, M., Ramli, M., & Mekhilef, S. (2019). Energy management and optimization of a PV/diesel/battery hybrid energy system using a combined dispatch strategy. *Sustainability*, 11(3), 683. doi:

<https://doi.org/10.3390/su11030683>

3. Zheng, X.-K., Li, K., Wang, R., & Zhang, T. (2017). Operation management of a hybrid renewable energy systems base on multi-objective optimal under uncertainties. *2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI)*. IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/icei.2017.18>

4. Ma, G., Xu, G., Chen, Y., & Ju, R. (2017). Multi-objective optimal configuration method for a standalone wind–solar battery hybrid power system. *IET Renewable Power Generation*, *11*(1), 194-202. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0646>

5. Song, Y., Liu, Y., Wang, R., & Ming, M. (2019). Multi-objective configuration optimization for isolated microgrid with shiftable loads and mobile energy storage. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, *7*, 95248-95263. doi: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2928619>

6. Upadhyay, S., & Sharma, M. P. (2014). A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *38*, 47-63. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.057>

7. Abedini, M., Moradi, M. H., & Hosseinian, S. M. (2016). Optimal management of microgrids including renewable energy sources using GPSO-GM algorithm. *Renewable Energy*, *90*, 430-439. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.014>

8. Delgado, C., & Dominguez-Navarro, J. A. (2014). Optimal design of a hybrid renewable energy system. *2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/ever.2014.6844008>

9. Bernal-Agustín, J. L., & Dufo-López, R. (2006). Economical and environmental analysis of grid connected photovoltaic systems in Spain. *Renewable Energy*, *31*(8), 1107-1128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.06.004>

10. Caballero, F., Sauma, E., & Yanine, F. (2013). Business optimal design of a grid-connected hybrid PV (photovoltaic)-wind energy system without energy storage for an Easter Island's block. *Energy*, *61*(C), 248-261. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.08.030>

11. Cho, J.-H., Chun, M.-G., & Hong, W.-P. (2016). Structure optimization of stand-alone renewable power systems based on multi object function. *Energies*, 9(8), 649. doi: <https://doi.org/10.3390/en9080649>
12. Eriksson, E. L. V., & Gray, E. M. (2017). Optimization and integration of hybrid renewable energy hydrogen fuel cell energy systems – A critical review. *Applied Energy*, 202, 348-364. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.132>
13. Singh, R., & Bansal, R. C. (2019). Optimization of an autonomous hybrid renewable energy system using reformed electric system cascade analysis. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(1), 399-409. doi: <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2867626>
14. Hosseinalizadeh, R., Shakouri G, H., Amalnick, M. S., & Taghipour, P. (2016). Economic sizing of a hybrid (PV–WT–FC) renewable energy system (HRES) for stand-alone usages by an optimization-simulation model: Case study of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 139-150. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.046>
15. Olatomiwa, L., Mekhilef, S., Huda, A. S. N., & Sanusi, K. (2015). Techno-economic analysis of hybrid PV –diesel–battery and PV –wind–diesel–battery power systems for mobile BTS : the way forward for rural development. *Energy Science & Engineering*, 3(4), 271-285. doi: <https://doi.org/10.1002/ese3.71>
16. Aguiar, R., & Collares-Pereira, M. (1992). TAG: A time-dependent, автоперпецїї, Gaussian model for generating synthetic hourly radiation. *Solar Energy (Phoenix, Ariz.)*, 49(3), 167-174. doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(92\)90068-1](https://doi.org/10.1016/0038-092x(92)90068-1)
17. Singh, R., Bansal, R. C., & Singh, A. R. (2018). Optimization of an isolated photo-voltaic generating unit with battery energy storage system using electric system cascade analysis. *Electric Power Systems Research*, 164, 188-200. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.08.005>
18. Bokopane, L., Kusakana, K., & Vermaak, H. J. (2015). Optimal energy management of an isolated electric Tuk-Tuk charging station powered by hybrid renewable systems. *2015 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE)*. IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/du.2015.7102981>
19. Bakhtiari, H., & Naghizadeh, R. A. (2018). Multi-criteria optimal sizing of

hybrid renewable energy systems including wind, photovoltaic, battery, and hydrogen with storage ε -constraint method. *IET Renewable Power Generation*, 12(8), 883-892. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2017.0706>

20. Coppitters, D., De Paepe, W., & Contino, F. (2020). Robust design optimization and stochastic performance analysis of a grid-connected photovoltaic system with storage battery and hydrogen storage. *Energy (Oxford, England)*, 213(118798), 118798. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118798>

21. Díaz, G., Gómez-Aleixandre, J., Coto, J., & Conejero, O. (2018). Maximum income resulting from energy arbitrage by battery systems subject to cycle aging and price uncertainty from a dynamic programming perspective. *Energy (Oxford, England)*, 156, 647-660. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.122>

22. Ramesh, M., & Saini, R. P. (2020). Effect of different batteries and diesel generator on the performance of a stand-alone hybrid renewable energy system. *Energy Sources Part A Recovery and Utilization Environmental Effects*, 1–23. doi: <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1763520>

23. Yusoff, Y., Ngadiman, M. S., & Zain, A. M. (2011). Overview of NSGA-II for optimizing machining process parameters. *Procedia Engineering*, 15, 3978-3983. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.745>

24. Ming, M., Wang, R., Zha, Y., & Zhang, T. (2017). Multi-objective optimization of hybrid renewable energy system using an enhanced multi-objective evolutionary algorithm. *Energies*, 10(5), 674. doi: <https://doi.org/10.3390/en10050674>

25. Nujoom, R., Wang, Q., & Mohammed, A. (2018). Optimisation of a sustainable manufacturing system design using the multi-objective approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(5-8), 2539-2558. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1649-y>

26. Ramaprabha, R, Mathur, BL. A Comprehensive review and analysis of solar photovoltaic array configurations under partial shaded conditions. *International Journal of Photoenergy* 2012; 2012. DOI: 10.1155/2012/120214

27. Rossi, D, Omana, M, Giaffreda, D, Metra, C. Modeling and detection of hotspot in shaded photovoltaic cells. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems* 2015; 23(6): 1031-1039, DOI: 10.1109/TVLSI.2014.2333064

28. Ahmad, R, Murtaza, AF, Sher, HA. Power tracking techniques for efficient operation of photovoltaic array in solar applications – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2019; 101: 82–102, DOI: 10.1016/j.rser.2018.10.015
29. Balasubramanian, IR, Ilango Ganesan, S, Chilakapati, N. Impact of partial shading on the output power of PV systems under partial shading conditions. *IET Power Electronics* 2014; 7(3): 657–666, DOI: 10.1049/iet-pel.2013.0143
30. Chen, K, Tian, S, Cheng, Y, Bai, L. An improved MPPT controller for photovoltaic system under partial shading condition. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 2014; 5(3): 978–985, DOI: 10.1109/TSTE.2014.2315653
31. Tey, KS, Mekhilef, S. Modified incremental conductance algorithm for photovoltaic system under partial shading conditions and load variation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2014; 61(10): 5384–5392, DOI: 10.1109/TIE.2014.2304921
32. Bouselham, L, Hajji, M, Hajji, B, Bouali, H. A new MPPT-based ANN for photovoltaic system under partial shading conditions. *Energy Procedia* 2017; 111: 924–933, DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.255
33. Chin, CS, Chin, YK, Chua, BL, Kiring, A, Teo, KTK. Fuzzy logic based MPPT for PV array under partially shaded conditions. *International Conference on Advanced Computer Science Applications and Technologies (ACSAT)* 2012; 133–138, DOI: 10.1109/ACSAT.2012.46
34. Rezk, H, Fathy, A. Simulation of global MPPT based on teaching–learning–based optimization technique for partially shaded PV system. *Electrical Engineering (Berlin. Print)* 2017; 99(3): 847–859, DOI: 10.1007/s00202-016-0449-3
35. Farzaneh, J, Keypour, R, Khanesar, M. A New maximum power point tracking based on modified firefly algorithm for PV system under partial shading conditions. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy* 2018; 3(1): 1-13, DOI: 10.1007/S40866-018-0048-7
36. Sundareswaran, K, Sankar, P, Nayak, PSR, Simon, SP, Palani, S. . Enhanced energy output from a PV system under partial shaded conditions through artificial bee colony. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 2015; 6(1): 198–209, DOI: 10.1109/TSTE.2014.2363521

