

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ
КАФЕДРА ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ**

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Василь БУДЬКО
«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії»

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

на тему: «Робота двосторонніх фотоелектричних модулів в умовах затінення та різної відбиваючої поверхні»

Виконав:

студент II курсу, групи ЕД-21мп
Юраш Олександр Васильович _____

Науковий керівник:

Д-р, фіз.-мат. наук, проф.,
Гаєвський Олександр Юлійович _____

Рецензент:

Канд. техн. наук, доц. каф. АЕ,
Дмитренко Олександр Олексійович _____

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

Студент _____

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра відновлюваних джерел енергії

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Василь БУДЬКО

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Юрашу Олександрю Васильовичу

1. Тема дисертації «Робота двосторонніх фотоелектричних модулів в умовах затінення та різної відбиваючої поверхні», науковий керівник дисертації Гаєвський Олександр Юлійович, професор, д.ф.-м.н., затверджені наказом по університету від «03» листопада 2023 р. № 5131-с
2. Термін подання студентом дисертації «12» січня 2024 р.
3. Об'єкт дослідження: робота двосторонніх фотоелектричних модулів.
4. Вихідні дані: основи роботи двосторонніх фотоелектричних модулів, енергетичні параметри обраного обладнання.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - 1) Провести аналіз наявних робіт по ефективності генерації двосторонніх фотоелектричних модулів. Відзначити основні моменти, врахувати переваги та недоліки.

- 2) Розробити експериментальну установку для отримання експериментальних даних по ефективності генерації двосторонніх фотоелектричних модулів, при цьому визначити метод отримання даних. Змонтувати експериментальну установку.
 - 3) Налагодити процес отримання експериментальних даних. Розробити план експерименту та виконати його, водночас корегувати його в залежності від отриманих даних.
 - 4) Проаналізувати отримані дані. Порівняти їх з тими, що були отримані в наявних роботах.
 - 5) Надати рекомендації по проектуванню, монтажу та експлуатації фотоелектричних станцій за результатами аналізу отриманих даних.
6. Перелік графічного матеріалу — 1 презентація
7. Дата видачі завдання «01» вересня 2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка.
1	Аналіз наявної літератури та робіт по роботі та ефективності генерації двосторонніх фотоелектричних модулів	01.07.2023-10.07.2023	Вик.
2	Визначення з методом вимірювання ефективності генерації двосторонніх фотоелектричних фотомодулів. Розробка експериментальної установки та підбір обладнання	11.07.2023-21.07.2023	Вик.
3	Монтаж експериментальної установки	22.07.2023-05.08.2023	Вик.
4	Пуско-наладка експериментальної установки, налагодження процесу збору даних, підготовка до проведення експерименту	05.08.2023-18.08.2023	Вик.
5	Проведення експерименту та збір даних генерації двосторонніх фотоелектричних модулів при різній відбиваючій поверхні та погодних умов	19.08.2023-05.12.2023	Вик.
6	Вивантаження експериментальних даних та їх аналіз	06.12.2023-20.12.2023	Вик.
7	Надання рекомендацій, зважаючи на отримані результати, написання висновків	20.12.2023-24.12.2023	Вик.
8	Оформлення пояснювальної записки і підготовка до захисту	25.12.2024-04.01.2024	Вик.

Студент _____

Олександр ЮРАШ

Науковий керівник _____

Олександр ГАЄВСЬКИЙ

Анотація

Магістерська дисертація включає в себе пояснювальну записку. Пояснювальна записка представлена на 148 сторінках формату А4, в яку входять 8 таблиць, 53 рисунків та 32 джерела використаної літератури.

В магістерській дисертації розглянуто процес розробки, монтажу та експлуатації експериментальної установки для отримання даних по роботі двосторонніх фотоелектричних модулів для подальшого аналізу та рекомендації по проектуванню нових систем, враховуючи отримані результати.

Актуальність проблеми. З огляду на стрімкий розвиток сонячної енергетики загалом, збільшення популярності та використання двосторонніх фотомодулів зокрема, актуально постає дослідження їх ефективності в порівнянні з односторонніми фотомодулями; факторів, що впливають на генерацію, в особливості за рахунок тильної поверхні, для подальшого застосування даних результатів при проектуванні та експлуатації систем на основі двосторонніх фотоелектричних модулів.

Мета магістерської дисертації. Підвищення ефективності застосування двосторонніх фотоелектричних модулів в автономних фотоелектричних системах при різних умовах затінення та відбиваючої поверхні.

Задачі дослідження.

1. Провести аналіз наявних робіт по ефективності генерації двосторонніх фотоелектричних модулів. Відзначити основні моменти, врахувати переваги та недоліки.
2. Розробити експериментальну установку для отримання експериментальних даних з ефективності генерації двосторонніх фотоелектричних модулів. при цьому визначити метод отримання моніторингових даних. Змонтувати експериментальну установку, яка дозволить змінювати в процесі експериментів склад та кількісні характеристики обладнання.

3. Налагодити процес отримання експериментальних даних в реальному часі на віддаленому комп'ютері. Розробити план експерименту та передбачити його корегування в залежності від отриманих даних.
4. Проаналізувати отримані моніторингові дані. Порівняти їх з тими, що відомі з літературних та Інтернет-ресурсів.
5. Надати рекомендації з проєктування, монтажу та експлуатації фотоелектричних станцій на основі результатів аналізу експериментальних даних.

Об'єкт дослідження. Процеси перетворення енергії сонячного випромінювання двосторонніми фотоелектричними модулями.

Предмет дослідження. Параметри автономної фотоелектричної системи на основі двосторонніх фотоелектричних модулів з урахуванням умов затінення та різної відбиваючої поверхні.

Методи дослідження. Порівняння потужності та продуктивності двома окремими стрінгами з однаковими фотомодулями, один з яких генерує тільки фронтальною стороною, а другий генерує як фронтальною, так і тильною сторонами. Обробка результатів в пакеті Microsoft Office та в програмному коді на базі Python.

Наукова новизна роботи. Отримано експериментальні дані приросту генерації двосторонніх фотоелектричних модулів кожного дня протягом часу проведення експериментальних досліджень (більше 100 днів) з інтервалом в 1 хвилину для подальшої побудови графіків приросту генерації та їх аналізу.

Практичне завдання роботи. Отримані залежності приросту генерації двосторонніх фотоелектричних модулів в умовах різної відбиваючої поверхні.

Ключові слова. відновлювані джерела енергії, фотоелектрична станція, фотоелектричний модуль, двосторонній фотоелектричний модуль, відбиваюча поверхня, ефективність генерації двосторонніх фотомодулів.

Annotation

The master's dissertation includes an explanatory note. The explanatory note is presented on 148 pages of A4 format, which include 8 tables, 53 figures and 32 sources of literature.

The master's dissertation examines the process of development, installation and operation of an experimental installation for obtaining data on the operation of bifacial photovoltaic modules for further analysis and recommendations for the design of new systems, taking into account the obtained results.

Relevance of development. In view of the rapid development of solar energy in general, and the increase in popularity and use of bifacial photovoltaic modules in particular, the study of their effectiveness in comparison to one-sided photovoltaic modules is relevant; factors affecting generation, especially due to the rear surface, for further application of these results in the design and operation of systems based on bifacial photovoltaic modules.

The purpose of the master's dissertation. Increasing the efficiency of the use of bifacial photovoltaic modules in autonomous photovoltaic systems under different conditions of shading and reflective surface.

Research objectives.

1. To conduct an analysis of existing works on the efficiency of generation of bifacial photovoltaic modules. Mark the main points, take into account the advantages and disadvantages.
2. Develop an experimental setup for obtaining experimental data on the efficiency of generation of bifacial photovoltaic modules. at the same time, determine the method of obtaining monitoring data. Assemble an experimental setup that will allow changing the composition and quantitative characteristics of the equipment during experiments.
3. Set up the process of obtaining experimental data in real time on a remote computer. Develop an experiment plan and predict its adjustment depending on the received data.

4. Analyze the received monitoring data. Compare them with those known from literary and Internet resources.
5. Provide recommendations on the design, installation and operation of photovoltaic plants based on the results of the analysis of experimental data.

The object of study. Processes of solar radiation energy conversion by bifacial photovoltaic modules.

The subject of study. Parameters of an autonomous photovoltaic system based on bifacial photovoltaic modules, taking into account shading conditions and different reflective surfaces.

Research methods. Comparison of power and performance of two separate strings with identical photovoltaic modules, one generating only the front side and the other generating both front and back sides. Processing of results in the Microsoft Office package and in Python-based program code.

Scientific novelty of the work. Experimental data on the increase in generation of bifacial photovoltaic modules were obtained every day during the course of experimental research (more than 100 days) with an interval of 1 minute for further construction of graphs of the generation ratio and their analysis.

The practical significance of the work. The obtained dependences of the increase in the generation of bifacial photovoltaic modules under the conditions of different reflective surfaces.

Keywords. renewable energy sources, photovoltaic plant, photovoltaic module, bifacial photovoltaic module, reflective surface, generation efficiency of bifacial photovoltaic modules.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	11
ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1 РОЗГЛЯД НАЯВНИХ РОБІТ ТА ДОСЛІДЖЕНЬ ПО ДВОСТОРОННІМ ФОТОМОДУЛЯМ ТА ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ В ПОРІВНЯННІ ЗІ ЗВИЧАЙНИМИ ОДНОСТОРОННІМИ.....	13
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ТА МОНТАЖ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ	32
РОЗДІЛ 3 ЗАПУСК УСТАНОВКИ, ПЛАН ТА ХІД ЕКСПЕРИМЕНТУ	40
РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАНИХ	48
РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНИЙ АСПЕКТ ТА ВИГОДА В ПОРІВНЯННІ З ОДНОСТОРОННІМИ; ПЕРСПЕКТИВИ НА МАЙБУТНЄ	82
РОЗДІЛ 6 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ	88
РОЗДІЛ 7 ОХОРОНА ПРАЦІ	90
РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	94
ДОДАТКИ.....	97
ДОДАТОК А. Розміщення фотомодулів на балконі 20-го корпусу КПП; загальний вид зверху.....	97
ДОДАТОК Б. Розміщення фотомодулів на балконі 20-го корпусу КПП; анфас	98

ДОДАТОК В. Розміщення фотомодулів на балконі 20-го корпусу КПП; профіль ..	99
ДОДАТОК Г. Дані генерації електроенергії кожним стрінгом кожного дня впродовж експерименту..	100
ДОДАТОК Д. Код для обробки та фільтрації експериментальних даних на прикладі даних за 20-те серпня.....	106
ДОДАТОК Е. Отримані графіки приросту генерації обраних днів експерименту	111
ДОДАТОК Ж. Порівняльна таблиця приросту генерації за рахунок двосторонніх фотомодулів та цін систем на двосторонніх фотомодулях з врахуванням генерації тильної сторони; приклад для 5 кВт станції.....	143
ДОДАТОК И. Подяка.....	148

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ФЕМ, ФМ — фотоелектричний модуль, фотомодуль.

ФЕК — фотоелектрична комірка.

ВАХ — вольт-амперна характеристика.

GCR — Ground cover ratio, коефіцієнт заповнення.

STC — standard test conditions, стандартні умови тестування.

MPP — maximum power point, точка максимальної потужності.

MPPT — maximum power point tracking, трекер точки максимальної потужності.

АКБ — акумуляторна батарея.

VRM — Victron remote monitoring, сайт моніторингу компанії Victron Energy.

ВСТУП

Диверсифікація джерел виробництва електроенергії є необхідною умовою подальшого розвитку людства. Це забезпечує як використання всього потенціалу наявних ресурсів, так і прагматичну експлуатацію останніх. Серед відновлюваних джерел останнім часом саме в сонячній фотоелектричній енергетиці спостерігається стрімкий розвиток, що пов'язано зі зменшенням вартості компонентів, збільшенням рентабельності та економічною доцільністю, а також прагненням до екологічно чистого виробництва електроенергії провідних країн світу. При цьому невід'ємною складовою збільшенням попиту є впровадження інновацій для підвищення ефективності та продуктивності систем. Однією з таких інновацій є двосторонні фотоелектричні модулі.

В роботі розглянуто види двосторонніх фотоелектричних модулів, їхню ефективність при різних умовах відбиваючої поверхні та погодних умов. На основі змонтованої експериментальної установки отримано залежності приросту генерації двосторонніх фотоелектричних модулів в умовах різної відбиваючої поверхні для м. Києва при висоті встановлення фотомодулів 1 м від поверхні землі, з азимутом 10° на Пд.-Зх та 30° до горизонту в період з кінця літа і до початку зими. Сформульовано доцільність використання двосторонніх фотоелектричних модулів на реальних об'єктах.

Автор вважає необхідним подякувати компанії Atmosfera за надання обладнання на час експерименту, а також всебічну підтримку в теоретичних та практичних аспектах використання, транспортуванні обладнання на об'єкт та надання порад під час експерименту [1]. Автор вважає необхідним подякувати кафедрі ВДЕ та КПІ в наданні дозволу для розміщення обладнання, а також підтримці та допомозі під час монтажу.

РОЗДІЛ 1 РОЗГЛЯД НА ЯВНИХ РОБІТ ТА ДОСЛІДЖЕНЬ ПО ДВОСТОРОННІМ ФОТОМОДУЛЯМ ТА ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ В ПОРІВНЯННІ ЗІ ЗВИЧАЙНИМИ ОДНОСТОРОННІМИ

Історія двосторонніх фотоелектричних модулів починається з 1954 року в «Bell Labs» [2], приблизно тоді почали з'являтися і звичайні односторонні фотомодулі. В той час це були лише експериментальні дослідження та лабораторні досліді, що ніяк не могли вийти на ринок електроенергетики. Великим поштовхом до розвитку та досліджень, удосконалення всієї галузі фотоенергетики стала нафтова криза 1973 року, особливо в Європі та Америці. Однак новій галузі необхідний був час на встановлення та розширення, тому в період з 70-их років і аж до початку ХХІ ст. використання фотоелектричних модулів, як і двосторонніх, в більшій мірі знаходило себе в космічній сфері: забезпечення електроенергією космічних станцій та супутників. Якраз в космічній галузі нівелюється основний недолік фотомодулів на той момент — висока вартість [3], що разом з доволі низьким ККД робила їх використання в комерції нерентабельним.

З часом, за рахунок продовження досліджень у сфері, використання у суміжних галузях, зокрема у космосі, популярність фотомодулів дещо збільшилася, а їх ціна зменшилась. Приблизно за 15 років з 100 \$/Вт зменшилася в 10 разів до 10 \$/Вт (рис. 1.1). Більш того, з настанням ХХІ ст. в Америці, а особливо в Європі та ЄС, почався рух на екологічне чисте виробництво, турботу про екологію та розуміння важливості сталого розвитку суспільства. Разом зі зменшенням собівартості фотомодулів, збільшенням попиту саме на відновлювані джерела енергії та екологічне виробництво електроенергії, зацікавленістю кінцевих клієнтів та великих гравців ринку в індустрію прийшли кошти, а з ними й інвестиції. Почався бурхливий розвиток фотомодулів, як в збільшенні потужності та загальної ефективності, так і окремих технологій, наприклад PERC [4] та Half-Cell [5], що наразі активно використовуються в більшості сучасних панелях.

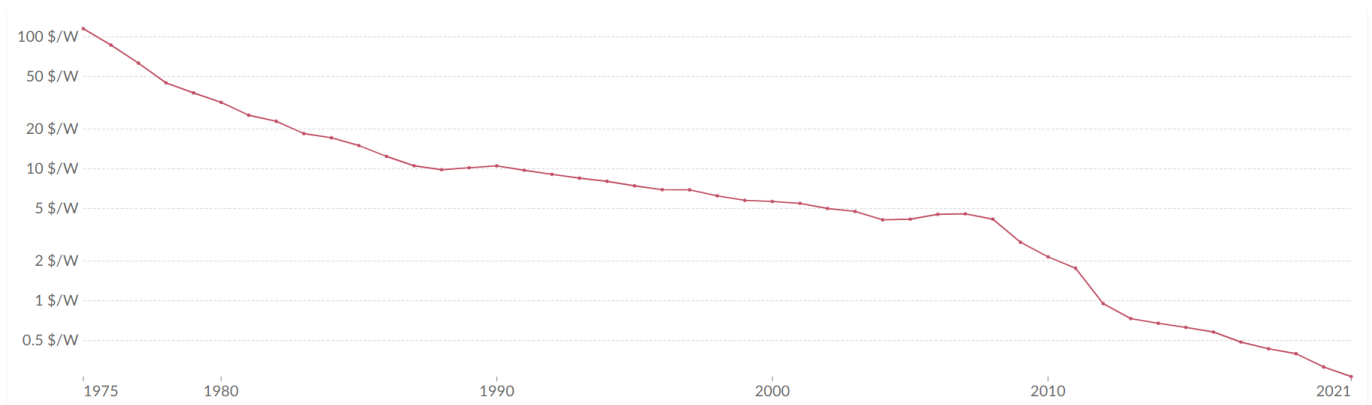


Рисунок 1.1 — Зміна вартості за 1 Вт потужності фотомодулів в період 1975–2021 [3]

Не дивно, що саме в цей час, а саме на початку XXI ст., відновилися активні дослідження саме по двостороннім фотомодулям, що з приходом інвестицій ще й пришвидшилися. 2012 рік можна вважати першим стабільний роком для двосторонніх фотомодулів на широкому ринку, оскільки з'явилися не тільки перші економічно ефективні панелі, а вони привернули увагу споживачів, і обсяги замовлень почали зростати (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 — Історія двосторонніх фотомодулів [2]

Першими компаніями на ринку двосторонніх фотомодулів можна вважати Solar Wind, PVGS, Yingli та bSolar. Згодом додалися LG electronics та Sunprime, а наразі, на момент написання даної дисертації, більшість провідних виробників фотомодулів мають у своїй продуктивній лінійці хоча б одну модель Bifacial.

По даним програмного забезпечення для моделювання фотоелектричних установок такого як pvDesign чи PVsyst у 2021 році більше ніж половина запитів по моделюванню була з використанням саме двосторонніх фотомодулів (рис. 1.3). Отже, можна бачити глобальну тенденцію на збільшення не тільки виробництва двосторонніх фотомодулів, а і будівництва станції саме з їх використанням та загальне збільшення кількості об'єктів з двосторонніми фотомодулями. Якщо тенденція продовжиться, то незабаром настане час, коли односторонні фотомодулі будуть вважатися архаїзмом, як колись двосторонні вважалися новизною.

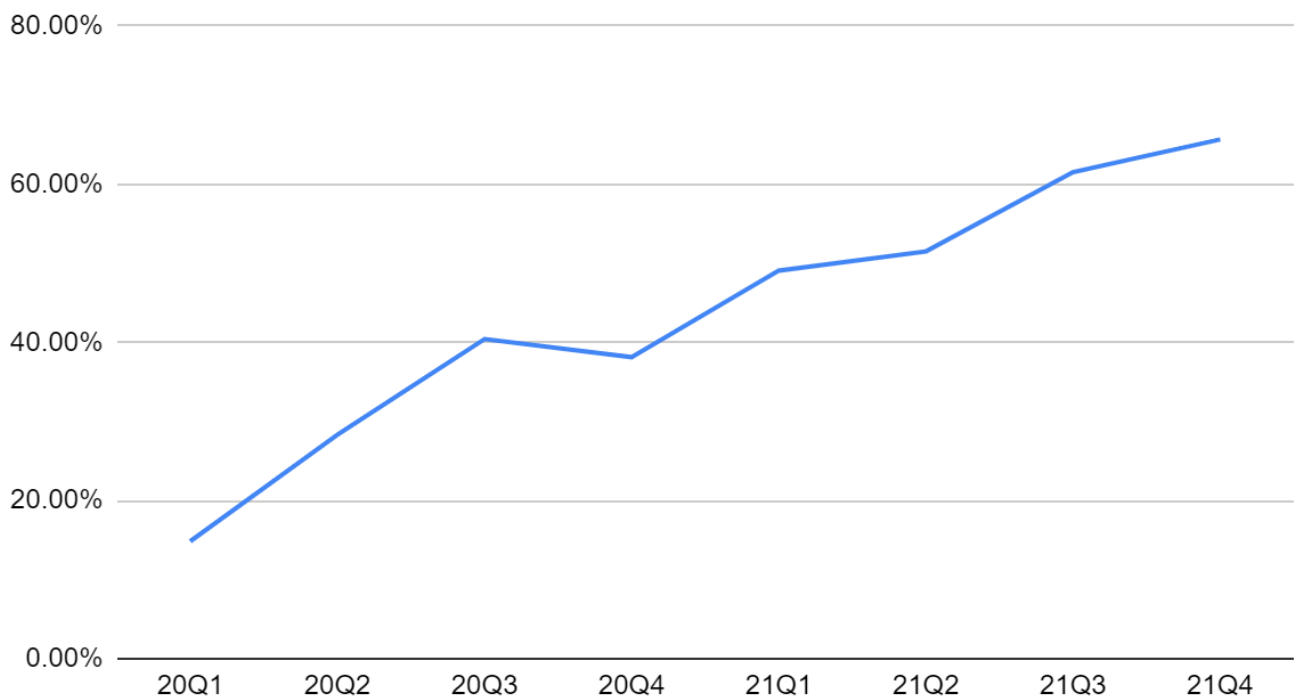


Рисунок 1.3 — Графік використання двосторонніх модулів над односторонніми за 2020 та 2021 роки по кварталам [2]

Зважаючи на такий стрімкий ріст двосторонніх фотомодулів постає питання їх використання та відповідних практичних досліджень для подальшого ефективного

практичного застосування під час проектування, монтажу та експлуатації станцій. Велика низка саме теоретичних досліджень вказують на можливе збільшення генерації до 25 % чи навіть 30 % [6, 7, 8] в порівнянні з односторонніми, однак ці дані, по більшій частині, саме теоретичні, а інколи не підкріплені формулами чи розрахунками звідки ці цифри з'явилися.

Саме тому є необхідність саме в практичних дослідженнях, що будуть найбільше наближені до реальності для з'ясування дійсної ефективності та приросту генерації двосторонніх фотомодулів для подальшого використання цих результатів як для аргументації кінцевим клієнтам переваг та недоліків того чи іншого встановлення, так і для рекомендацій по проектуванню там монтажу сонячних установок, а можливо і для розробки спеціальних кріплень саме для двосторонніх фотоелектричних модулів в залежності від приросту генерації.

Перш за все необхідно визначитися з певними основними елементами, про які надалі буде йти мова у роботі. Основним *об'єктом дослідження* є двосторонні сонячні фотомодулі. *Предметом дослідження* є вплив зовнішніх факторів, в тому числі відбиваючої поверхні, на роботу двосторонніх фотомодулів, їх ефективність та генерацію.

Двосторонній сонячний фотоелектричний модуль (в англomовній літературі використовується термін Bifacial Solar Photovoltaic Panel (Module) або просто Bifacial (Бифашл)) — фотоелектричний сонячний елемент, що має змогу сприймати інтенсивність сонячного випромінювання як з передньої (лицьової, фронтальної) сторони, так і задньої (тильної) для генерації електроенергії.

За видом *задньої підкладки* розрізняють два види двосторонніх фотомодулів:

1) **Скло/Скло**: двосторонні панелі з двосторонньою скляною поверхнею структурно міцніші та можуть протистояти більшим навантаженням, ніж інші двосторонні або односторонні сонячні панелі.

2) Скло/Прозора підкладка: передня сторона вкрита склом, а задня частина захищена прозорою підкладкою. Як правило, доступніші з точки зору ціни, ніж панелі скло/скло.

За *технологією фотоелектричних комірок* розрізняють [9]:

1) PERT (Passivated Emitter Rear Totally Diffused): ККД: 19,5–22 % (лицьова), 17–19 % (тильна); двосторонність: 80–90 %; приклади компаній виробників: Yingli, Trina, LG.

2) PERL (Passivated Emitter Rear Locally-diffused): ККД: 19,8 % (лицьова); двосторонність: 80–90 %.

3) **PERC** (Passivated Emitter Rear Contact): ККД: 19,4–21,2 % (лицьова), 16,7–18,1 % (тильна); двосторонність: 70–80 %; приклади компаній виробників: **JA Solar**, LONGi, Trina.

4) IBC (Interdigitated Back Contact): ККД: 23,2 %; двосторонність: 70–80 %.

5) HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer): ККД: 24,7 %; двосторонність: 95–100 %; приклади компаній виробників: Panasonic, Hanergy.

За характером *кріплення* розрізняють наступні види фотомодулів:

1) Рамні фотомодулі (рис. 1.4): як і більшість класичних односторонніх фотомодулів мають металічну раму (зазвичай алюмінієву), яка згодом кріпиться до конструкції під час монтажу.

2) Безрамні фотомодулі (рис. 1.5): не мають металічної рами, тому для їх монтажу необхідні спеціальні кріплення.

З практичної точки зору рамні та безрамні фотомодулі мають дуже суттєву різницю саме за рахунок кріплення. Як відомо, за місцем встановлення типи систем кріплення розрізняють на:

1) Дахові;

- Скатні дахи;
- Плaska покрівля (баластні системи);
- Навіси;

2) Наземні;

- Стаціонарні системи;
- Трекерні системи;

3) Плавучі.



Рисунок 1.4 — Загальний вид двостороннього фотомодуля з рамою



Рисунок 1.5 — Змонтовані безрамні двосторонні фотомодулі на наявному об'єкті [6]

При цьому рамні двосторонні фотомодулі можливо встановити на аналогічні кріплення, що використовують і для звичайних односторонніх фотомодулів. Зважаючи на велику різноманітність, довгий час роботи з відповідними і надійність, це є безумовною перевагою рамних двосторонніх фотомодулів. Тим паче, що і для інженерів та монтажників техніка встановлення та експлуатації вже відома. В більшості випадків рамні двосторонні фотомодулі монтуються на наземні системи, бо саме вони можуть забезпечити відповідні рекомендації по встановленню. У виробників металоконструкцій наявні в продуктивній лінійці модифіковані наземні системи кріплення спеціально для двосторонніх фотомодулів, однак різниця зі звичайними не суттєва.

Що ж до безрамних двосторонніх фотомодулів, то для них, як вже зазначалося, потрібні спеціальні системи кріплення, що безумовно спричинить додаткові витрати часу та коштів. Персоналу, що буде монтувати відповідний об'єкт, необхідно пройти додаткове навчання по встановленню безрамних конструкції. Через дані фактори об'єкти з безрамними двосторонніми фотомодулями є доволі рідкісними.

В тексті було згадано два терміни, такі як ККД та двосторонність. ККД для фотопанелей є відношенням енергії від інтенсивності сонячного випромінювання, що надійшла на фотомодуль, до тої електричної енергії, що виробив фотомодуль.

Двосторонність (або коефіцієнт двосторонності) — відношення ККД тильної сторони по відношенню до ККД фронтальної за умови однакової інтенсивності сонячного випромінювання. Звідси можемо бачити, що коефіцієнт двосторонності завжди буде менше одиниці, а найкраще значення буде дорівнювати одиниці.

Розглянемо принцип роботи звичайного одностороннього фотомодуля, а саме фактори, що впливають на його генерацію. Як відомо, фотомодуль складається з великої кількості фотоелектричних комірок. За рахунок їх послідовного і паралельного з'єднання отримується загальна ВАХ фотомодуля. Однодіодна модель ФЕК представлена на рис. 1.6, а ВАХ ФЕК у формулі (1.1) [10].

$$i(G, T) = i_{ph}(G, T) - i_0 \left(e^{\frac{q(u(G, T) + i(G, T) * r_s)}{AkT}} - 1 \right) - \frac{u(G, T) + i(G, T) * r_s}{r_p} \quad (1.1)$$

де G – густина потоку випромінювання (інтенсивність сонячного випромінювання) (Вт/м^2); T – температура ФЕК (К); u – різниця потенціалів на електродах ФЕК (В); i_{ph} – фотострум ФЕК (А); i_0 – зворотний струм насичення (А); A – коефіцієнт неідеальності діода; k – постійна Больцмана; q – заряд електрона (Кл); r_s – послідовний опір ФЕК (Ом); r_p – паралельний опір ФЕК (Ом).

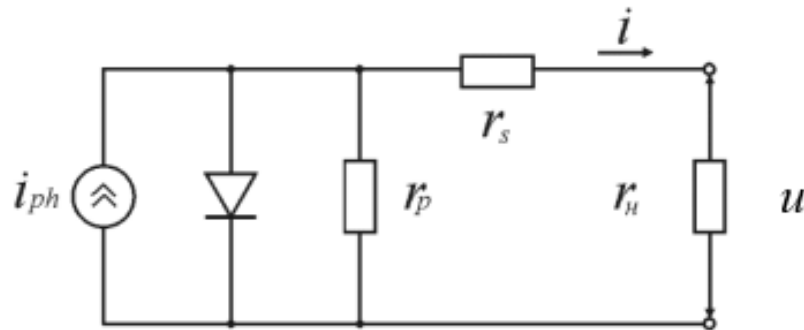


Рисунок 1.6 — Однодіодна модель ФЕК [10]

Після паралельного та послідовного підключення комірок отримуємо модель фотомодуля (рис. 1.7), та його рівняння ВАХ (1.2) [10].

$$I(G, T) = \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right)^{-1} * \left(I_{ph}(G, T) - \frac{U(G, T)}{R_p} - I_0 \left(e^{\frac{q(U(G, T) + I(G, T) * R_s)}{An_s kT}} - 1 \right) \right) \quad (1.2)$$

де $I = i * n_p$; $I_{ph} = i_{ph} * n_p$; $I_0 = i_0 * n_p$; $U = u * n_s$ — результуючі величини струмів і напруги для ФМ; $R_s = r_s * n_s / n_p$; $R_p = r_p * n_s / n_p$ — опори електричних втрат.

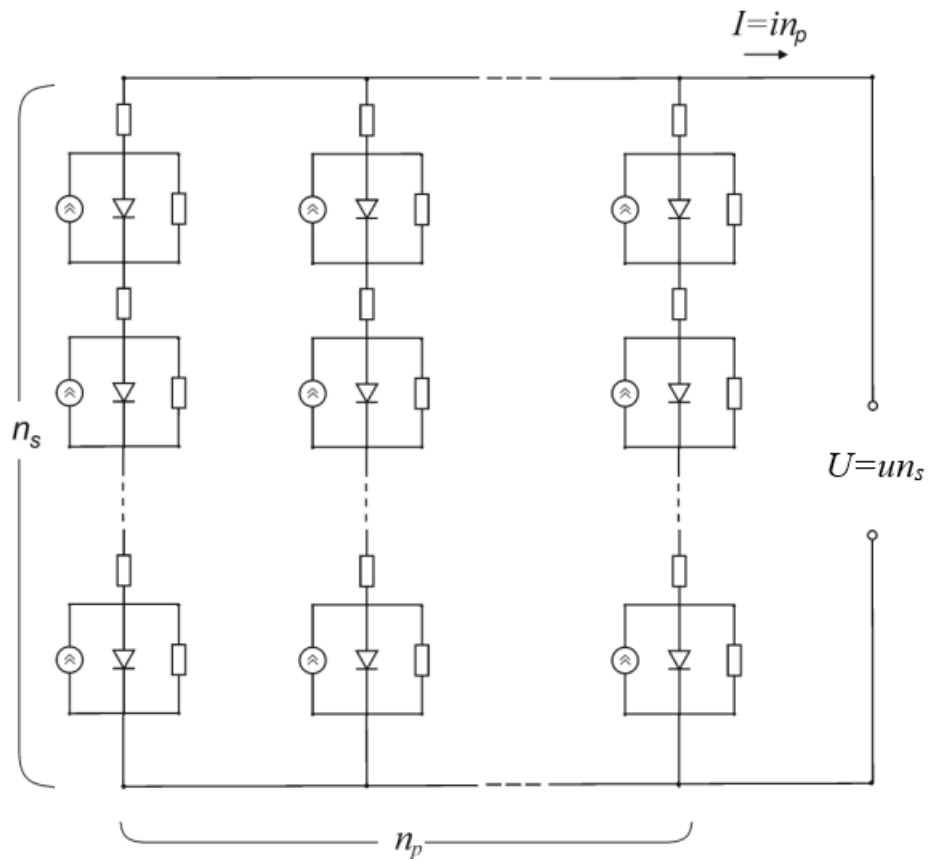


Рисунок 1.7 — Модель ФМ, що складена з однодіодних схем заміщення ФЕК [10]

З цих рівнянь бачимо, що характеристики ФМ: опір, коефіцієнт неідеальності, зворотній струм насичення — залежать від характеристик ФЕК, а також їх конфігурації у ФМ, що не залежать від зовнішніх факторів на об'єкті. Звідси можемо зробити висновок, що конструктивні параметри закладені вже у фотомодулі і їх змінити неможливо. Основними ж змінними величинами є струм, напруга, та фотострум. Вони, в свою чергу, залежать від температури та освітлення (потіку випромінювання). Тобто за рахунок зміни температури фотомодуля та освітлення, або інтенсивності сонячного випромінювання, можна змінювати ВАХ фотомодуля на об'єкті, а звідси і змінювати генерацію. Загальну тенденцію зміни ВАХ фотомодуля від інтенсивності сонячної радіації (рис. 1.8 та 1.9) та температури (рис. 1.10 та рис. 1.11) представлено нижче [10].

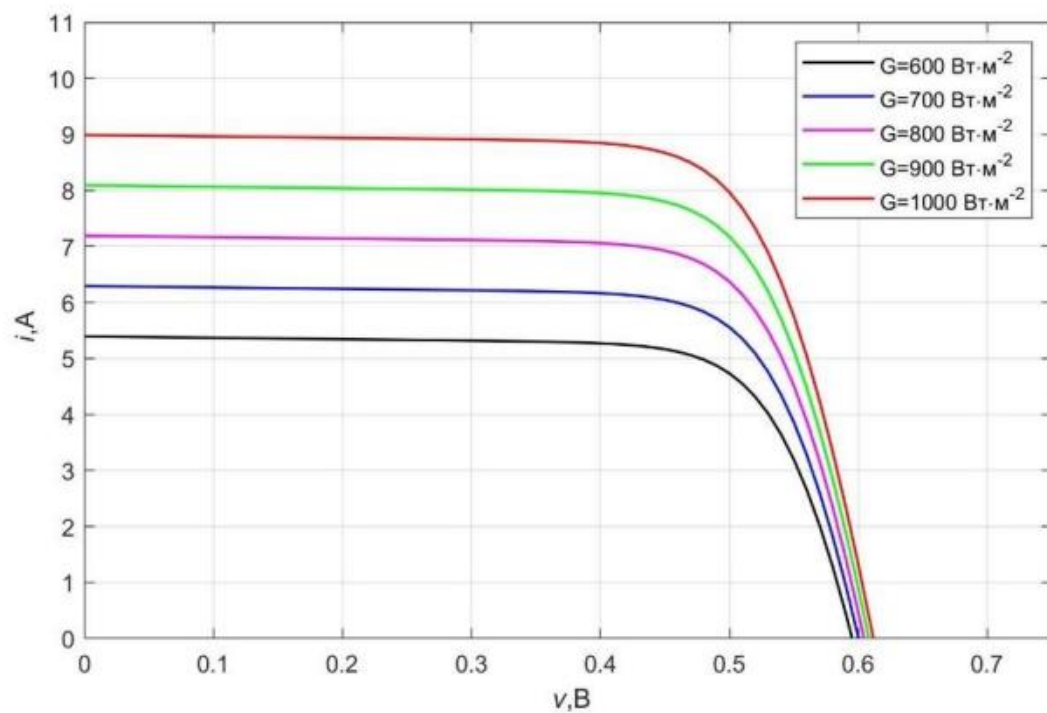


Рисунок 1.8 — ВАХ ФМ в залежності від освітлення [10]

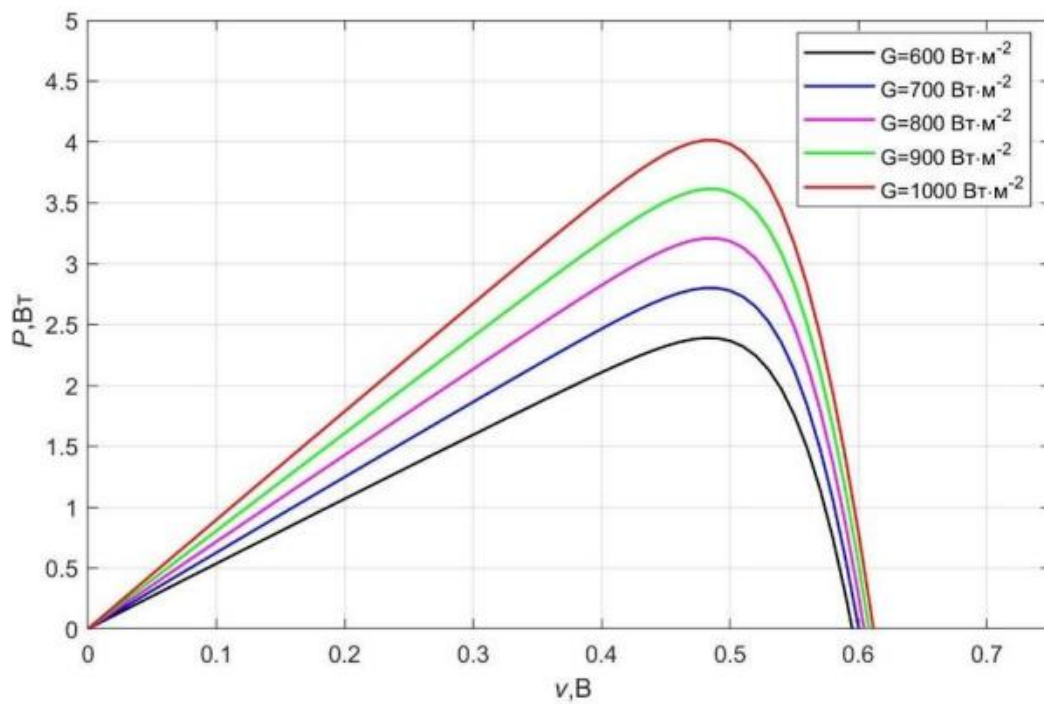


Рисунок 1.9 — Крива потужності ФМ в залежності від освітлення [10]

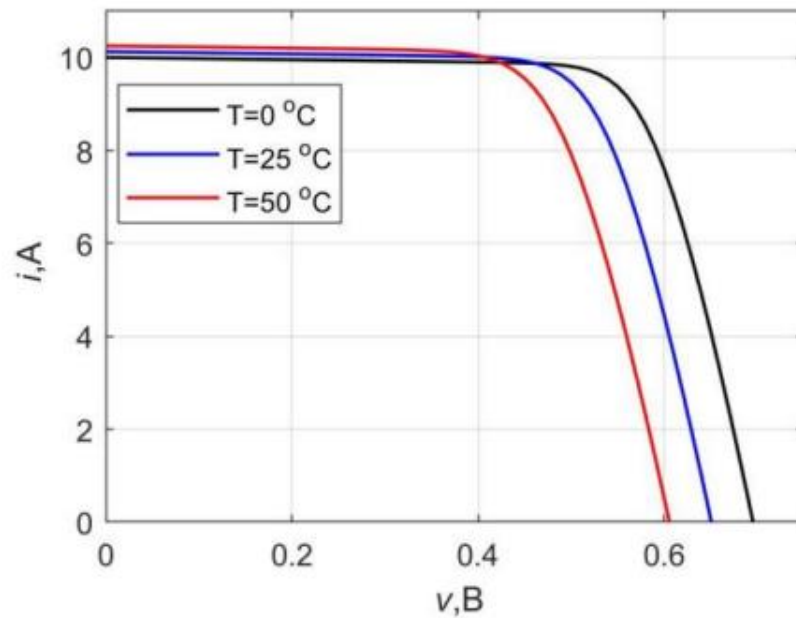


Рисунок 1.10 — ВАХ ФМ в залежності від температури [10]

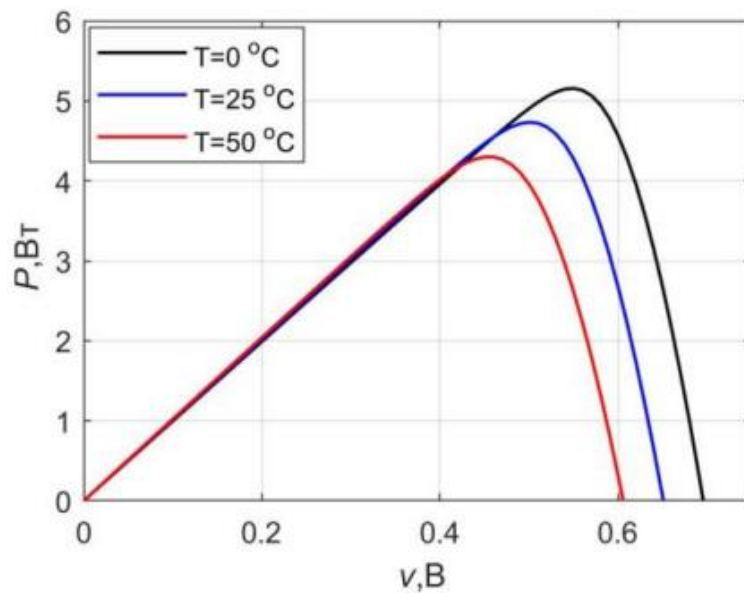


Рисунок 1.11 — Крива потужності ФМ в залежності від температури [10]

Загальна інтенсивність сонячної радіації розділяється на пряму, дифузну та відбиту (рис. 1.12).

Пряма інтенсивність сонячної радіації доходить до фотомодуля у вигляді прямих променів, що виходять безпосередньо від Сонця. Вона залежить від положення Сонця на небосхилі, прозорості атмосфери та погодних умов.