37. Liu, YH, Huang, SC, Huang, JW, Liang, WC. A particle swarm optimization-based maximum power point tracking algorithm for PV systems operating under partially shaded conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2012; 27(4): 1027–1035, DOI: 10.1109/TEC.2012.2219533
38. Ishaque, K, Salam, Z. A deterministic particle swarm optimization maximum power point tracker for photovoltaic system under partial shading condition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2012; 60(8): 3195–3206, DOI: 10.1109/TIE.2012.2200223
39. Chauhan, U, Singh, V, Kumar, B, Rani, A. An improved MVO assisted global MPPT algorithm for partially shaded PV system. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 2020; 38(5): 6715–6726, DOI: 10.3233/JIFS-179749
40. Jiang, LL, Maskell, DL, Patra, JC. A novel ant colony optimization-based maximum power point tracking for photovoltaic systems under partially shaded conditions. *Energy and Buildings* 2013; 58: 227–236, DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.12.001
41. Daraban, S, Petreus, D, Morel, C. A novel MPPT (maximum power point tracking) algorithm based on a modified genetic algorithm specialized on tracking the global maximum power point in photovoltaic systems affected by partial shading. *Energy (Oxford, England)* 2014; 74: 374–388, DOI: 10.1016/j.energy.2014.07.001
42. Lyden, S, Haque, ME. A simulated annealing global maximum power point tracking approach for PV modules under partial shading conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics* 2016; 31(6): 4171–4181, DOI: 10.1109/TPEL.2015.2468592
43. Jantsch, M, Real, M, Haeberlin, H, Whitaker, C, Kurokawa, K, Blaesser, G, Kremer, P, Verhoeve, CV. Measurement of PV maximum power point tracking performance. 14th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition 1997.
44. Islam, H, Mekhilef, S, Shah, NBM, Soon, TK, Seyedmahmousian, M, Horan, B, Stojcevski, A. Performance evaluation of maximum power point tracking approaches and photovoltaic systems. *Energies* 2018; 11(2): 365, DOI: 10.3390/en11020365
45. Raghavendra, KVG, Zeb, K, Muthusamy, A, Krishna, TNV, Kumar, SVSVP, Kim, DH, Kim, MS, Cho, HG, Kim, HJ. A Comprehensive review of DC–DC

converter topologies and modulation strategies with recent advances in solar photovoltaic systems. *Electronics* 2019; 9(1): 31, DOI:10.3390/electronics9010031

46. Ma, J, Man, KL, Ting, TO, Zhang, N, Guan, SU, Wong, PWH. Approximate single-diode photovoltaic model for efficient IV characteristics estimation. *The Scientific World Journal* 2013; 2013: 1-7, DOI: 10.1155/2013/230471

47. Mahmoud, Y, Xiao, W, Zeineldin, H. A Simple approach to modeling and simulation of photovoltaic modules. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 2012; 3: 185-186, DOI: 10.1109/TSTE.2011.2170776

48. de Cesare, G, Caputo, D, Nascetti, A. Maximum power point tracker for portable photovoltaic systems with resistive-like load. *Solar Energy (Phoenix, Ariz.)* 2006; 80(8): 982–988, DOI: 10.1016/j.solener.2005.07.010

49. Piegari, L, Rizzo, R. Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking. *IET Renewable Power Generation* 2010, 4(4): 317-328, DOI: 10.1049/iet-rpg.2009.0006

50. Sadollah, A, Bahreininejad, A, Eskandar, H, Hamdi, M. Mine blast algorithm for optimization of truss structures with discrete variables. *Computers and Structures* 2012; 102(103): 49–63, DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.03.013

51. Sadollah, A, Eskandar, H, Bahreininejad, A, Kim, JH. Water cycle, mine blast and improved mine blast algorithms for discrete sizing optimization of truss structures. *Computers and Structures* 2015; 149: 1–16, DOI: 10.1016/j.compstruc.2014.12.003

Розділ 4. Безпілотний літальний апарат з використанням сонячної енергетичної системи

4.1. Використання сонячної енергії у безпілотному літальному апараті

Наявність альтернативного джерела енергії у вигляді сонячних панелей може значно збільшити час польоту по порівнянні з безпілотними літальними апаратами, які використовують тільки акумулятори або паливні системи як основне джерело енергії. БПЛА що працюють на сонячній енергії, використовують сонячні панелі для збору сонячної енергії в денний час, яка після перетворення може використовуватися для підтримання польоту і бортових систем.

У разі оптимальної конструкції літака і відповідних умов навколишнього середовища, можливо, що буде достатньо сонячної енергії для зарядки бортових акумуляторів, для того щоб потім використовувати накопичену енергію в протягом нічного циклу польоту і подальшого виходу на денну фазу. Це так звана можливість безперервного польоту, при якому відбувається циклічне використання енергії, накопиченої в акумуляторах в протягом нічного періоду часу, і підзарядка в протягом денного періоду.

БПЛА з використанням сонячної енергії можна розділити на три основних типи за характером вибору висоти польоту [3, 5]:

- БПЛА призначені для тривалого висотного польоту (HALE, High-Altitude Long-endurance). До таких можна віднести літаки у великому масштабі з великим розмахом крил. Частіше всього використовуються як рухливі телекомунікаційні платформи;

- БПЛА призначені для тривалого польоту на низькій висоті (LALE, Low-Altitude Long-endurance). Сюди входять БПЛА з невеликим розмахом крил. Застосовуються частіше всього для спостереження та збору інформації;

- БПЛА з можливістю безперервного польоту. Особливий клас БПЛА, який може реалізовувати безперервний політ при заданих обмеженнях (висота польоту, горизонтальний політ, розміри літака тощо).

Основними відмінностями висотного польоту від польоту на низькій висоті є різні погодні умови (дощ, вітер, хмарність) і метеорологічні явища (термічні процеси).

4.2. Проблеми побудови безпілотних літальних апаратів на сонячній енергії

БПЛА з СЕС є предметом досліджень досить тривалий час [1, 4]. На сьогоднішній день розроблено безліч легких БПЛА, основними дослідниками в цій області є лабораторія при ETHZ, Швейцарія і група робіт [3, 4, 5]. В даних роботах ставляться завдання визначення можливості безперервного польоту з використанням сонячної енергії з урахуванням особливостей середовища експлуатації (висота, ширина, дата і час польоту, метеорологічні умови), а також завдання визначення основних геометричних параметрів конструкції літака, площі сонячних панелей, для того, щоб забезпечити максимальну тривалість польоту, з урахуванням заданих вхідних користувачем (корисна навантаження, технологічні параметри, параметри проектування структури БПЛА).

Однією з основоположних робіт по темі проектування сонячних БПЛА є [4]. У якій ставиться основною метою проектування сонячного БПЛА який буде здійснювати безперервний політ з використанням сонячної енергії в умовах заданої середовища експлуатації, часу року і місця, а також структурних і технологічних параметрів БПЛА. В роботі ставиться акцент на трьох основних моделях: аеродинаміці БПЛА при сталому горизонтальному польоті, енергетичної моделі БПЛА з урахуванням підсистем і корисною навантаження, а також апроксимуючих моделях мас. На етапі концептуального проектування, проводиться тільки пошук рішення для трьох параметрів компонування літака: розмах крил, подовження крила і маса БПЛА.

При цьому, концептуальне проектування, будується навколо одного критерію: щоб був достатній запас енергії (енергетичний баланс), для того, щоб літак зміг здійснити безперервний політ. Відповідно під нього шукається доступне рішення шляхом перебору або рішенням нерівності, яке буде задовольняти енергетичного балансу для здійснення усталеного горизонтального польоту.

Також, в роботі [4] не поставлена багатокритеріальна оптимізаційна задача, введений тільки один критерій, не проводиться пошук оптимальної конфігурації компонування літака, не проводиться оптимізація енергоспоживання БПЛА (крім введення МРРТ), так само як і його показників продуктивності під поставлені завдання.

Завдання розробки БПЛА на сонячних панелях охоплює багато області проектування і розробки [7]:

- проектування літального апарату (структура літака, аеродинаміка, механіка польоту);
- проектування бортових енергетичних систем (силова електроніка, електроживлення, сонячна енергетична установка);
- розробка навігаційного програмного забезпечення автопілота.

Проблеми виникають при проектуванні БПЛА:

- низькі енергетичні запаси низькі енергетичні запаси не забезпечують стійкість до погіршеною погоди (наприклад, хмар або низхідним потоків), а також не дозволяють виконувати польоти у нічний час з корисними навантаженнями
 - фактична відсутність корисної навантаження;
 - висока складність експлуатації, низьке енергоспоживання і значну вагу
- БПЛА призводить до млявою динамікою польоту, що вимагає просунуті алгоритми автопілотування;
- Обмежена автономія без обізнаності про навколишньому середовищі. БПЛА, і зокрема сонячні БПЛА, схильні до впливу навколишнього середовища , Крім рельєфу місцевості місцеві погодні ефекти можуть швидко пошкодити літальний апарат (наприклад, з-за поривів вітру, опадів чи грози) або знизити його характеристики (наприклад, через хмари).

Розробка сонячного БПЛА починається з етапу специфікації сценарію використання і параметрів середовища експлуатації, а також доступних технологічних параметрів, на підставі яких визначаються основні структурні параметри БПЛА.

Результатом проектування будуть конструктивні параметри БПЛА, а також структура бортових систем.

Метою статі є розробка підходу до проектування БПЛА на сонячній енергії з використанням сонячних панелей застосовуючи методи багатокритеріальний оптимізації та побудови системи САПР з використання гібридної системи акумулювання енергії. Заснований на математичних моделях і підході концептуального проектування розробленому в [4] з удосконаленням математичних моделей енергетичної системи.

Для досягнення поставленої мети необхідне рішення наступних завдань:

- розробити моделі структурних елементів БПЛА на СЕ з використання ГСАЕ враховуючи параметри процедури оптимізації, імітаційні моделі, що дозволяють перевірити поведінку заданої структури БПЛА, а також формалізувати набір критеріїв;
- виконати пошук оптимальної конфігурації БПЛА ГСЕС з використанням багатокритеріальної оптимізації використовуючи генетичні алгоритми, використовуючи математичні моделі елементів.

4.3. Конструкція безпілотного літального апарату на сонячній енергії

Конструктивно БПЛА (рис. 4.1), як і звичайний літак складається з: фюзеляжу, крил і хвостового оперення, який також оснащений силовою установкою, а також, володіє певною схемою компоновання.



Рис. 4.1 – Компонування літака-планера

Відповідно структурно сонячний БПЛА складається з:

- корпусу БПЛА з урахуванням схеми компонування і профілю крила;
- СЕС (сонячні панелі, АКБ, набір перетворювачів, МРРТ), що представляє енергетичну частину комплексу силової установки;
- рухова група (пропелер, електродвигун), що представляє частину комплексу силової установки для створення тяги;
- пілотажно-навігаційне обладнання (контролер польоту, БІНС);
- радіотехнічне обладнання;
- бортове обладнання сценарію експлуатації (корисне навантаження).

Сонячні панелі покривають верхню частину крила літака, що відповідно утворює багато різних кутів падіння сонячних променів на сонячні модулі.

При конструюванні безпілотного літального апарату використовується адаптована версія СЕУ по вазі і розмірам. Зв'язок та інтеграція підсистем БПЛА з підсистемами СЕУ показана на рис. 4.2.

СЕУ забезпечує перетворення сонячної енергії для бортової мережі безпілотного літального апарату і забезпечує належні рівні енергії для безперервної роботи електричного обладнання, включаючи зарядку акумулятора, а також контрольовану енергетичну підтримку корисною навантаження.