Дифузна (розсіяна) інтенсивність сонячної радіації розсіюється в атмосфері, і після цього надходить до фотомодуля. У хмарні дні та коли дощить дифузна інтенсивність сонячного випромінювання є основним компонентом сумарної інтенсивності сонячного випромінювання.

Разом пряма та дифузна інтенсивність сонячного випромінювання відповідають за основну частину загальної інтенсивності сонячного випромінювання, і їх суму називають **сумарною інтенсивністю сонячної радіації**. Тобто сумарна інтенсивність сонячного випромінювання надходить на Земну поверхню від випромінювання з Сонця.

Відбита інтенсивність сонячної радіації потрапляє на поверхню фотомодуля після контакту з земною поверхнею. Тобто це частина сумарної радіації, що втрачається земною поверхнею внаслідок відбивання. Відношення відбитої інтенсивності сонячного випромінювання до тієї, що надійшла на дану поверхню, називається **альбедо**.

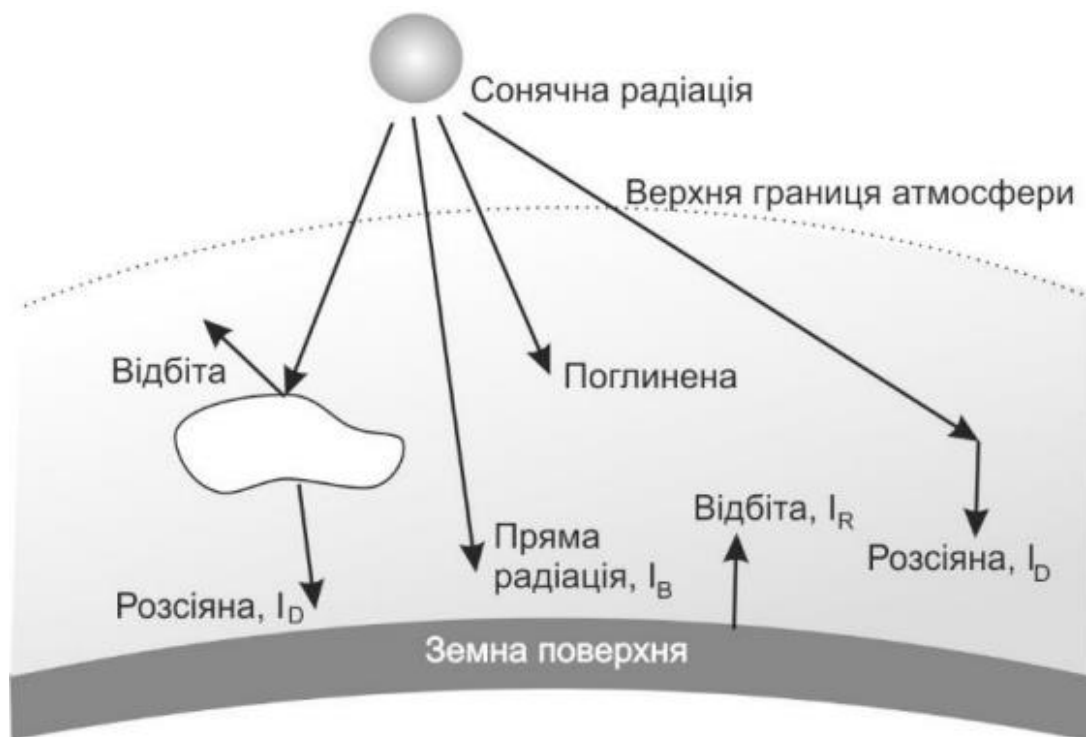


Рисунок 1.12 — Склад сонячної радіації в атмосфері та на земній поверхні [10]

Отже, основними факторами, що впливають на генерацію звичайного одностороннього фотомодуля є температура фотомодуля та загальна інтенсивність сонячного випромінювання. Вони, в свою чергу, залежать як від умовно *макро-факторів*: географічних координат, а саме розміщення фотомодуля по широті та довготі, висоти над рівнем моря, клімату, погодних умов у даній місцевості, тощо; так і від умовно *мікро-факторів*: розміщення фотомодуля на об'єкті, кут ФМ до горизонту, орієнтація ФМ, наявність часткового затінення, тощо. Тобто макро-фактори зазвичай неможливо змінити для конкретного об'єкту, як не можна змінити конструктивні параметри конкретного фотомодуля. А от вже від мікро-факторів залежить ефективність фотомодуля на об'єкті; іншими словами чи зможе він видавати свій максимум на даному конкретному об'єкті.

Загалом всі ці фактори впливають і на генерацію двосторонніх фотомодулів, однак, як виділяють джерела [1], до цього ще додаються наступні (рис. 1.13):

1) *Альbedo*: значення відбиваючої здатності поверхні на якій встановленні фотомодулі. Може бути від 0 до 1, оскільки є коефіцієнтом. Різні поверхні мають різне альbedo, що представлено в табл. 1.1.

2) *Висота встановлення фотомодулів*: Чим більше це значення, тим більше відбитого випромінювання зможе поглинути тильна сторона фотомодуля, однак зі збільшенням висоти збільшуються і сили, які необхідно витримувати фотомодулями, як то пориви вітру, а також величина конструкції, а звідси збільшується капіталовкладення (рис. 1.14).

3) *Ground cover ratio (GCR) (коефіцієнт заповнення)*: напряду впливає від відстані між рядами фотомодулів. Іншими слова це той відсоток, який фотомодулі займають за об'єкті, а яка частина корисної площі об'єкту залишилася без покриття. Звичайно, що чим менша відстань між рядами фотомодулів, тим менше відбитої інтенсивності сонячної радіації надходить на тильну поверхню. Також, мала відстань між рядами фотомодулів спричинює часткове затінення стрінгів у вранішні та вечірні години, що додатково зменшує генерацію будь-якими фотомодулями (рис. 1.15).

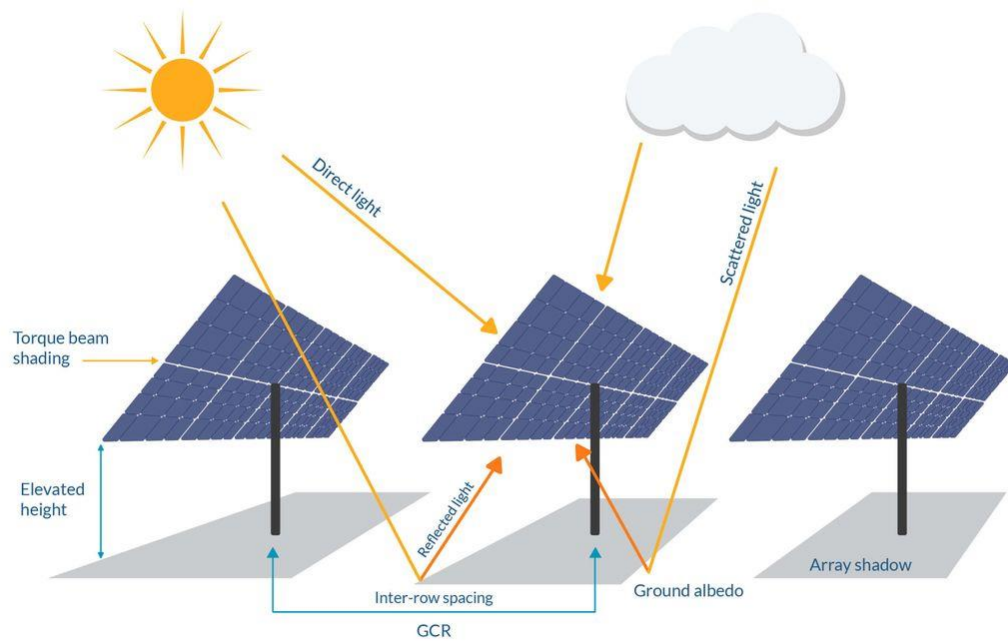


Рисунок 1.13 — Ключові фактори, що впливають на генерацію двосторонніх ФМ [1]

Таблиця 1.1 — Альбеда деяких поверхонь [1]

Тип поверхні	Альбеда
Трава (липень-серпень, Велика Британія)	0,25
Газони	0,18-0,23
Суха трава	0,28-0,32
Необроблені поля	0,26
Голий ґрунт	0,17
Щебінь	0,18
Асфальт	0,15
Новий бетон до атмосферних впливів	0,55
Бетон після атмосферних впливів	0,2
Свіжий сніг	0,80-0,90
Старий сніг	0,45-0,70
Поверхня води	0,05-0,22

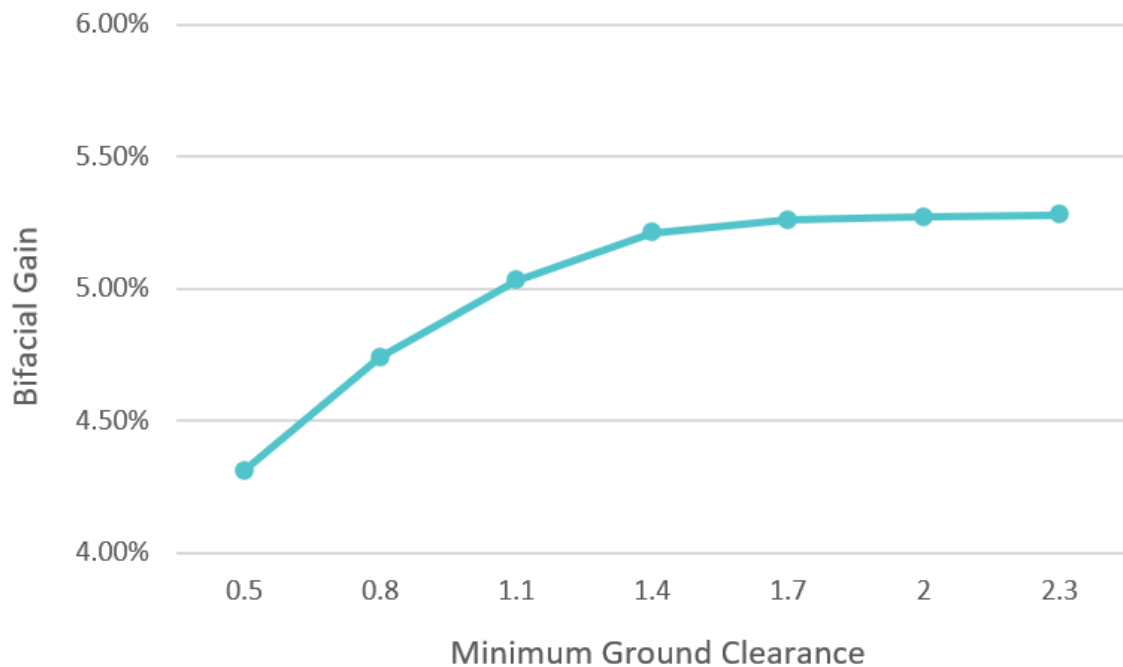


Рисунок 1.14 — Залежність генерації тильної сторони від висоти встановлення двосторонніх фотомодулів [1]

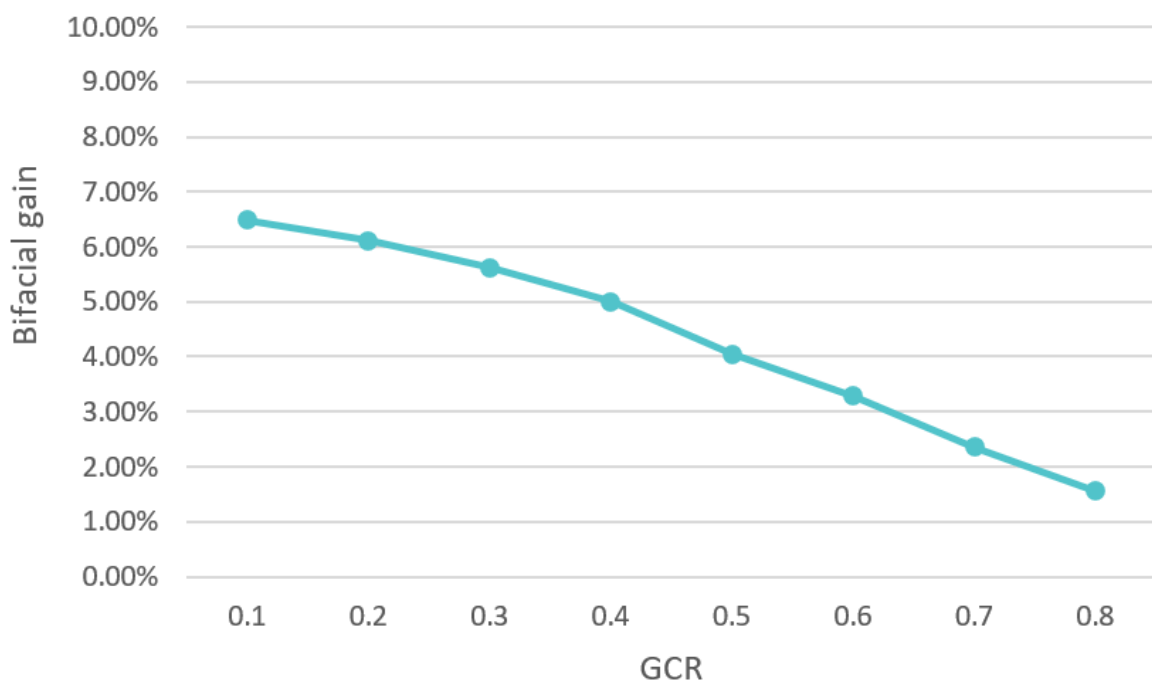


Рисунок 1.15 — Залежність генерації тильної сторони від коефіцієнту заповнення (GCR) двосторонніх фотомодулів [1]

В цій же статті вказується, що збільшення генерації за рахунок двосторонніх фотомодулів сягає до 25 % [1], разом із посиланням на відповідне джерело, де це було вказано [11]. В той же час з джерела [11] ми бачимо, що 25 %, чи навіть більше, є скоріше маркетинговими цифрами, оскільки теоретично це досягти можливо, однак на практиці на генерацію впливає багато факторів, і дані дуже різняться. Як приклад наведено, що трекерні системи в Північній Америці на двосторонніх панелях отримують збільшену генерації за рахунок двосторонності в межах від 3 % до 10 %.

Саме тенденцію по завищеним показникам приросту генерації електроенергії двосторонніми панелями ми бачимо в більшості статей, що носять скоріше маркетингову ціль, а не технічну чи наукову. Наприклад, у вільному доступі відразу знаходяться кілька джерел, що вказують на можливе збільшення генерації аж до 30 % [6, 7, 8, 12]. Звичайно, що ніяких конкретних посилань, звідки ця інформація була взята, вони не дають. Як і не уточнюють при яких умовах було досягнуто відповідне збільшення генерації, з якими моделями панелей і т.д.

Інші ж статті описують вже практичні дослідження, що були опубліковані влітку 2023 року [13]. Автори використовували реальну двосторонню панель на 550 Вт та тестували її потужність та параметри з різною відбиваючою поверхнею, що мала різне альбедо (рис. 1.16). Альбедо було від 0,1 до 0,85. Також було використано спеціальне програмне забезпечення для зняття ВАХ ФМ. Максимальний приріст генерації, що було отримано, склало 5,008 % з алюмінієвою фольгою з Альбедо 0,85. Фотомодуль з потужністю 550 Вт при STC видав 582,870 Вт в піку.

Подібний дослід робили і побутові споживачі, що можна бачити в наступному відео [14]. Було порівняння двосторонньої панелі на 220 Вт з односторонньою панеллю і їх ефективність в тих чи інших умовах (табл. 1.2). Якщо поглянути на перші два рядки, а саме при зміні відбиваючої поверхні з чорної та білу, то різниця скала всього 3 Вт, або 1 % від номінальної потужності панелі. Більш детально про те, як відбувався дослід, краще переглянути на самому відео.



Рисунок 1.16 — Типи відбиваючої поверхні зліва направо:

- 1) Алюмінієва фольга;
- 2) Біла глянцева пластикова панель;
- 3) Матова плита, пофарбована в білий колір;
- 4) Бетонна плита

Таблиця 1.2 — Ефективність двосторонньої монокристалічної панелі та односторонньої монокристалічної панелі в різних умовах [14]

Умови	220 Вт двосторонні ФМ	% від номінальної потужності*	100 Вт односторонні ФМ	% від номінальної потужності*
45° до горизонту чітко на південь з чорною поверхнею	182 Вт	83 %	86 Вт	86 %
45° до горизонту чітко на південь з білою поверхнею	185 Вт	84 %	—	—
45° до горизонту чітко на північ з чорною поверхнею	86 Вт	39 %	17 Вт	17 %
45° до горизонту чітко на північ з білою поверхнею	92 Вт	42 %	—	—
0° до горизонту з чорною поверхнею	176 Вт	80 %	71 Вт	71 %
0° до горизонту з білою поверхнею	174 Вт	79 %	—	—
Часткове затінення	154 Вт	70 %	47 Вт	45 %

*Округлені до найближчого середнього для простоти.

Основні мінуси даних дослідів вбачаються автором даної дисертації наступні:

1) Не було дотримано рекомендованої висоти встановлення для двосторонніх фотомодулів (більшість виробників вказують від 0,5 м до 2 м [15]). На досліді в статті висота була менше ніж 20 см візуально, а на відео навіть 10 см не було, а це є одним із основним фактором ефективності тильної сторони двостороннього фотомодуля.

2) Дані мають миттєве значення. Хоча для короткого досліду це є допустимим, однак сонячні панелі стоять на реальних об'єктах цілий день, і важливо розуміти їх ефективність не тільки в найкращі години піку, а і зранку та ввечері, коли сонячні

промені потрапляють на земну поверхню під малим кутом, та основним фактором виступає дифузна та розсіяна інтенсивність сонячного випромінювання. Частково це було згадано в досліді на відео, бо, як бачимо, двосторонні фотомодулі все ще генерують приблизно 39-42 % своєї потужності при реверсивному положенні (тобто орієнтації на північ).

В роботі від американських вчених [16] недолік миттєвих даних усунено, оскільки автори обчислювали генерацію за весь день при різних висотах відносно землі, як і при різних альбедо та орієнтації. Більш того, як підкреслюють автори у вступі до статті, наявна література висвітлює роботу двосторонніх фотомодулів лише в кількох локаціях, і її не можна використати для будь-якого місця на Земному шарі. Це, до речі, ми і можемо бачити в попередніх двох дослідях, оскільки вони були зроблені для конкретних локацій.

В роботі було враховано всі складові інтенсивності сонячного випромінювання, пораховані значення для будь-якого місця на Землі, а для даних по освітленню була взята метеорологічна база даних NASA. В результаті було отримано дані як про можливу додаткову генерацію двосторонніми фотомодулями, так і про оптимальну орієнтацію фотомодулів, а також висоту встановлення в залежності від широти. Звичайно, що всі ці дані є теоретичними, оскільки фізично неможливо провести всі ці досліді в реальності по прикладу попередніх двох, що були наведені вище. Для більш детального ознайомлення з роботою американських вчених рекомендується відвідати оригінал.

Розглянемо отримані в роботі таблиці максимального приросту генерації за рахунок двосторонніх фотомодулів при різних альбедо та висоті встановлення (рис. 1.18). При висоті встановлення в 1 м та альбедо 0,25 приріст генерації для України сягає приблизно 15-20 %. Якщо ж збільшити значення альбедо до 0,5, наприклад поклавши матеріал з більшою відбиваючою здатністю під панелі, то приріст генерації може досягти 25-30 %. Як можемо бачити з даної статті, маркетингові цифри в 30 % цілком можливі, але це в теорії.

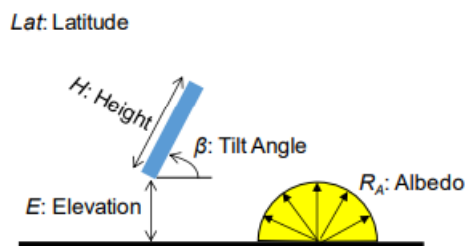


Рисунок 1.17 — Фізичні визначення параметрів для рис. 1.18 [16]

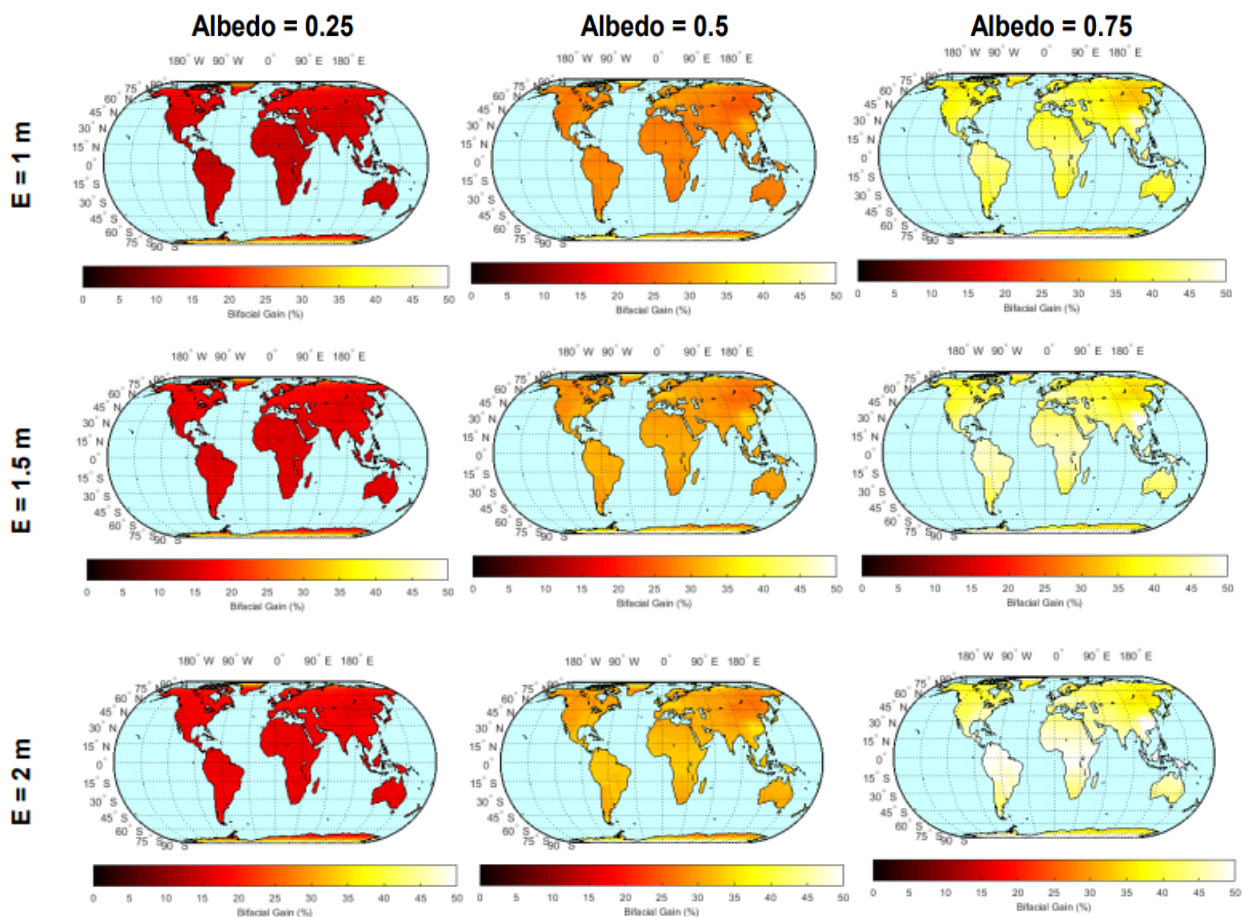


Рисунок 1.18 — Максимальний приріст генерації двостороннього модуля висотою 1 м для різних альбедо землі та висот (E) (рис. 1.17) [16]

Необхідно пам'ятати, що результати отримані в статті американських вчених є теоретичними, бо на реальних об'єктах куди більше факторів впливають на генерацію, ніж ті, що були враховані в роботі, незважаючи на комплексність і різноманітність останніх.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ТА МОНТАЖ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Для дослідження на практиці ефективності двосторонніх фотомодулів, впливу факторів затінення та відбиваючої поверхні на їх роботу, а також порівняння з теоретичними даними, що представлені в літературі, було вирішено розробити експериментальну установку та змонтувати її. Відразу постало питання методу експерименту та характеру досліджень. Автором даної дисертації було запропоновано метод порівняння однакових двосторонніх фотоелектричних модулів в різних умовах. Тобто, один (або кілька) фотомодуль буде контрольним, з яким і буде порівнюватися дані іншого (інших) фотомодуля, для якого будуть влаштовані різні типи відбиваючої поверхні. Також, було вирішено порівнювати не тільки миттєві значення потужності чи ВАХ фотомодулів, а і загальну продуктивність за день та в різні періоди часу. Даний метод є найбільш приближений до реальних установок, де кінцевий клієнт бажає отримати вигоду від фотоелектричної станції і порівняти її ефективність з іншими варіантами.

У зв'язку з методом порівняння, а також через необхідність у слідкуванні за генерацією фотомодулів впродовж великого проміжку часу постала наступна низка факторів:

1) Потреба в двох однакових стрінгах, оскільки тоді можна буде порівняти значення з першого стрінгу та з другого;

2) Потреба в перетворенні згенерованої електроенергії та направлені її на споживача або в мережу, оскільки необхідно забезпечити умову, щоб нічого не обмежувало генерацію фотомодулів, окрім природніх факторів;

3) Потреба в цілодобовому моніторингу генерації з мінімальними інтервалами часу для отримання найточнішої картини роботи фотомодулів, а також зменшення похибки;

4) Водночас не варто виходити за межі магістерської дисертації та будувати промислову станцію, а обмежитися мінімальною кількістю обладнання для вирішення поставленої задачі.

Отже, завдання на даному етапі дисертації звучало наступним чином: «Розробити та змонтувати експериментальну установку мінімально можливим коштом та кількістю обладнання, в той же час забезпечити чистоту експерименту та точність вимірів.». Основною проблемою, окрім пошуку обладнання, було саме вибір обладнання, в тому числі інвертора та МРРТ, та схеми станції для вирішення завдання, оскільки фотомодулі на об'єктах не йдуть окремими компонентами, а працюють в кооперації з іншим обладнанням. Більшість МРРТ мають певне значення початкової напруги від якої починається генерація фотомодулів, що є ключовим фактором для мінімізування кількості фотомодулів для експерименту. На мережевих інверторах стартова напруга може починатися від 200 В [17], 500 В чи навіть 600 В [18], що в перерахунку на фотомодулі досягає 8-16 фотомодулів в залежності від характеристик. Звичайно, що дана кількість виходить за рамки магістерської дисертації. В той же час інвертори меншої потужності можуть почати генерацію від фотомодулів з 100-120 В [19].

Після дослідження ринку, огляду характеристик різних систем було зроблено вибір на користь обладнання компанії Victron Energy [20]. Основні фактори, через які було обрано саме Victron:

1) Компанія має великий вибір обладнання для фотоелектричних систем, оскільки їх системи мають модульну компоновку. На відміну від більшості виробників, у Victron кожен пристрій: інвертор, контролер заряду, пристрій моніторингу — є окремою складовою, що збільшує варіативність у підборі обладнання;

2) Фотоелектричні контролери заряду Victron мають стартову напругу по панелях на 5 В більше, ніж напруга АКБ [21]. Це означає, що для 12 В системи початкова напруга для фотомодулів складає всього 17 В;

3) Наявність дистанційного моніторингу, що дозволяє отримувати дані з інтервалом в 1 хвилину [22]. Більш того, за допомогою моніторингу можна

контролювати роботу станції та здійснювати дистанційні налаштування, що, забігаючи наперед, неодноразово допомагало в процесі експерименту;

4) Обладнання Victron має репутацію ефективного та надзвичайно надійного, оскільки сама компанія починала з автономних систем, зокрема для човнів та яхт, де зарекомендувала себе, а згодом вийшла на світовий ринок. Більш детально ознайомитися з нідерландською компанією пропонується на офіційному сайті [20].

Станцію було вирішено зробити повністю автономною, щоб не прив'язуватись до загальної електромережі та зімітувати замкнений цикл генерації та споживання. В якості навантаження попередньо розглядався електричний обігрівач приблизно на 2 кВт. Надалі йшов підбір конкретного обладнання для станції, його наявності, та можливості для використання в експериментальній установці. Було запропоновано два основних варіанти, що різнилися напругою АКБ: системою на 24 В та на 48 В. Попередні складові кожної із систем наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 — Попередні складові двох варіантів систем: на 24 В та на 48 В

Система	24 В	48 В
Фотомодуль	Фотомодуль двосторонній на 500-600 Вт. — 2 шт.	Фотомодуль двосторонній на 500-600 Вт. — 4 шт.
Контролер заряду	Victron Energy SmartSolar MPPT 150/100-Tr VE.Can. — 2 шт.	Victron Energy SmartSolar MPPT 150/100-Tr VE.Can. — 2 шт.
АКБ	Dyness B4850 — 1 шт.	Ventura GPL 12-65 — 2-4 шт.
Інвертор	—	Victron Energy MultiPlus-II 48/3000/35-32 GX — 1 шт.
Пристрій керування	Cerbo GX — 1 шт	Victron Energy MultiPlus-II 48/3000/35-32 GX — 1 шт.
Система кріплень	Однорядна на 4 панелі — 1 шт	Однорядна на 2 панелі — 1 шт

Основним фактором, що впливав на вибір напруги АКБ був її вплив на стартову напругу контролерів заряду, а звідси на кількість фотомодулів. Більшість фотомодулів

вище 500 Вт мають напругу XX приблизно 50 В, а напругу MPP — близько 40 В. Якщо обрати систему на 24 В, то необхідно тільки 2 панелі, по 1 на стрінг, для проведення експерименту. В той же час система на 24 В потребує використання свинцево-кислотних АКБ, бо літій-залізо-фосфатних АКБ на 12 В чи 24 В не було в наявності в момент підбору обладнання. Більш того, інвертори на 24 В є менш розповсюдженні, тому в попередній таблиці він навіть не врахований.

З іншого боку система на 48 В є більш звичною не тільки в підборі, а і в експлуатації, що спрощує її налаштування та корегування в процесі експерименту. Однак для даної системи одного фотомодуля буде замало — необхідно по 2 на кожен стрінг. Отже, загальна кількість фотомодулів стає 4, що в свою чергу, впливає на підбір системи кріплень, вже не кажучи про транспортування та монтаж. Також, система на 48 В потребує більш коштовного обладнання.

Після роздумів над вибором типу системи, консультацією з науковим керівником, колегами, складом кафедри ВДЕ, врешті-решт було зроблено вибір на користь системи 48 В. Повний список обладнання представлено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 — Список обладнання для експериментальної установки

Обладнання	Модель	Кількість
Фотомодуль	JA Solar JAM72D30-555/GB 555 Wp, Bifacial [23]	4
Контролер заряду	Victron Energy BlueSolar MPPT 250/100-Tr VE.Can [24]	2
АКБ	Dyness A48100 [25]	1
Пристрій керування	Cerbo GX [26]	1
Інвертор	Victron Energy Quattro II 48/5000/70-50/50 [27]	1
Система кріплень	Kripter Domino V2-08 [28]	1

В якості системи кріплень, теж після низки обговорень та консультацій, було обрано Kripter Domino V2-08, оскільки вона дозволяє встановити 4 фотомодуля в один

ряд з однаковою висотою над поверхнею землі. Це є необхідною умовою для чистоти експерименту. В той же час готова система кріплень є витривалою та надійною, що грає не останню роль при експлуатації, про що буде згадано дещо пізніше на прикладі.

Варто зазначити, що Kripter Domino V2-08 є наземною системою кріплень для звичайних односторонніх фотомодулів, але, як зазначалося в попередньому розділі, на них можливо встановити рамні двосторонні фотомодулі. При цьому поперечні балки частково затіняють тильну поверхню фотомодулів, однак це не грає вирішальної ролі для експерименту.

Наступним важливим питанням було вибір місця для встановлення експериментальної установки. Знову ж таки, було кілька варіантів, однак врешті-решт було вирішено змонтувати установку в КПП, а саме на балконі 20-го корпусу.

В подальшому відбувався безпосередньо монтаж експериментальної установки на балконі 20-го корпусу КПП, в основному фотоелектричних модулів та системи кріплення. Інше обладнання було розміщено в 429 аудиторії, оскільки інвертор, контролери заряду, АКБ та інше обладнання потребує закритого приміщення, в ідеалі кімнати. Для організування інтернет-підключення було використано 4G модем (рис. 2.1).

Між АКБ та інвертором було використано заводський мідний кабель на 25 мм^2 . Між контролерами заряду та АКБ використовувався мідний кабель 6 мм^2 . Також кабель 6 мм^2 застосовувався для приєднання фотомодулів до контролерів заряду і для навантаження.

Завершальний день монтажу відбувся 5-го серпня 2023 року. Було змонтовано систему кріплень, закріплено фотоелектричні модулі, підключено останні до контролерів заряду (рис. 2.2). Проведено налаштування системи на бажаний режим роботи, виведено станцію в моніторинг VRM. Електричну схему станції наведено на рис. 2.3. Розміщення фотомодулів в просторі наведено в Додатках А, Б, В.

В результаті було змонтовано чотири двосторонні фотомодулі потужністю 555 Вт кожен у два стрінга. Перший стрінг — крайні два фотомодулі; другий —

центральні два. Фотомодулі встановленні під кутом 30° до горизонту та 10° по азимуту з направленням на південний захід. Відстань від землі до нижнього краю фотомодулів становить 1 м.



Рисунок 2.1 — Початкове розміщення обладнання в 429 ауд. 20-го корпусу КПП:
в лівому верхньому куті контролери заряду
Victron Energy BlueSolar MPPT 250/100-Tr VE.Can;
праворуч інвертор Victron Energy Quattro II 48/5000/70-50/50;
знизу АКБ Dyness A48100



Рисунок 2.2 — Завершальний етап монтажу. Змонтована система кріплень Domino V2-08 та зафіксовані 4-ри фотоелектричні модулі JA Solar JAM72D30-555/GB 555 Wp, Bifacial

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА НА БАЛКОНІ 20-ГО КОРПУСУ КПІ

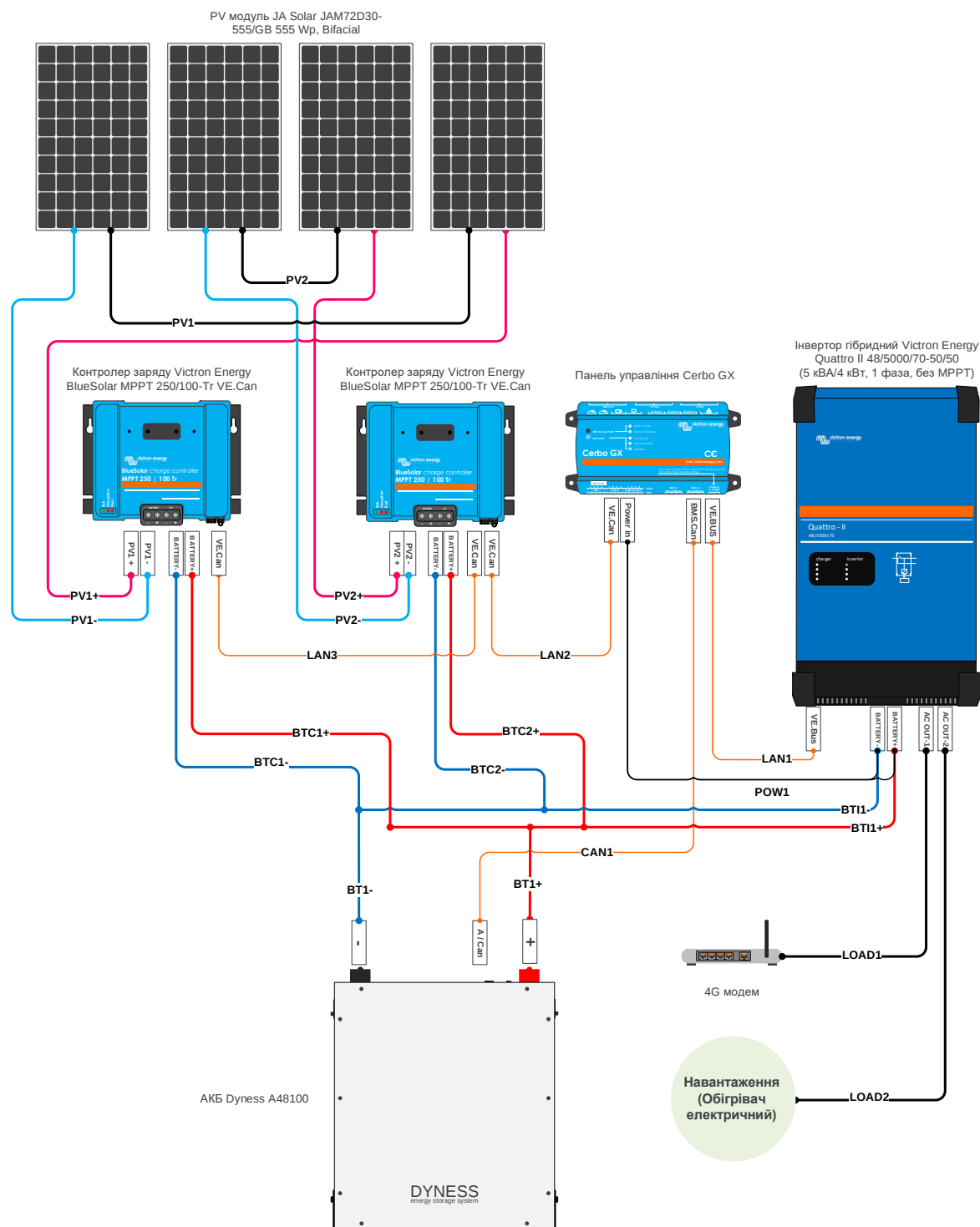


Рисунок 2.3 — Електрична схема експериментальної установки

РОЗДІЛ 3 ЗАПУСК УСТАНОВКИ, ПЛАН ТА ХІД ЕКСПЕРИМЕНТУ

На першому етапі (05.08.2023) була змонтована автономна фотоелектрична станція для експерименту. Оскільки станція автономна, то постало питання навантаження, бо у випадку 100 % заряду АКБ отримані дані не можна використовувати: внутрішня логіка обладнання обрізає генерацію одного контролера та залишає лише другий для покриття власних потреб. В якості навантаження використовувався електричний обігрівач потужністю до 2 кВт.

Система була налаштована наступним чином: обігрівач під'єднаний на другий програмований вихід інвертора (AC Out-2); при досягненні певного відсотку заряду АКБ (по SOC), наприклад 30 %, інвертор починає давати живлення на навантаження, тобто на обігрівач; це відбувається до того моменту, поки АКБ не розрядиться до певного відсотку, наприклад 25 %, і інвертор не перестане подавати живлення на вихід AC Out-2.

Мінусом процесу описаного вище було те, що обігрівач сам вимикається при розігріві до певної температури. Зважаючи, що найкращі години сонячної генерації були саме влітку та на початку вересня, а температура повітря сягала до 30-35 °C, то мали місце випадки, коли АКБ заряджалися на 100 %. Відповідні дні окремо позначені та враховані при аналізі отриманих даних.

З самого початку був задум змінювати відбиваючу поверхню під фотомодулями через певні проміжки часу (кілька тижнів) і порівнювати отримані результати. Система моніторингу дозволяє отримувати як миттєві значення з інтервалом в 1 хвилину, так і сумарні за весь день. Більш того, дані можна окремо завантажити з порталу для подальшої обробки та, наприклад, обирати тільки певні години: вдень, зранку чи ввечері. Тому після монтажу, налаштування та тестування системи, закритті одного стрінгу та розміщення відбиваючої поверхні, ніякі додаткові дії від персоналу для збору інформації не потребуються — все автоматизовано.

Таблиця 3.1 — План експерименту

Дата	Описання	Фотографія
05.08.2023- 18.08.2023	Перевірка роботи установки, підготовка до проведення експерименту.	—
19.08.2023- 28.08.2023	Без відбиваючої поверхні; перший стрінг позаду закрили картоном.	Рис. 3.1.
31.08.2023- 07.09.2023	Без відбиваючої поверхні; перший стрінг додатково до картону закрили темною тканиною.	Рис. 3.2.
09.09.2023- 19.09.2023	Світловідбиваюча біла тканина в якості відбиваючої поверхні; покладена не прямо під панелями.	Рис. 3.3.
21.09.2023- 28.09.2023	Темна чорна тканина в якості відбиваючої поверхні.	Рис. 3.4.
30.09.2023- 09.10.2023	Біло-зелена тканина в якості відбиваючої поверхні.	Рис. 3.5.
11.10.2023- 17.10.2023	Чорне агроволокно в якості відбиваючої поверхні.	Рис. 3.6.
19.10.2023- 06.11.2023	Світловідбиваюча біла тканина в якості відбиваючої поверхні.	Рис. 3.7.
08.11.2023- 05.12.2023	Без відбиваючої поверхні; перший стрінг все ще закритий ззаду.	—

Приблизно 2 тижні після завершення монтажу зайняли вище згадані моменти. В цей час був підключений обігрівач; скореговано відсоток заряду АКБ, при якому починалося живлення навантаження. Також перевірено, що стрінги дійсно генерують однакову потужність; миттєва різниця зазвичай не перевищувала 3-7 Вт, що можна вважати несуттєвою похибкою. Більш того, 15-го серпня були зняті ВАХ одного з фотомодулів при ясній погоді. Розглянута зміна ВАХ при частковому затіненні.