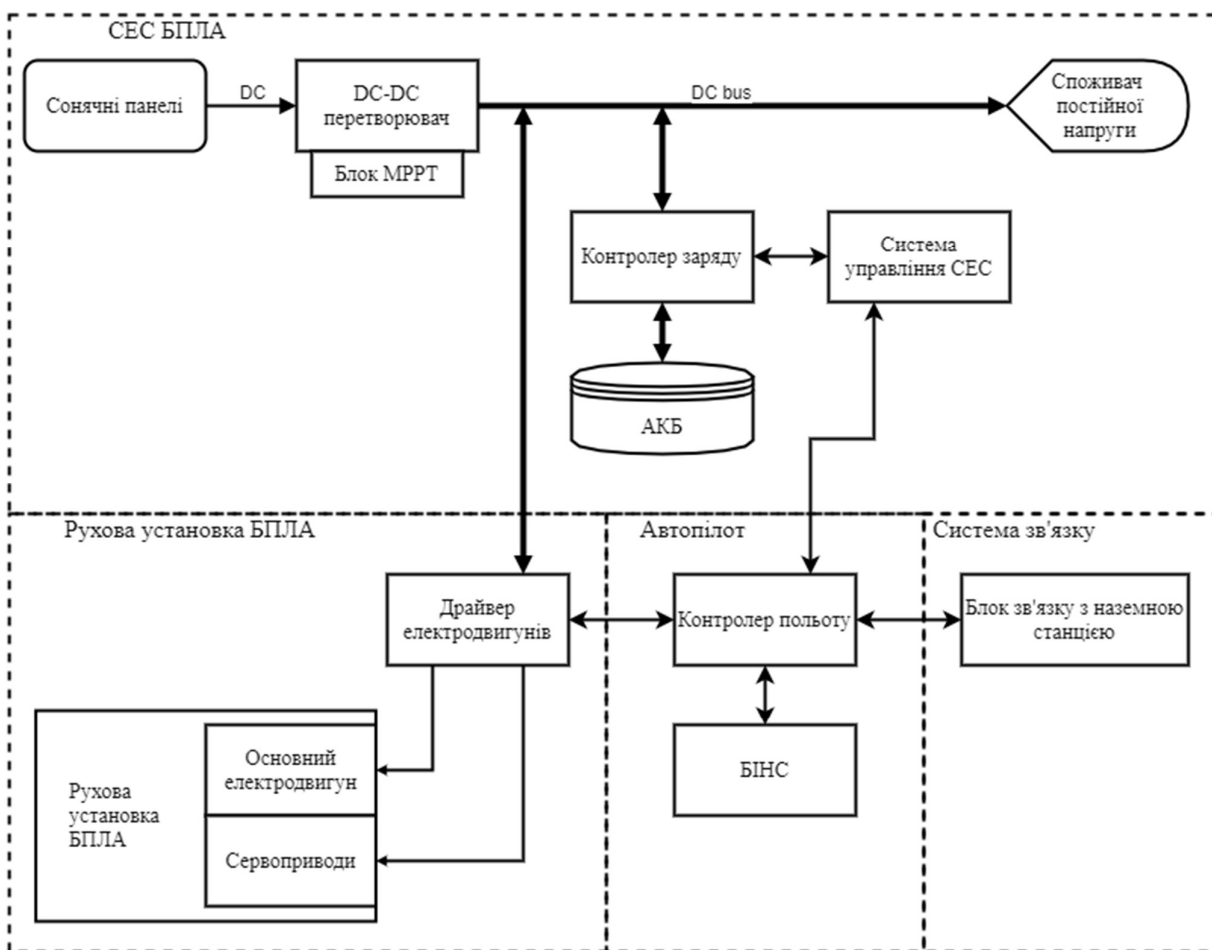


Рис. 4.2 – Структура сонячного БПЛА

4.4. Система автоматизованого проектування безпілотного літального апарату на сонячній енергії

Однією з основних цілей цієї роботи і концептуального проектування є розробка системи САПР. САПР - це система, яка містить набір блоків, де кожний блок являє собою набір моделей, конфігурацій, програмного та алгоритмічного забезпечення для вирішення завдання концептуального проектування, а також можливість перевірки результатів.

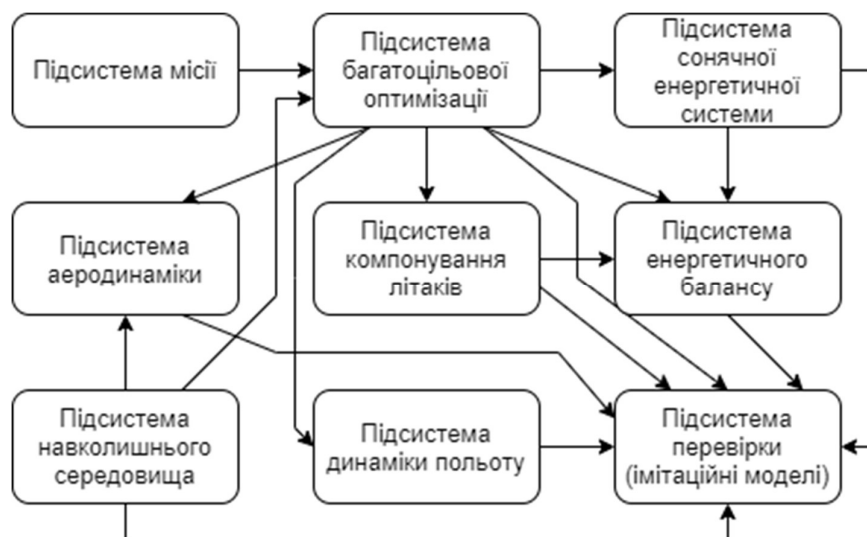


Рис. 4.3 – Структура сонячного БПЛА.

Структура САПР, а також взаємозв'язок блоків показана на рис. 4.13, розглянемо кожен з блоків більш докладно:

Підсистема місії. Цей блок дозволяє введення користувачем конфігурації польоту, цілі, які будуть встановлені перед БПЛА, щоб спрямувати процес проектування для вирішення прикладних завдань. Параметри, з якими працює це пристрій: маса корисного навантаження, споживана потужність, тип місії, а також очікуваний тип маршруту та критичні точки (політ з точки А в точку В, політ з поверненням або без, круговий політ, круговий політ по шляхових точках і т. д.).

Підсистема навколишнього середовища. Цей блок є введенням користувачем очікуваної інформації про умовах навколишнього середовища, у яких буде літати БПЛА. Параметри, з якими працює пристрій: час року, а також діапазон робочих дат, очікувані погодні умови (в якості альтернативи може використовуватися історична база даних, на основі якої буде виходити припущення про погодні умови).

Підсистема сонячної енергії. Цей блок являє собою модель сонячної електростанції, у тому числі містить власну САПР, для розрахунку і проектування адаптованих SPS для сценарію використання. Вхідні параметри: специфікація вимог до основних вузлів і підсистем СЕУ (сонячні панелі, ШІМ або МРРТ, акумулявання, вимоги до навантаження і т. Д.). Вихідні параметри: специфікація адаптованого SPS (тип і потужність сонячних панелей, конфігурація підключення,

очікувані технічні характеристики вузлів, діапазон робочих напруг, а також генеруюча потужність).

Багатоцільова підсистема оптимізації. Цей блок є підсистемою багатокритеріальної оптимізації, в якій процес оптимізації багатьох цільових функцій запускається в умовах заданих обмежень. Відповідно, проблема пошуку оптимальної конфігурації БПЛА вирішується з урахуванням багатьох чинників, таких як: специфіка польоту, особливості навколишнього середовища і час польоту, а також додаткові користувальницькі обмеження за вагою, розмірами і т. д.

Підсистема аеродинаміки. Цей блок є підсистемою для розрахунку аеродинамічної складової БПЛА, такий як коефіцієнти опору і підйомної сили.

Підсистема динаміки польоту. Цей блок є підсистемою динаміки польоту сонячного літака, яка буде використовуватися для налаштування системи валідації і розрахунку параметрів механіки польоту.

Підсистема компоновання літака. Цей блок використовується в якості підсистеми розрахунку макета.

Підсистема енергетичного балансу. Цей блок є підсистемою для розрахунку та оцінки енергетичних потреб БПЛА в контексті доступною сонячної енергії та енергії, що генерується SES.

Підсистема валідації (імітаційне моделювання). Це набір імітаційних моделей БПЛА, включаючи аеродинамічну модель літака, навігаційну систему, зконфігуровану для польоту, енергетичну модель літака, компоновання, модель навколишнього середовища, а також модель доступного сонячного випромінювання. Виконує моделювання, аналізує кілька днів польоту налаштованого БПЛА для генерації звіту по всім бортовим підсистемам, включаючи енергетичну.