В подальшому (18.08.2023) перший стрінг, а саме крайні дві панелі, було закрито позаду картоном (рис. 3.1). До 29-го серпня система залишалася в такому стані. Після огляду графіків генерації в моніторингу, а також додаткового спостереження за фотомодулями, через кілька днів було прийнято рішення додатково закрити тильні сторони фотомодулів у першому стрінгу темною тканиною, оскільки картон не міг повністю закрити фотомодуль, подекуди були наявні порожнини, через які відбите світло потрапляло на тильну поверхню панелей. Це було зроблено 29-го серпня (рис. 3.2), а в подальші дні було помічено збільшення різниці генерації ще на 1–3 %.

Після впевненості в тому, що перший стрінг з закритою тильною стороною, генерує менше, ніж чистий стрінг, 8-го вересня був покладений перший вид тканини: світловідбиваюча біла тканина (рис. 3.3). Якщо звернути увагу на рис. 3.3, то буде видно, що тканина розташована не прямо під панелями, а трохи південніше. Автором дисертації спочатку було прийнято саме таке рішення, оскільки вважалося, що сонячні промені опівдні будуть краще відбиватися від білої тканини і потрапляти на тильну сторону фотомодулів. В подальшому дане розміщення більше не застосовувалося, і основна частина тканини розташовувалася прямо під фотомодулями. Варто також зазначити, що 19-го вересня в Києві був доволі сильний вітер, і від цього тканина змістилася.



1



2

1 — Крайня права панель; 2 — Крайня ліва панель

Рисунок 3.1 — Перший стрінг закритий ззаду картоном



1



2

1 — Крайня права панель; 2 — Крайня ліва панель

Рисунок 3.2 — Перший стрінг закритий ззаду додатково тканиною



Рисунок 3.3 — Світловідбиваюча біла тканина в якості відбиваючої поверхні

20-го вересня тканина була змінена на темну під панелями, а додаткове агроволокно було розміщено спереду (рис. 3.4). Більшість днів в цей час були сонячними, тому приблизно через тиждень, 29-го вересня, тканина була змінена на біло-зелену (рис. 3.5).

Після огляду отриманих даних до того моменту, виявлено, що найкращою по загальній генерації за день була саме біло-зелена тканина, а не світловідбиваюча. В той же час різниця між темною тканиною і світловідбиваючою була мізерна, на рівні 1 %. Тому було вирішено повторити досліди з темною та світловідбиваючою тканиною, тим паче, що був на це час.



Рисунок 3.4 — Темна тканина в якості відбиваючої поверхні



Рисунок 3.5 — Біло-зелена тканина в якості відбиваючої поверхні

10-го жовтня було покладено під панелями чорне агроволокно (рис. 3.6). Після тижню спостережень було помічено суттєве зменшення генерації тестового стрінгу, і 18-го жовтня було закріплено в черговий раз світловідбиваючу білу тканину (рис. 3.7). В цей раз тканина розташовувалася прямо під фотомодулями. Досліди з останньою тканиною проходили доволі довго, оскільки вже була середина осені, і сонячних днів стало куди менше. Як раз в цей період зіграла роль надійність конструкції для монтажу та самих фотомодулів, оскільки 28-го жовтня в Києві вирувала непогода, швидкість вітру доходила до 20 м/с. Однак експериментальній установці жодної шкоди, окрім пом'ятої тканини, не було задіяно. Тільки 7-го листопада тканина була прибрана, але самі стрінги залишилися без змін: перший — закритий з тильної сторони, далі будемо називати його **еталонним (базовим)** стрінгом; другий — з двосторонньою робочою поверхнею, будемо називати його **тестовим (експериментальним)** стрінгом.

Після спостереження за установкою впродовж листопада та початку грудня місяця, в особливості при сніговому покриві, зрештою було прибрано тканину та картон з тильної сторони базового стрінгу, 6-го грудня. Після цього стрінги почали генерувати ідентично з розбіжністю в кілька Вт то в одну, то в іншу сторону, що підтверджує чистоту експерименту.



Рисунок 3.6 — Чорне агроволокно в якості відбиваючої поверхні



Рисунок 3.7 — Світловідбиваюча біла тканина в якості відбиваючої поверхні

В результаті були отримані дані генерації окремо еталонного та тестового стрінгів впродовж кожного дня експерименту при різній погоді та різних відбиваючих поверхнях. Дані були завантажені з платформи моніторингу системи Victron для подальшої обробки та аналізу.

РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАНИХ

Впродовж експерименту велося спостереження за установкою та даними генерації кожного дня, що записувалося в таблицю для попереднього огляду (Додаток Г). Доступ також наявний по посиланню на електронну версію [29]. Дані йдуть в хронологічному порядку, як вони були під час експерименту. Важливо пам'ятати, що незважаючи на однакове місце розташування обох стрінгів, все ж таки мають місце локальні фактори, що вносять похибки в експеримент. Тому таблиця в додатку Г служить скоріше орієнтиром, які дні краще взяти для подальшого дослідження та аналізу.

Для описання ефективності двосторонніх ФМ вводимо коефіцієнт двостороннього підсилення (BG, Bifacial Gain), який розраховується за наступною формулою [30]:

$$BG = \frac{W_{test} - W_{base}}{W_{base}} * 100 \% \quad (4.1)$$

де W_{test} — електроенергія (або потужність), що була згенерована тестовим стрінгом, кВт*год (кВт); W_{base} — електроенергія (або потужність), що була згенерована базовим стрінгом, кВт*год (кВт).

Bifacial gain (4.1) характеризує у відсотках відносний приріст генерації, або приріст потужності тестового стрінга відносно базового.

Попередньо можемо бачити, що на першому етапі експерименту, коли тильну сторону базового стрінгу закрили тільки картоном, то приріст генерації складав приблизно 7–9 %, з середнім значенням 8 %. Після того, як тильну сторону додатково закрили тканиною, то приріст генерації склав 7,8–10,7 %, з середнім значенням 9,2 %.

Для більш детального розгляду приросту генерації першого та другого стрінга без відбиваючої поверхні було взято 20-те та 24-те серпня, а також 2-ге та 7-ме вересня. В ці дні погода була здебільшого сонячна, і з табл. 4.1 можна бачити, що саме в сонячну погоду дані найбільш релевантні. Коли в хмарні, дощові чи туманні дні генерація зовсім мала, що ускладнює аналіз, наприклад 25-го жовтня чи 4-го

листопада. Також, як можна бачити з наступних графіків, при хмарній погоді приріст генерації навпаки зменшується.

Було вивантажено дані експериментальної установки з моніторингу VRM. Однак розраховувати приріст генерації з вивантажених даних виявилося нерациональним. Справа в тому, що дані в-моніторингу хоч і записуються з інтервалом приблизно в 1 хвилину, однак все одно мають місце як локальні фактори, будь то хмари чи розрідженість атмосфери, так і програмні, наприклад помилка синхронізації з отриманням даних від всіх пристроїв. Для звичайних графіків це не є проблемою, однак при розрахунку коефіцієнта BG (4.1) такі похибки суттєво впливають на криву, що можна бачити на рис. 4.1.

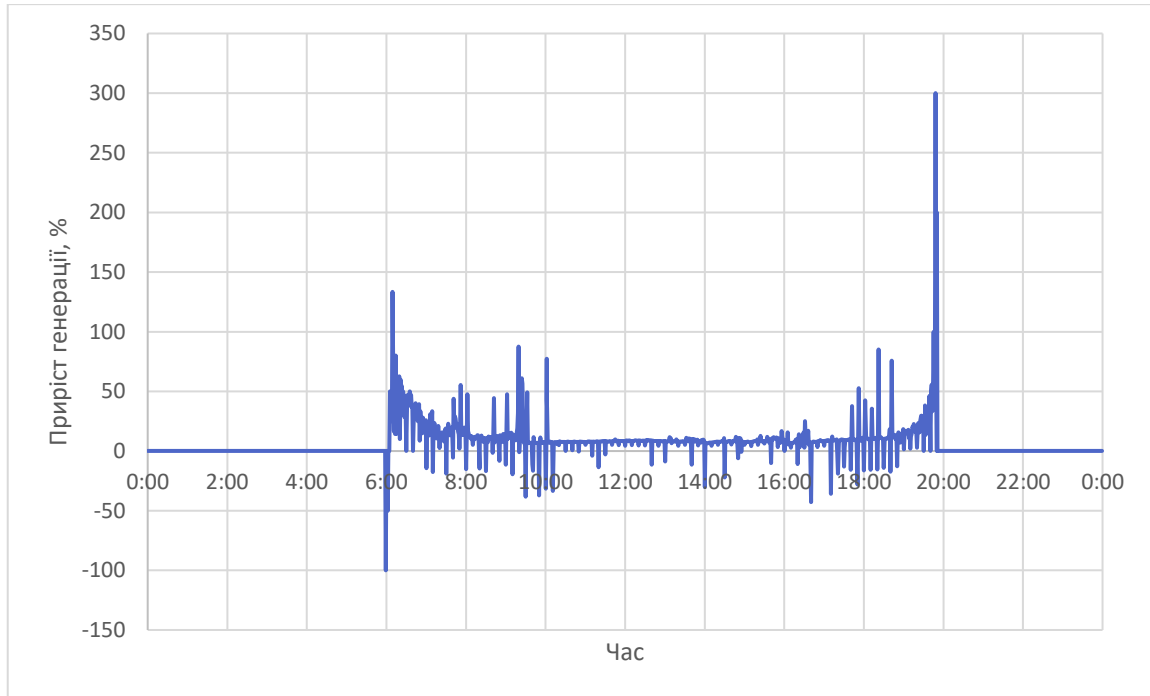


Рисунок 4.1 — Попередній графік приросту генерації за 20-те серпня

Стрибки приросту генерації до 50 % чи навіть 300 % перекривають значені дані в обідні години. Більш того, наявні мінусові значення, що відбувається як раз за рахунок певних затримок чи локальних факторів. І навіть якщо формувати вісь та прибрати мінусові значення, то графік все ще не показовий (рис. 4.2).

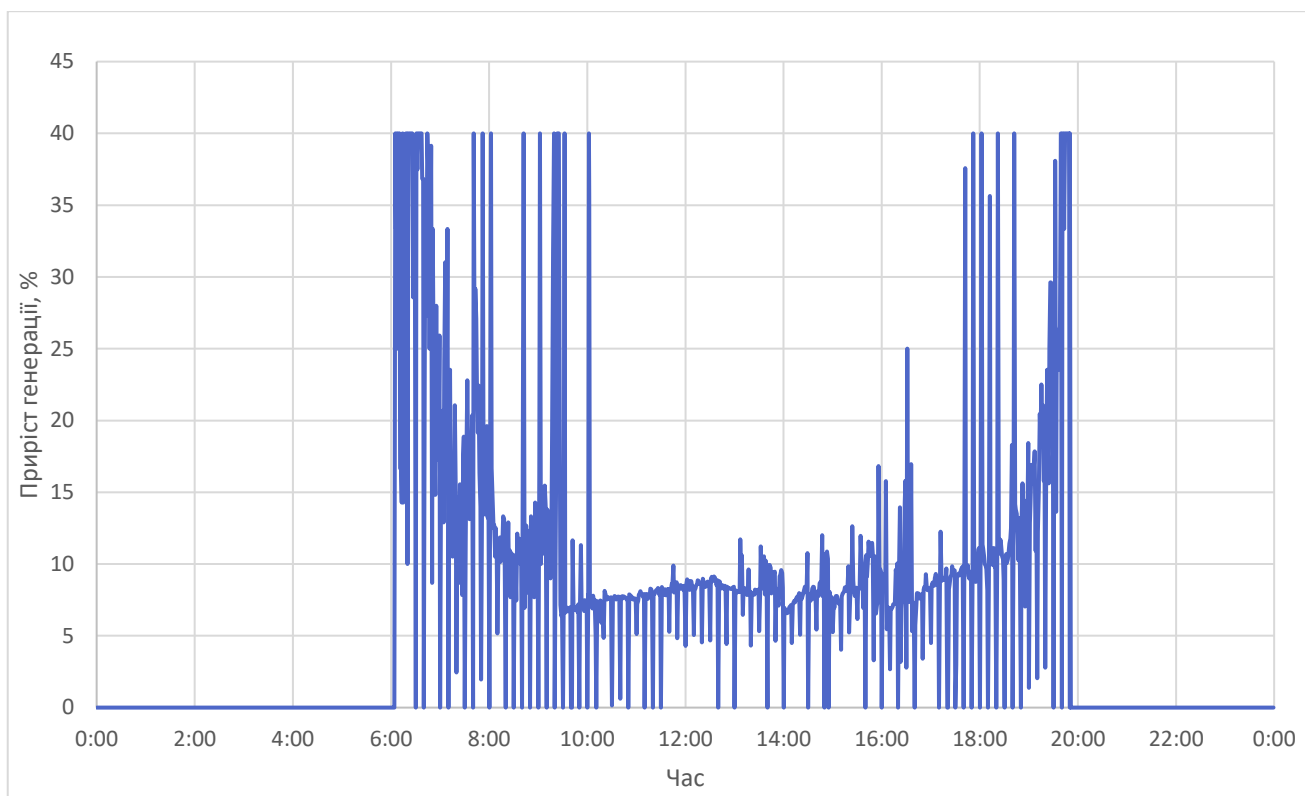


Рисунок 4.2 — Попередній графік приросту генерації за 20-те серпня;
форматована вісь

Саме тому було вирішено застосувати фільтри для роботи з даними та приведення їх до більш зрозумілого та показового вигляду. Для цього було застосовано код на мові програмування Python. Перш за все, у програмі бралися дані не за кожну хвилину, а середні значення за кожні 3 хвилини, щоб нівелювати випадкові стрибки. Однак цього було замало, особливо на початку дня та в кінці. Після певних правок, коригування значень та декількох фільтрів, як то стандартне середнє з двох сусідніх, чи адаптивне рухоме середнє, було отримано графік, що можна бачити на рис. 4.3. Повний код програми на мові Python доступний у додатку Е.

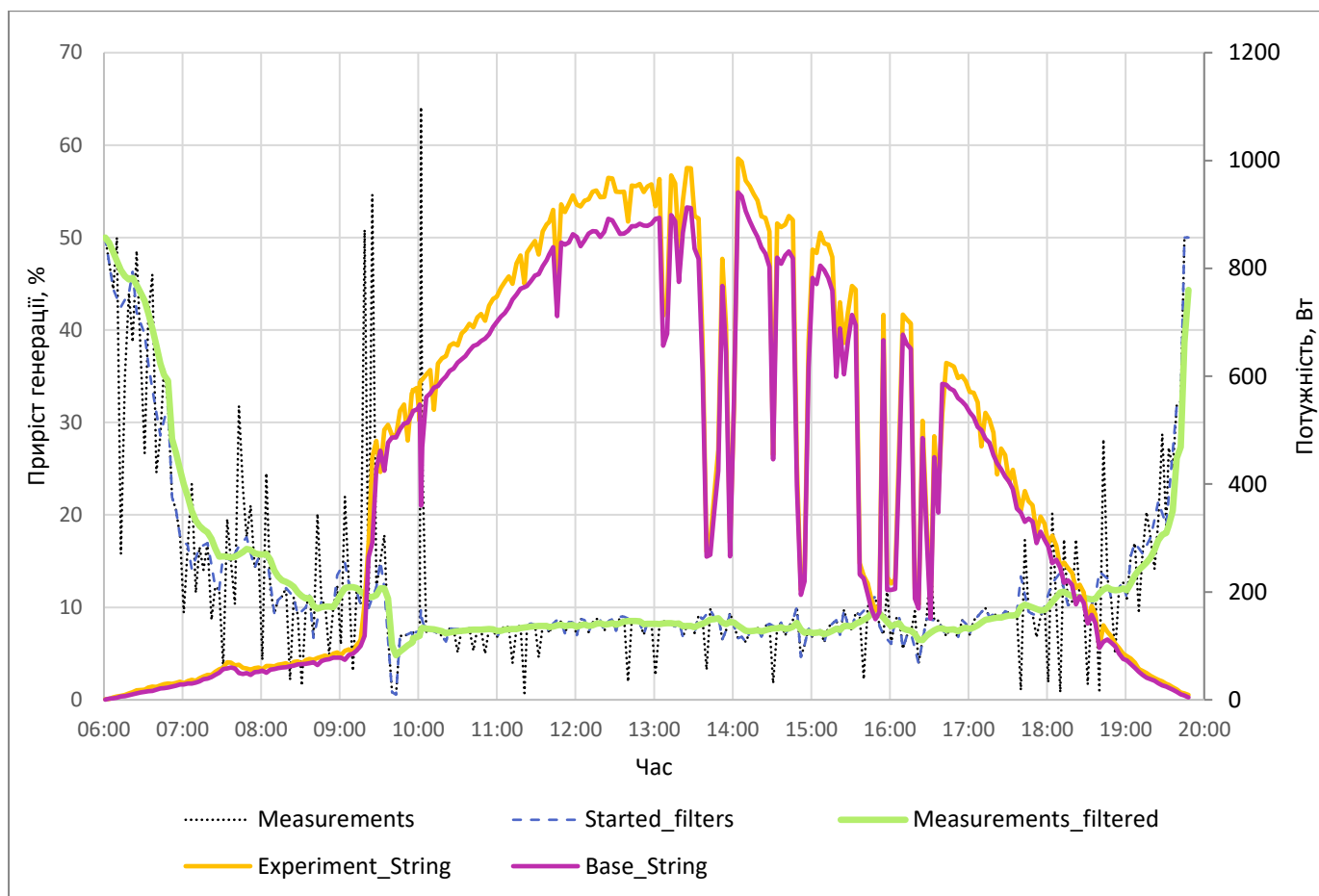


Рисунок 4.3 — Відфільтрований графік генерації за 20-те серпня.

Погода: сонячно, місцями хмарно. Без штучної відбиваючої поверхні

Як можна бачити, то даний графік більш показовий та краще підходить для аналізу. По осі абсцис йде час доби; по лівій основній осі ординат — приріст генерації експериментального стрінга відносно базового; по правій додатковій осі ординат — миттєва потужність кожного стрінга у Вт.

Легенда розшифровується наступним чином:

- **Measurements** — крива приросту генерації з мінімальними правками, розрахована по формулі 4.1;
- **Started_filters** — проміжна крива приросту генерації під час процесу фільтрації даних;
- **Measurements_filtered** — кінцева крива приросту генерації (BG), яка отримана в результаті процедури фільтрації;

- Experiment_String — середні за 3 хвилини миттєві значення генерації експериментального (тестового) стрінга впродовж дня, Вт;
- Base_String — середні за 3 хвилини миттєві значення генерації базового (еталонного) стрінга впродовж дня, Вт.

За допомогою такого суміщеного графіку є можливість оцінити не тільки приріст генерації, а і значення його, зважаючи на величину генерованої потужності кожного стрінга. Найкраще це можна бачити, якщо залишити тільки кінцеву криву приросту генерації та значення потужності (рис. 4.4). Наприклад, приріст генерації вранці, з 6-тої години до 9-ої, зазвичай більше 10 %, однак в цей час стрінги генерують менше 100 Вт кожен, тому це не має вирішального значення.

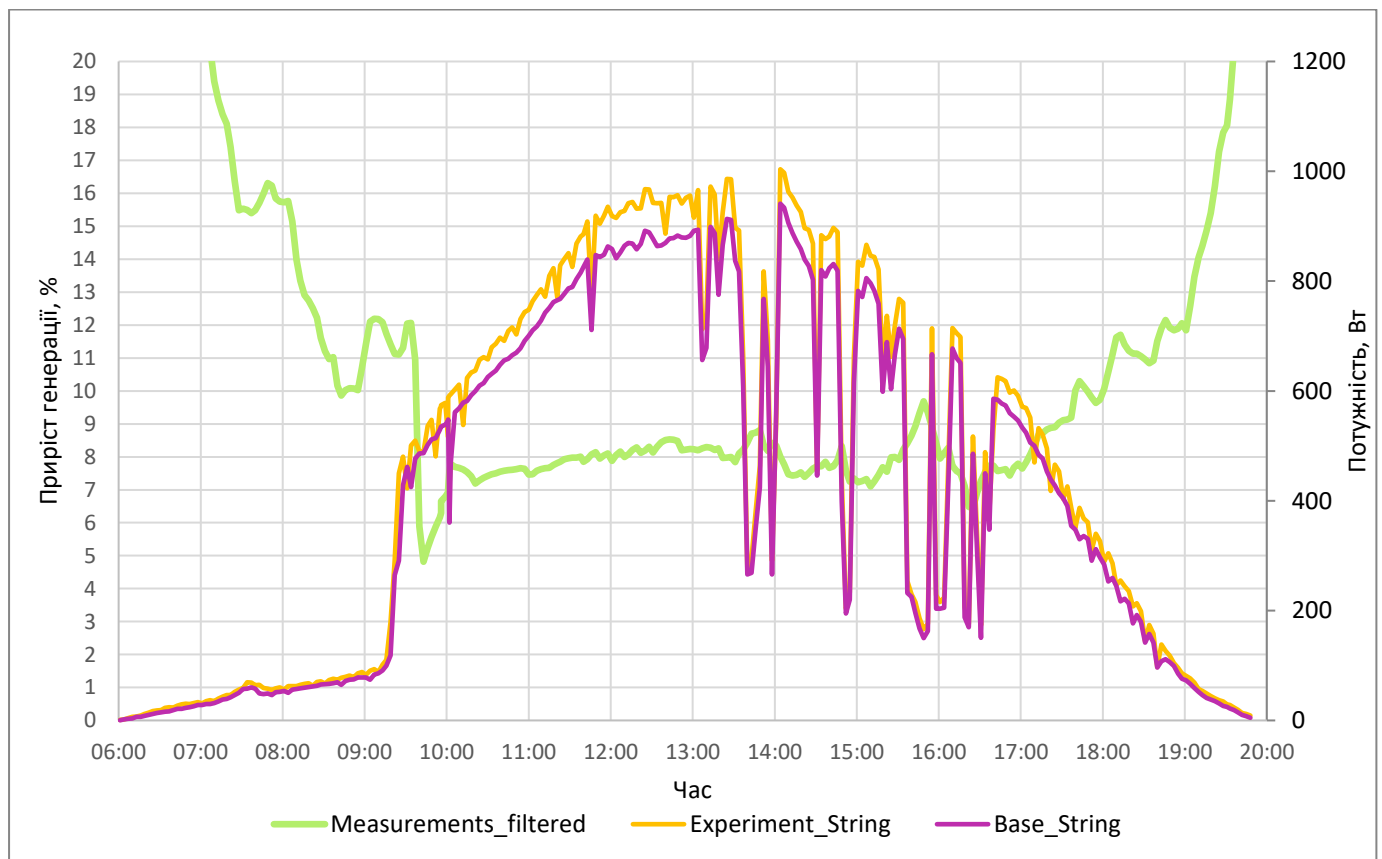


Рисунок 4.4 — Відфільтрований графік генерації за 20-те серпня; форматована вісь

Мале значення генерації до 10-ої години пов'язано з затіненням експериментальної установки будівлею 21-го корпусу. В подальших графіках даний патерн зберігається, а час затінення збільшується через зміну положення Сонця на

горизонті. Під час зникнення затінення, має місце стрибкоподібне збільшення приросту генерації між стрінгами, однак на це можна не зважати, бо це пов'язано з тим, що кожний фотомодуль поступово виходить з тіні. На рис. 4.4 цей момент відбувається приблизно з 9:15 до 9:30.

В подальшому йде нормальна робота фотоелектричної установки, де можемо спостерігати приріст генерації на рівні 7–9 % з перевагою у 8 %. Зменшення генерації потужності фотомодулів пов'язані з частковою хмарністю в цей день. Під вечір приріст генерації знов збільшується, але, як і з вранішніми годинами, це не має вирішального значення, саме для 20-го серпня, бо абсолютна різниця невелика, і панелі мало генерують.

По такому алгоритму були побудовані графіки для вибірки сонячних днів, по 2 для кожного етапу експериментальних досліджень (табл. 4.1). Відповідні відфільтровані графіки наведені в додатку Е.

Таблиця 4.1 — Обрані сонячні дні для побудови графіків для подальшого аналізу

День	Дата	Погода	Відбиваюча поверхня	Еталонний стрінг, кВт*год	Тестовий стрінг, кВт*год	Приріст генерації, %	АКБ зарядилися до 100 %?	Примітки
2	20.08.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	5,56	6,04	8,633	ні	
6	24.08.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	5,16	5,59	8,333	ні	
15	02.09.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	4,27	4,66	9,133	ні	
20	07.09.2023	сонячно	відсутня	6,14	6,8	10,749	ні	
22	09.09.2023	сонячно, місцями хмарно	світловідбиваюча біла тканина	6,16	6,81	10,552	ні	
25	12.09.2023	сонячно	світловідбиваюча біла тканина	5,65	6,23	10,265	ні	
37	24.09.2023	сонячно	темна/чорна тканина	4,74	5,23	10,338	ні	
40	27.09.2023	сонячно	темна/чорна тканина	4,97	5,51	10,865	ні	
43	30.09.2023	сонячно, місцями хмарно	біло-зелена тканина	4,39	4,97	13,212	ні	
52	09.10.2023	сонячно, місцями хмарно	біло-зелена тканина	3,99	4,54	13,784	ні	Вітер
54	11.10.2023	сонячно, місцями хмарно	темна/чорна тканина	4,33	4,71	8,776	ні	
60	17.10.2023	сонячно, місцями хмарно	темна/чорна тканина	4,15	4,51	8,675	ні	

Продовження Табл. 4.1

День	Дата	Погода	Відбиваюча поверхня	Еталонний стрінг, кВт*год	Тестовий стрінг, кВт*год	Приріст генерації, %	АКБ зарядилися до 100 %?	Примітки
67	24.10.2023	сонячно, місцями хмарно	світловідбиваюча біла тканина	3,53	3,97	12,465	ні	
77	03.11.2023	сонячно	світловідбиваюча біла тканина	3,54	4,11	16,102	ні	
94	20.11.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	2,34	2,96	26,496	ні	Часткове затінення базового стрінга
102	28.11.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	2,48	3,21	29,435	ні	Сніговий покрив
104	30.11.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	2,22	2,98	34,234	ні	

Графік за 24-те серпня (рис. Е.1) повторює здебільшого аналогічний за 20-те серпня (рис. Е.2), однак має місце більші коливання приросту генерації, що пов'язано з хмарністю в цей день. Загальна картина зберігається незмінною, а різниця в генерації становить на рівні 8 % в середньому.

При додатковому закритті тильної поверхні фотомодулів базового стрінгу тканиною, приріст генерації збільшився в середньому на 1–1,5 %. Це гарно видно на графіках за 2-ге (рис. Е.3) та 7-ме вересня (рис. Е.5).

Перші досліди з світловідбиваючою білою тканиною (рис. Е.6 — Е.9) мають схожу тенденцію з попередніми. Приріст генерації не збільшився суттєво, як очікувалося від самого початку. Крива або знаходиться в тих же межах 8–10 % (рис. Е.7), або наближається до 11 % (рис. Е.9). Як вже було зазначено, це може бути пов'язано з тим, що тканина була розташована не повністю під фотомодулями, а половина під фотомодулями, а інша половина перед ними (рис. 3.3). Отже, не було отримано максимуму відбитої інтенсивності сонячного випромінювання, що і пояснює малу зміну приросту генерації.

Дані з першою частиною чорної тканини теж доволі цікаві (рис. Е.10 — Е.13). Перш за все можемо бачити, що приріст генерації майже не змінився в порівнянні з першим етапом (рис. Е.11, Е.13) і зберігається на рівні 9–10 %. Це може бути пов'язано з типом чорної тканини, що використовувалася в першій частині. Справа в тому, що при більш прискіпливому огляді виявилось, що дана тканина має певні світловідбиваючі здібності, що може пояснювати несуттєву зміну генерації.

Після встановлення біло-зеленої тканини спостерігається суттєве збільшення приросту генерації (рис. Е.14 — Е.17). Зокрема, на графіку за 30-те вересня (рис. Е.15) середнє значення приросту генерації перевищує 12 %, і подекуди доходить до 14 %. В графіку за 9-те жовтня (рис. Е.17) приріст генерації теж тримається на рівні 12–13 %, а при зменшенні інсоляції за рахунок хмар приріст генерації не опускається нижче 10 %. Саме графіки при використанні біло-зеленої тканини, а також порівняння з попередніми, стали дуже вагомими під час проведення експерименту.

По-перше, можемо зробити висновок, що важливим моментом є не тільки колір відбиваючої поверхні (в нашому випадку тканини), а і її текстура. На це необхідно зважати під час вибору відбиваючої поверхні на наявній станції, або при розрахунку додаткової генерації від двосторонніх фотомодулів на моменті проектування станції. Той же білий гравій, бетонна плита пофарбована в білий колір чи біле простирadlo будуть мати різну ефективність генерації.

По-друге, як видно на графіку за 9-те жовтня (рис. Е.17) у вечірню пору, після 14:00, приріст генерації дещо знизився до 11...12 %. Загальна генерація теж знизилася через хмарність. Тому можна стверджувати, що двосторонні панелі працюють найкраще саме в сонячну погоду, і хоча в хмарну погоду вони все одно генерують більше односторонніх, однак приріст генерації найбільший саме при сонячній погоді. Це додатково підкріплюється загальним даними генерації за 1-ше, 4-те, 5-те, а особливо за 7-ме жовтня (Додаток Г), коли погода здебільшого була хмарна.

По-третє, в реальних умовах можна досягти порівняно високих значень приросту генерації, від 13 %, якщо забезпечити необхідні умови роботи фотомодулів. На даному етапі вважалось, що цифра 15 % може бути максимальною при ідеальних факторах, однак детальніше про це пізніше. Натомість саме після позитивних даних з біло-зеленою тканиною було вирішено повторити досліди з чорною та біло-світловідбиваючою.

На другій частині експерименту з чорною тканиною (рис. Е.18 — Е.21) було використано матове агроволокно. При цьому помітне суттєве зменшення приросту генерації, в середньому до 8 % (рис. Е.19). Схожі дані, але з більшою дисперсією, можна бачити на графіку за 17-те жовтня (рис Е.21). Отже, підтверджується той факт, що двосторонні панелі генерують менше з темною тканиною в якості відбиваючої поверхні. І ще раз підтверджується твердження, що не тільки колір впливає, а і текстура, якщо порівнювати першу частину експерименту з чорною тканиною та другу (рис. 4.5, 4.6).

При проведені другої частини експерименту з білою світловідбиваючою тканиною (рис. Е.22 — Е.25) останню було розміщено безпосередньо під фотомодулями (рис. 3.6). Помічено збільшення приросту генерації в середньому до 11–12 % (рис. Е.23, Е.25). Як раз за 24-те жовтня приріст сумарної генерації за день склав 12,465 % (табл. 4.1). В той же час за 3-те листопада ми бачимо більше 16 % приросту сумарної генерації, що є набагато більшим, ніж будь-яке інше значення до того часу.

Розглянемо детальніше графік за 3-те листопада (рис. Е.24). На початку дня наявне затінення всіх фотомодулів від будівлі 21-го корпусу. Близько 9:30 фотомодулі поступово виходять із тіні, чим пояснюється стрибок у прирості генерації. Надалі йде стабільна робота з приростом генерації на рівні 10–12 %. Однак з 14:00 спостерігається стрибкоподібне збільшення приросту генерації аж до 80 %. При цьому тестовий стрінг генерує в 14:30 приблизно 560 Вт, а базовий — 300 Вт. І хоча спочатку вважалося, що саме тильна поверхня тестового стрінга відповідальна за такий приріст генерації, однак з часом постали сумніви у такому твердженні. Тому на даному етапі стрибок не брався до уваги, оскільки необхідно було дослідити його причини. Після 15:30 приріст генерації стає близько 20–25 %, що по досвіду інших днів є цілком нормальним, зважаючи на швидкий захід сонця в листопаді, а самі значення генерації стали доволі малі (до 150 Вт).

Тим не менш друга частина експерименту з світловідбиваючою тканиною по результату схожа з аналогічною з чорною тканиною: були враховані помилки, допущенні при проведенні перших частин, та отримані кращі дані для порівняння (рис. 4.7, 4.8). Так, якщо порівнювати другі частини експериментів з чорною та білою світловідбиваючою тканиною, то різниця складає близько 3 % (рис. 4.9, 4.10); чорна — 8 %, біла світловідбиваюча — 11 %. Саме такий результат у порівняно суттєвій різниці приросту генерації планувалося отримувати під час підбору тканини в якості відбиваючої поверхні.

Однак світловідбиваюча тканина все одно не перевершує біло-зелену тканину, що зберігає лідерство з приблизним середнім значенням 12,5–13 % вдень (рис. 4.11, 4.12). В порівнянні ж з чорним агроволокно різниця в 4,5–5 % є суттєвою, особливо для промислової сонячної станції на кількасот кВт.

Першочергово на цьому мали закінчуватися експерименти, однак було вирішено прибрати тільки штучну відбиваючу поверхню у вигляді тканини та залишити станцію. Вважалося, що стрибок в прирості генерації за 3-тє листопада міг бути пов'язаний з косими сонячними променями при низькому положенні сонця в вечірні години.

На графіку за 20-тє листопада (рис. Е.26, Е.27), після хмар в першій половині дня, з 11:20 спостерігається нормальна робота станції з приростом генерації в 7–11 %, або середнім у 9 %. Однак, після 13:00 знову йде стрибкоподібне збільшення приросту генерації. Якщо не зважати на стрибок, то помітимо, що приріст генерації без відбиваючих поверхонь в листопаді та на початку вересня майже ідентичні, з середнім значенням в 9 % (рис. 4.13, 4.14). Важливо зазначити, що хоча до 21-го листопада ані снігу, ані снігового покриву не спостерігалось, однак температура навколишнього середовища вночі була нижче нуля, через що фронтальна поверхня фотомодулів покривалася шаром льоду. Вдень цей лід встигав розмерзнути, але цей аспект потрібно враховувати при порівнянні ефективності односторонніх та двосторонніх фотомодулів, оскільки тильна поверхня двосторонніх фотомодулів генерує завжди без змін.

З 22-го листопада почав випадати сніг, і вся площа балкону, як і інших місць Києва, покрилася снігом. При цьому в сонячні дні 28-го та 30-го листопада (рис. Е.28 — Е.32) спостерігається суттєве збільшення приросту генерації вдень аж до 18 %. Найкраще це видно на суміщених графіках приросту генерації в порівнянні з 20-им листопада, 2-им та 7-им вересня (рис. 4.15 — 4.16), або ж з другими частинами експериментів з чорною та білою світловідбиваючою тканинами, а також з біло-зеленою тканиною (рис. 4.17 — 4.18).

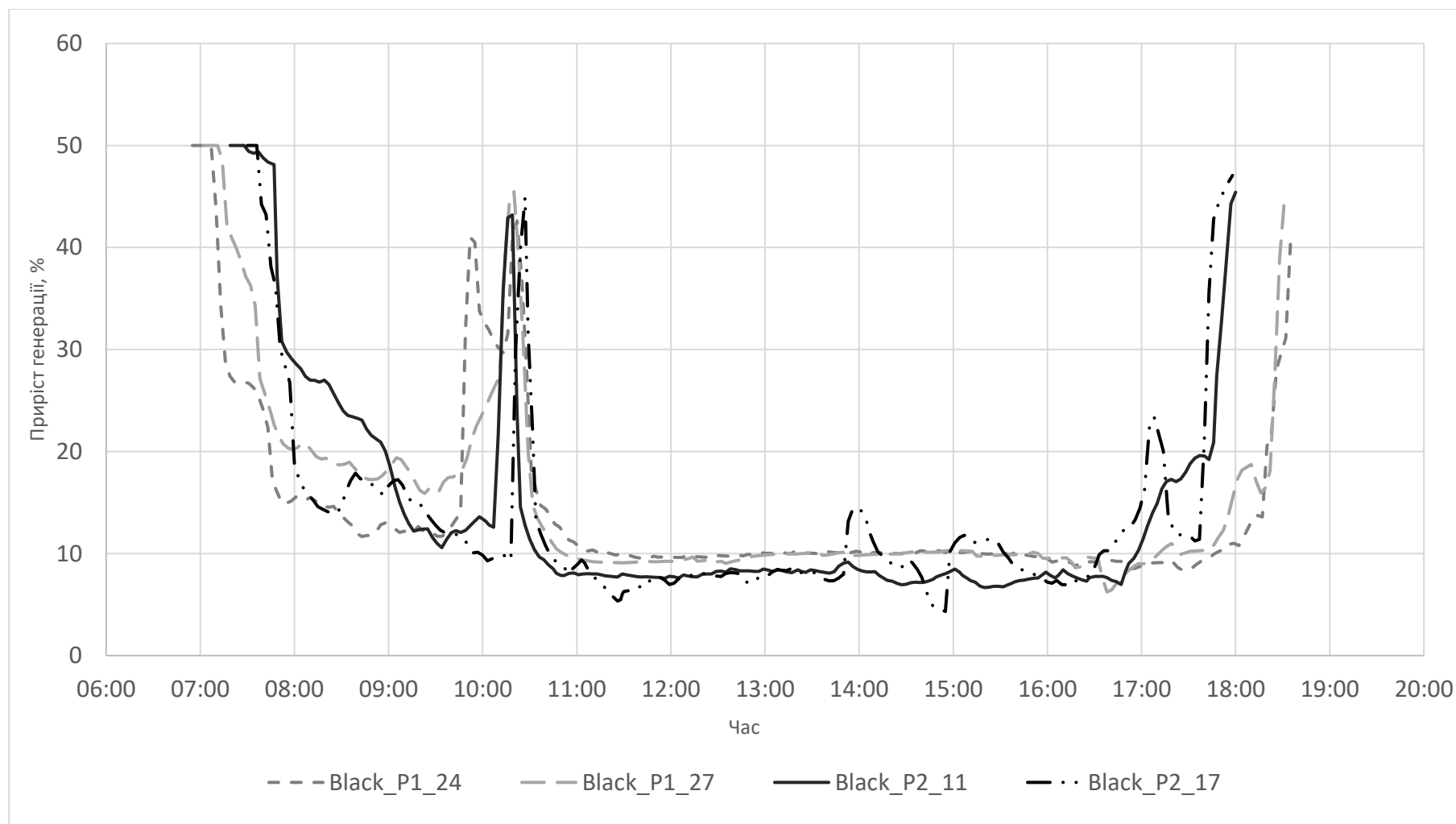


Рисунок 4.5 — Суміщений графік приросту генерації.
Дві частини експерименту з чорною тканиною (24.09; 27.09; 11.10; 17.10)

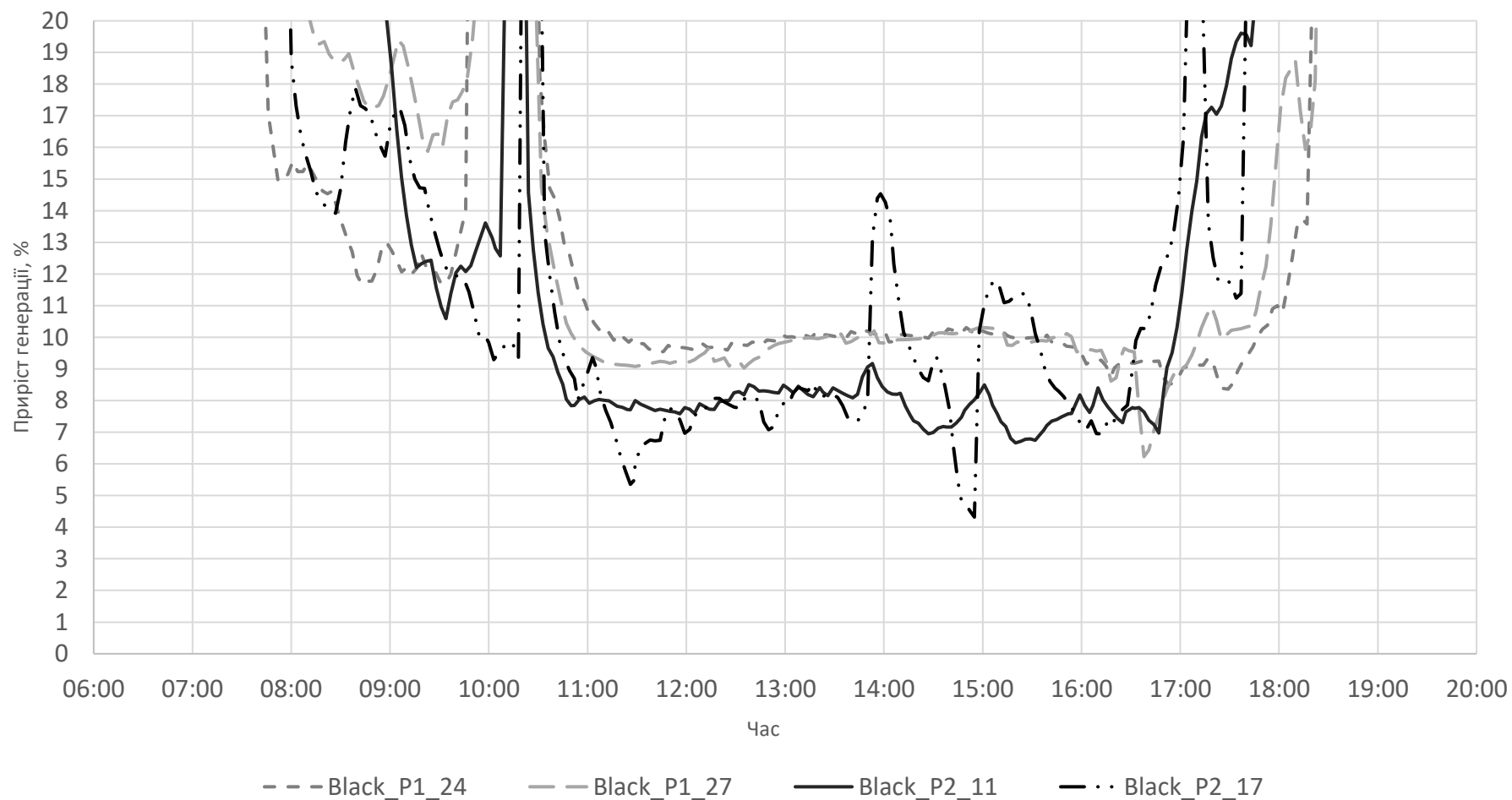


Рисунок 4.6 — Суміщений графік приросту генерації; форматована вісь.

Дві частини експерименту з чорною тканиною (24.09; 27.09; 11.10; 17.10)

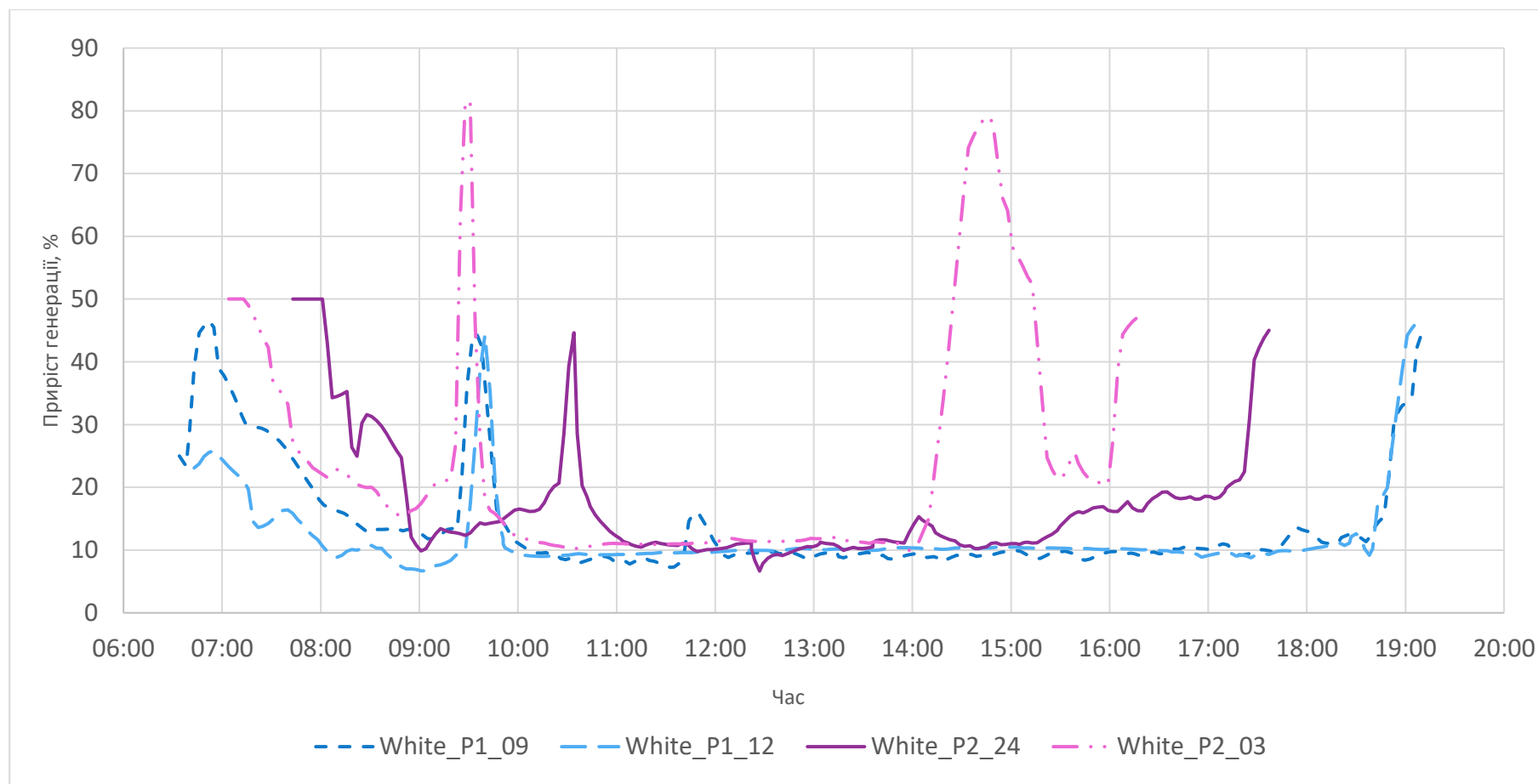


Рисунок 4.7 — Суміщений графік приросту генерації.

Дві частини експерименту з білою світловідбиваючою тканиною (09.09; 12.09; 24.10; 03.11)

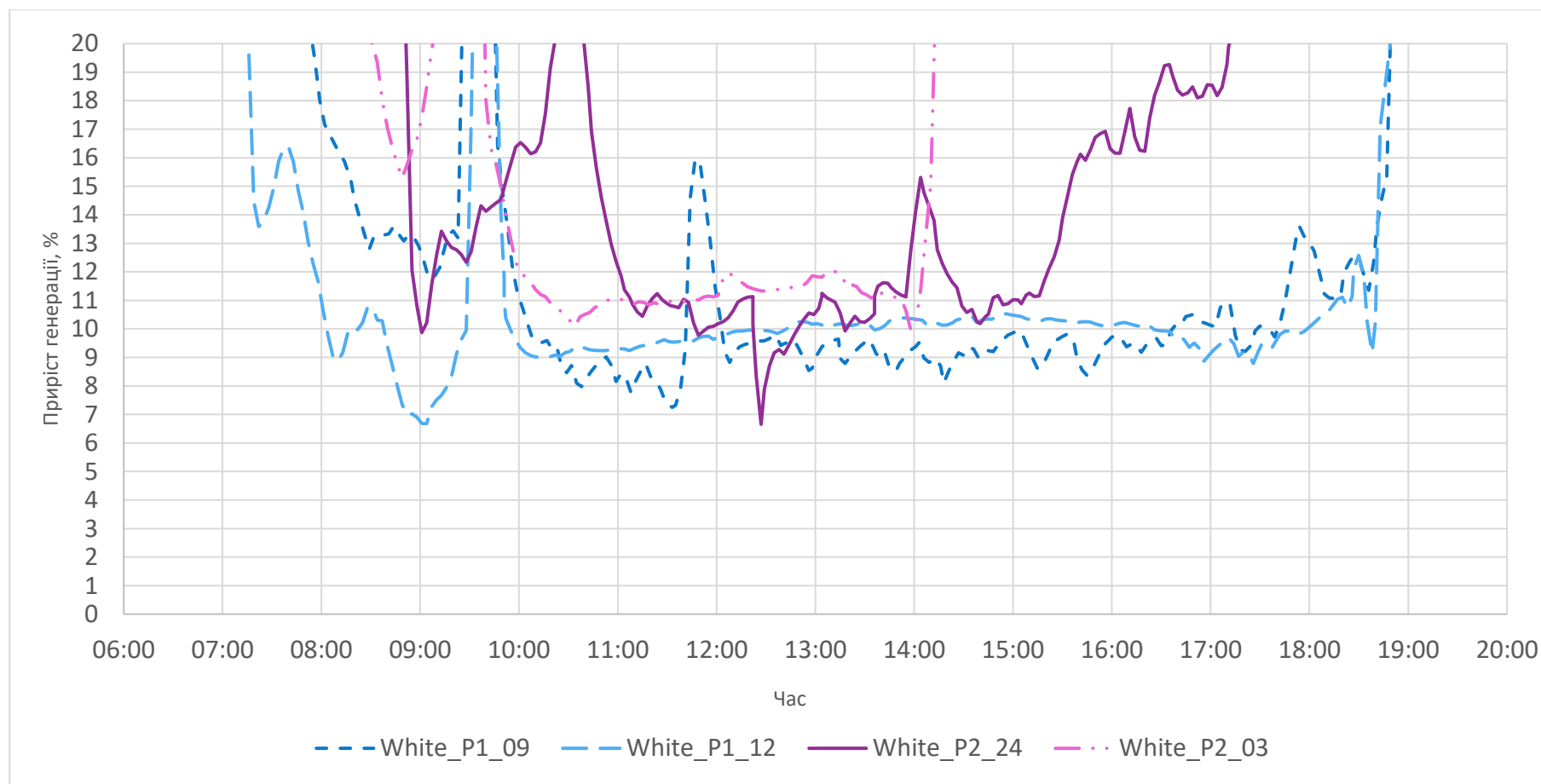


Рисунок 4.8 — Суміщений графік приросту генерації; форматована вісь.

Дві частини експерименту з білою світловідбиваючою тканиною (09.09; 12.09; 24.10; 03.11)

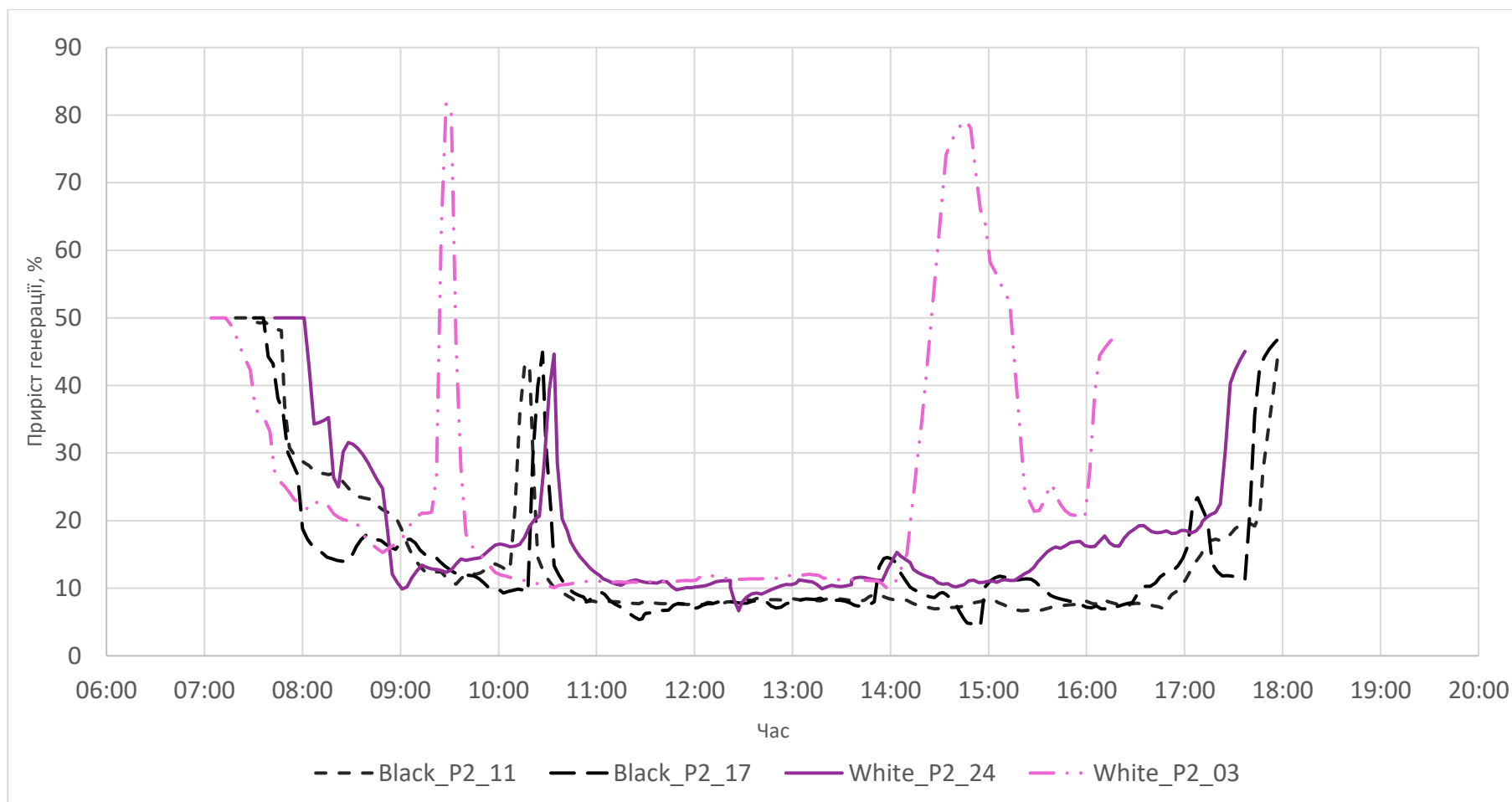


Рисунок 4.9 — Суміщений графік приросту генерації.

Другі частини експерименту з чорною та білою світловідбиваючою тканиною (11.10; 17.10; 24.10; 03.11)

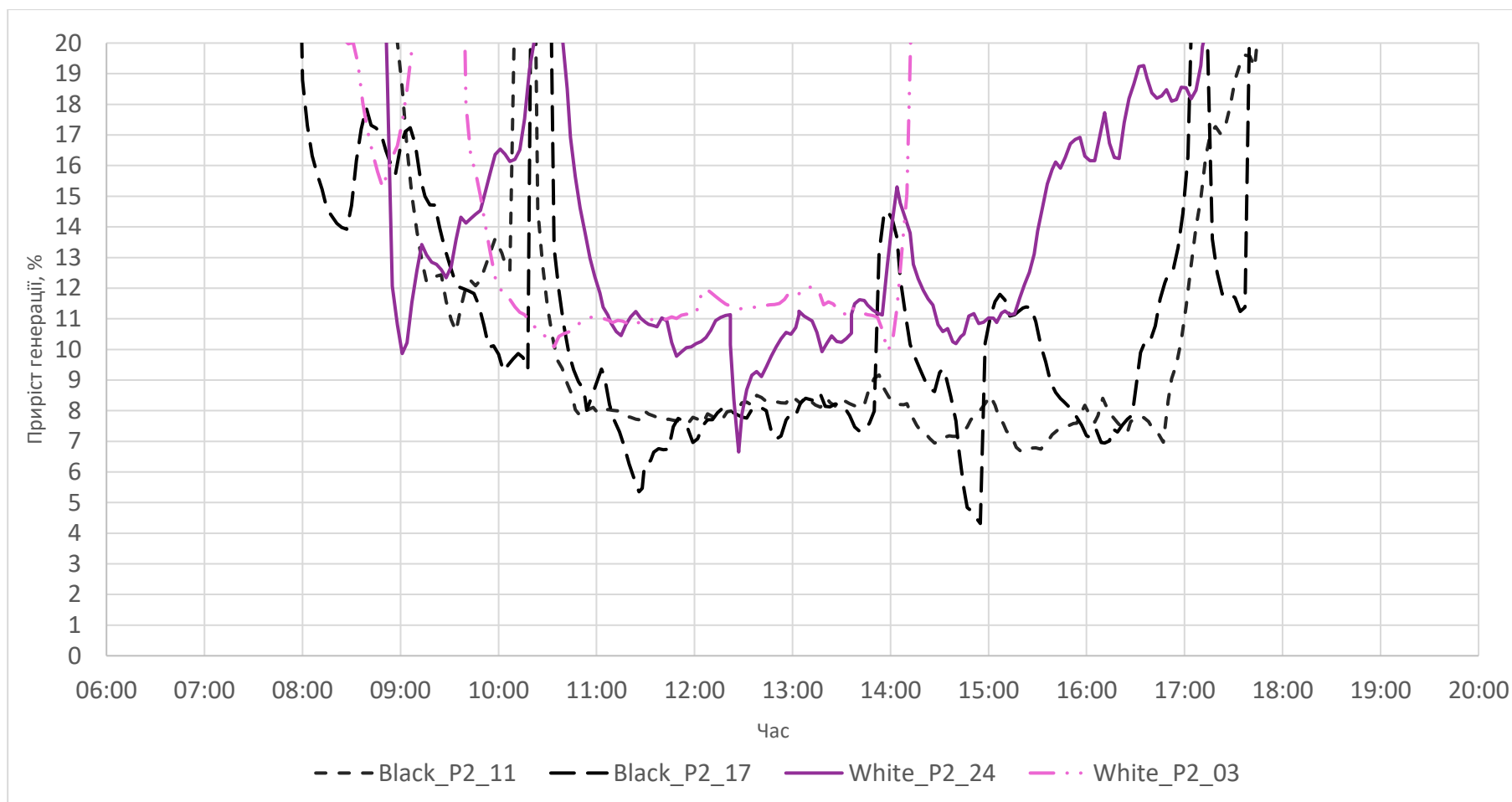


Рисунок 4.10 — Суміщений графік приросту генерації; форматована вісь.

Другі частини експерименту з чорною та білою світловідбиваючою тканиною (11.10; 17.10; 24.10; 03.11)

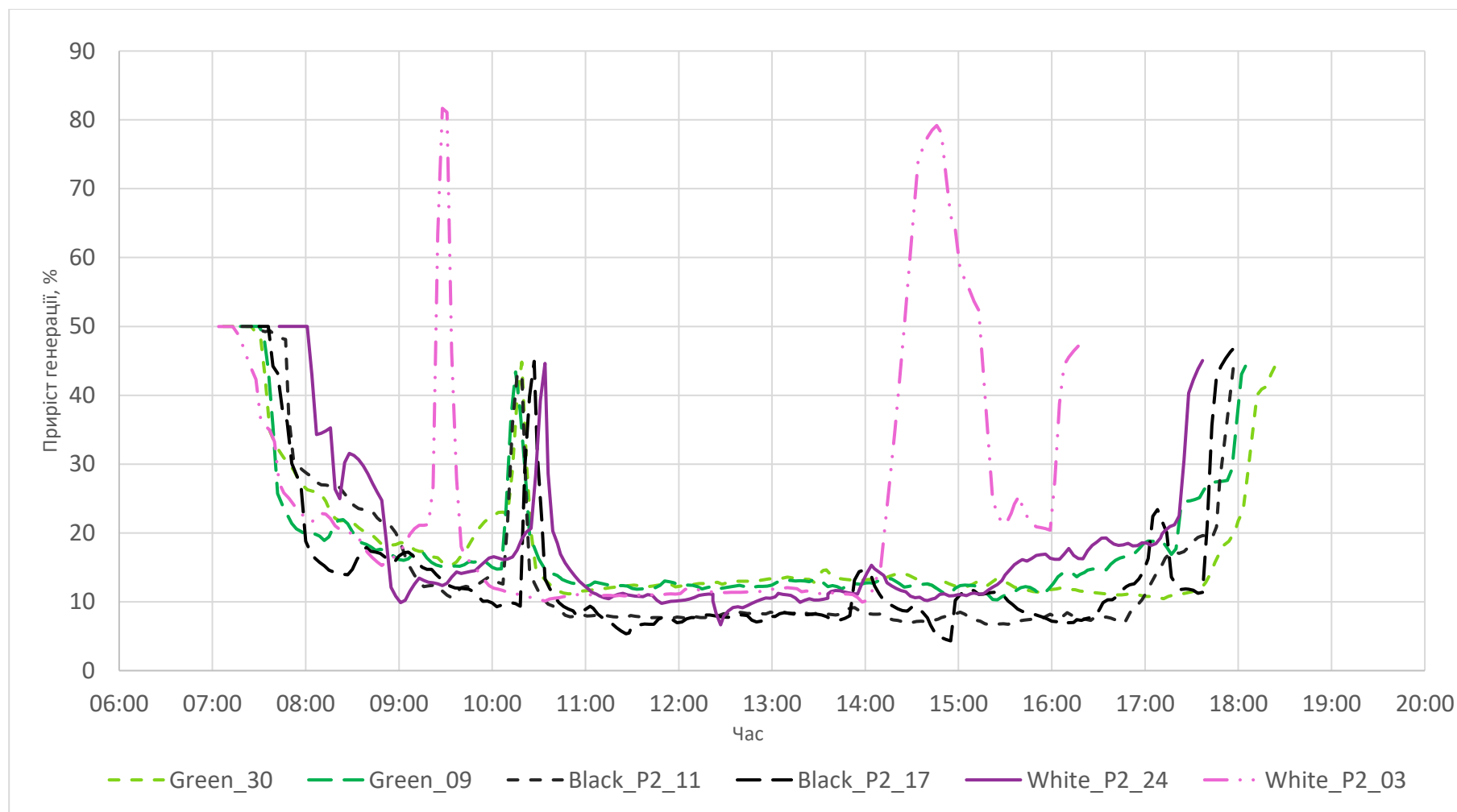


Рисунок 4.11 — Суміщений графік приросту генерації.

Другі частини експерименту з чорною та білою світловідбиваючою тканиною,
а також біло-зелена тканина (30.09; 09.10; 11.10; 17.10; 24.10; 03.11)

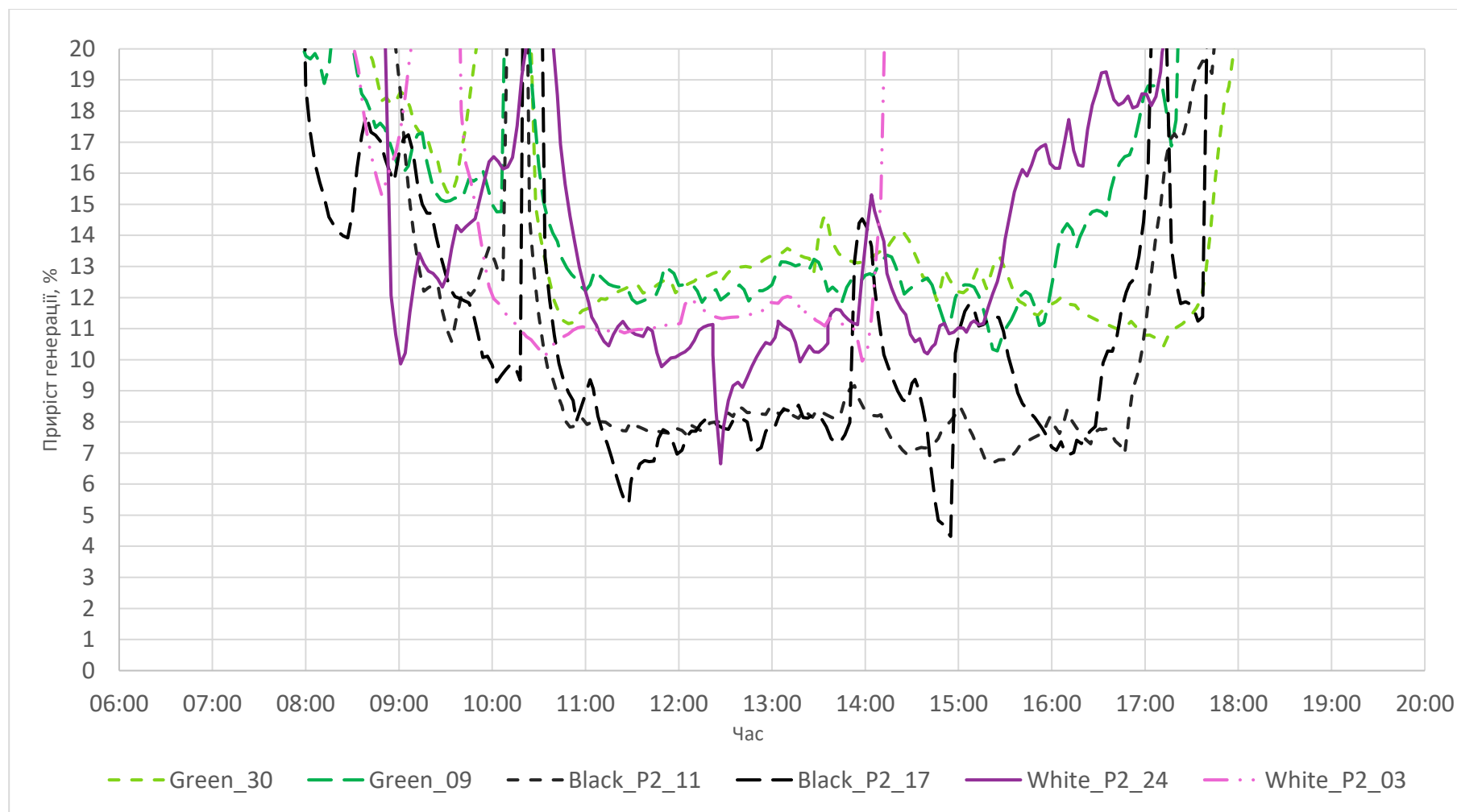


Рисунок 4.12 — Суміщений графік приросту генерації; форматована вісь.
Другі частини експерименту з чорною та білою світловідбиваючою тканиною,
а також біло-зелена тканина (30.09; 09.10; 11.10; 17.10; 24.10; 03.11)

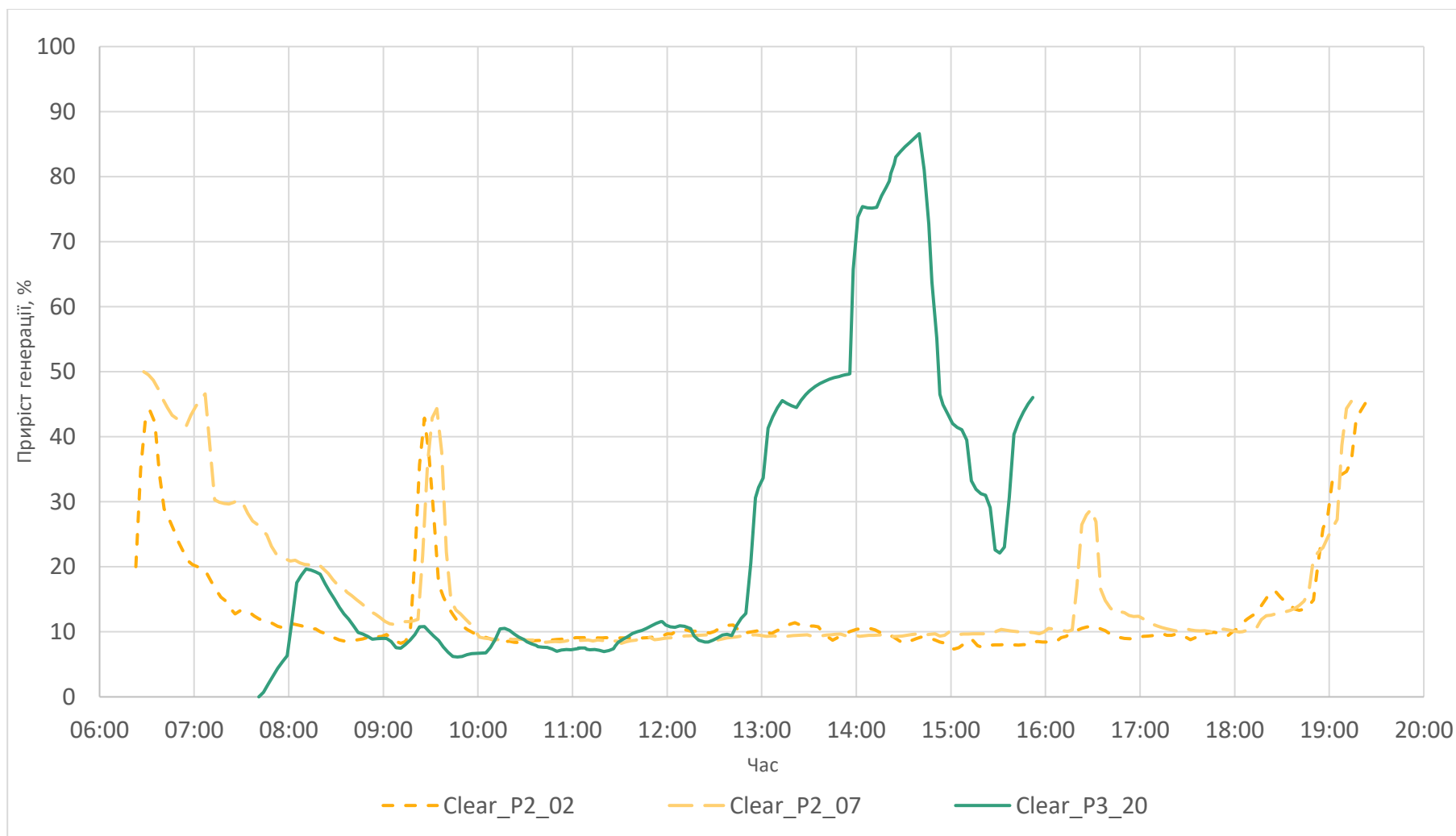


Рисунок 4.13 — Суміщений графік приросту генерації.

Частини експерименту без відбиваючої поверхні в вересні та листопаді (02.09; 07.09; 20.11)

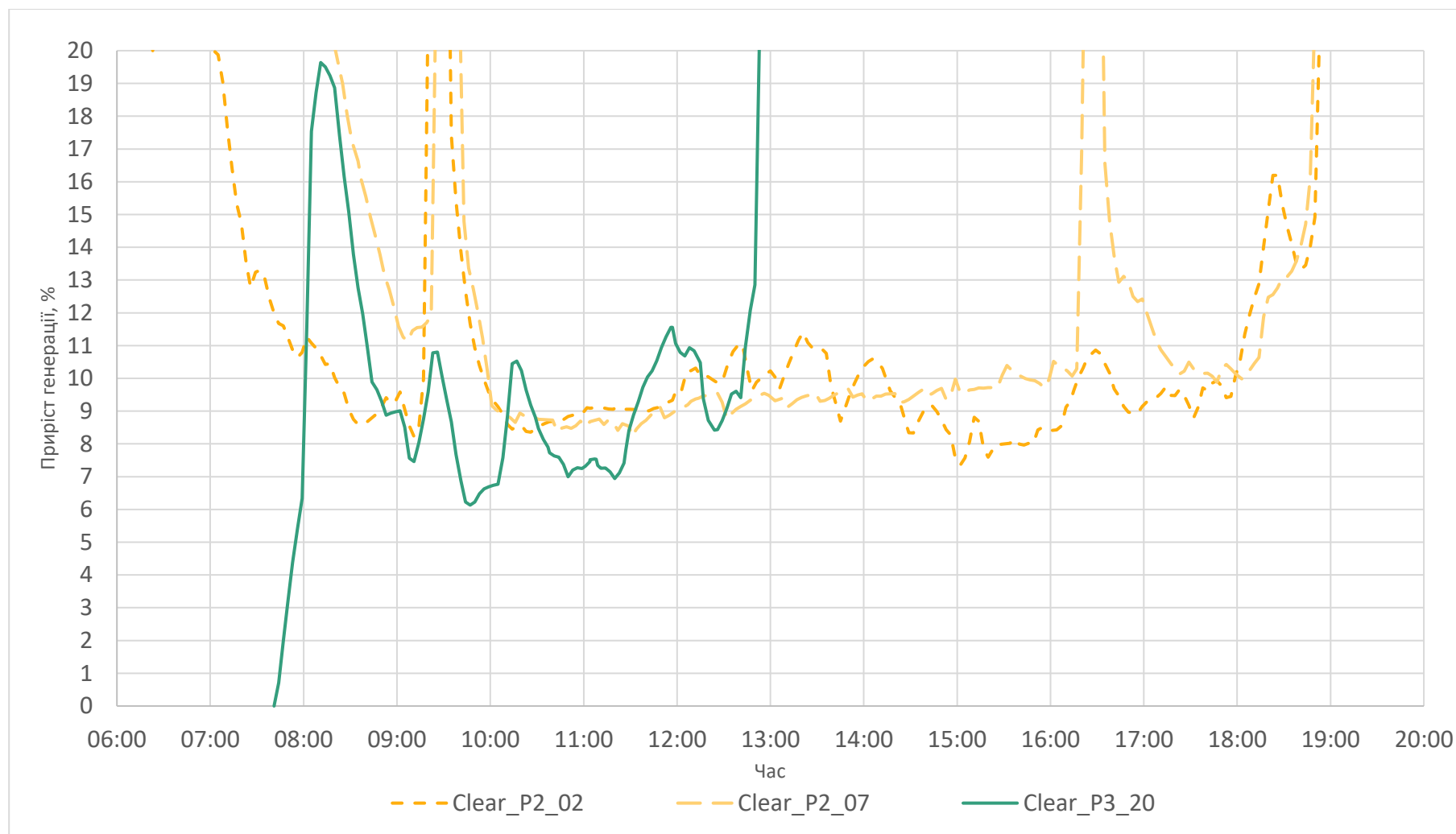


Рисунок 4.14 — Суміщений графік приросту генерації; форматована вісь.

Частини експерименту без відбиваючої поверхні в вересні та листопаді (02.09; 07.09; 20.11)

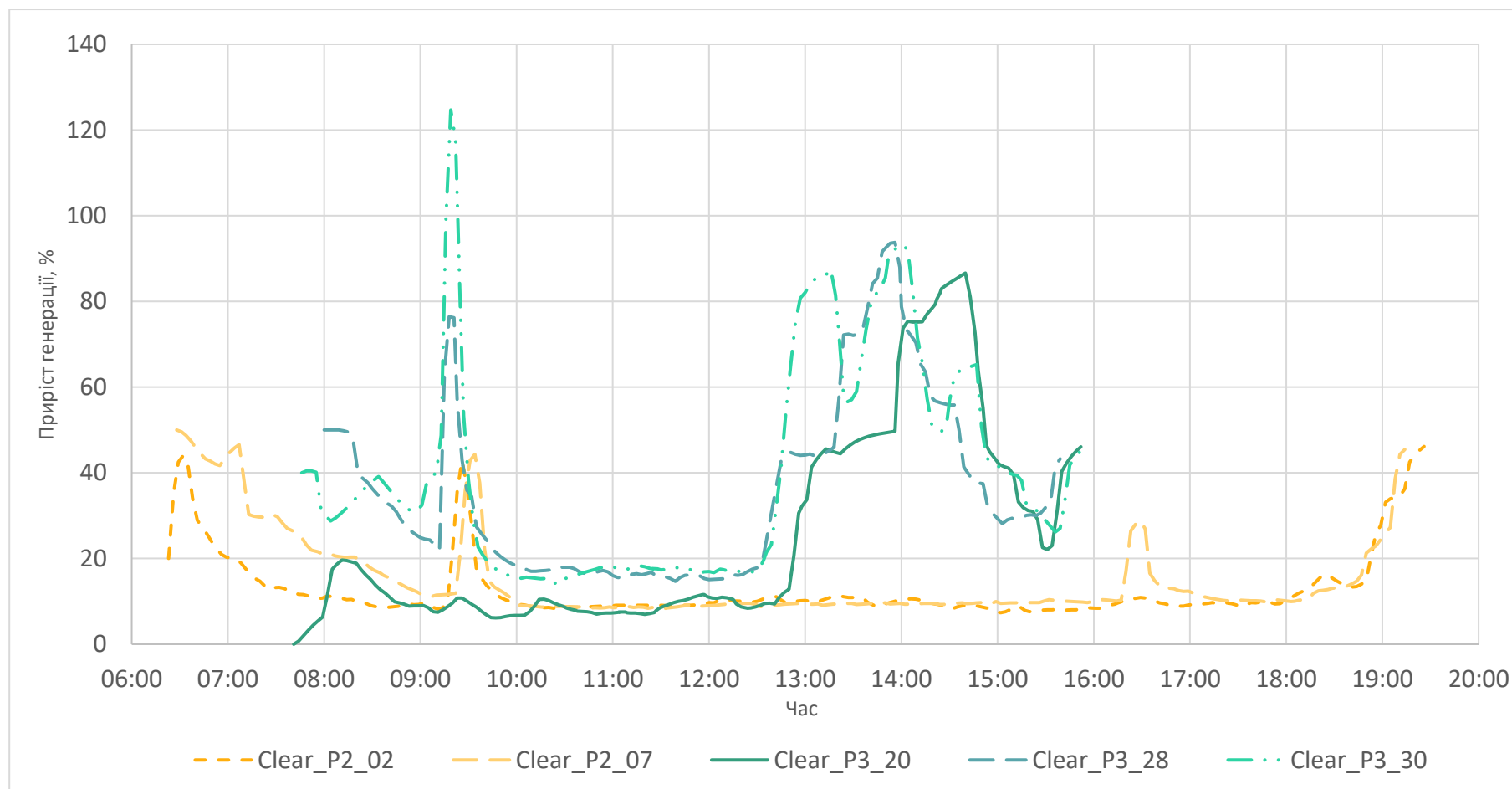


Рисунок 4.15 — Суміщений графік приросту генерації.

Частини експерименту без відбиваючої поверхні в вересні та листопаді,
а також з сніговим покривом (02.09; 07.09; 20.11, 28.11; 30.11)

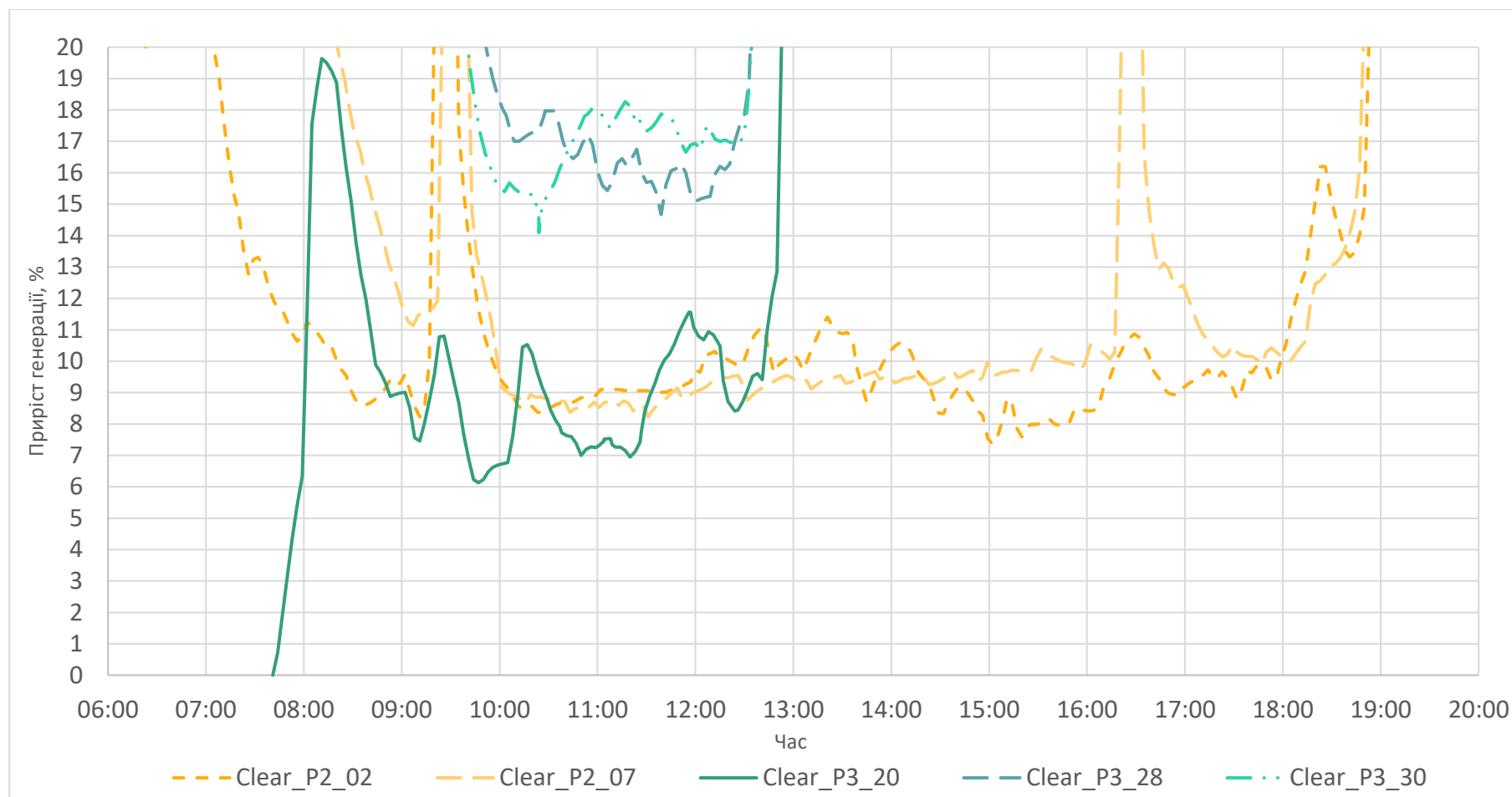


Рисунок 4.16 — Суміщений графік приросту генерації; форматована вісь.