4.5. Проектування безпілотного літального апарату з використанням сонячної енергетичної системи

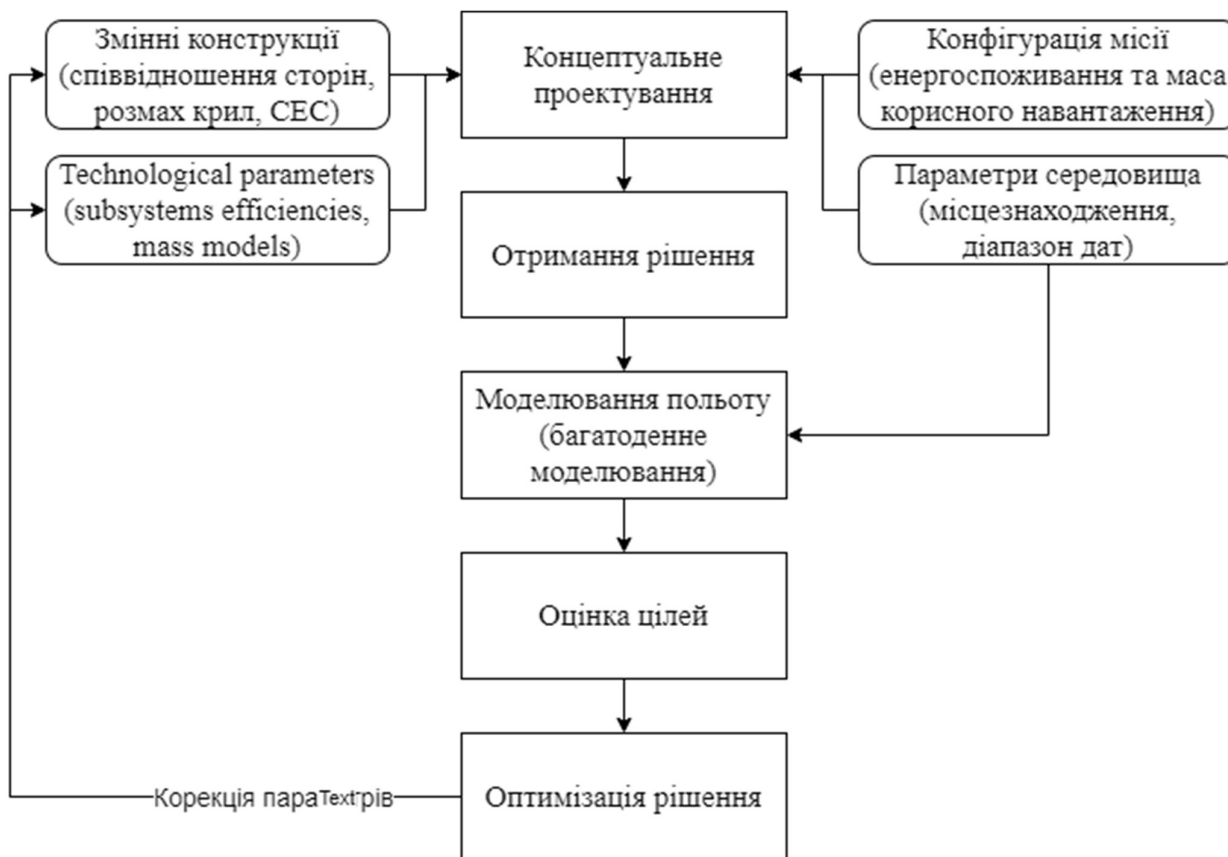


Рис. 4.4 – Цикл проектування БПЛА з СЕУ

Опорною точкою є концепція безперервного польоту, виходячи з цього, формується концепція енергетичного балансу: балансу мас і балансу енергії: баланс ваги передбачає, що підйомна сила повинна компенсувати сумарний вага літака і повинна бути врівноваженою; енергетичний баланс являє собою деякі значення доступною сонячної енергії протягом дня, що збирається сонячними батареями, розміщеними на борту, яка повинна дорівнювати або перевищувати значення споживаної енергії на всіх енергетичних вузлів літака.

Запропонована методологія концептуального проектування в роботі 4] являє собою наступний вигляд:

1. формується вираження необхідної потужності БПЛА за умови безперервного горизонтального польоту;
2. будується вираз доступною сонячної енергії в перебігу дня;

3. розроблені вагові моделі, дозволяють замкнути цикл пошуку аналітичного рішення задачі проектування.

Розширення концептуального проектування БПЛА з СЕС полягає в тому, що СЕС доповнюється гібридною системою акумулювання енергії (HESS).

Модель маси БПЛА, яка враховує всі основні підсистеми БПЛА, запропонована в роботі [4] має наступний вигляд:

$$m = m_{av} + m_{pld} + m_{af} + m_{sc} + m_{mppt} + m_{storage} + m_{prop},$$

де: m_{av} - маса авіоніки; m_{pld} - маса корисного навантаження, m_{af} - маса корпусу літака, m_{sc} - маса сонячних панелей, m_{mppt} - маса контролера МППТ, m_{bat} - маса АКБ, m_{prop} - маса рухової групи.

Вводиться HESS з використанням акумуляторних батарей і суперконденсаторів:

$$m_{storage} = N_{sc}m_{sc}k_{storage} + N_{bat}m_{bat}(1 - k_{storage}),$$

де $k_{storage}$ – коефіцієнт розподілу маси між суперконденсаторами та АКБ.

Побудова гібридних систем акумулювання енергії

Завдання визначення розміру елементів накопичення HESS, полягає в тому, щоб знайти оптимальне кількість елементів HESS, а саме акумуляторних батарей (N_{bat}) і суперконденсаторів (N_{sc}), при умові мінімізації ваги HESS, а також задоволенні вимог навантаження, доступної потужності і обмежень елементів системи.

Існує взаємозалежність між проблемою управління енергоспоживанням HESS і розміром HESS, так як при різному розмірі елементів HESS розподіл потужності може бути визначено по-різному.

Існує безліч досліджень розміру системи акумулювання, у тому числі і на основі зв'язки АКБ і суперконденсаторів [6, 8].

Завдання оптимізації розмірів HESS полягає в тому, щоб знайти оптимальну комбінацію (N_{bat}, N_{sc})

Мінімізувати $f(N_{bat}, N_{sc})$,

при обмеженнях

$$\begin{aligned}
N_{bat}P_{bat}^{max} &\geq P_{bat}(t), \\
N_{sc}P_{sc}^{max} &\geq P_{sc}(t), \\
N_{bat}P_{bat,one} &\geq P_{load}, \\
N_{bat}P_{bat,one} + N_{sc}P_{sc,one} &\geq P_{load}^{max}, \\
N_{bat}E_{bat,one} + N_{sc}E_{sc,one} &\geq E_{load}^{max}, \\
P_{sc}^{min} &\leq P_{sc}(t) \leq P_{sc}^{max}, \\
P_{bat}^{min} &\leq P_{bat}(t) \leq P_{bat}^{max}, \\
SOC_{bat}^{min} &\leq SOC_{bat}(t) \leq SOC_{bat}^{max}, \\
SOC_{sc}^{min} &\leq SOC_{sc}(t) \leq SOC_{sc}^{max}.
\end{aligned}$$

На кожному часом кроці моделі навантаження $P_{load}(t)$ сума миттєвої потужності АКБ (P_{bat}) і суперконденсатора (P_{sc}) дорівнює споживаної потужності навантаження:

$$P_{load}(t) = P_{bat}(t) + P_{sc}(t).$$

У свою чергу миттєву потужність можливо виразити через енергії за момент часу:

$$P_{sc} = \frac{E_{sc}(t) - E_{sc}(k-1)}{\Delta T}.$$

Зв'язок енергії з напругою:

$$\begin{aligned}
E_{sc}(t) &= \frac{CV_{sc}^2(t)}{2}, \\
E_{sc}^{min} &\leq E_{sc}(t) \leq E_{sc}^{max}, \\
P_{sc}^{min}(t) &\leq P_{sc}(t) \leq P_{sc}^{max}(t).
\end{aligned}$$

Максимальна потужність розряду/заряду може бути виражена наступним чином (максимальні струми розряду/заряду визначаються характеристиками):

$$\begin{aligned}
P_{sc}^{min} &= V_{sc}I_{sc}^{min}, \\
P_{sc}^{max} &= V_{sc}I_{sc}^{max}.
\end{aligned}$$

Для рішення задачі оптимізації і синтезу підсистеми багатокритеріальної оптимізації для автоматизованої системи проектування був використаний метод удосконаленого алгоритму еволюції Парето (SPEA2 [2]). Цей метод

zareкомендував себе для вирішення проблем цього типу і є поліпшеним варіантом методу з тим же ім'ям.