Частини експерименту без відбиваючої поверхні в вересні та листопаді,
а також з сніговим покривом (02.09; 07.09; 20.11, 28.11; 30.11)

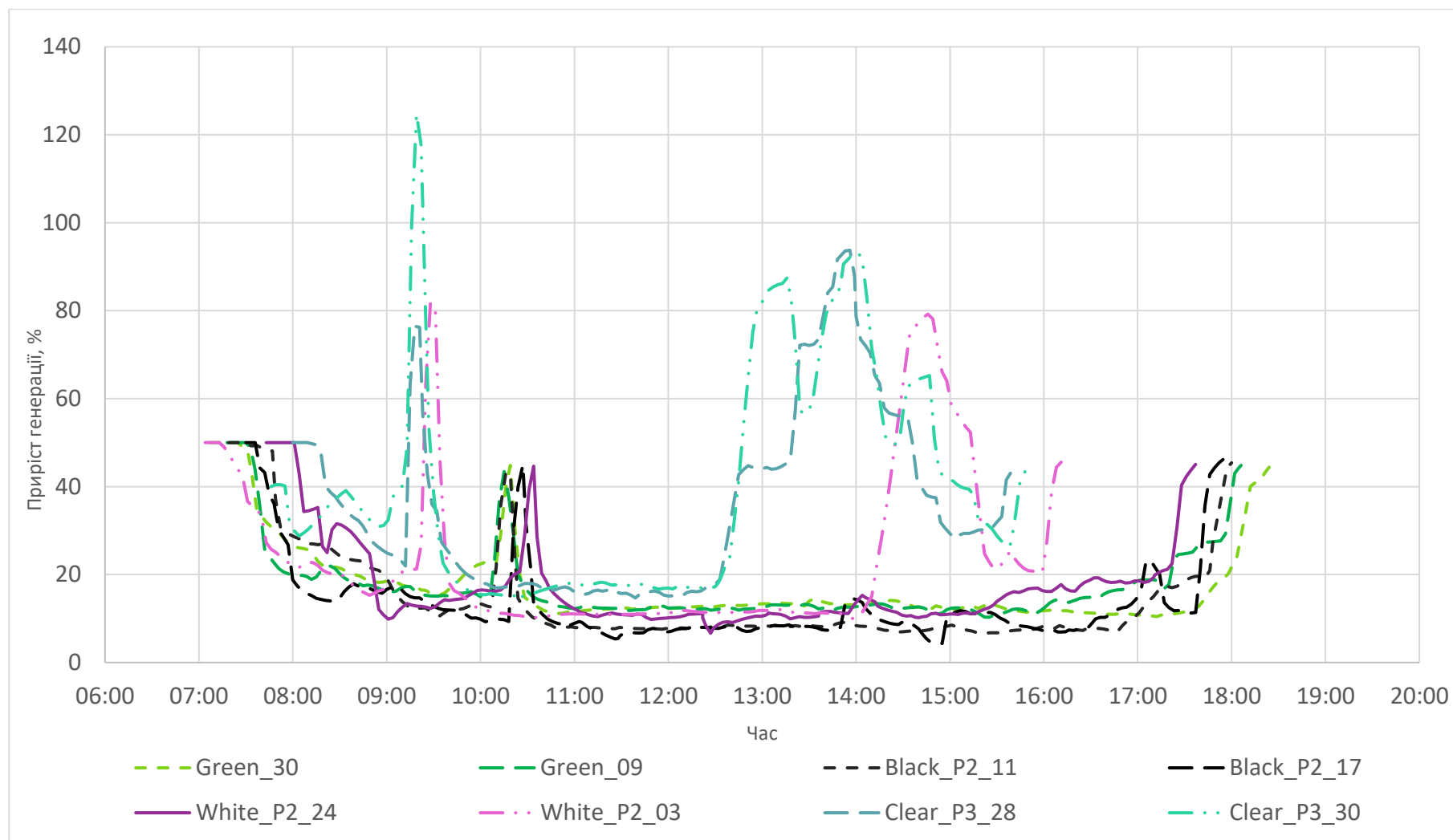


Рисунок 4.17 — Суміщений графік приросту генерації.

Другі частини експерименту з чорною та білою світловідбиваючою тканиною, а також біло-зелена тканина та сніговий покрив (30.09; 09.10; 11.10; 17.10; 24.10; 03.11; 28.11; 30.11)

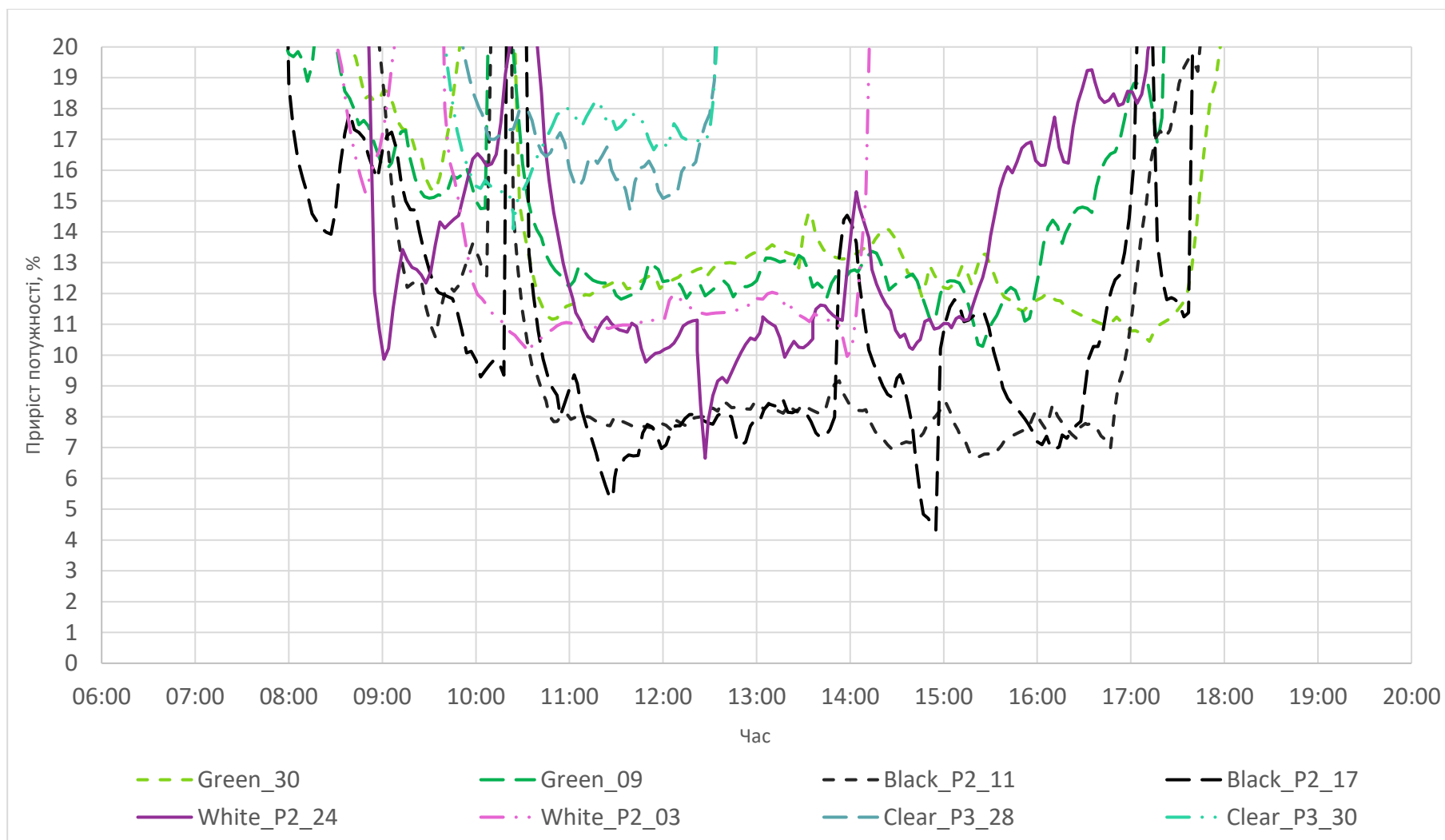


Рисунок 4.18 — Суміщений графік приросту генерації; форматована вісь.

Другі частини експерименту з чорною та білою світловідбиваючою тканиною, а також біло-зелена тканина та сніговий покрив (30.09; 09.10; 11.10; 17.10; 24.10; 03.11; 28.11; 30.11)

Можна вважати, що середнє значення приросту генерації становить на рівні 16–17 %, що набагато перевищує будь-які попередні показники. Виділено три основні фактори, що зумовили такий великий приріст генерації:

1. Сніг має одне із найкращих значень альбедо (табл. 1.1), особливо свіжий сніг. Разом з цим, сніг покриває не тільки поверхню під фотомодулями, а і всю іншу площу (рис. 4.19), тим самим збільшуючи її відбиваючі здатності. Звичайно, що в умовах експерименту було неможливо покрити всю поверхню балкону білою, чорною чи будь-якою іншою тканиною. Тобто потрібно зважати не тільки на відбиваючу здатність поверхні безпосередньо під фотомодулями, а і в певному радіусі, наприклад 5 м.
2. Загальне зменшення генерації електроенергії фронтальною поверхнею через зменшення інсоляції пізньою осінню. В той же час тильна сторона майже завжди сприймає тільки відбиту інтенсивність сонячного випромінювання, значення якої не настільки залежать від максимальної інсоляції в певний місяць. Умовно, якби взимку була б така ж сама інсоляція, що і в серпні місяці, то очікується, що значення приросту генерації могло би бути дещо меншим. Якщо поглянути на різницю генерації [Вт] (НЕ приріст генерації), то без відбиваючої поверхні 7-го вересня вона склала 100 Вт, але миттєві потужності стрінгів були 1000 та 900 Вт. В той же час 28-го листопада якщо різниця теж була 100 Вт, то миттєві потужності вже на рівні 770 та 670 Вт.
3. Навіть після заметілі чи опадів, коли фронтальна поверхня фотомодулів покрита шаром снігу, тильна сторона все одно генерує в звичайному режимі (рис. 4.20). Саме тому 22-го та 23-го листопада, а також 2-го грудня приріст генерації непомірно високий (Додаток Г). І хоча в ті дні загальна генерація склала менше 1 кВт*год, однак це показує загальну тенденцію, що відбувається навіть в сонячні дні вранці.

30-го листопада було з'ясовано причину (рис. 4.19) стрибків приросту генерації до 80–100 % на графіках, починаючи з 3-го листопада (а може навіть і раніше). Справа

в тому, що відбувалось часткове затінення базового стрінгу в післяобідні години іншою секцією фотомодулів, розташованими південно-західніше. В літні місяці та перші місяці осені Сонце було доволі високо на небосхилі, тому тіні не було, однак зі зниження положенням Сонця та зменшенням кута падіння сонячних променів до горизонту відбулося часткове затінення.



Рисунок 4.19 — Часткове затінення базового стрінгу.

Дата та час зйомки фото: 30.11.2023 о 13:20



Рисунок 4.20 — Фронтальна поверхня фотомодулів покрита снігом.

Дата та час зйомки фото: 06.12.2023 о 10:52

В результаті дослідів було отримано середні значення приросту генерації двосторонніх фотомодулів в порівнянні з односторонніми при різних типах відбиваючої поверхні, що наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 — Середні показники приросту генерації двосторонніх фотомодулів в залежності від типу відбиваючої поверхні.

Тип відбиваючої поверхні	Приріст генерації (... ± 0,5 %)
Відсутня (сірі бетонні плити)	9 %
Темна тканина	9,5 %
Біло-зелена тканина	12,5 %
Матове чорне агроволокно	8 %
Світловідбиваюча біла тканина	11 %
Свіжий сніг	16,5 %

Важливо пам'ятати, що відповідні прирости генерації взяті для найбільш продуктивної доби, тобто в середині дня. Конкретний час залежить від пори року, якщо влітку цей час умовно з 9-10 годин ранку і до 17-18 години вечора, то взимку приблизно з 10-ої години і до 13-ої. При косих променях сонцю на світанку та пізнього вечора прирости генерації збільшуються, подекуди до 20–50%, однак це не має вирішального значення.

Найкраще це можна бачити, якщо взяти певний день, наприклад 7-ме вересня (рис. Е.4, Е.5) та отримати погодинні значення згенерованої електроенергії (рис. 4.21). При цьому, якщо поділити погодинні значення на сумарні за весь день (6,14 кВт*год базовим стрінгом та 6,8 кВт*год експериментальним), то отримаємо відсоткове співвідношення кількості згенерованої електроенергії кожної години від сумарної генерації за день (рис. 4.22). Тоді наглядно видно, що на години до 9-ої ранку і після 18-ої вечора припадає менше 5 % всієї генерації за день.

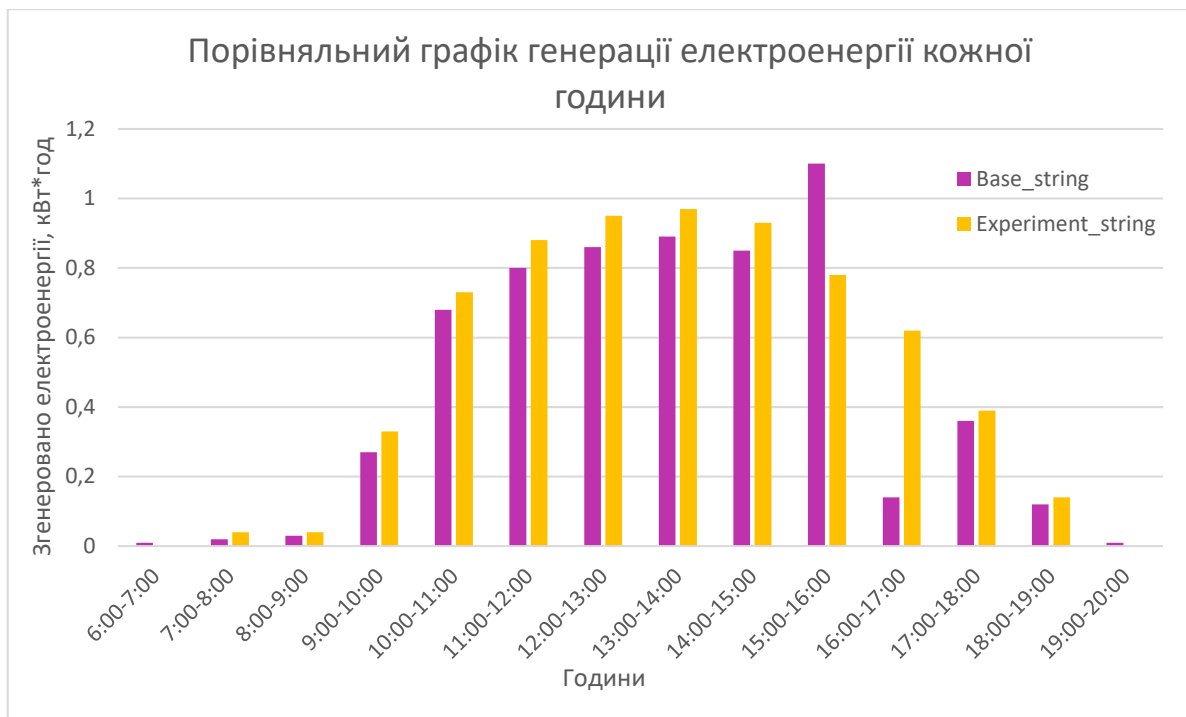


Рисунок 4.21 — Порівняльний графік генерації електроенергії кожної години;
07.09.2023

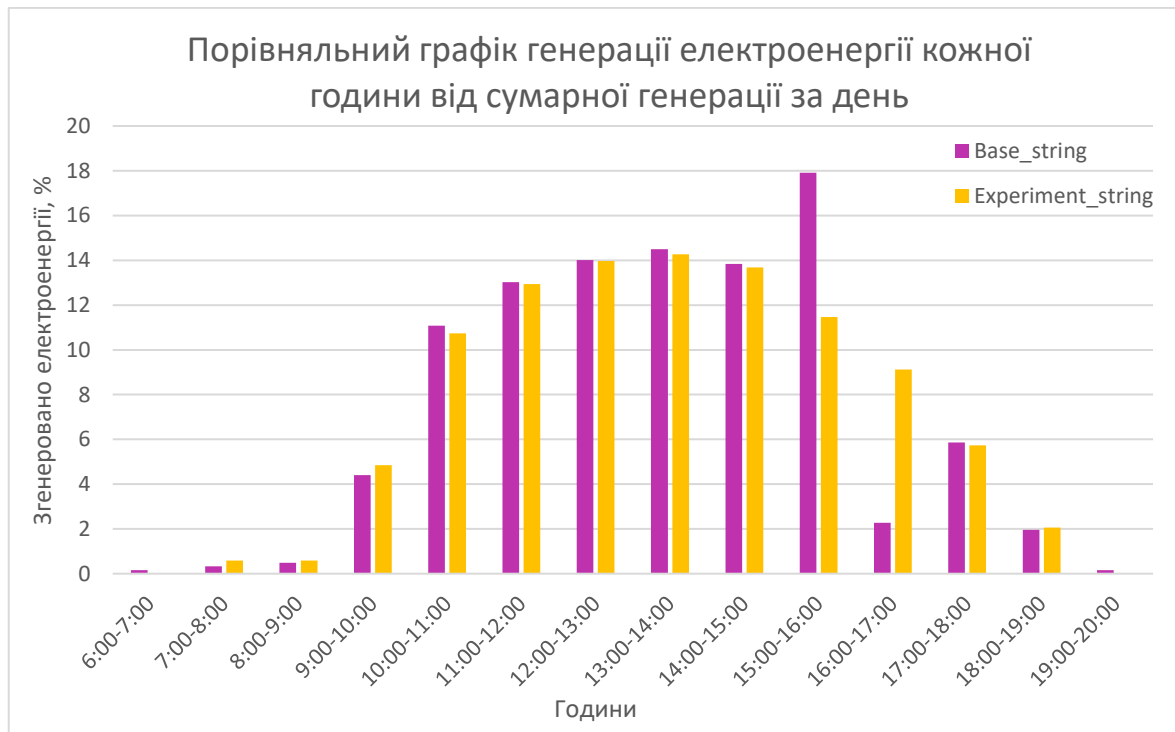


Рисунок 4.22 — Порівняльний графік генерації електроенергії кожної години від сумарної генерації за день; 07.09.2023

Якщо порівнювати отримані результати з теоретичними, наприклад в роботі американських вчених згаданих в першому розділі (рис. 1.18) [16], то при висоті встановлення 1 м та оптимальному куті як до горизонту, так і азимуту, максимальний приріст генерації двосторонніх фотомодулів при альбедо 0,5 становить приблизно 25–30 %. Важливо зазначити, що для цих результатів кут до горизонту має бути близько 60° , а азимут чітко на південь, коли в експерименті кут до горизонту завжди становив 30° , а азимут 10° на південний захід. І навіть, якщо встановити фотомодулі під рекомендованими кутами, все одно є сумніви в досягненні 25 %, оскільки це є саме максимумом, причому, скоріше за все, короткостроковим. Тобто практичні показники будуть завжди гірші, ніж теоретичні.

Це можна прослідкувати і в іншій роботі, де симулювався приріст генерації двосторонніми фотомодулями [30]. Зокрема при висоті встановлення в 1 м при куті 35° та альбедо 21 % приріст генерації склав 10–15 % (рис. 4.23). При збільшенні альбедо до 43 % приріст генерації становив 20–25 %, що доволі близько до значень, що наведені в попередній роботі (рис. 1.22). В експерименті ж значення 12,5 % для біло-зеленої тканини були отримані 30-го вересня та 9-го жовтня, однак є сумніви, що альбедо біло-зеленої тканини становить 21 %.

Більш того, як можна проаналізувати теоретичні розрахунки та моделі, то в них при збільшенні альбедо приріст генерації збільшується суттєво (на 5 % чи 10 %), коли в експерименті максимальна різниця у прирості склала між матовим агроволокном та свіжим снігом з значенням в 8,5 %. Звідси можна зробити висновок, що теоретичні результати по ефективності двосторонніх фотомодулів для реальних установок краще множити на певний коефіцієнт, щоб отримати реальне значення приросту генерації.

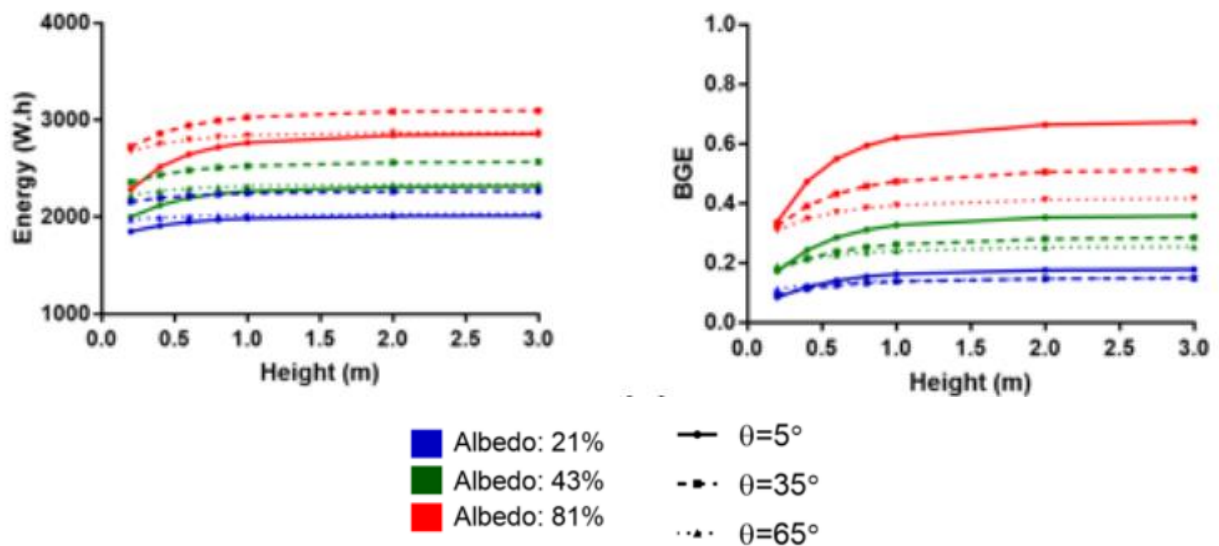


Рисунок 4.23 — Виробіток електроенергії та приріст генерації двосторонніх фотомодулів в залежності від висоти встановлення фотомодулів при різних кутах до горизонту (5° , 35° , 65°) та різних значеннях альбедо 20-го вересня [30]

В той же час, якщо порівнювати аналогічні реальні експерименти, то дані доволі схожі (рис. 4.24) [31]. При висоті встановлення в 64 см та білій фользі в якості відбиваючої поверхні під фотомодулями приріст генерації склав приблизно 13,1 %. Якщо при тій же висоті не використовувати штучну відбиваючу поверхню, а залишити природню поверхню, чим був здебільшого коричневий дах будівлі, то приріст генерації склав близько 5,4 %. Загалом дані результати корелюють з тими, що були отримані з експериментальною установкою.

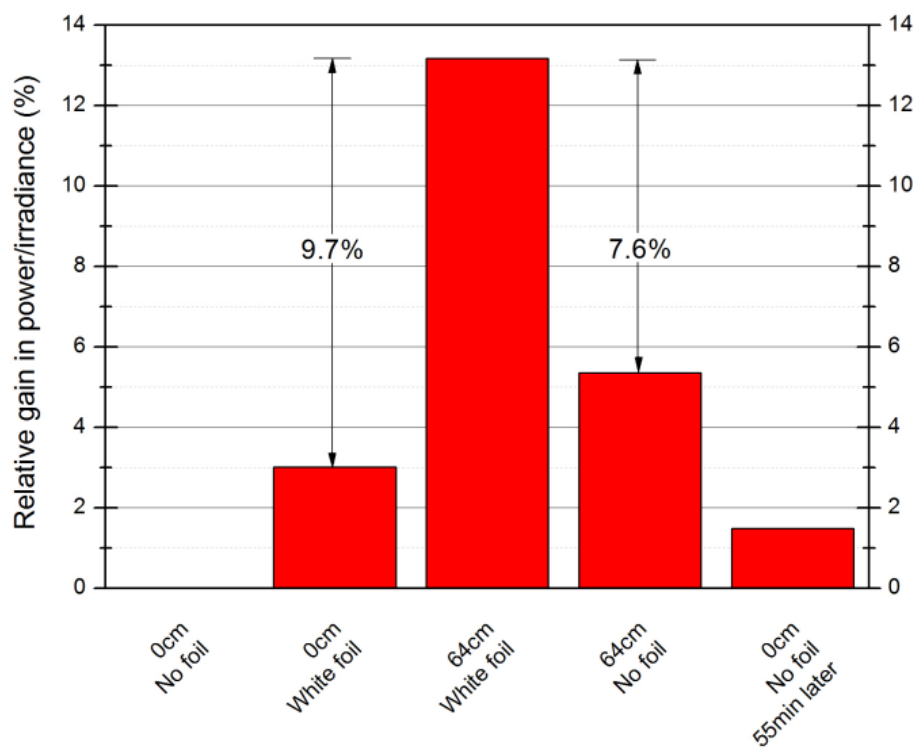


Рисунок 4.24 — Приріст потужності в залежності від висоти встановлення двостороннього фотомодулю та відбиваючої поверхні [31]

РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНИЙ АСПЕКТ ТА ВИГОДА В ПОРІВНЯННІ З ОДНОСТОРОННІМИ; ПЕРСПЕКТИВИ НА МАЙБУТНЄ

Відповідно до результатів, отриманих в попередньому розділі, справедливим буде зазначити, що при наземному розміщенні двосторонніх фотоелектричних панелей, з висотою від землі на рівні 1-2 м, кутом до горизонту 30° (що є цілком звичним кутом для України), відбиваючій поверхні з гарним альбедо, цілком можливо отримати приріст генерації від сонячного масиву на рівні 10–15 %. Оскільки в експериментальній установці використовувався тільки один ряд сонячних панелей, то не було враховано коефіцієнт заповнення (GCR), або ж відстань між рядами фотомодулів. Тому справедливим буде зазначити, що на реальних об'єктах приріст генерації від двосторонніх фотомодулів скоріше складатиме 10–11 % в середньому при факторах, описаних вище.

Середня ціна двосторонніх фотомодулів на 10-20 центів за Вт більше, ніж односторонніх [32]. При цьому можемо орієнтуватися на ціну фотоелектричної станції на односторонніх фотомодулях на рівні 2,85 \$ за 1 Вт, тоді вартість 5 кВт станції становить 14250 \$. Якщо ж використовувати двосторонні фотомодулі, то вартість збільшиться на 500-1000 \$. При цьому варто зазначити, що хоча потужність станцій однакова, однак в ній не врахована тильна поверхня двосторонніх фотомодулів. Якщо взяти цілком реальний приріст генерації на 10 %, то отримаємо, що 5 кВт станція вже може виробляти 5,5 кВт (табл. 5.1). При цьому кінцева ціна системи на двосторонніх фотомодулях з врахуванням тильної сторони вже буде дешевшою і становитиме 2,73 \$ за 1 Вт, якщо вважаємо збільшення ціни на двосторонні фотомодулі на рівні 0,15 \$ за 1 Вт.

Отже, виходить, що рентабельніше обирати двосторонні фотомодулі при заданій ціні та відсотку приросту генерації. Якщо ж розглянути кілька варіантів збільшення цін, від 0,10 до 0,20 \$ за 1 Вт; і кілька варіантів відсотків збільшення генерації, від 5 % і аж до 15 %, то отримаємо показовий графік коли краще обирати односторонні, а коли двосторонні фотомодулі (рис. 5.1).

Таблиця 5.1 — Порівняльна таблиця вартості системи на односторонніх та двосторонніх фотомодулях при збільшені ціни в 0,15 \$ та приросту генерації в 10 %

Загальна потужність сонячних фотомодулів системи, кВт	Вартість системи з використанням односторонніх фотомодулів, \$	Вартість системи з використанням двосторонніх фотомодулів, \$	Збільшення ціни за 1 Вт при використанні двосторонніх фотомодулів, \$	Різниця вартості при використанні двосторонніх фотомодулів*, \$	Приріст потужності за рахунок двосторонніх фотомодулів, %	Загальна потужність сонячних двосторонніх фотомодулів з врахуванням тильної сторони, кВт	Ціна системи за 1 Вт при використанні односторонніх фотомодулів, \$	Кінцева ціна системи за 1 Вт при використанні двосторонніх фотомодулів, \$
5	14250	15000	0,15	750	10	5,5	2,85	2,727
6	17100	18000		900		6,6		
7	19950	21000		1050		7,7		
8	22800	24000		1200		8,8		
9	25650	27000		1350		9,9		
10	28500	30000		1500		11		

* Примітка. Оцінено збільшення ціни на двосторонні фотомодулі на рівні 0,15 \$ за 1 Вт.

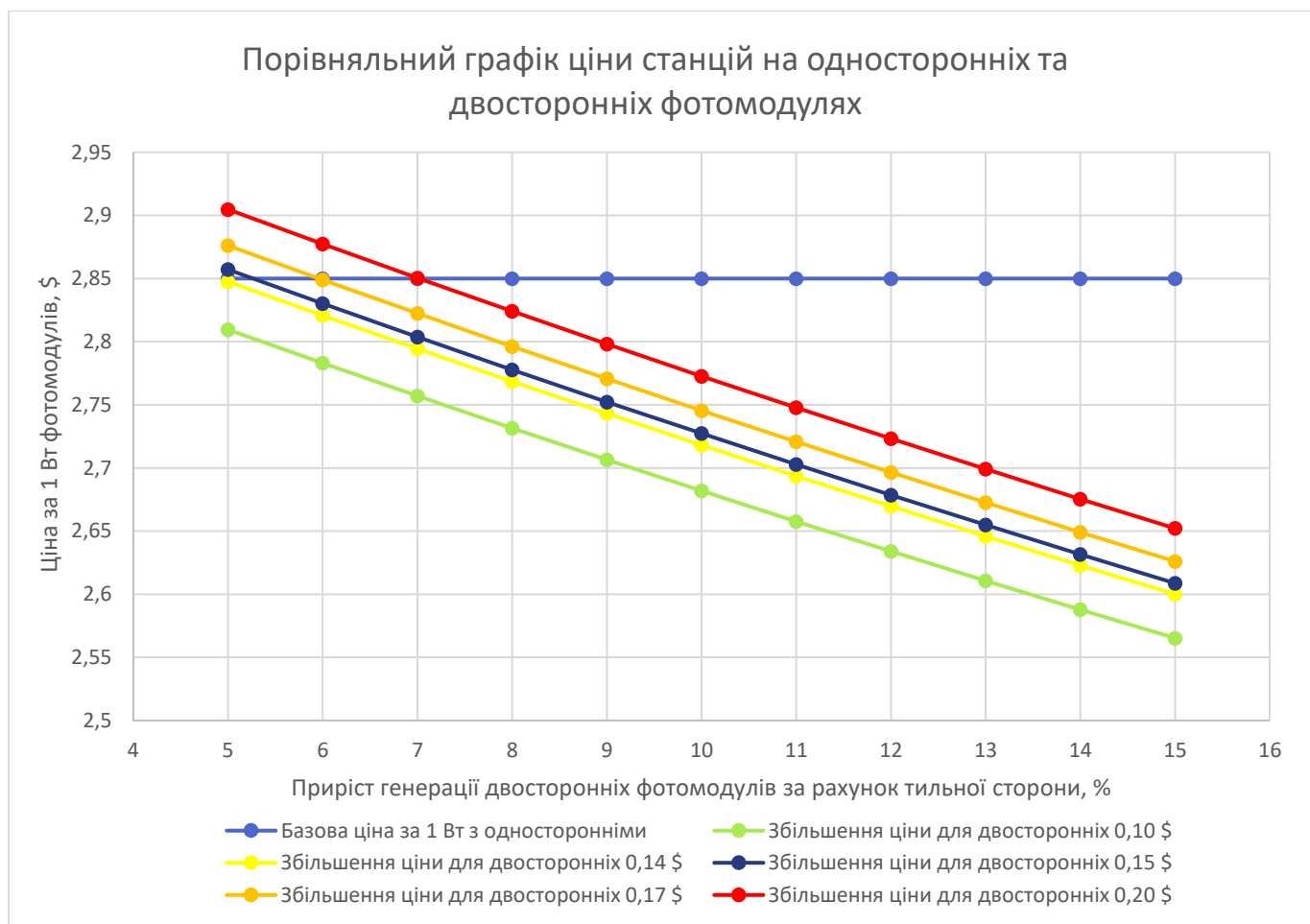


Рисунок 5.1 — Порівняльний графік ціни станцій на односторонніх та двосторонніх фотомодулях (детальніше див. Додаток Ж)

Можемо бачити, що у випадку приросту генерації на рівні навіть 5 % є вигідним встановлення двосторонніх фотомодулів, якщо збільшення їх ціни за 1 Вт менше 0,15 \$. Це є цілком логічним, оскільки при збільшенні ціни за 1 Вт до 0,15 доларів США у відсотковому співвідношенні отримуємо збільшення на 5,26 %, при базовій ціні односторонніх на рівні 2,85 доларів США. Тобто при виборі між двосторонніми та односторонніми фотомодулями потрібно порівнювати на скільки у відсотках можливо збільшити генерацію двосторонніх за рахунок тильної сторони, і на скільки у відсотках двосторонні будуть дорожчі за односторонні. Якщо відсоток приросту генерації більший, ніж відсоток збільшення ціни, то рентабельніше брати двосторонні.

У зв'язку зі всім вище написаним, виявляється цілком очевидно, чому двосторонні фотомодулі встановлюють в більшості випадків або на наземні конструкції, наприклад Domino (рис. 2.2), що використовувалася в експериментальній установці, або для навісів (рис. 1.5), а не на баластні чи дахові системи. Саме при такому розміщенні можливо досягти необхідний відсоток приросту генерації, щоб вибір двосторонніх фотомодулів був економічно рентабельним.

Більш того, майже на всіх наземних конструкціях, при дотриманні базових рекомендацій по встановленню двосторонніх фотомодулів (висота від поверхні встановлення — 1 м) та певних дій для покращення відбиваючої здатності навколишньої поверхні, цілком можливо досягти 5–9 %, а при правильному проектуванні і 10–15 % приросту генерації за рахунок тильної сторони. Оскільки велика кількість промислових фотостанцій монтуються саме на наземних конструкціях, то можна прогнозувати, що в найближчому майбутньому на майже всіх наземних конструкціях будуть монтуватися лише двосторонні фотомодулі.

Цікавим також є момент з коефіцієнтом заповнення (GCR). В роботі не було можливості його дослідити через наявність лише одного ряду фотомодулів, однак якщо вірити залежності (рис. 1.15), то умовне зменшення GCR з 0,5 до 0,4 збільшує приріст генерації двосторонніх фотомодулів на 1 % (від 4 % до 5 %). Зважаючи на дані цифри, можливим є варіант, при якому на промисловій станції, на якій планувалося розміщувати умовно 110 двосторонніх фотомодулів по 10 шт. в 11 рядів, вирішили поставити лише 100 фотомодулів в 10 рядів. При цьому збільшили відстань між рядами фотомодулів, що збільшило генерацію за рахунок тильної сторони, а також зменшило вплив затінення у вранішні та вечірні години в період з жовтня по березень, і тому генерація майже не змінилася, а капіталовкладення зменшилися. Автором даної дисертації це питання вважається цікавим, та для відповіді на яке потрібні подальші дослідження.

Кінцевим результатом повного та вичерпного дослідження ефективності двосторонніх фотомодулів вважається побудова **реального** сімейства графіків залежності приросту генерації за рахунок тильної поверхні від:

- 1) Кута до горизонту;
- 2) Альбедо;
- 3) Висоти встановлення;
- 4) Коефіцієнту заповнення (GCR);
- 5) Азимути;
- 6) Локації на Землі.

До прикладу, що були наведені на рис. 4.23, однак з врахуванням коефіцієнту заповнення та інших факторів.

Що ж до основної частини наявного експерименту, то вбачається кілька факторів, що негативно вплинули на якість отриманих результатів, які, у випадку подальших досліджень, потрібно врахувати:

1. Відбиваючі поверхні займали площу лише під фотомодулями. При цьому, на думку автора, може втрачатися певний відсоток генерації від тильної сторони. При проведенні повторних досліджень рекомендовано відбиваючу поверхню розміщувати як під фотомодулями, так і в радіусі, наприклад 5 м, навколо них.
2. Дані для різних відбиваючих отримувалися в різні пори року. І хоча був контрольний стрінг, який працював як односторонній для порівняння, це все одно не є панацеєю. Різні кути падіння сонячний променів, різна температура та погодні умови безумовно тою чи іншою мірою впливають на отримані дані. Саме тому при проведенні повторних досліджень рекомендовано змонтувати 2 ідентичні системи, запропоновані в даній дисертації (рис. 2.3), на відстані 10-15 м одна від одної в однаковій локації, між якими і робити порівняння ефективності відбиваючих поверхонь. Або ж запропонувати інший метод отримання результатів.

3. Через наявність затінення зранку від будівлі 21-го корпусу, та певного затінення ввечері, не вдалося достовірно оцінити ефективність двосторонніх фотомодулів у ранішні та вечірні години, коли здебільшого наявні косі промені сонця. І хоча вважається, що не зважаючи на миттєвий приріст генерації на рівні 20–50 %, в сумарній продуктивності за цілий день на ці години припадає не більше 10 % всієї генерації, однак для повного аналізу ефективності двосторонніх фотомодулів в порівнянні з односторонніми рекомендовано дослідити дане питання. Через це при проведенні повторних досліджень рекомендовано обрати цілком рівню поверхню без жодних об'єктів, що можуть вплинути на якість отриманих результатів.

Не зважаючи на труднощі під час проведення експериментальної частини, позитивні та негативні фактори, що вплинули на весь експеримент, все одно автором даної дисертації досліди вважають задовільними, оскільки:

- 1) Перевірено на практиці вплив тильної сторони двосторонніх фотомодулів на генерацію сонячного масиву та встановлено реальні показники, яких можливо досягти при цьому, що наведено в табл. 4.2.
- 2) Результати експерименту підтверджуються з схожими результатами досліджень двосторонніх фотомодулів в іноземних джерелах, що каже про їх ґрунтовність та надійність.
- 3) Отримано та вивантажено дані генерації експериментальної установки, до яких можна, у разі потреби, звернутися в майбутньому.
- 4) Сформульовано доцільність обрання двосторонніх фотомодулів для реальних об'єктів, з врахуванням результатів, отриманих під час експерименту, а також підтверджено основні типи кріплень, для який використання двосторонніх фотомодулів є доцільним.
- 5) Розглянуто фактори, що рекомендовано врахувати при повторних дослідженнях для отримання більш повної картини по ефективності генерації двосторонніх фотомодулів.

РОЗДІЛ 6 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

В даній магістерській дисертації основним результатом експериментальних досліджень є отримання реального приросту генерації двосторонніх фотомодулів за рахунок тильної поверхні.

Оскільки система географічно розташовувалася в Києві, то ці дані релевантні тільки для найближчих прилеглих регіонів, а у разі їх використання подалі, наприклад в тій же одеській області, то потрібно зважати на неточність, або ж брати певний коефіцієнт. Тим не менш, в межах України можна вважати, що дані особливо не будуть відрізнятися через зміну широти і місцевості, а більший ефект на приріст генерації будуть мати фактори безпосередньо на об'єкті, такі як:

- 1) Кут до горизонту;
- 2) Альбедо;
- 3) Висота встановлення ФМ;
- 4) Коефіцієнту заповнення (GCR);
- 5) Азимут;

Як вже зазначалося, для досягнення необхідного приросту генерації для двосторонніх фотомодулів, що буде компенсувати їх збільшену вартість в порівнянні з односторонніми, двосторонні фотомодулі необхідно встановлювати у відповідності до рекомендацій. При розгляді найпопулярніших місць встановлення фотомодулів, найкращими є наземні конструкції, наприклад на основі того ж Kripter Domino, або навіси, де висота встановлення фотомодулів суттєво перевищує 2 м.

Розміщення фотомодулів на наземних конструкціях зазвичай притаманне великим промисловим станціям під власне споживання, що у випадку використання двосторонніх фотомодулів дозволяє отримати приріст генерації на рівні 9–10%, що суттєво зменшить термін окупності станції на ті ж 9–10%. Також, це дозволить отримати більше потужності з одиниці площі об'єкту, що позитивно впливає на всю галузь фотоенергетики.

Що ж до побутових споживачів, то здебільшого там переважають дахові системи кріплень, однак все ще зустрічаються наземні. Особливої уваги у випадку приватних будинків заслуговують навіси, наприклад для автомобілів, що дозволяються встановлювати двосторонні фотопанелі на висоті більше 2-ох м, що суттєво впливає на їх приріст генерації.

РОЗДІЛ 7 ОХОРОНА ПРАЦІ

Оскільки експериментальна установка представляла собою набір складного електричного обладнання, то в процесі експлуатації станції, збору даних та підтримання роботи станції автор роботи та колеги, яких надалі будемо називати персоналом, дотримувалися відповідних вимог безпеки.

Персонал станції завчасно був ознайомлений з усім обладнанням, апаратурою та вимірювальними приладами, їх принципом дії, призначенням в схемі і номінальними даними.

Електричну схему збирали тільки при вимкнених вимикачах з боку фотомодулів та АКБ, і всі комутації проводилися при відключеному навантаженні. Зібрану електричну схему перед вмиканням обов'язково перевірили двічі на правильність всіх підключень; мультиметром було перевірено правильну полярність фотомодулів та напруги АКБ. Перед кожним вмикання персонал попереджався про це.

Увімкнення системи проводилося в наступному порядку:

- 1) Увімкнення АКБ
- 2) Увімкнення живлення від фотомодулів та перевірка роботи контролерів заряду, їх індикації
- 3) Увімкнення інвертора, перевірка індикації, перевірка живлення на навантаження зі сторони змінного струму 220 В.

Вимкнення системи проводилося в зворотному порядку.

Будь-які зміни в системі по електричній частині відбувалися тільки при знеструмленні всього обладнання.

Персонал був проінформований про заборону в процесі роботи станції дотиків до оголених кінців проводів, металічних затискачів, шини постійного струму, клем інвертора та контролерів заряду.

При виявленні несправностей в схемі, терміново зупинялася робота станції у відповідному порядку, повідомлялося автору роботи або інженерно-технічному працівнику, що вносили відповідні зміни.

Доступ до аудиторії, в якій знаходилося електротехнічне обладнання, був закритий, а особи, що допускалися до огляду станції, спочатку проходили інструктаж з техніки безпеки та засвоювали правила, що подані вище. Особи, які не пройшли інструктаж з техніки безпеки, до приміщення аудиторії з електротехнічним обладнанням не допускалися.

У разі нещасного випадку персонал був проінформований про необхідність миттєво знеструмити установку, негайно надати першу допомогу потерпілому. У випадку необхідності викликати швидку допомогу за телефоном 103.