Основною метою алгоритму SPEA2 є підтримка та пошук рішень у вигляді парето-оптимального безлічі.

Основними відмінностями SPEA2 по порівнянні з SPEA є:

- використовується покращена схема призначення фітнесу, яка враховує для кожного людини, скільки людина домінує і над чим він домінує;
- включена методика оцінки щільності найближчих сусідів, яка дозволяє більш точно орієнтуватися в процесі пошуку;
- нові методи скорочення архіву гарантують збереження граничних рішень.

Багатокритеріальна оптимізація була виконана для вхідних параметрів, які представлені в табл. 4.5 із зменшеним набором критичних параметрів.

Таблиця 4.1
Проектні параметри

Час початку	1 / серпень / 2019 р.
Час закінчення	1 / сент. / 2019 р.
Розташування	Київ, Україна
Цільова висота	100 м
Ефективність сонячних елементів	0,18
Конфігурація сонячної енергії eff	0,95
ККД МРРТ	0,98
Вихідна батарея SoC	Повна
зарядка / розрядка Ефективність	0,98
Потужність Корисна навантаження	0.5 W

Рішення які були знайдені допомогою багатокритеріальної оптимізації підсистеми наведена в табл. 4.6.

Таблиця 4.2
Параметри літака

Загальна маса	2,8 кг
розмах крила	3.4 m ²
Endurance	25h
Круїзний потужність	17W

Solar Cells площа	0,75 м ²
Ємність батареї	150 Втч.
Швидкість (набір висоти)	0,1 м / с
Потужність (набір висоти) 20	Вт
Потужність Avionics	2,5 Вт
Потужність корисної навантаження	0,5 Вт

Інструмент аналізу, розроблений в Simulink, використовується як вхідні параметри характеристики середовища польоту, часу запуску, а також параметри БПЛА. Моделювання виконується за рахунок трьох базових підсистем:

- модель інтенсивності сонячного випромінювання, що представляє собою модель доступної енергії забезпечуваною Сонцем;
- модель енергосистеми, яка використовується для розрахунку поточного розподілу потужності;
- модель БПЛА, яка використовується для розрахунку і відстеження фактичних параметрів польоту БПЛА.

Інструмент аналізу показаний на рис. 4.8, він представляє наступні типи блоків: вхідних параметрів та імітаційних моделей;

Входи інструменту аналізу:

- день року, коли можна почати симуляцію;
- параметри розташування, такі як довгота і широта;
- параметри площі сонячних елементів, які пов'язані з перетворенням потужності від сонячної до електричної енергії;
- параметри банку батарей, які відповідають за акумулювання та надання додаткової енергії, якщо потрібно, можуть бути сконфігуровані з різним станом заряду батарей;
- параметри польоту БПЛА, які являють собою параметри спроектованого літака, такі як необхідна потужність для горизонтального польоту, параметри структури БПЛА, очікувана швидкість підйому і додаткова потужність необхідна для набору висоти, і початкова висота зльоту;
- блок вимог до потужності БПЛА, який описує потрібну додаткову потужність для системи.

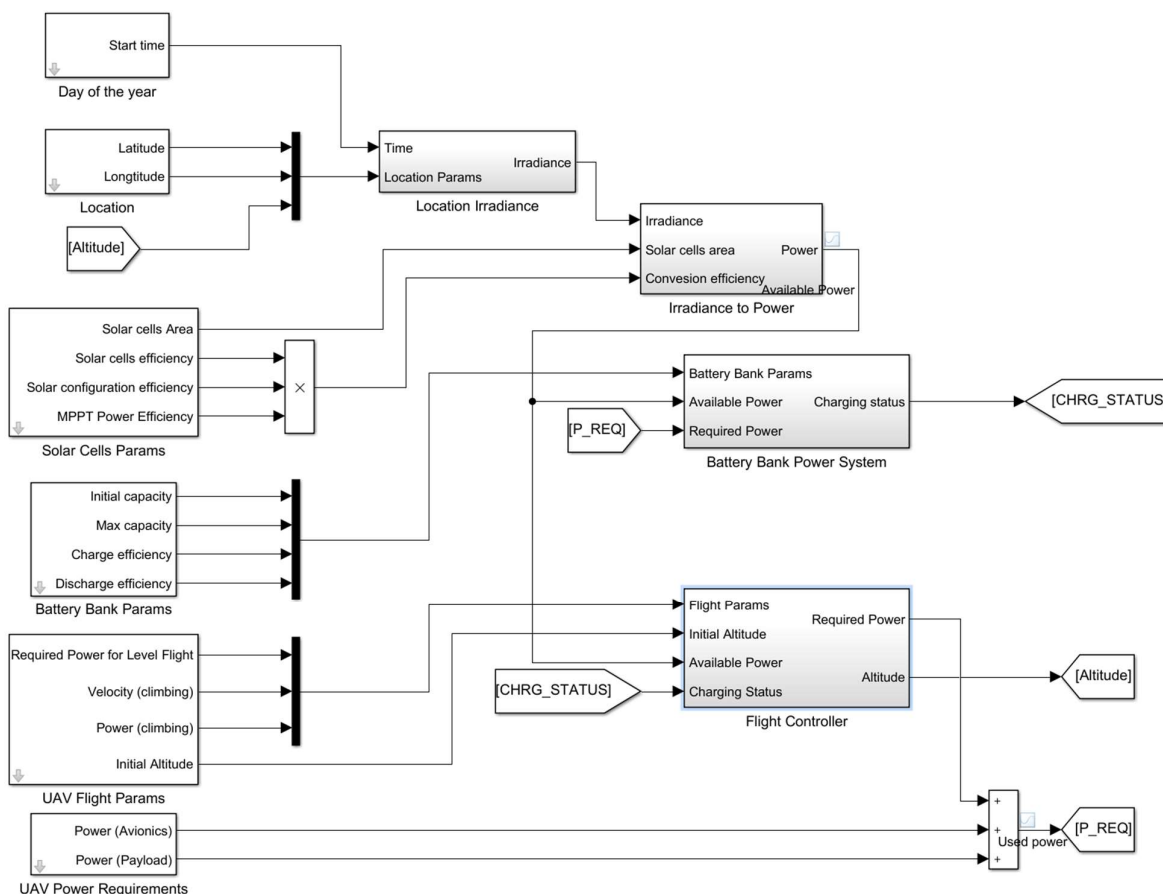


Рис. 4.5 – Інструмент аналізу БПЛА в Simulink

Location Irradiance - модель освітленості, яка використовує модель Duffie & Beckman, яка може забезпечити розрахунковий рівень освітленості в залежності від часу року і поточного географічного положення;

Irradiance to Power, який забезпечує можливість перетворення фактичного рівня освітленості з використанням масиву сонячних елементів з його певним параметрам (ефективність сонячних елементів і його ефективність конфігурації) і ефективність блоку MPPT;

Battery Bank Power System, яка являє собою сховище енергії, імітує систему управління живленням, яка може прийняти рішення в залежності від стану заряду батарей для зарядки або немає. Оскільки входи управляють параметрами як доступною потужністю та необхідною потужністю для польоту, і можуть забезпечити різницю при потужності під час фази розряду. Оскільки внутрішній стан забезпечує поточний стан заряду і надлишок енергії;

Flight Controller - самий складний блок, він налаштований параметрами польоту і забезпечує логіку використання стратегії сходження (утримуючи висоту

або збільшуючи енергію в якості потенційної енергії), враховуючи поточний статус зарядки. Забезпечує як поточну висоту, так і потужність.

Моделювання часу виконується з використанням 48-годинний часової шкали для перевірки можливої безперервної здібності польоту з докладним поданням всіх внутрішніх станів підсистем у обраному місці в Києві, Україна.

Параметри моделювання були обрані для середнього БПЛА, який міг забезпечити теоретичний безперервний політ, місце в Києві, і дата використовувалася як не сама краща за денною тривалості, але протягом літа. Повний набір параметрів наведено нижче в табл. 4.4.

Таблиця 4.3

Вхідні параметри моделювання

Start time	1/Aug/2018 10:00
Location	Kyiv, Ukraine
Simulated Altitude	100m
Solar cells area	0.6 m ²
Solar cells efficiency	0.18
Solar configuration eff	0.95
MPPT efficiency	0.98
Battery initial SoC	168Wh
Battery Capacity	168Wh
Charge/Discharge efficiency	0.98
Level flight power	12W
Velocity (climbing)	0.1 m/s
Power (climbing)	14W
Power Avionics	2.5 W
Power Payload	0.5 W

З результатів моделювання ми могли б добитися того, що для цих параметрів можливий безперервний політ. На рис. 4.10 порівнюється доступна потужність

(являє собою потужність, отриману від сонячних елементів після перетворення в електричну), з використаної потужністю (потужність, необхідна повітряним судном для всіх систем, підключених до енергосистеми, таких як авіоніка і корисна навантаження) і потужність заряду (які являють собою потік потужності від і до батареї). На рис. 5 є стан заряду батареї, де показана поточна ємність.

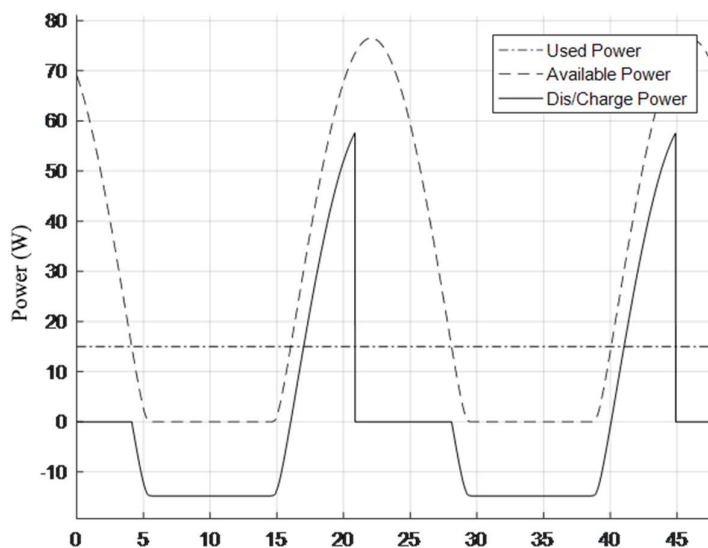


Рис. 4.6 – Порівняння доступною, використаної енергії та енергії заряду АКБ

Цей імітований політ з плином часу можна було б розділити на кілька етапів:

Фаза 1: Початковий запуск і проліт при денному світлі.

На цьому етапі симуляція почалася з батареї з повною місткістю, вона показана на рисунках 4-5, заряджаючи потужність і акумулятор SoC, тут є прямі лінії. Це означає, що для цього симулированного дня і для цього часу початку можна почати з менш початкового SoC, де ми могли б додатково перезарядити акумулятор на повну потужність в нічний час.

Фаза 2: Літати в нічний час.

Нічний час польоту пов'язано з тим, що немає можливості заряджати акумулятор, цей тип польоту повністю залежить від наявності енергії від батареї. Після моделювання часу на цьому етапі ми могли проаналізувати доступний запас потужності після нічного кінця.

Етап 3: Безперервний політ.

Наступним кроком є здатність забезпечити безперервний політ, на цьому етапі для досягнення цього може бути замало показників. Перш за все, це успішно попередній етап, а секунда один, на цьому етапі при денному світлі акумулятор повинен бути заряджений достатньо для майбутнього нічного польоту. При поточної симуляції вона показана як пряма горизонтальна лінія між 21h і 28h польоту. У цьому випадку батарею можна заряджати досить швидко, навіть до максимальної сонячної радіації.

В результаті цей інструмент моделювання міг би створити «реальну» картину льотної ефективності, з деякими ідеями, де ми могли б поліпшити деякі параметри дизайну або як ми можемо використовувати надлишкову потужність, наприклад, як показано між 21 год і 28 год польоту, є перевищення влади. Ця потужність може бути збережена шляхом збільшення висоти або може бути використана додатковими функціями корисною навантаження.

Висновки до розділу 4

Розроблена структура СЕС для БПЛА на сонячній енергії до складу якої входить гібридна система акумуляування енергії (на базі акумуляторних батарей та суперконденсаторів), параметри яких визначаються в результаті рішення оптимізаційної задачі, що дозволяє підвищити надійність, збільшити час польоту, збільшити пікову максимальну потужність енергетичної системи БПЛА.

Список використаних джерел у розділу 4

1. Boucher, R. (1984) “History of solar flight,” in *20th Joint Propulsion Conference*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
2. Kim, M. *et al.* (2004) “SPEA2+: Improving the performance of the strength Pareto evolutionary algorithm 2,” in *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 742–751.
3. Leutenegger, S. (2014) *Unmanned solar airplanes: Design and algorithms for efficient and robust autonomous operation*. ETH Zurich. doi: 10.3929/ETHZ-A-010255301.

4. Noth, A. (2008) *Design of solar powered airplanes for continuous flight*. ETH Zurich. doi: 10.3929/ETHZ-A-005745622.
5. Oettershagen, P. (2018) *Solar-powered unmanned aerial vehicles: Design and environment-aware navigation for robust low-altitude multi-day continuous flight*. ETH Zurich. doi: 10.3929/ETHZ-B-000265638.
6. Paul, T. *et al.* (2020) “Sizing of lithium-ion battery/supercapacitor hybrid energy storage system for forklift vehicle,” *Energies*, 13(17), p. 4518.
7. Rajendran, P. and Smith, H. (2018) “Development of design methodology for a small solar-powered unmanned aerial vehicle,” *International journal of aerospace engineering*, 2018, pp. 1–10.
8. Yu, H. *et al.* (2021) “Dimensioning and power management of hybrid energy storage systems for electric vehicles with multiple optimization criteria,” *IEEE transactions on power electronics*, 36(5), pp. 5545–5556.

Висновки

У дисертаційній роботі розглянута актуальна проблема проектування гібридних сонячних енергетичних систем та їх підсистем, які були теоретично та експериментально досліджена. Розроблені підходи забезпечують пошук оптимальної структури, застосування ефективних алгоритмів пошуку точки максимальної потужності сонячної підсистеми, а так само визначення оптимальної СЕС із застосуванням гібридної системи накопичення енергії для БПЛА на сонячній енергії, яка забезпечує збільшення тривалості польоту.