У випадку пожежі негайно вимкнути автоматичні вимикачі, тумблери приладів та перемикачі для знеструмлення установки, а в подальшому вжити заходів щодо ліквідації пожежі. При необхідності викликати пожежну команду за телефоном 101.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Розроблено та змонтовано експериментальну установку для збору даних по ефективності генерації двосторонніх фотомодулів в умовах затінення та різної відбиваючої поверхні. Проведено пуско-наладку змонтованої установки та налагодження процес отримання даних.
2. Здійснено низку дослідів при використанні різних типів відбиваючих поверхонь, дані з яких в подальшому використовувалися для побудови порівняльних графіків та знаходження значень приросту генерації за рахунок тильної поверхні двосторонніх фотомодулів. Проаналізовано відповідні графіки; описано фактори, що вплинули на результати експерименту та їх вагомість при оцінці ефективності BG двосторонніх фотомодулів.
3. На основі аналізу експериментальних даних отримано середні значення приросту генерації ($\dots \pm 0,5 \%$) двосторонніх фотомодулів в залежності від типу відбиваючої поверхні в сонячні дні (табл. 4.2):
 - Відсутня (сірі бетонні плити) — 9 %;
 - Темна тканина — 9,5 %;
 - Біло-зелена тканина — 12,5 %;
 - Матове чорне агроволокно — 8 %;
 - Світловідбиваюча біла тканина — 11 %;
 - Свіжий сніг — 16,5 %.
4. Порівняно результати експериментальних даних з тими, що були отримані при схожих дослідженнях в іноземних джерелах. Результати виявилися подібними, що підтверджує їх надійність.
5. Підтверджено, що наземні системи кріплень задовольняють рекомендаціям по встановленню двосторонніх фотомодулів. На основі експериментальних результатів оцінено реальні значення приросту генерації за рахунок тильної сторони двосторонніх фотомодулів, що можливо досягти на об'єктах, на рівні 10–11 %. При цих значеннях, ціні за 1 Вт односторонніх фотомодулів на рівні 2,85 \$

та збільшенні ціни за 1 Вт двосторонніх фотомодулів на рівні 10-20 центів завжди є економічно рентабельним обирати двосторонніх фотомодулів, а ніж односторонні (рис. 5.1).

6. Виокремлено фактори, що вплинули на результати експерименту, та надано рекомендації як їх уникнути у разі повторних дослідженнях. Акцентовано увагу на моментах, що потребують подальших досліджень та отримання вичерпної картини по ефективності генерації двосторонніх фотомодулів. Сформульовано кінцеві цілі для повного дослідження ефективності генерації двосторонніх фотомодулів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

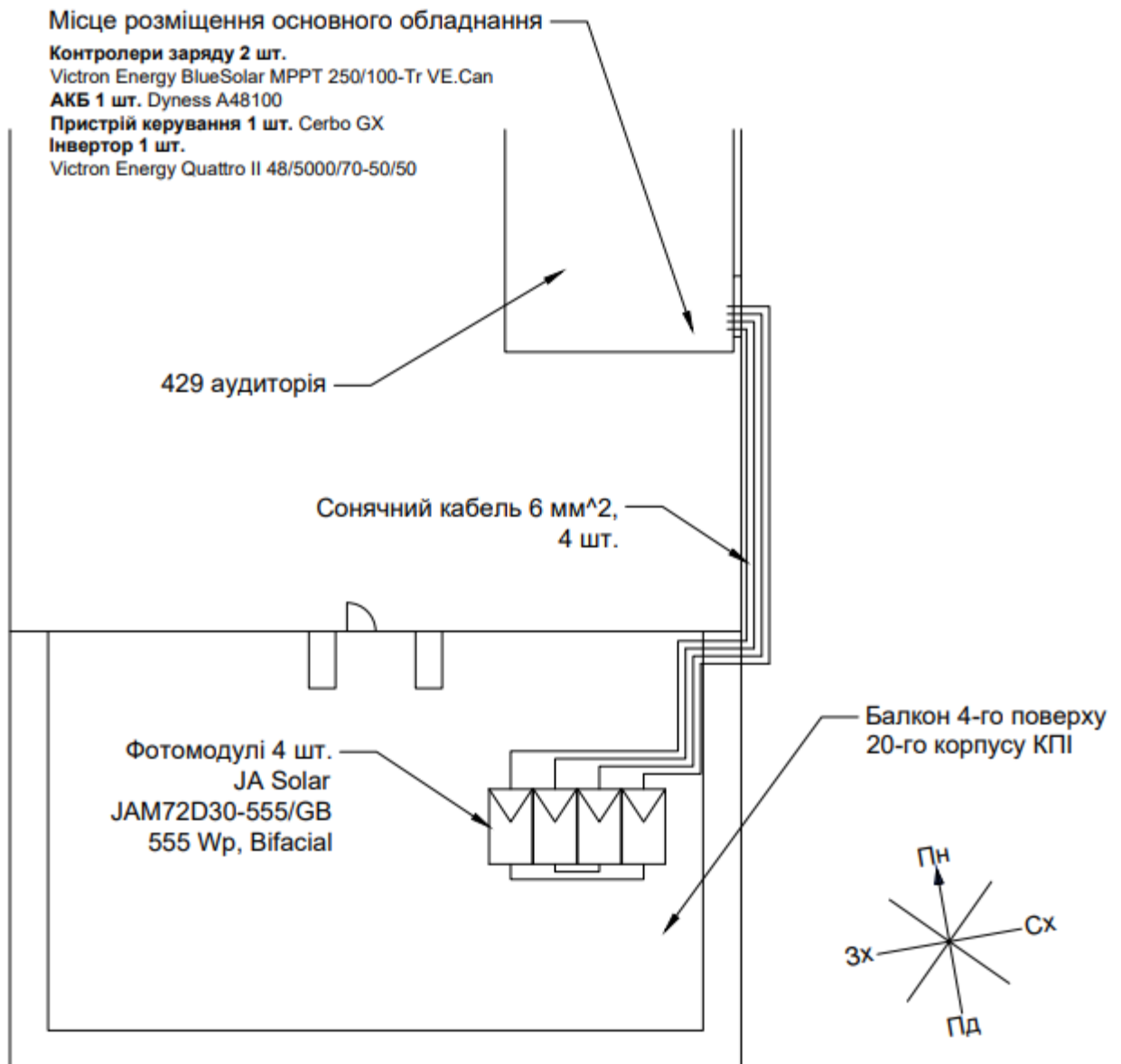
1. Atmosfera. URL: <https://www.atmosfera.ua/>
2. Bifacial modules: a comprehensive guide on financial and technical performance of the next hot thing in solar. URL: <https://ratedpower.com/blog/bifacial-modules/>
3. Our World in Data. Solar (photovoltaic) panel prices. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-prices>
4. What you need to know about PERC solar cells. URL: <https://aurorasolar.com/blog/what-you-need-to-know-about-perc-solar-cells/>
5. Advantages of Half-Cell Solar Modules. URL: <https://lasolarfactory.com/en/blog/advantages-of-half-cell-solar-modules>
6. What are bifacial solar modules? URL: <https://www.solarpowerworldonline.com/2018/04/what-are-bifacial-solar-modules/>
7. Bifacial Solar Panels: Disadvantages and Advantages. URL: [https://www.renogy.com/blog/bifacial-solar-panels-disadvantages-and-advantages/#:~:text=Bifacial %20solar %20cells %20have %20between,such %20as %20sun %20tracking %20systems](https://www.renogy.com/blog/bifacial-solar-panels-disadvantages-and-advantages/#:~:text=Bifacial%20solar%20cells%20have%20between,such%20as%20sun%20tracking%20systems)
8. HOW BIFACIAL SOLAR PANELS WORK AND WHY THEY ARE SO EFFICIENT. URL: <https://www.novergysolar.com/bifacial-solar-panels/>
9. A review of crystalline silicon bifacial photovoltaic performance characterisation and simulation. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/EE/C8EE02184H>
10. Гаєвський О.Ю. «Фотоенергетика. Частина 1. Сонячна радіація і фотоелектричні модулі». Підручник / Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 150 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/58361/1/Fotoenerhetyka_Haievskiyi.pdf
11. Discussing bifacial project economics. URL: <https://www.pv-magazine.com/2020/02/19/discussing-bifacial-project-economics/>
12. Bifacial PV technology: technical considerations. URL: <https://www.dnv.com/article/bifacial-pv-technology-technical-considerations-186095>

13. INCREASING THE EFFICIENCY OF BIFACIAL HALF CELL SOLAR PANELS WITH REFLECTIVE BACKSIDE MATERIALS. URL: <https://as-proceeding.com/index.php/icensos/article/download/525/474>
14. How Efficient Are Bifacial Solar Panels? URL: https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=i6zKw9wbzJc&pp=ygUUYmlmYWNPpYWwgc29sYXIgcGFuZWw%3D&ab_channel=FreedominaCan
15. ZNSHINE PV MODULES INSTALLATIONMANUAL. URL: <https://www.solarrun.com.au/wp-content/uploads/2022/09/znshinesolar.pdf>
16. Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1423188>
17. Solis_Manual_(25-50)K_5G_ENX_V1.5. URL: https://www.solisinverters.com/global/solarinverter8/25_50k_s5_global.html
18. Fronius Eco 27.0-3-S. URL: <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/sonyachna-enerhiya/instalyatory-ta-partnery/tekhnichni-dani/%D0%BD%D1%81%D1%96-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82%D0%B8/%D1%96%D0%BD%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8/fronius-eco/fronius-eco-27-0-3-s>
19. LuxPower SNA5000 WPV User Manual. URL: <https://luxpowertek.com/wp-content/uploads/2022/02/SNA5000WPV-UM-210604.pdf>
20. Victron Energy. URL: <https://www.victronenergy.com/>
21. SmartSolar Charge Controller MPPT 150/35 & 150/45 Datasheet. URL: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-SmartSolar-charge-controller-MPPT-150-35-&-150-45-EN.pdf>
22. VRM – Remote monitoring. URL: <https://www.victronenergy.com/panel-systems-remote-monitoring/vrm>
23. JA Solar JAM72D30-555/GB 555 Wp, Bifacial Datasheet. URL: <https://www.jasolar.com/uploadfile/2022/0923/20220923042520898.pdf>

24. Victron Energy BlueSolar MPPT 250/100-Tr VE.Can. URL: <https://www.victronenergy.com/solar-charge-controllers/bluesolar-mppt-150-35>
25. Dyness A48100. URL: <https://www.dyness.com/products/a48100-1>
26. Cerbo GX. URL: <https://www.victronenergy.com/communication-centres/cerbo-gx>
27. Victron Energy Quattro II 48/5000/70-50/50. URL: <https://www.victronenergy.com/inverters-chargers/quattro-ii>
28. Kripter Domino V2-08. URL: <https://kripter.ua/services/knyzhno-na-2-moduli/>
29. Дані генерації електроенергії кожним стрінгом кожного дня впродовж експерименту; електронна версія.
Diploma_Yurash_Data: https://docs.google.com/spreadsheets/d/1BA3CheIoff_NJ1-6J30F2QEUiQs_U4FlCJ5INhGJY8/edit?usp=sharing
30. Analysis of the Impact of Installation Parameters and System Size on Bifacial Gain and Energy Yield of PV Systems. ULR: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1460255>
31. Bifacial n-Type Solar Modules: Indoor and Outdoor Evaluation. URL: [https://www.researchgate.net/publication/349737454_Bifacial n-Type Solar Modules Indoor and Outdoor Evaluation](https://www.researchgate.net/publication/349737454_Bifacial_n-Type_Solar_Modules_Indoor_and_Outdoor_Evaluation)
32. A Guide to Bifacial Solar Panels (2023). URL: <https://www.marketwatch.com/guides/solar/bifacial-solar-panels/#:~:text=According%20to%20a%202018%20study,to%2020%20cents%20per%20watt.>

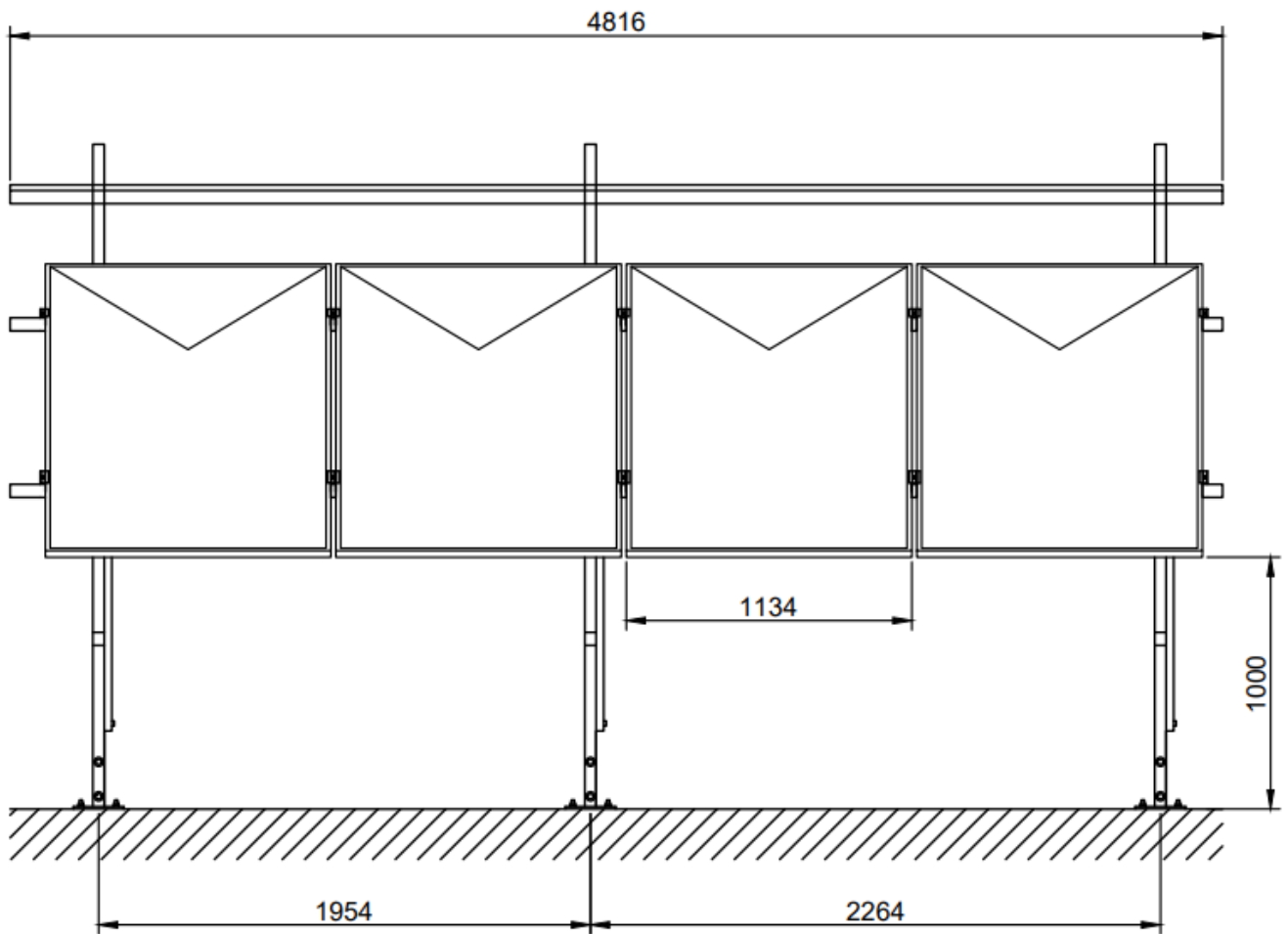
ДОДАТКИ

ДОДАТОК А



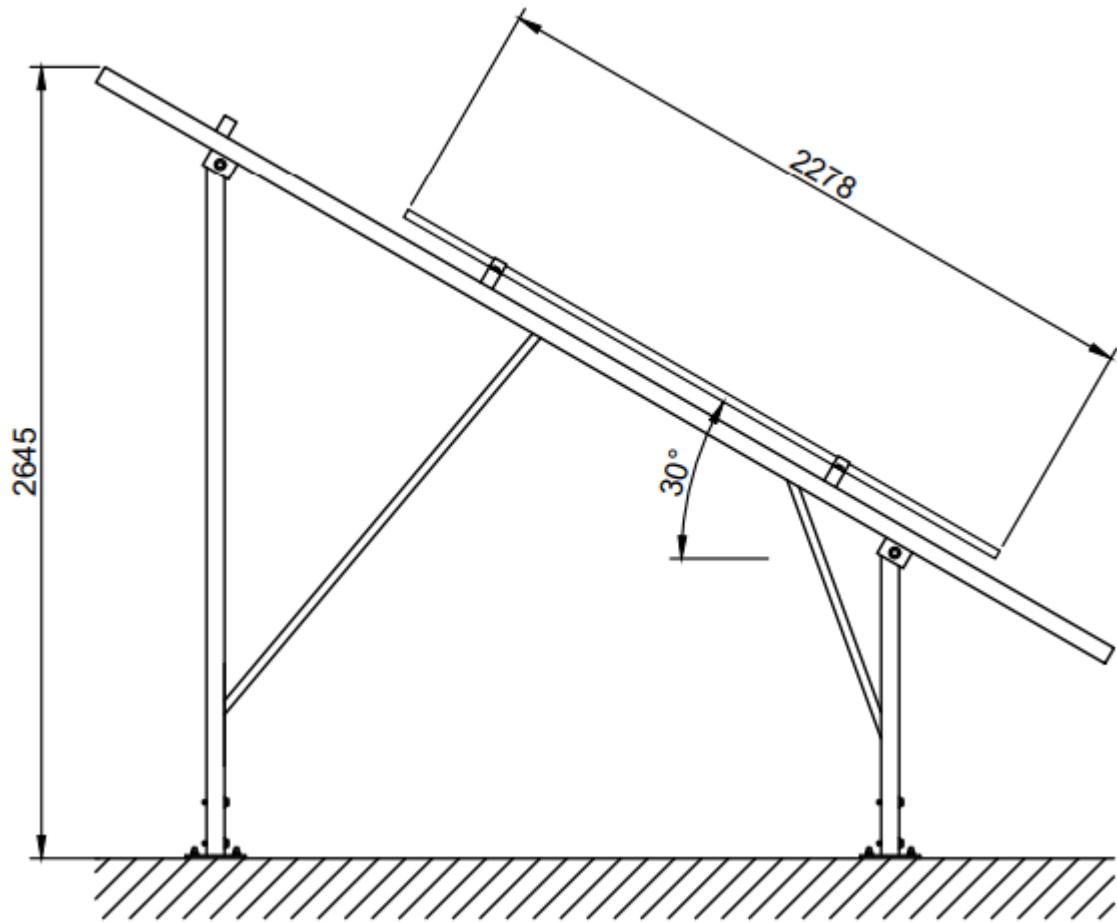
Розміщення фотомодулів на балконі 20-го корпусу КПІ;
загальний вид зверху.

ДОДАТОК Б



Розміщення фотомодулів на балконі 20-го корпусу КПП;
анфас.

ДОДАТОК В



Розміщення фотомодулів на балконі 20-го корпусу КП;
профіль.

ДОДАТОК Г

Дані генерації електроенергії кожним стрінгом кожного дня впродовж експерименту.

День	Дата	Погода	Відбиваюча поверхня	Еталонний стрінг, кВт*год	Тестовий стрінг, кВт*год	Приріст генерації, %	АКБ зарядилися до 100 %?	Примітки
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	19.08.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	5,66	6,18	9,187	ні	
2	20.08.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	5,56	6,04	8,633	ні	
3	21.08.2023	сонячно, дощ, хмарно	відсутня	4,26	4,58	7,512	ні	
4	22.08.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	6,07	6,51	7,249	так	Дані можна брати до 14:00 та після 18:00
5	23.08.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	5,24	5,66	8,015	ні	
6	24.08.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	5,16	5,59	8,333	ні	
7	25.08.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	5,19	5,59	7,707	ні	
8	26.08.2023	хмарно	відсутня	4,59	4,92	7,19	ні	
9	27.08.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	5,42	5,85	7,934	ні	
10	28.08.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	5,29	5,71	7,94	ні	
13	31.08.2023	сонячно, дощ, хмарно	відсутня	4,22	4,55	7,82	ні	
14	01.09.2023	хмарно, дощ	відсутня	4,38	4,76	8,676	ні	
15	02.09.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	4,27	4,66	9,133	ні	
16	03.09.2023	хмарно	відсутня	2,81	3,05	8,541	ні	
17	04.09.2023	хмарно	відсутня	3,75	4,09	9,067	ні	
18	05.09.2023	сонячно	відсутня	6,03	6,66	10,448	так	Дані можна брати до 14:30 та після 18:00
19	06.09.2023	хмарно	відсутня	4,44	4,85	9,234	ні	
20	07.09.2023	сонячно	відсутня	6,14	6,8	10,749	ні	

(2)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
22	09.09.2023	сонячно, місцями хмарно	світловідбиваюча біла тканина	6,16	6,81	10,552	ні	
23	10.09.2023	сонячно	світловідбиваюча біла тканина	6,05	6,71	10,909	ні	
24	11.09.2023	хмарно	світловідбиваюча біла тканина	4,38	4,84	10,502	ні	
25	12.09.2023	сонячно	світловідбиваюча біла тканина	5,65	6,23	10,265	ні	
26	13.09.2023	сонячно, місцями хмарно	світловідбиваюча біла тканина	5,17	5,72	10,638	ні	
27	14.09.2023	хмарно, дощ	світловідбиваюча біла тканина	4,01	4,44	10,723	ні	
28	15.09.2023	дуже хмарно	світловідбиваюча біла тканина	1,51	1,65	9,272	ні	
29	16.09.2023	хмарно	світловідбиваюча біла тканина	2,02	2,2	8,911	ні	
30	17.09.2023	сонячно, місцями хмарно	світловідбиваюча біла тканина	5,35	5,88	9,907	ні	
31	18.09.2023	сонячно, місцями хмарно	світловідбиваюча біла тканина	5,43	6	10,497	ні	
32	19.09.2023	сонячно	світловідбиваюча біла тканина	5,68	6,24	9,859	ні	Був вітер, тому підложку частково унесло
34	21.09.2023	хмарно, дощ	темна/чорна тканина	3,01	3,32	10,299	ні	
35	22.09.2023	хмарно з проясненнями	темна/чорна тканина	4,66	5,13	10,086	ні	
36	23.09.2023	сонячно	темна/чорна тканина	4,77	5,26	10,273	ні	
37	24.09.2023	сонячно	темна/чорна тканина	4,74	5,23	10,338	ні	
38	25.09.2023	сонячно	темна/чорна тканина	4,56	5,04	10,526	ні	
39	26.09.2023	сонячно, місцями хмарно	темна/чорна тканина	4,88	5,36	9,836	ні	
40	27.09.2023	сонячно	темна/чорна тканина	4,97	5,51	10,865	ні	
41	28.09.2023	сонячно	темна/чорна тканина	4,77	5,25	10,063	ні	

(3)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
43	30.09.2023	сонячно, місцями хмарно	біло-зелена тканина	4,39	4,97	13,212	ні	
44	01.10.2023	сонячно, дощ, хмарно	біло-зелена тканина	1,79	1,99	11,173	ні	
45	02.10.2023	сонячно, місцями хмарно	біло-зелена тканина	3,5	3,97	13,429	ні	
46	03.10.2023	сонячно, місцями хмарно	біло-зелена тканина	4,15	4,7	13,253	ні	
47	04.10.2023	хмарно	біло-зелена тканина	1,95	2,18	11,795	ні	
48	05.10.2023	хмарно з проясненнями	біло-зелена тканина	3,26	3,65	11,963	ні	
49	06.10.2023	сонячно, місцями хмарно	біло-зелена тканина	4,94	5,55	12,348	ні	
50	07.10.2023	хмарно, дощ	біло-зелена тканина	0,68	0,73	7,353	ні	
51	08.10.2023	сонячно, місцями хмарно	біло-зелена тканина	3,64	4,09	12,363	ні	Вітер
52	09.10.2023	сонячно, місцями хмарно	біло-зелена тканина	3,99	4,54	13,784	ні	Вітер
54	11.10.2023	сонячно, місцями хмарно	темна/чорна тканина	4,33	4,71	8,776	ні	
55	12.10.2023	сонячно, місцями хмарно	темна/чорна тканина	3,83	4,16	8,616	ні	
56	13.10.2023	сонячно, місцями хмарно	темна/чорна тканина	3,58	3,88	8,38	ні	
57	14.10.2023	сонячно, місцями хмарно	темна/чорна тканина	3,71	4,03	8,625	ні	
58	15.10.2023	хмарно, дощ	темна/чорна тканина	0,45	0,49	8,889	ні	
59	16.10.2023	хмарно з проясненнями	темна/чорна тканина	1,85	1,97	6,486	ні	
60	17.10.2023	сонячно, місцями хмарно	темна/чорна тканина	4,15	4,51	8,675	ні	

(4)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
62	19.10.2023	хмарно	світловідбиваюча біла тканина	3,12	3,48	11,538	ні	
63	20.10.2023	хмарно, дощ	світловідбиваюча біла тканина	0,41	0,44	7,317	ні	
64	21.10.2023	туман, хмарно	світловідбиваюча біла тканина	0,4	0,46	15	ні	
65	22.10.2023	туман, хмарно	світловідбиваюча біла тканина	0,87	0,96	10,345	ні	
66	23.10.2023	хмарно з проясненнями	світловідбиваюча біла тканина	1,6	1,79	11,875	ні	
67	24.10.2023	сонячно, місцями хмарно	світловідбиваюча біла тканина	3,53	3,97	12,465	ні	
68	25.10.2023	хмарно, дощ	світловідбиваюча біла тканина	0,11	0,15	36,364	ні	Дощ цілий день
69	26.10.2023	хмарно, дощ	світловідбиваюча біла тканина	1,43	1,58	10,49	ні	
70	27.10.2023	сонячно, дощ, хмарно	світловідбиваюча біла тканина	3,02	3,4	12,583	ні	
71	28.10.2023	сонячно, дощ, хмарно	світловідбиваюча біла тканина	0,54	0,6	11,111	ні	ВІТЕР!
72	29.10.2023	хмарно з проясненнями	світловідбиваюча біла тканина	1,13	1,27	12,389	ні	
73	30.10.2023	хмарно з проясненнями	світловідбиваюча біла тканина	2,59	2,96	14,286	ні	
74	31.10.2023	сонячно, місцями хмарно	світловідбиваюча біла тканина	3,29	3,73	13,374	ні	
75	01.11.2023	хмарно, дощ	світловідбиваюча біла тканина	0,47	0,54	14,894	ні	
76	02.11.2023	сонячно, місцями хмарно	світловідбиваюча біла тканина	3,09	3,52	13,916	ні	
77	03.11.2023	сонячно	світловідбиваюча біла тканина	3,54	4,11	16,102	ні	
78	04.11.2023	хмарно, дощ	світловідбиваюча біла тканина	0,1	0,12	20	ні	
79	05.11.2023	сонячно, місцями хмарно	світловідбиваюча біла тканина	2,91	3,31	13,746	ні	
80	06.11.2023	сонячно, місцями хмарно	світловідбиваюча біла тканина	2,12	2,39	12,736	ні	

(5)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
82	08.11.2023	хмарно, дощ	відсутня	0,19	0,22	15,789	ні	
83	09.11.2023	хмарно з проясненнями	відсутня	1,19	1,3	9,244	ні	
84	10.11.2023	хмарно з проясненнями	відсутня	2,55	2,93	14,902	ні	
85	11.11.2023	хмарно, дощ	відсутня	0,34	0,37	8,824	ні	
86	12.11.2023	хмарно, дощ	відсутня	0,37	0,4	8,108	ні	
87	13.11.2023	хмарно	відсутня	1,32	1,42	7,576	ні	
88	14.11.2023	хмарно, дощ	відсутня	0,39	0,42	7,692	ні	
89	15.11.2023	хмарно з проясненнями	відсутня	1,93	2,08	7,772	ні	
90	16.11.2023	хмарно, дощ	відсутня	0,18	0,21	16,667	ні	
91	17.11.2023	дуже хмарно	відсутня	0,26	0,28	7,692	ні	
92	18.11.2023	хмарно з проясненнями	відсутня	1,04	1,14	9,615	ні	
93	19.11.2023	хмарно	відсутня	0,6	0,65	8,333	ні	
94	20.11.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	2,34	2,96	26,496	ні	Часткове затінення базового стрінга
95	21.11.2023	хмарно	відсутня	0,67	0,73	8,955	ні	Зранку фотомодулі покриваються льодом
96	22.11.2023	хмарно, сніг	відсутня	0	0,03	—	ні	
97	23.11.2023	хмарно, сніг	відсутня	0,01	0,1	900	ні	
98	24.11.2023	сонячно, дощ, хмарно	відсутня	0,91	1,2	31,868	ні	
99	25.11.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	2,44	2,89	18,443	ні	
100	26.11.2023	хмарно	відсутня	0,28	0,29	3,571	ні	

(6)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
101	27.11.2023	сонячно, сніг, хмарно	відсутня	0,76	1,04	36,842	ні	
102	28.11.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	2,48	3,21	29,435	ні	Сніговий покрив
103	29.11.2023	хмарно, сніг	відсутня	0,19	0,25	31,579	ні	
104	30.11.2023	сонячно, місцями хмарно	відсутня	2,22	2,98	34,234	ні	
105	01.12.2023	хмарно, сніг	відсутня	0,17	0,27	58,824	ні	
106	02.12.2023	хмарно, сніг	відсутня	0,01	0,08	700	ні	
107	03.12.2023	хмарно, сніг	відсутня	0,12	0,2	66,667	ні	
108	04.12.2023	сонячно, сніг, хмарно	відсутня	0,71	1,03	45,07	ні	
109	05.12.2023	хмарно з проясненнями	відсутня	1,08	1,32	22,222	ні	

ДОДАТОК Д

Код для обробки та фільтрації експериментальних даних на прикладі даних за 20-те серпня.

```
# -*- coding: utf-8 -*-

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

def large_numbers_filter(array, peak_factor, close_factor):
    g = 1
    for k in range(g, np.size(array, 0) - g):
        if(np.abs(array[k - g, 0] - array[k, 0]) > close_factor):
            if(np.abs(array[k, 0] - array[k + g, 0]) > close_factor):
                if(np.abs(array[k - g, 0] - array[k + g, 0]) < peak_factor):
                    array[k, 0] = (array[k - g, 0] + array[k + g, 0]) / 2

data_day_time = pd.read_excel('./Diploma_Data_Sunny_Python.xlsx', sheet_name='Clear_P1_20',
skiprows=2, usecols=[0])
xlsx_day_time = np.array(data_day_time)

data_measurements_exp = pd.read_excel('./Diploma_Data_Sunny_Python.xlsx',
sheet_name='Clear_P1_20', skiprows=2, usecols=[37])
xlsx_measurements_exp = np.array(data_measurements_exp)
data_measurements_base = pd.read_excel('./Diploma_Data_Sunny_Python.xlsx',
sheet_name='Clear_P1_20', skiprows=2, usecols=[22])
xlsx_measurements_base = np.array(data_measurements_base)

#Пошук перших і останніх значень. Фільтрація та усереднення даних в змінну 'mean_time' хвилин

#Пошук перших значимих величин генерації
indexOf_start_data = 0

for k in range(0, np.size(xlsx_measurements_exp, 0)):
    if(xlsx_measurements_exp[k, 0] > 0):
        indexOf_start_data = k
        for g in range(k, k + 10):
            if(xlsx_measurements_exp[g, 0] == 0):
                indexOf_start_data = g
        break

#Пошук останніх значимих величин генерації
indexOf_end_data = 0

for k in range(0, np.size(xlsx_measurements_exp, 0)):
```

```

        if(xlsx_measurements_exp[np.size(xlsx_measurements_exp, 0) - 1 - k, 0] > 0):
            indexOf_end_data = np.size(xlsx_measurements_exp, 0) - 1 - k
            for g in range(k, k + 10):
                if(xlsx_measurements_exp[np.size(xlsx_measurements_exp, 0) - 1 - g, 0] == 0):
                    indexOf_end_data = np.size(xlsx_measurements_exp, 0) - 1 - g
            break

#Запис в окремий масив середнє значення за 'mean_time' хвилин
mean_time = 3
new_size_arrays = (indexOf_end_data - indexOf_start_data) // mean_time
day_time_raw = np.empty((new_size_arrays, np.size(xlsx_day_time, 1)), dtype=object)
measurements_exp = np.zeros((new_size_arrays, np.size(xlsx_measurements_exp, 1)))
measurements_base = np.zeros((new_size_arrays, np.size(xlsx_measurements_base, 1)))

for k in range(0, (np.size(measurements_exp, 0))):
    sum_local_measurements_exp = 0
    sum_local_measurements_base = 0

    for j in range(0, mean_time):
        sum_local_measurements_exp = sum_local_measurements_exp +
xlsx_measurements_exp[indexOf_start_data + k * mean_time + j, 0]
        sum_local_measurements_base = sum_local_measurements_base +
xlsx_measurements_base[indexOf_start_data + k * mean_time + j, 0]

        measurements_exp[k, 0] = sum_local_measurements_exp / mean_time
        measurements_base[k, 0] = sum_local_measurements_base / mean_time
        day_time_raw[k, 0] = str(xlsx_day_time[indexOf_start_data + k * mean_time + (mean_time //
2) + 1, 0])

#Розрахунок відношення стрінгів

ratio_raw = np.zeros((np.size(measurements_exp, 0), 1))

for k in range(0, np.size(ratio_raw, 0)):
    if(measurements_base[k, 0] == 0):
        ratio_raw[k, 0] = 0
    else:
        ratio_raw[k, 0] = ((measurements_exp[k, 0] - measurements_base[k, 0]) /
measurements_base[k, 0]) * 100

#Чистка від "-" значень на початку та в кінці
for k in range(0, np.size(ratio_raw, 0)):
    if(ratio_raw[k, 0] > 0):
        break
    else:
        ratio_raw[k, 0] = 0

for k in range(0, np.size(ratio_raw, 0)):
    if(ratio_raw[np.size(ratio_raw, 0) - k - 1, 0] > 0):
        break
    else:
        ratio_raw[np.size(ratio_raw, 0) - k - 1, 0] = 0

```

```

#Чистка від занадто великих значень генерації на початку та в кінці
upper_limit = 50
number_range = 60 // mean_time

for k in range (0, np.size(ratio_raw, 0)):
    if(ratio_raw[k, 0] > upper_limit):
        for j in range (k, k + number_range):
            if(ratio_raw[j, 0] > upper_limit):
                ratio_raw[j, 0] = upper_limit
            break

for k in range (0, np.size(ratio_raw, 0)):
    if(ratio_raw[np.size(ratio_raw, 0) - k - 1, 0] > upper_limit):
        for j in range (k, k + number_range):
            if(ratio_raw[np.size(ratio_raw, 0) - j - 1, 0] > upper_limit):
                ratio_raw[np.size(ratio_raw, 0) - j - 1, 0] = upper_limit
            break

#Чистка від мінусових значень
for k in range (1, np.size(ratio_raw, 0) - 1):
    if(ratio_raw[k, 0] < 0):
        ratio_raw[k, 0] = (ratio_raw[k - 1, 0] + ratio_raw[k + 1, 0]) / 2

#Чистка від нулів на початку
indexOf_start_ratio_raw = 0

for k in range (0, np.size(ratio_raw, 0)):
    if(ratio_raw[k, 0] > 0):
        indexOf_start_ratio_raw = k
        for g in range (k, k + 10):
            if(ratio_raw[g, 0] == 0):
                indexOf_start_ratio_raw = g
            break

#Чистка від нулів в кінці
indexOf_end_ratio_raw = 0

for k in range (0, np.size(xlsx_measurements_exp, 0)):
    if(ratio_raw[np.size(ratio_raw, 0) - 1 - k, 0] > 0):
        indexOf_end_ratio_raw = np.size(ratio_raw, 0) - 1 - k
        for g in range (k, k + 10):
            if(ratio_raw[np.size(ratio_raw, 0) - 1 - g, 0] == 0):
                indexOf_end_ratio_raw = np.size(ratio_raw, 0) - 1 - g
            break

ratio_trim = ratio_raw[indexOf_start_ratio_raw:indexOf_end_ratio_raw]
day_time = day_time_raw[indexOf_start_ratio_raw:indexOf_end_ratio_raw]
measurements_exp_trim = measurements_exp[indexOf_start_ratio_raw:indexOf_end_ratio_raw]
measurements_base_trim = measurements_base[indexOf_start_ratio_raw:indexOf_end_ratio_raw]

ratio_before_filtering = np.copy(ratio_trim)

```

```

#Чистка від великих збурень
large_numbers_filter(ratio_trim, 20, 5)
large_numbers_filter(ratio_trim, 20, 3)
large_numbers_filter(ratio_trim, 40, 2)

#Фільтр адаптивне рухоме середнє
adaptive_koef = [0.2, 0.5]
power_factor = 10
ratio_filtered = np.zeros((np.size(ratio_trim, 0), 1))
ratio_filtered[0, 0] = ratio_trim[0, 0]

for k in range (1, np.size(ratio_trim, 0)):
    g = adaptive_koef[0]
    if(np.abs(ratio_trim[k, 0] - ratio_filtered[k - 1, 0]) > power_factor):
        g = adaptive_koef[1]

    ratio_filtered[k, 0] = ratio_filtered[k - 1, 0] + (ratio_trim[k, 0] - ratio_filtered[k - 1, 0]) * g

ratio = ratio_filtered

#Чистка від секунд в часі

for k in range (0, np.size(day_time, 0)):
    day_time[k, 0] = day_time[k, 0][0:16]
    day_time[k, 0] = np.char.replace(np.str_(day_time[k, 0]), 'T', ' ')
    day_time[k, 0] = np.char.replace(np.str_(day_time[k, 0]), '-', '.')

print(ratio)

all_data = np.empty((np.size(day_time, 0), 6), dtype=object)
all_data[:, 0] = day_time[:, 0]
all_data[:, 1] = ratio_before_filtering[:, 0]
all_data[:, 2] = ratio_trim[:, 0]
all_data[:, 3] = ratio[:, 0]
all_data[:, 4] = measurements_exp_trim[:, 0]
all_data[:, 5] = measurements_base_trim[:, 0]

print(all_data)

data_out = pd.DataFrame(data=all_data, columns=['Time_filtered', 'Measurements',
'Started_filters',
'Measurements_filtered', 'Experiment_String',
'Base_String'])

```

```

print(data_out)

with pd.ExcelWriter('Diploma_Data_Sunny_Python_Filtered.xlsx',
    date_format='YYYY-MM-DD',
    datetime_format='YYYY-MM-DD HH:MM',
    mode='a',
    engine='openpyxl',
    if_sheet_exists='replace'
) as writer:
    data_out.to_excel(writer, sheet_name='Clear_P1_20_Filtered')

```

```

plt.figure(1, figsize=(8, 5))
plt.title("Filtered")
plt.plot(range(len(ratio_before_filtering)), ratio_before_filtering, 'k--', linewidth=0.5,
    label='Measurements')
plt.plot(range(len(ratio_trim)), ratio_trim, 'b-.', linewidth=0.75, label='Started_filters')
plt.plot(range(len(ratio)), ratio, 'g', linewidth=2, label='Measurements_filtered')
plt.legend()

```

```

plt.show()

```

ДОДАТОК Е

Отримані графіки приросту генерації обраних днів експерименту



Рисунок Е.1 — Відфільтрований графік генерації за 20-те серпня; форматована вісь.

Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня відсутня.



Рисунок Е.2 — Відфільтрований графік генерації за 24-те серпня; форматована вісь.

Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня відсутня.

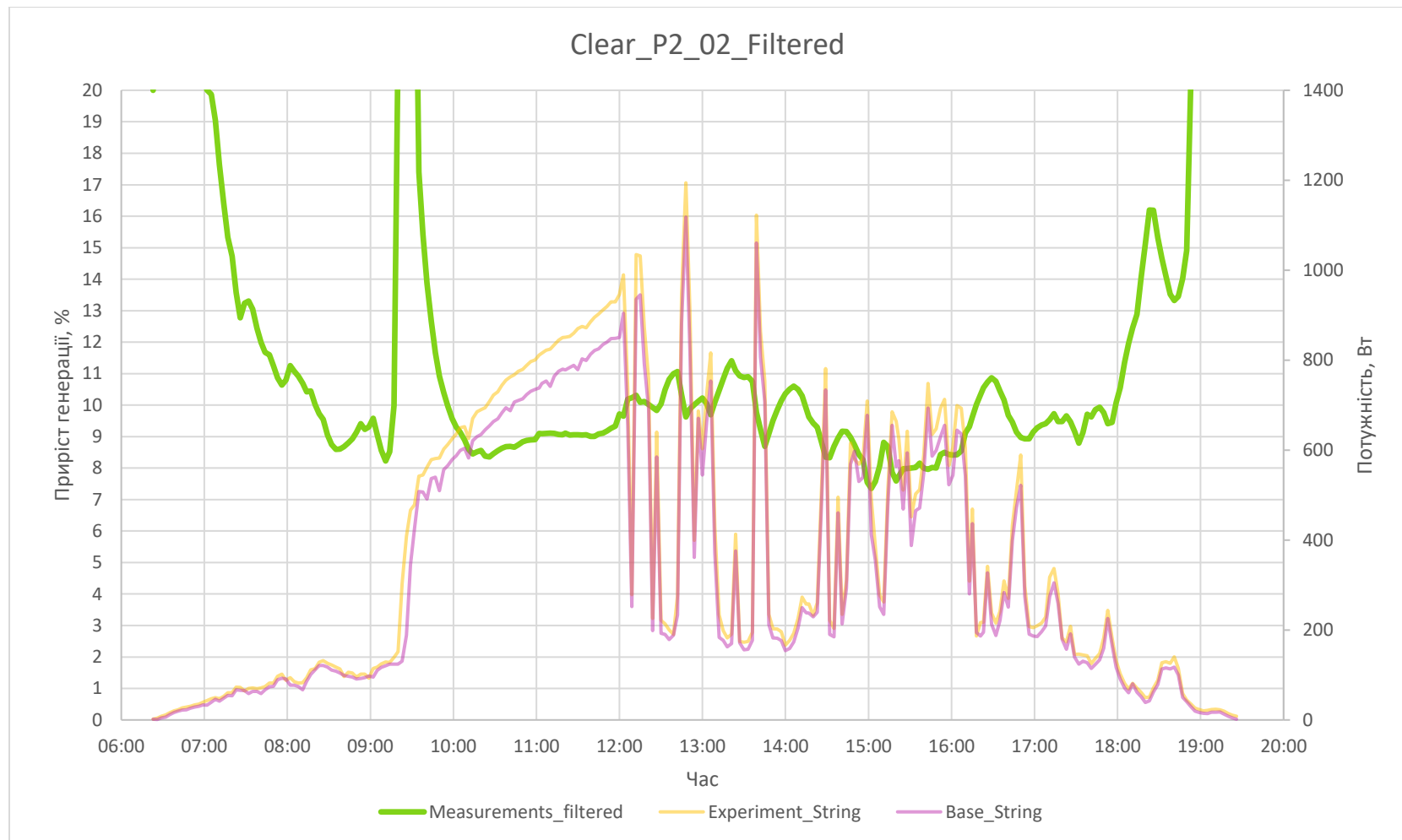


Рисунок Е.3 — Відфільтрований графік генерації за 2-ге вересня; форматована вісь.

Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня відсутня.

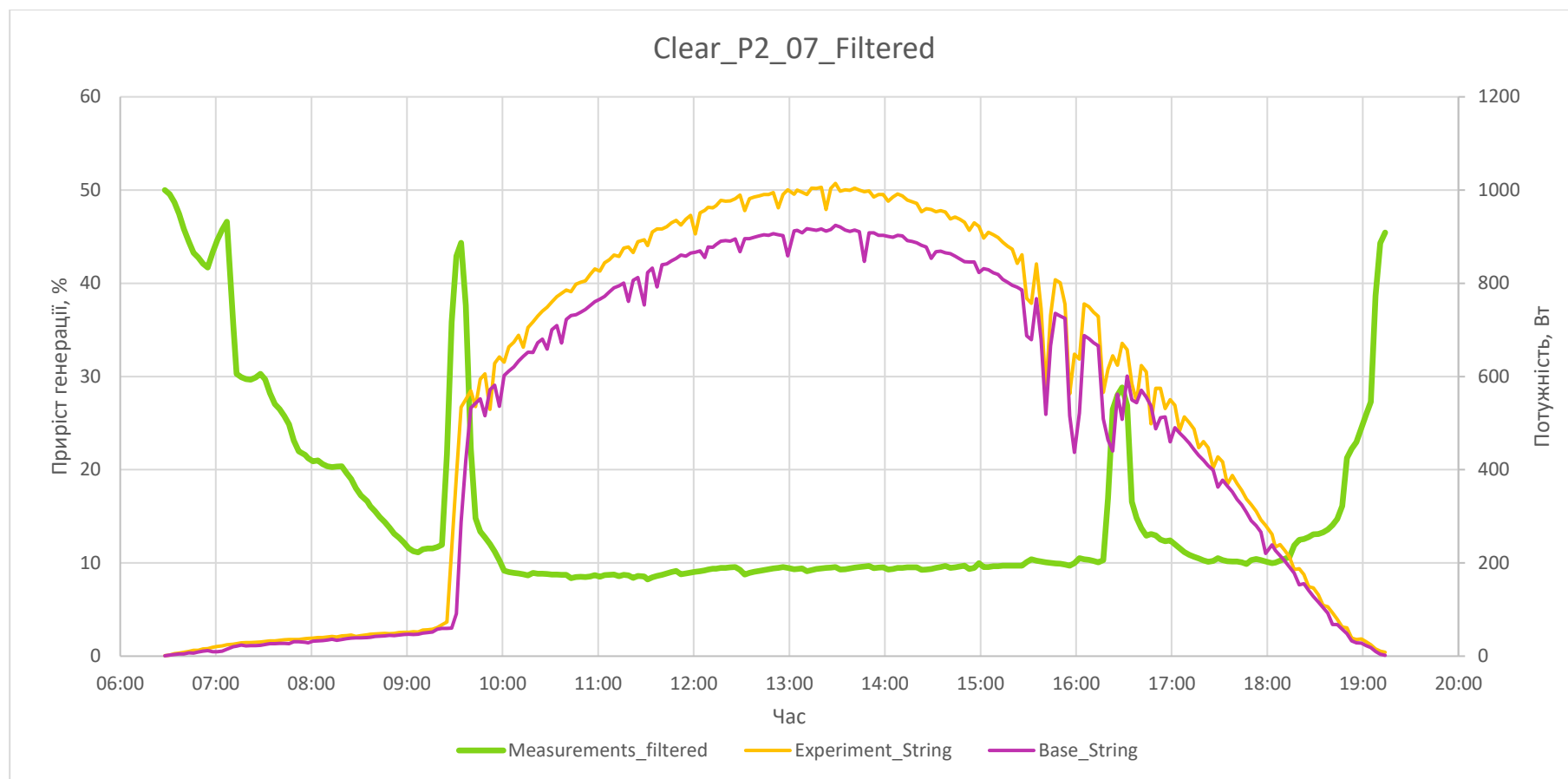


Рисунок Е.4 — Відфільтрований графік генерації за 7-ме вересня.

Погода: сонячно. Відбиваюча поверхня відсутня.



Рисунок Е.5 — Відфільтрований графік генерації за 7-ме вересня; форматована вісь.

Погода: сонячно. Відбиваюча поверхня відсутня.

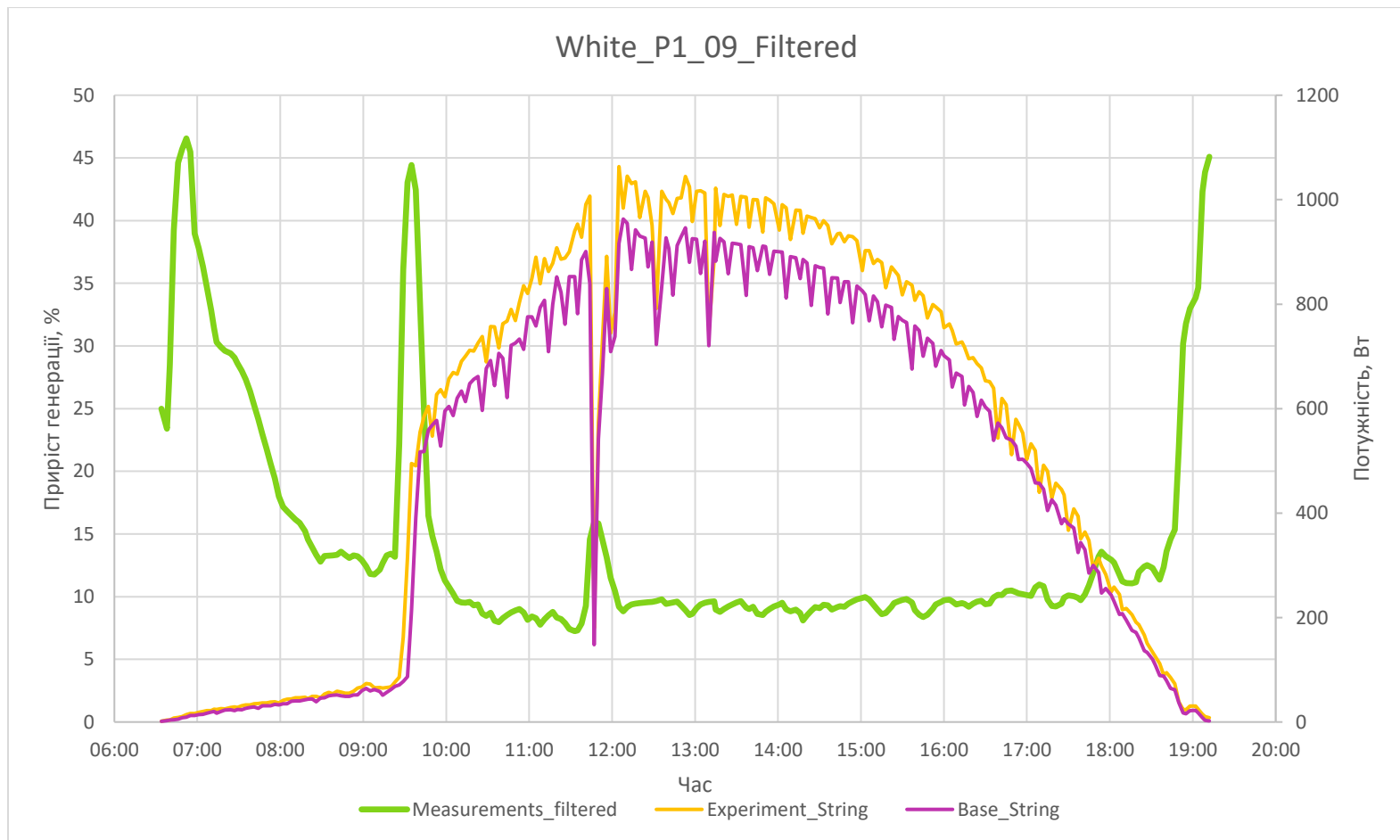


Рисунок Е.6 — Відфільтрований графік генерації за 9-те вересня.

Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня: світловідбиваюча біла тканина.



Рисунок Е.7 — Відфільтрований графік генерації за 9-те вересня; форматована вісь.
Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня: світловідбиваюча біла тканина.

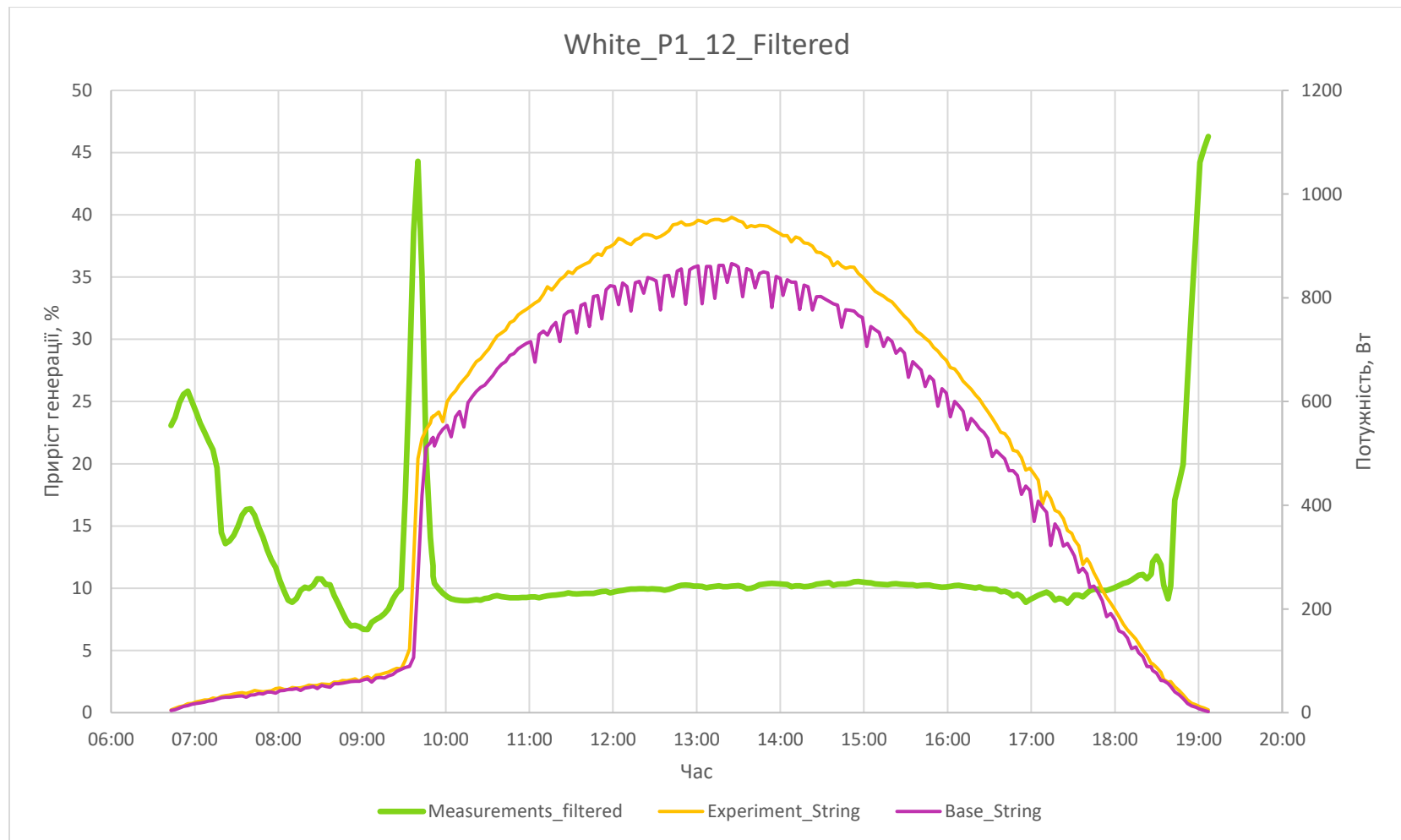


Рисунок Е.8 — Відфільтрований графік генерації за 12-те вересня.
Погода: сонячно. Відбиваюча поверхня: світловідбиваюча біла тканина.

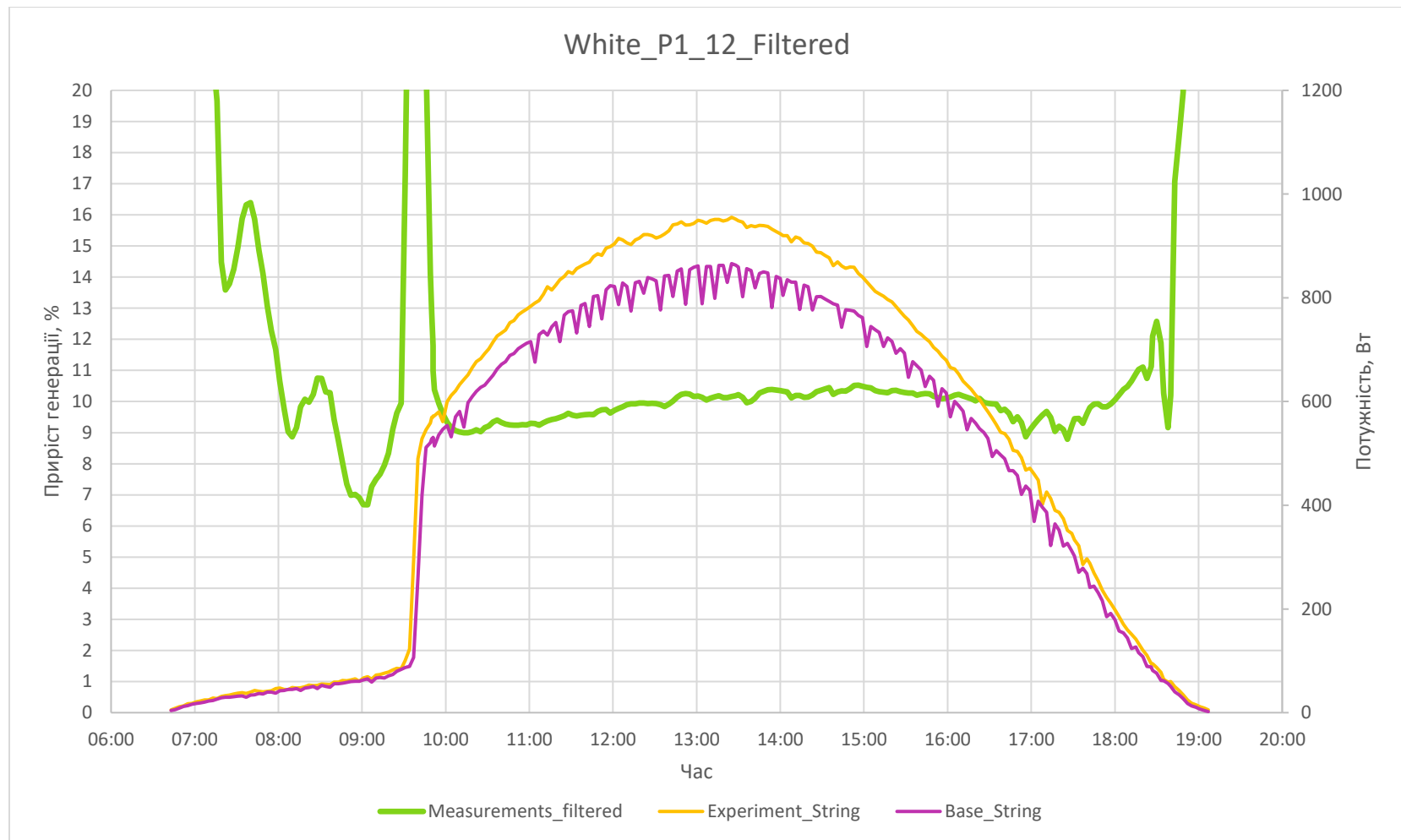


Рисунок Е.9 — Відфільтрований графік генерації за 12-те вересня; форматована вісь.

Погода: сонячно. Відбиваюча поверхня: світловідбиваюча біла тканина.

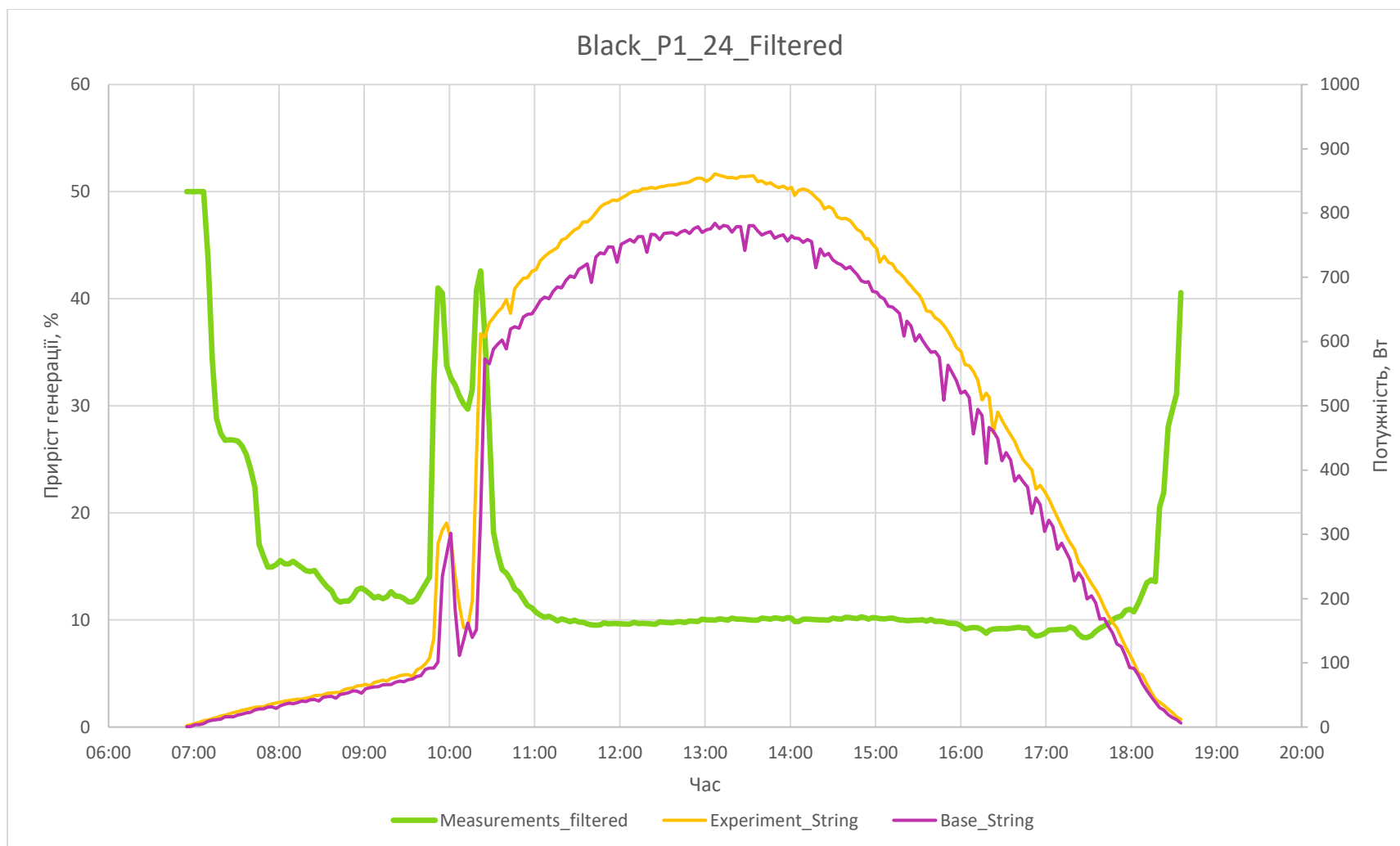


Рисунок Е.10 — Відфільтрований графік генерації за 24-те вересня.

Погода: сонячно. Відбиваюча поверхня: темна тканина.

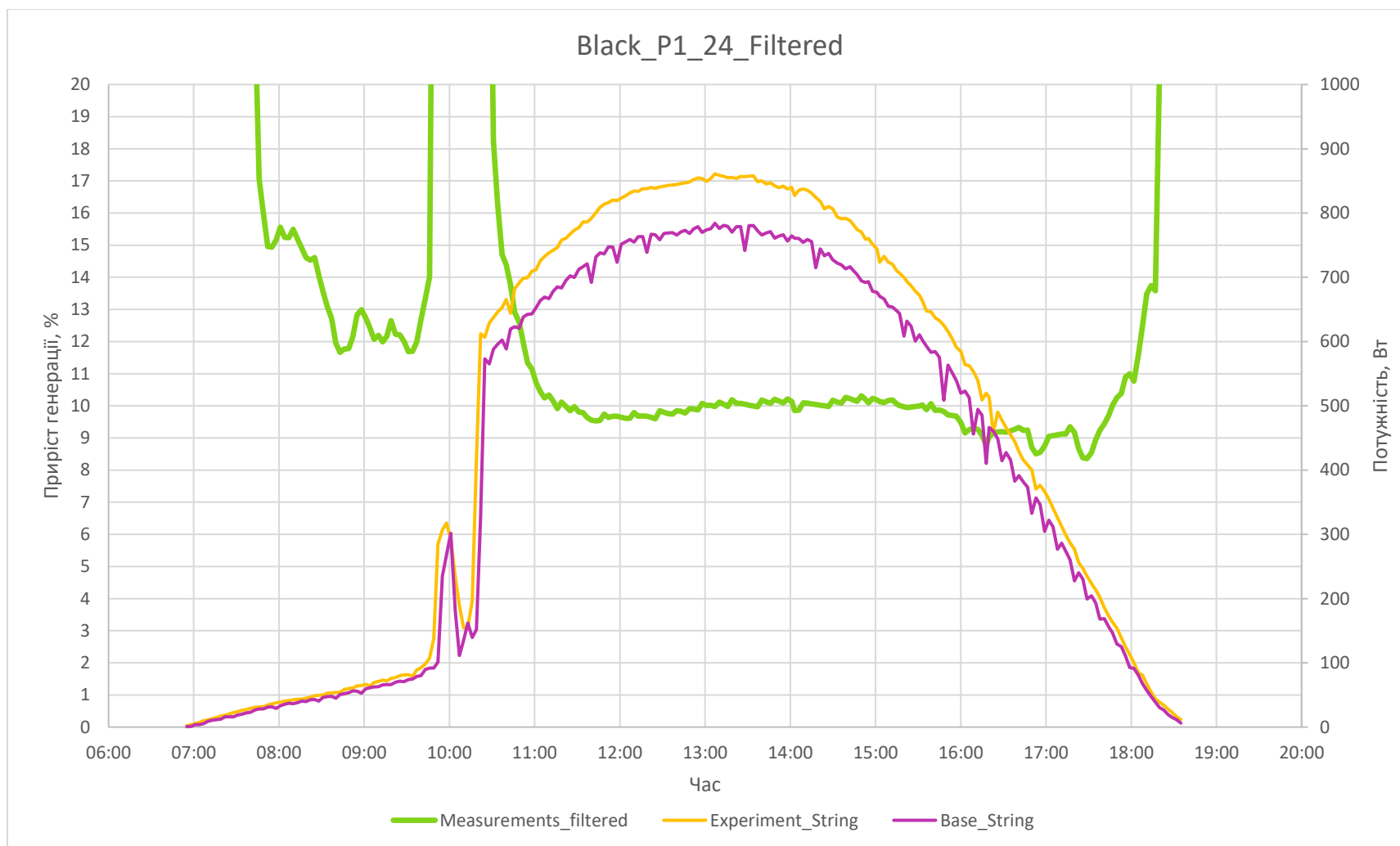


Рисунок Е.11 — Відфільтрований графік генерації за 24-те вересня; форматована вісь.

Погода: сонячно. Відбиваюча поверхня: темна тканина.

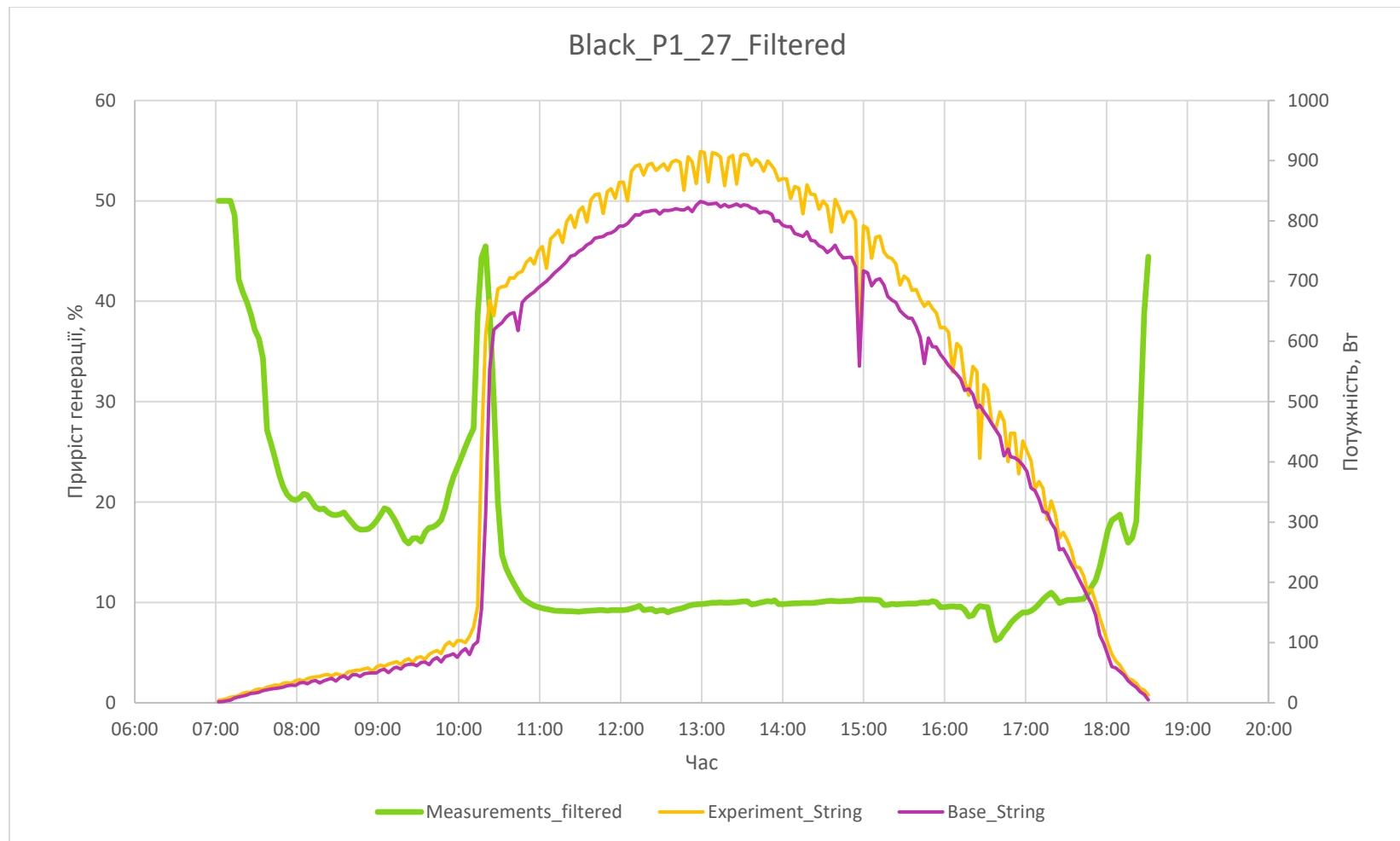


Рисунок Е.12 — Відфільтрований графік генерації за 27-те вересня.

Погода: сонячно. Відбиваюча поверхня: темна тканина.

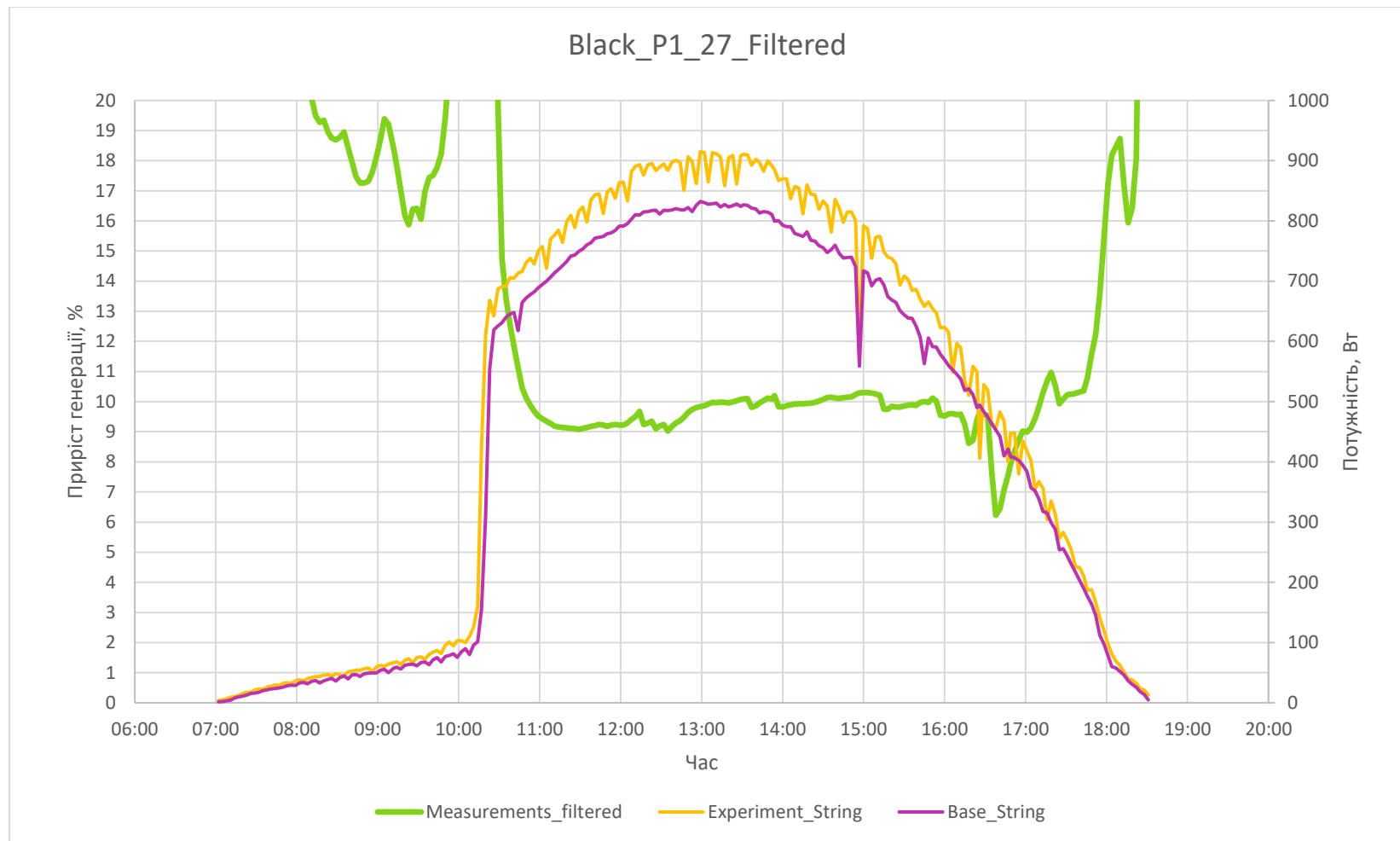


Рисунок Е.13 — Відфільтрований графік генерації за 27-те вересня; форматована вісь.

Погода: сонячно. Відбиваюча поверхня: темна тканина.

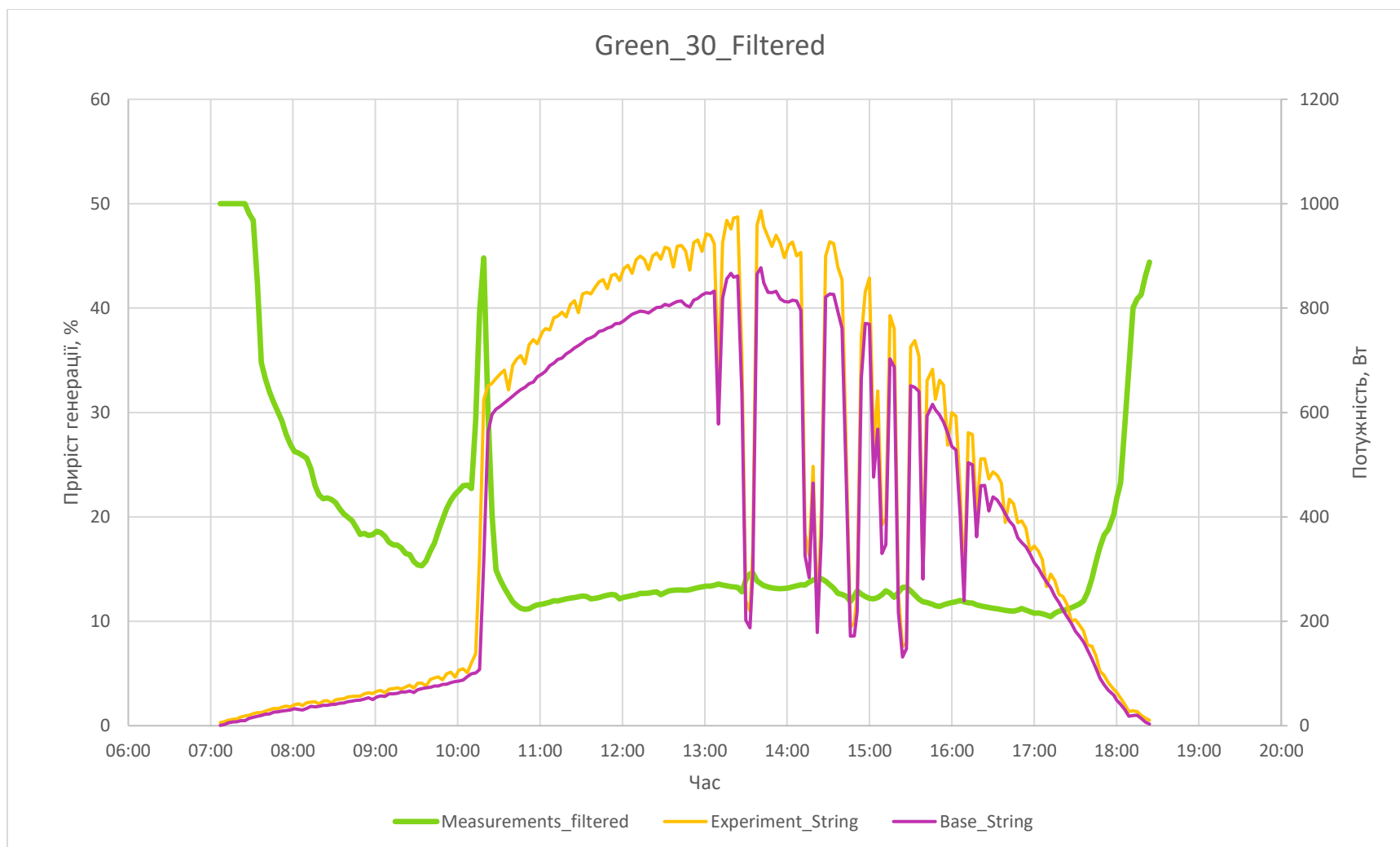


Рисунок Е.14 — Відфільтрований графік генерації за 30-те вересня.

Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня: біло-зелена тканина.

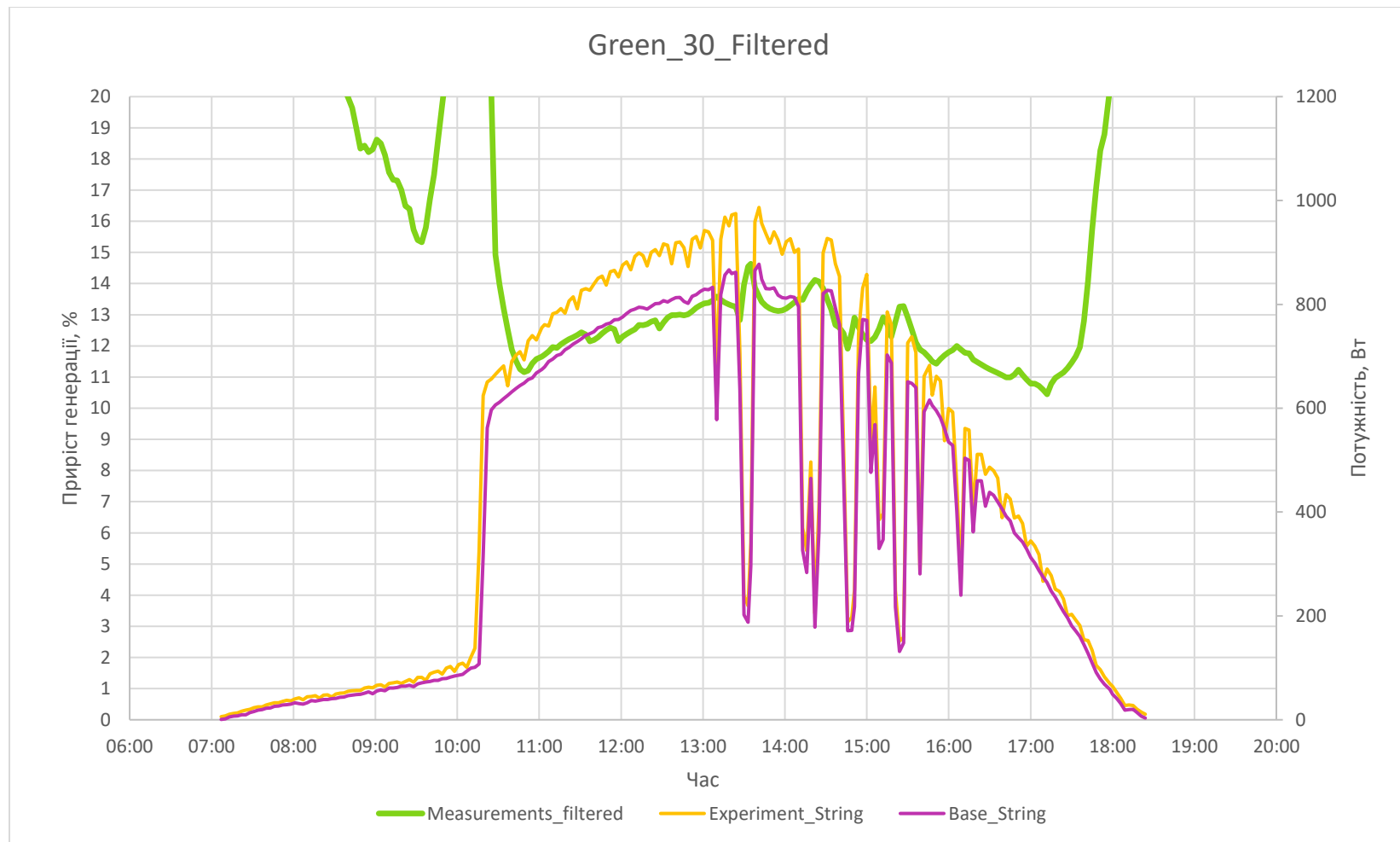


Рисунок Е.15 — Відфільтрований графік генерації за 30-те вересня; форматована вісь.

Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня: біло-зелена тканина.