Основні досягнуті результати:

1. Розроблена структура системи та сама система автоматизованого проектування ГСЕС, що дозволяє оптимізувати структуру і параметри ГСЕС на підставі використання методів багатокритеріальної оптимізації, що дозволяє мінімізувати вартість системи, збільшити надійність, мінімізувати дефіцит енергії для споживачів, мінімізувати забруднення навколишнього середовища.

2. Розроблена структура СЕС для БПЛА на сонячній енергії до складу якої входить гібридна система акумулювання енергії (на базі акумуляторних батарей та суперконденсаторів), параметри яких визначаються в результаті рішення оптимізаційної задачі, що дозволяє підвищити надійність, збільшити час польоту, збільшити пікову максимальну потужність енергетичної системи БПЛА.

3. Розроблено новий алгоритм МРРТ, для його реалізації використаний еволюційний метод Mine Blast Algorithm, що дозволяє підвищити ефективність і швидкість знаходження точки максимальної потужності в умовах часткової затіненості.

4. Розроблена система імітаційних моделей елементів ГСЕС, до її складу входять елементи СЕС (сонячні панелі, набір перетворювачів постійного та змінного струму), дизель-генератор, гібридна система акумулювання енергії, енергомережу, що дозволяє перевірити результати проектування.

5. Розроблену систему автоматизованого проектування ГСЕС впроваджено до ДП «ВО Київприлад» (акт впровадження від 20 квітня 2021), яка дозволила визначити оптимальну структуру ГСЕС для домогосподарства на двох осіб (м.

Київ, Україна) та знизити оціночну вартість системи, в випадках можливості продажу електроенергії за зеленим тарифом, до 45%, при збереженні цілей надійності, не збільшуючи забрудненість навколишнього середовища та відсутності дефіциту. Також апробовано розроблену САПР ГСЕС на спроектований і побудований ГСЕС на даху 5 корпусу НАУ.

Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації

Статті у виданнях іноземних держав–членів ЄС та ОЕСР:

1. Karabetsky, D., Sineglazov, V. (2021) “Multi-objective optimization of Hybrid Solar Energy System,” *Věda a perspektivy*, 1(1).

Статті у наукових фахових виданнях України:

2. Sineglazov, V., Karabetsky, D. and Chumachenko, O. (2021) “Multicriteria optimization in the problem of computer-aided design of hybrid solar energy systems”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(2 (111)), pp. 67–78.

3. Sineglazov, V. M. and Karabetsky, D. P. (2013) “Computer-aided design of solar power plant,” *Electronics and Control Systems*, 2(36).

4. Sineglazov, V. M. and Karabetsky, D. R. (2014) “Computer-aided design of motor driver for solar power plant,” *Electronics and Control Systems*, 1(39).

5. Sineglazov, V. M. and Karabetsky, D. P. (2014) “Analysis of solar power plant’s efficiency,” *Electronics and Control Systems*, 3(41).

6. Sineglazov, V. M. and Karabetsky, D. P. (2015) “Computer-aided design of solar power trackers,” *Electronics and Control Systems*, 1(43).

7. Karabetsky, D. P. (2016) “ANALYSIS OF SOLAR CHARGE CONTROLLERS,” *Electronics and Control Systems*, 1(47).

8. Karabetsky, D. P. (2018) “Conceptual design of solar unmanned aerial vehicle,” *Electronics and Control Systems*, 2(56).

9. Sineglazov, V. M., Karabetsky, D. P. and Klanovets, O. V. (2020) “MAXIMUM POWER POINT TRACKING FOR PHOTO MODULES,” *Electronics and Control Systems*, 1(63).

Матеріали та тези наукових доповідей:

10. Karabetsky, D. (2016) “Solar rechargeable airplane: Power system optimization,” in *2016 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. IEEE, pp. 218–220.

11. Karabetsky, D. (2017) “Conceptual design of maximum power point tracking for solar rechargeable airplane,” in *2017 IEEE 4th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*. IEEE, pp. 58–60.
12. Karabetsky, D. M. (2015) “Flying range of solar airplane,” in *2015 IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*. IEEE, pp. 48–49.
13. Karabetsky, D. and Sineglazov, V. (2018) “Analysis of solar rechargeable airplane,” in *2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. IEEE, pp. 16–19.
14. Karabetsky, D. and Sineglazov, V. (2018) “Conceptual design of solar power system,” in *2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. IEEE, pp. 275–278.
15. Karabetsky, D. and Sineglazov, V. (2019) “Conceptual design of solar rechargeable airplane,” in *2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*. IEEE, pp. 17–20.
16. Karabetsky, D. and Sineglazov, V. (2020) “Path planning for solar rechargeable aircraft,” in *2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. IEEE, pp. 126–128.
17. Sineglazov, V. M. and Karabetsky, D. P. (2013) “Energy system design of solar aircraft,” in *2013 IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD)*. IEEE, pp. 9–11.
18. Sineglazov, V. M. and Karabetsky, D. P. (2013) “Flying wing design for solar rechargeable aircraft” in *2013 IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD)*. IEEE, pp. 56–58.
19. Sineglazov, V. and Karabetsky, D. (2020) “HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEMS,” in *8. EUROPEAN CONFERENCE on RENEWABLE ENERGY SYSTEMS (ECRES)*. ISTAMBUL, TURKEY, pp. 596–600.
20. Sineglazov, V. and Karabetsky, D. (2020) “MAXIMUM POWER POINT TRACKING UNDER PARTIAL SHADING CONDITIONS USING NOVEL MINE BLAST ALOGRITHM,” in *8. EUROPEAN CONFERENCE on RENEWABLE ENERGY SYSTEMS (ECRES)*. ISTANBUL, TURKEY, pp. 590–595.

Додаток Б. Акт про практичне впровадження результатів дисертаційного дослідження (ДП «ВО Київприлад»)



ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший заступник генерального директора-

Головний інженер

Білий В.М.

«20» квітня 2021р

АКТ

**Про практичне впровадження результатів дисертаційного дослідження
Карабецького Дениса Петровича на тему: «Автоматизоване проектування
гібридних сонячних енергетичних систем», поданого на здобуття наукового
ступеня кандидата наук за спеціальністю**

05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт

1. Комісія у складі:

Голова: Білий В.М.- перший заступник генерального директора-головний інженер

Члени комісії: Подольський В.П.- начальник конструкторсько-технологічного відділу,

Махно Ю.П. – головний технолог.

розглянула матеріали впровадження результатів зазначеної дисертаційної роботи у процес виробництва.

2. Комісія прийшла до наступного висновку:

Результати наукового дослідження «Автоматизоване проектування гібридних сонячних енергетичних систем» Карабецького Д.П. впроваджуються у практичну діяльність ДП ВО «Київприлад», а саме програмне середовище системи автоматизованого проектування гібридних сонячних енергетичних систем.

Впровадження програмного середовища системи автоматизованого проектування гібридних сонячних енергетичних систем дозволило оптимізувати структуру і параметри системи використовуючи генетичні алгоритми для вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації, і тим самим скоротити вартість системи, збільшити надійність, скоротити дефіцит енергії та забруднення навколишнього середовища для споживачів.

Голова комісії,

В.М. Білий

Члени комісії:

В.П. Подольський

Ю.П. Махно