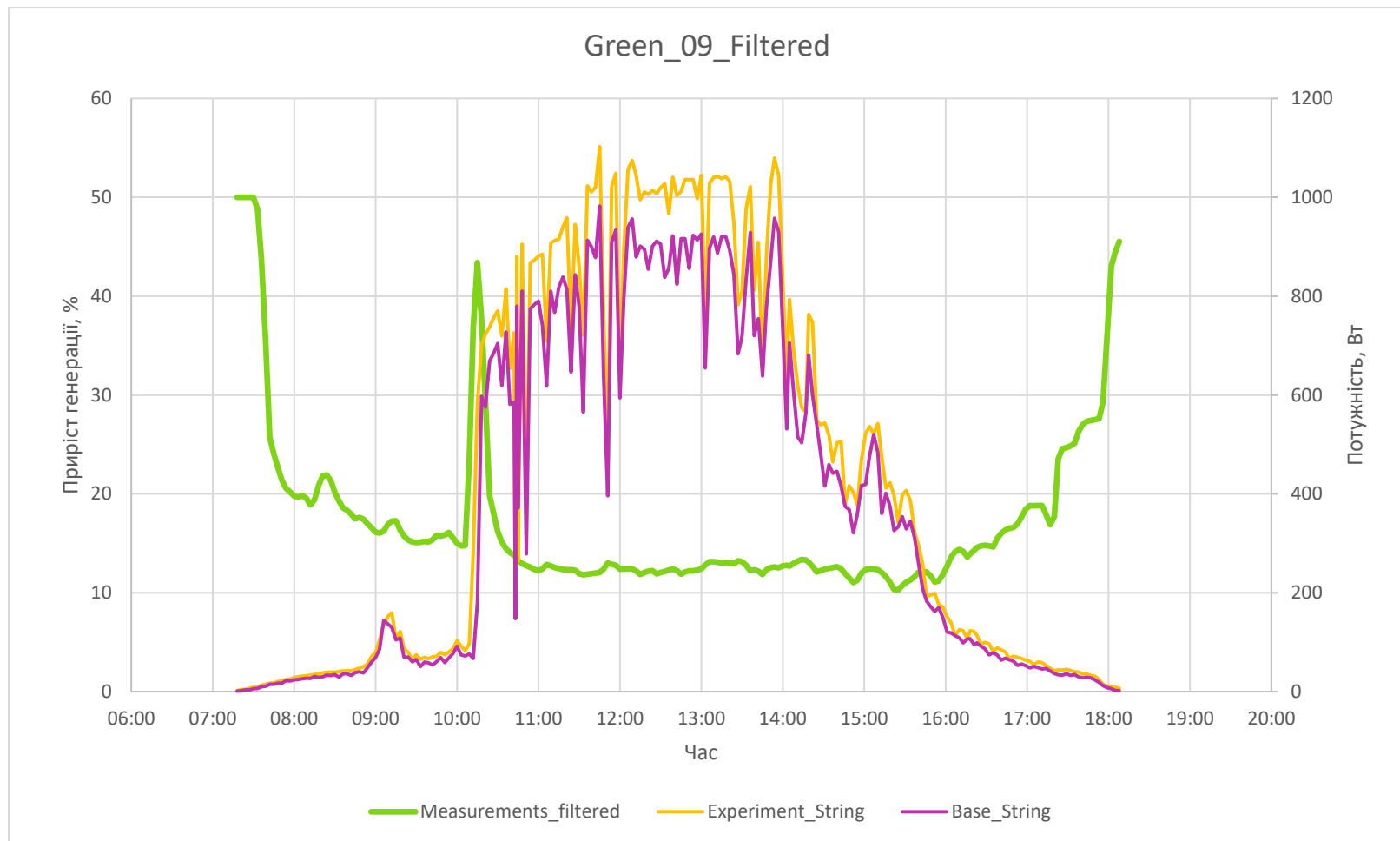


Рисунок Е.16 — Відфільтрований графік генерації за 9-те жовтня.

Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня: біло-зелена тканина.

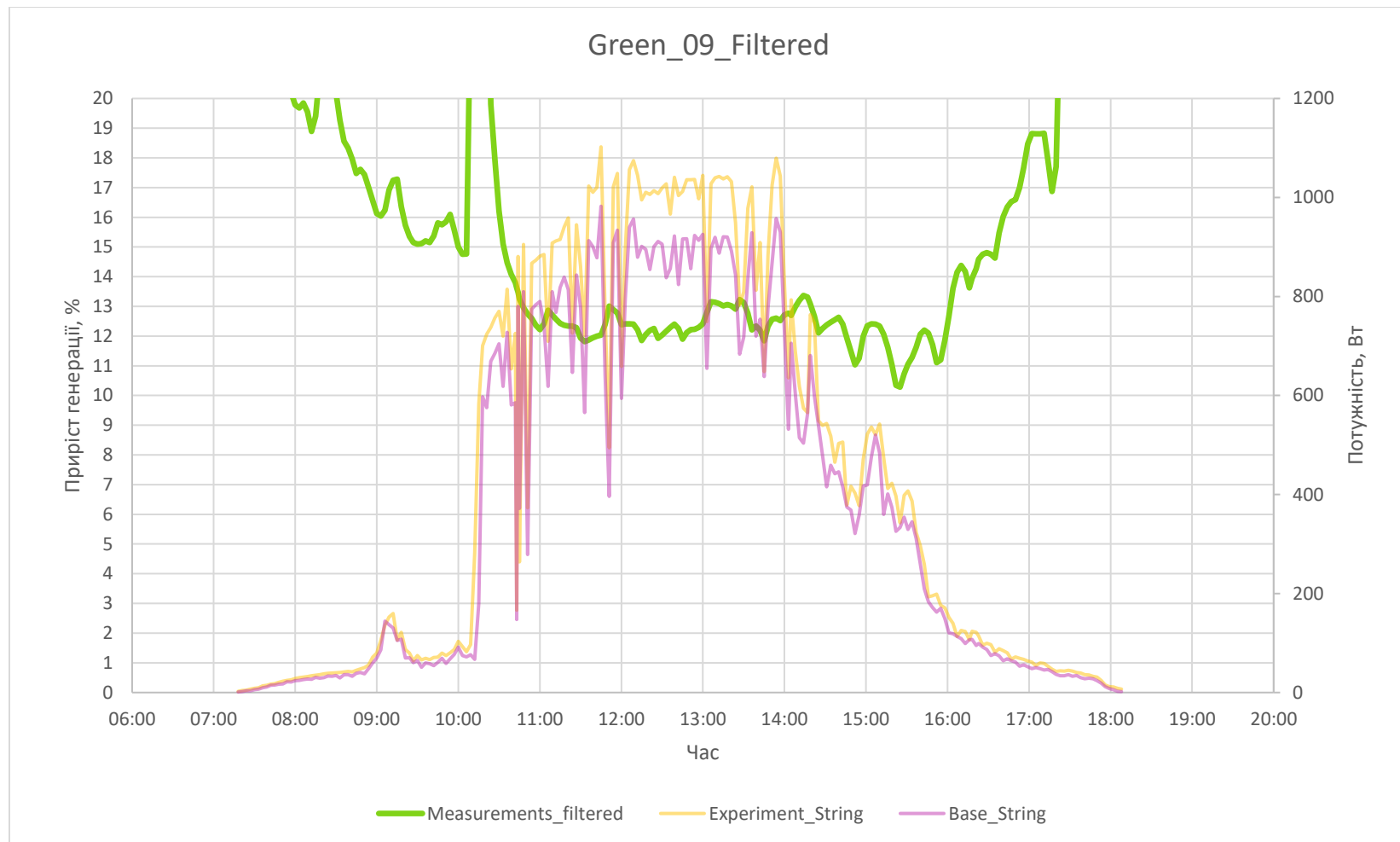


Рисунок Е.17 — Відфільтрований графік генерації за 9-те жовтня; форматована вісь.

Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня: біло-зелена тканина.

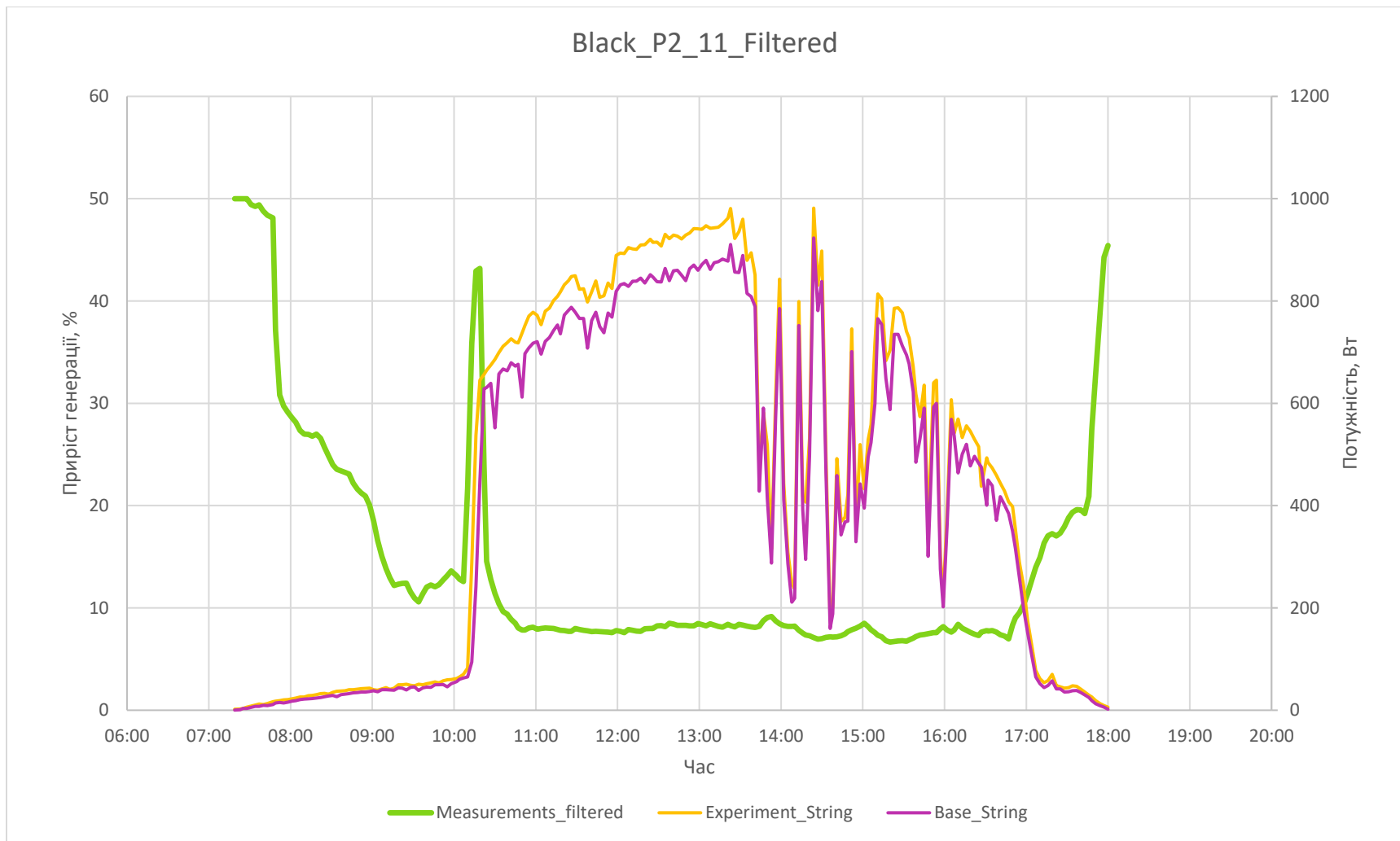


Рисунок Е.18 — Відфільтрований графік генерації за 11-те жовтня.
Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня: агроволокно.

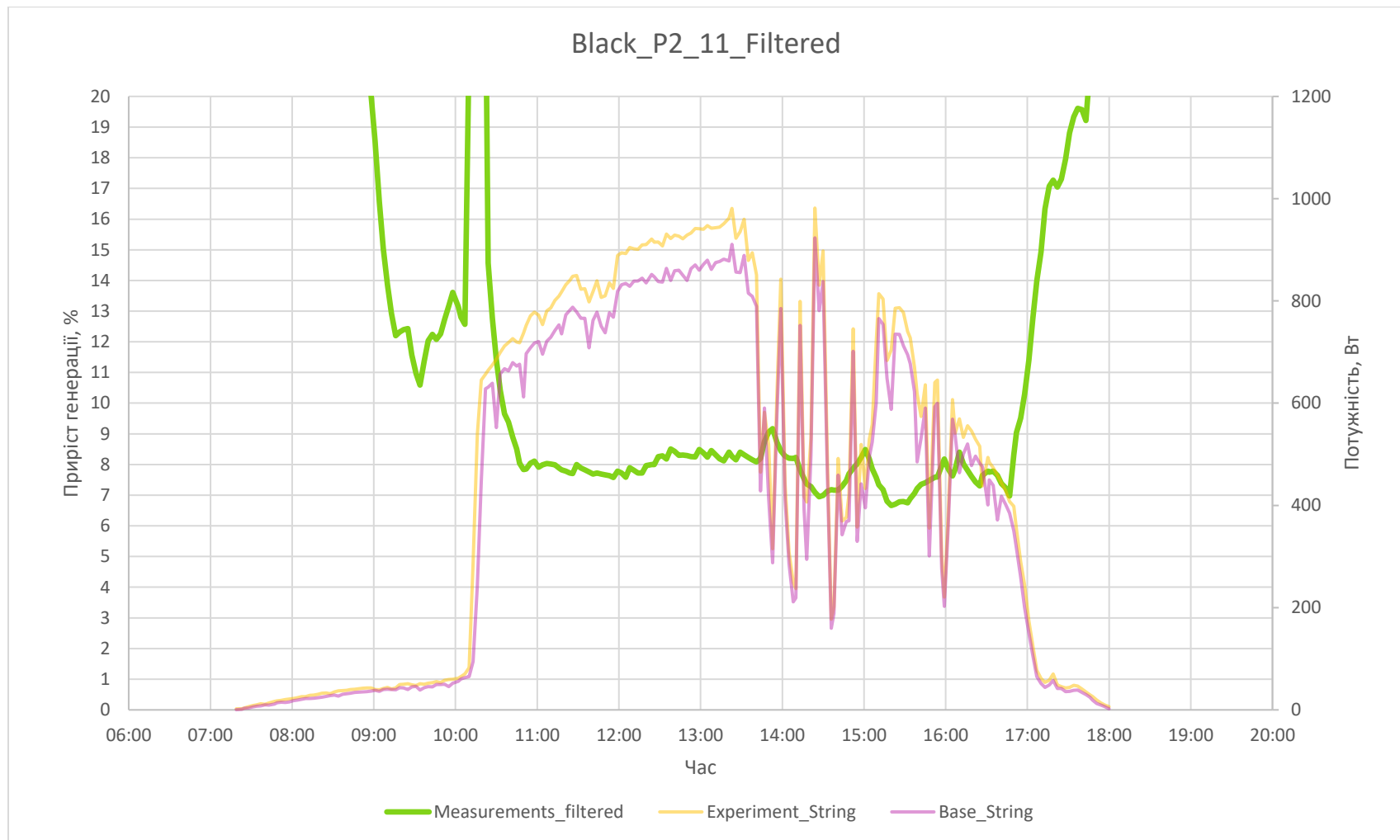


Рисунок Е.19 — Відфільтрований графік генерації за 11-те жовтня; форматована вісь.

Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня: агроволокно.

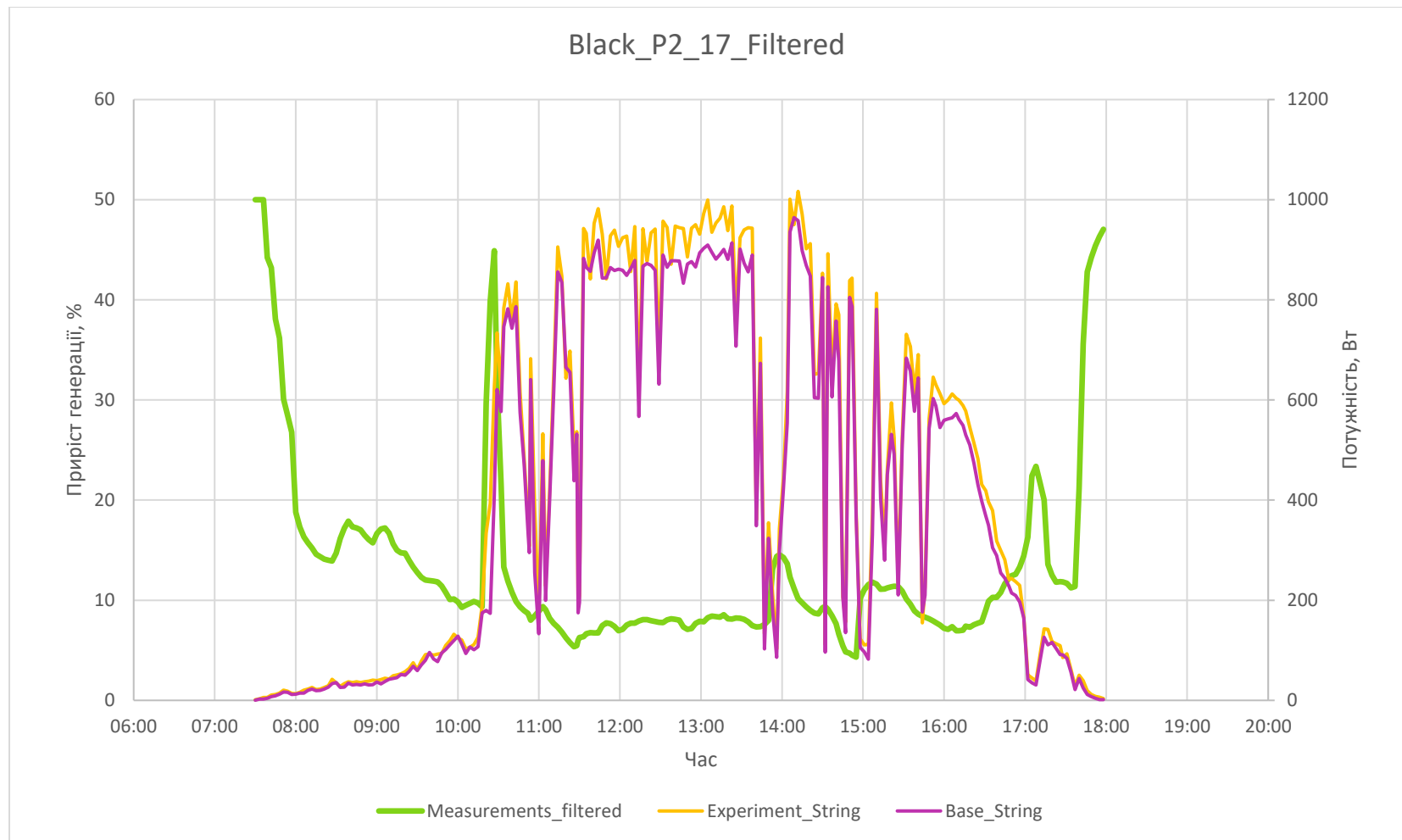


Рисунок Е.20 — Відфільтрований графік генерації за 17-те жовтня.
Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня: агроволокно.

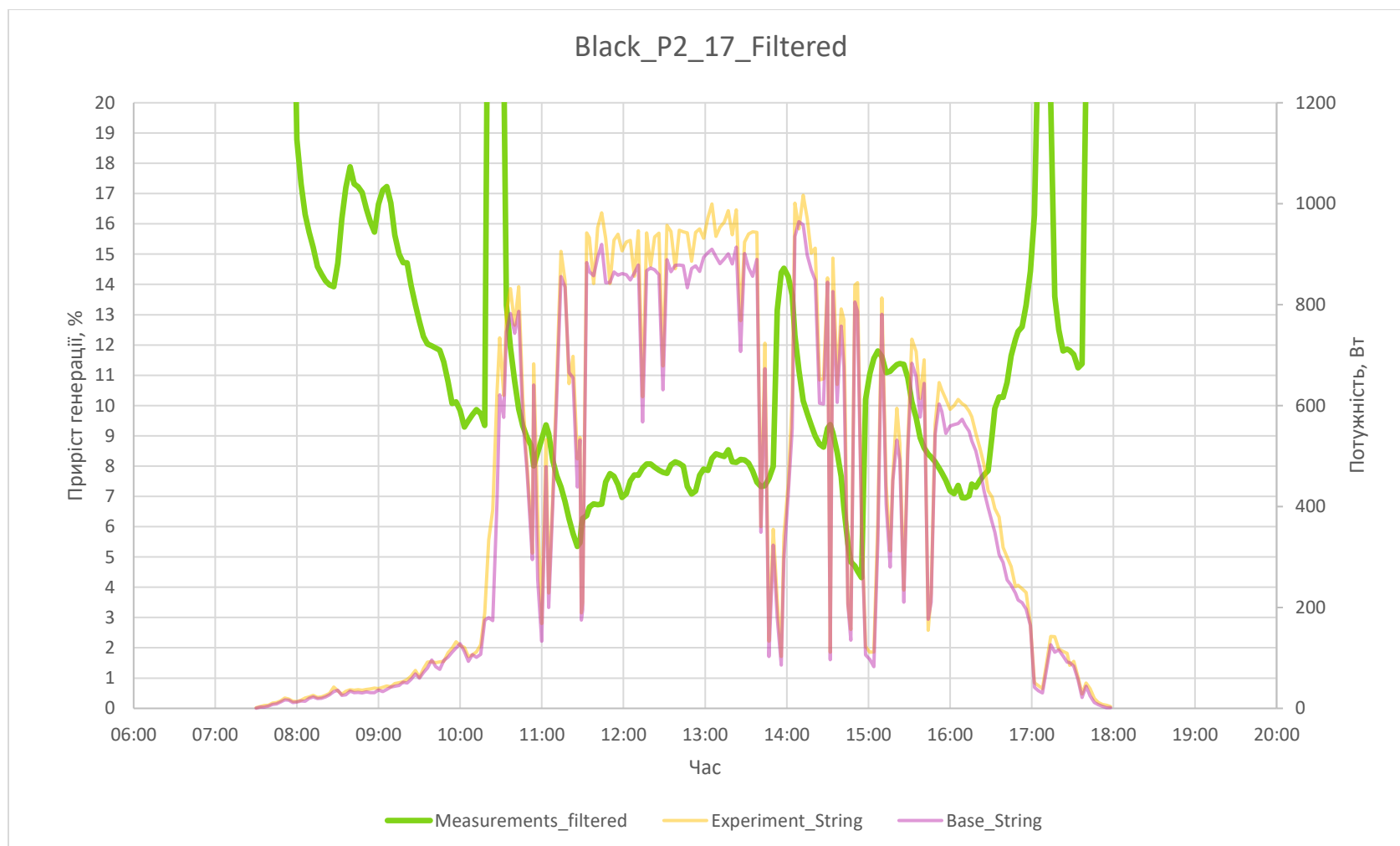


Рисунок Е.21 — Відфільтрований графік генерації за 17-те жовтня; форматована вісь.

Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня: агроволокно.

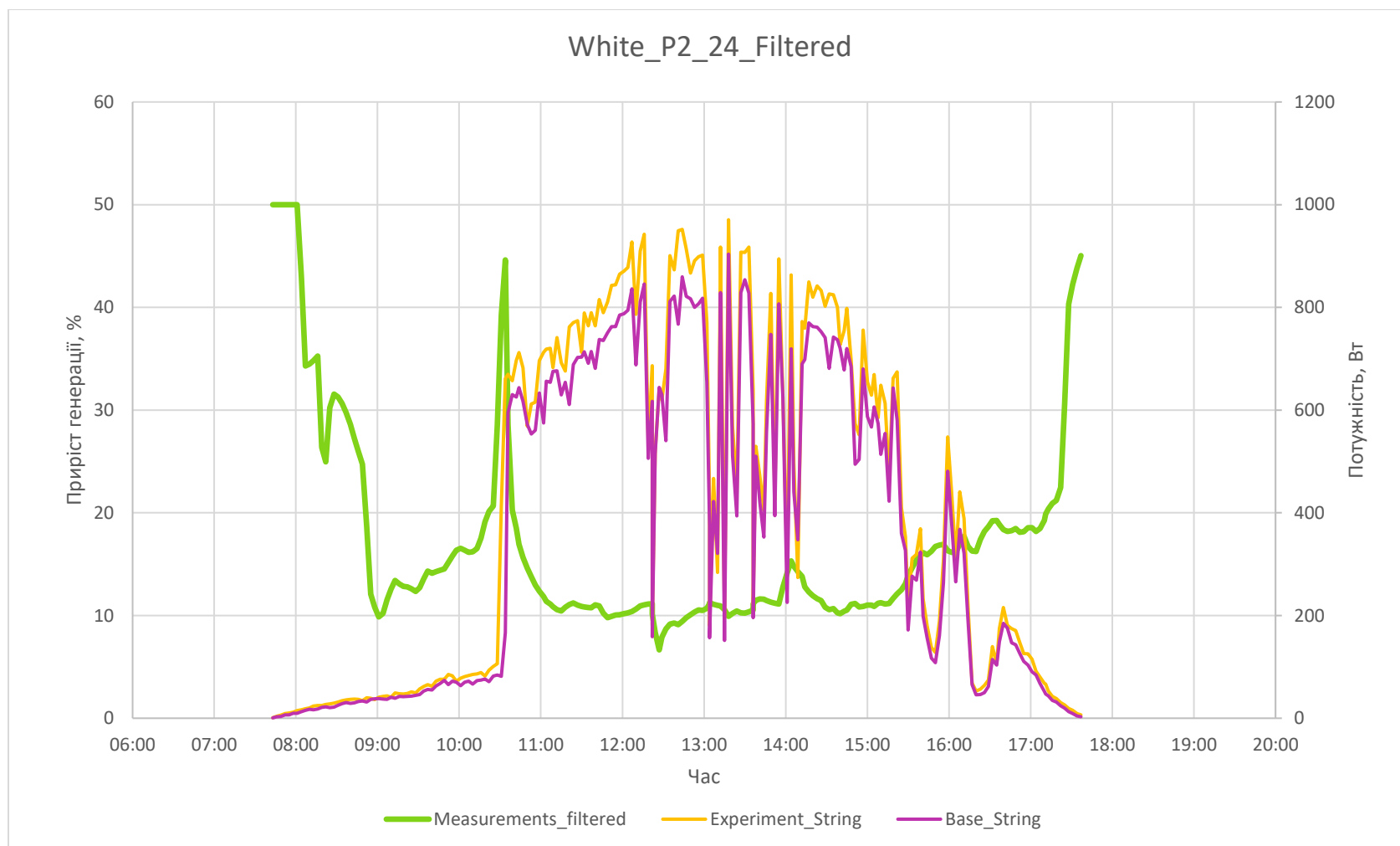


Рисунок Е.22 — Відфільтрований графік генерації за 24-те жовтня.

Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня: світловідбиваюча біла тканина.



Рисунок Е.23 — Відфільтрований графік генерації за 24-те жовтня; форматована вісь.
Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня: світловідбиваюча біла тканина.

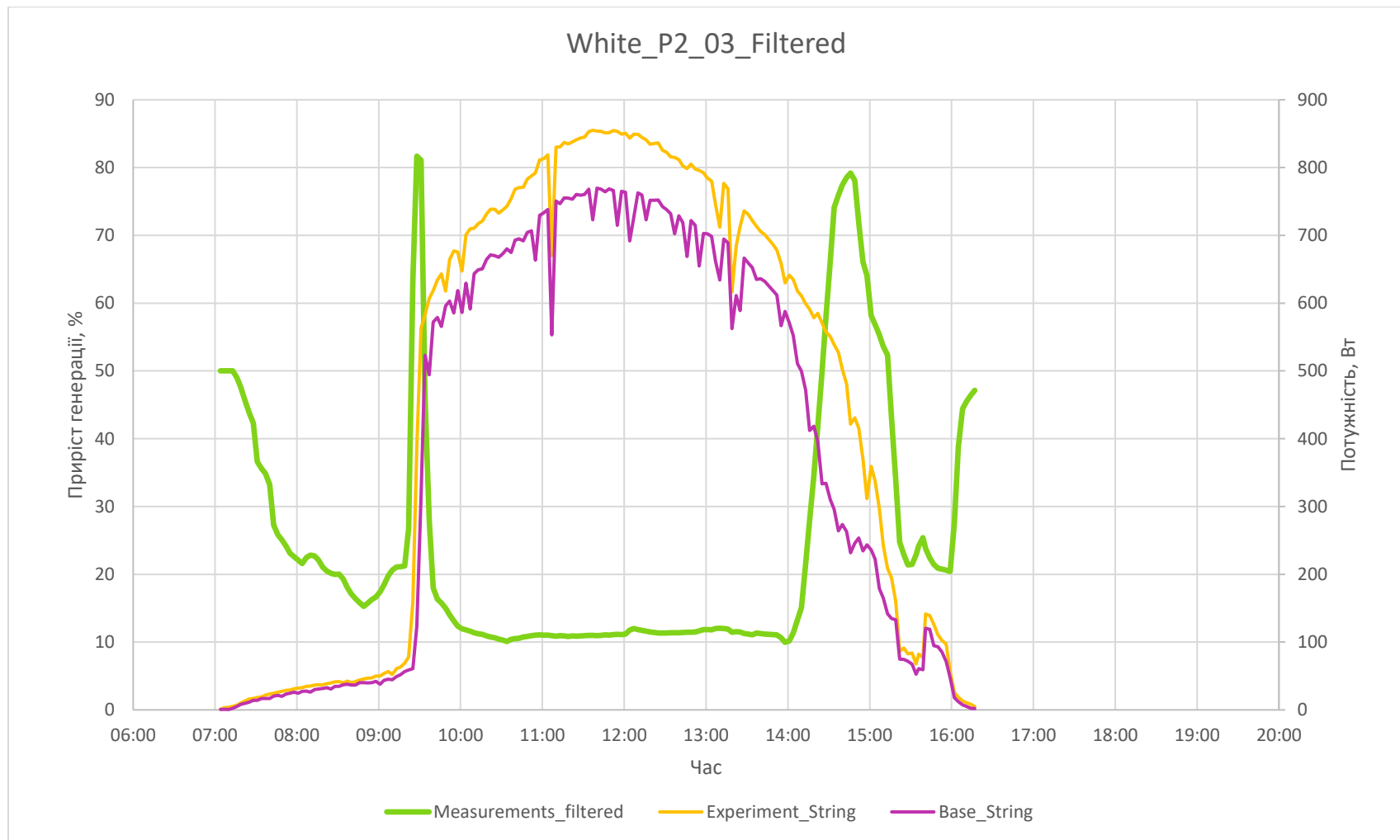


Рисунок Е.24 — Відфільтрований графік генерації за 3-тє листопада.
Погода: сонячно. Відбиваюча поверхня: світловідбиваюча біла тканина.

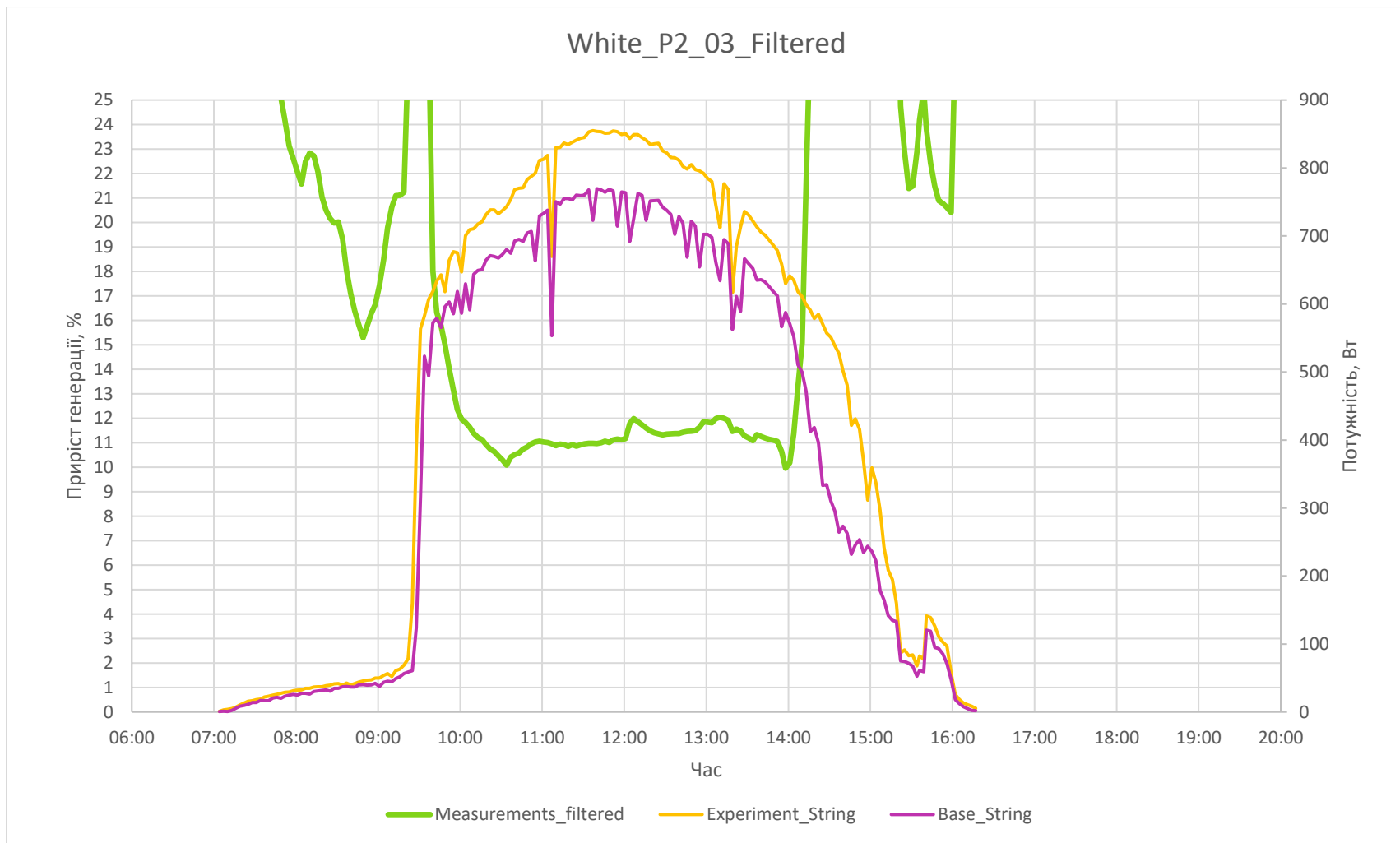


Рисунок Е.25 — Відфільтрований графік генерації за 3-те листопада; форматована вісь.

Погода: сонячно. Відбиваюча поверхня: світловідбиваюча біла тканина.



Рисунок Е.26 — Відфільтрований графік генерації за 20-те листопада.

Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня відсутня.



Рисунок Е.27 — Відфільтрований графік генерації за 20-те листопада; форматована вісь.

Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня відсутня.

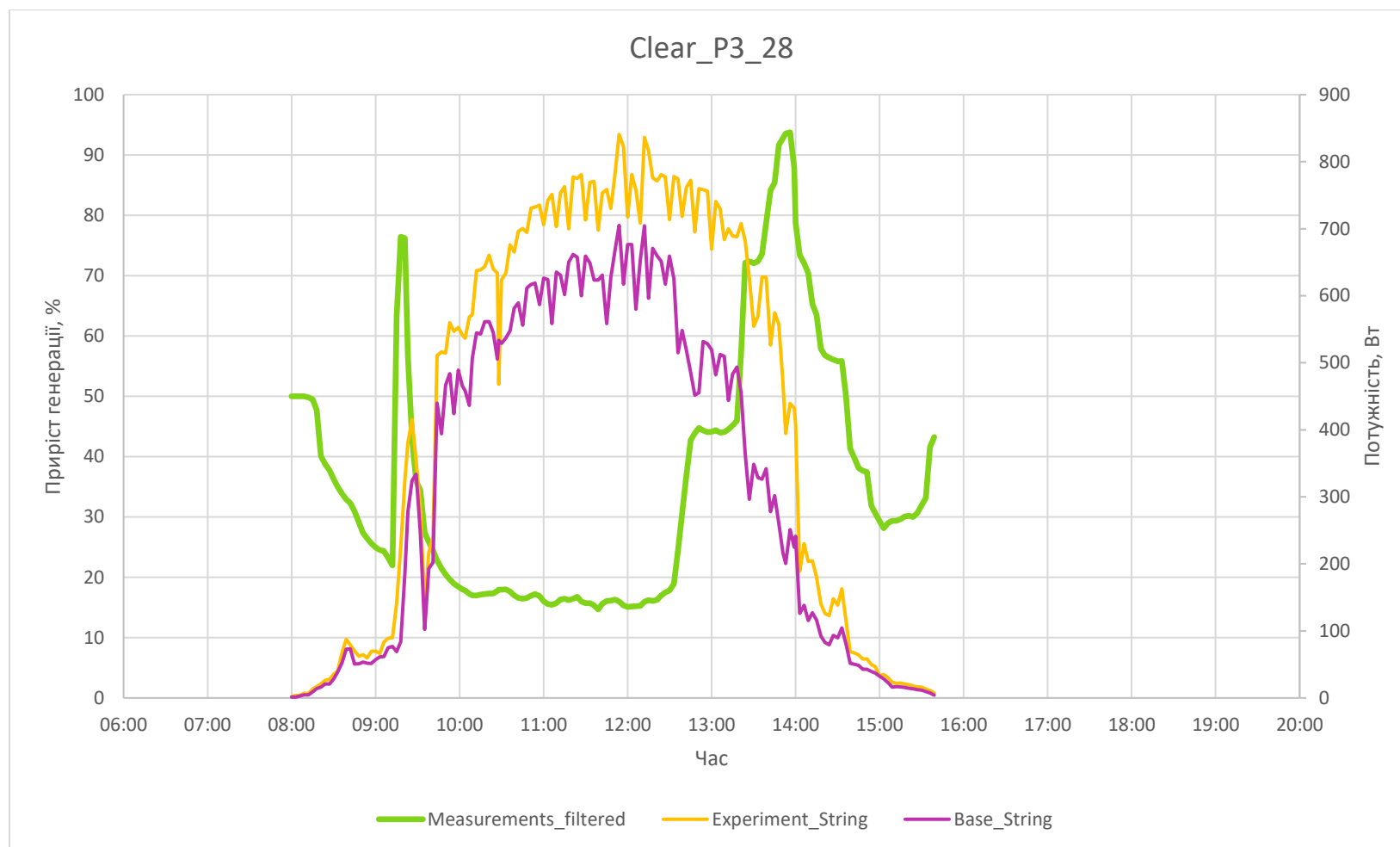


Рисунок Е.28 — Відфільтрований графік генерації за 28-те листопада.

Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня відсутня. Наявний сніговий покрив.

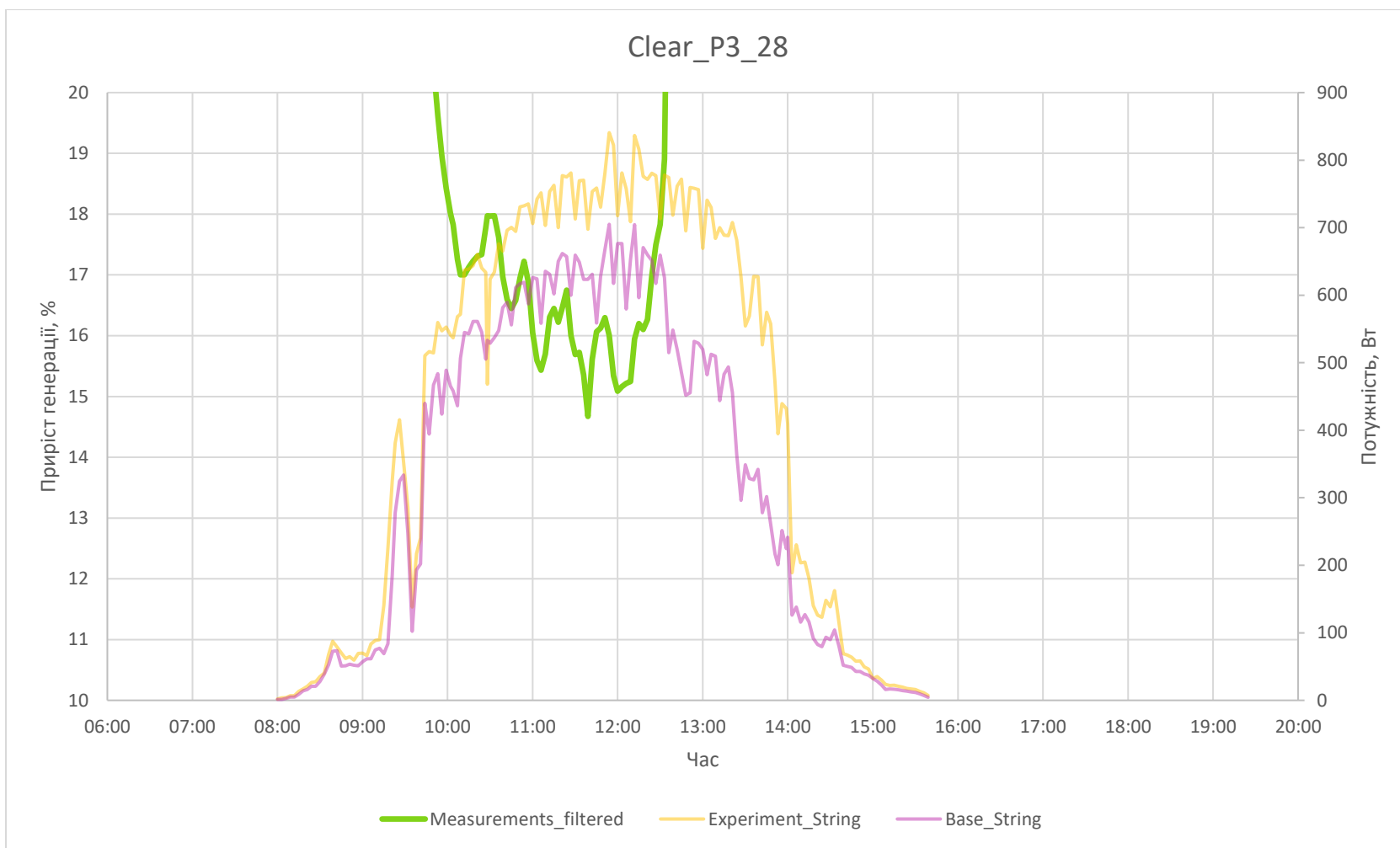


Рисунок Е.29 — Відфільтрований графік генерації за 28-те листопада; форматована вісь.
Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня відсутня. Наявний сніговий покрив.

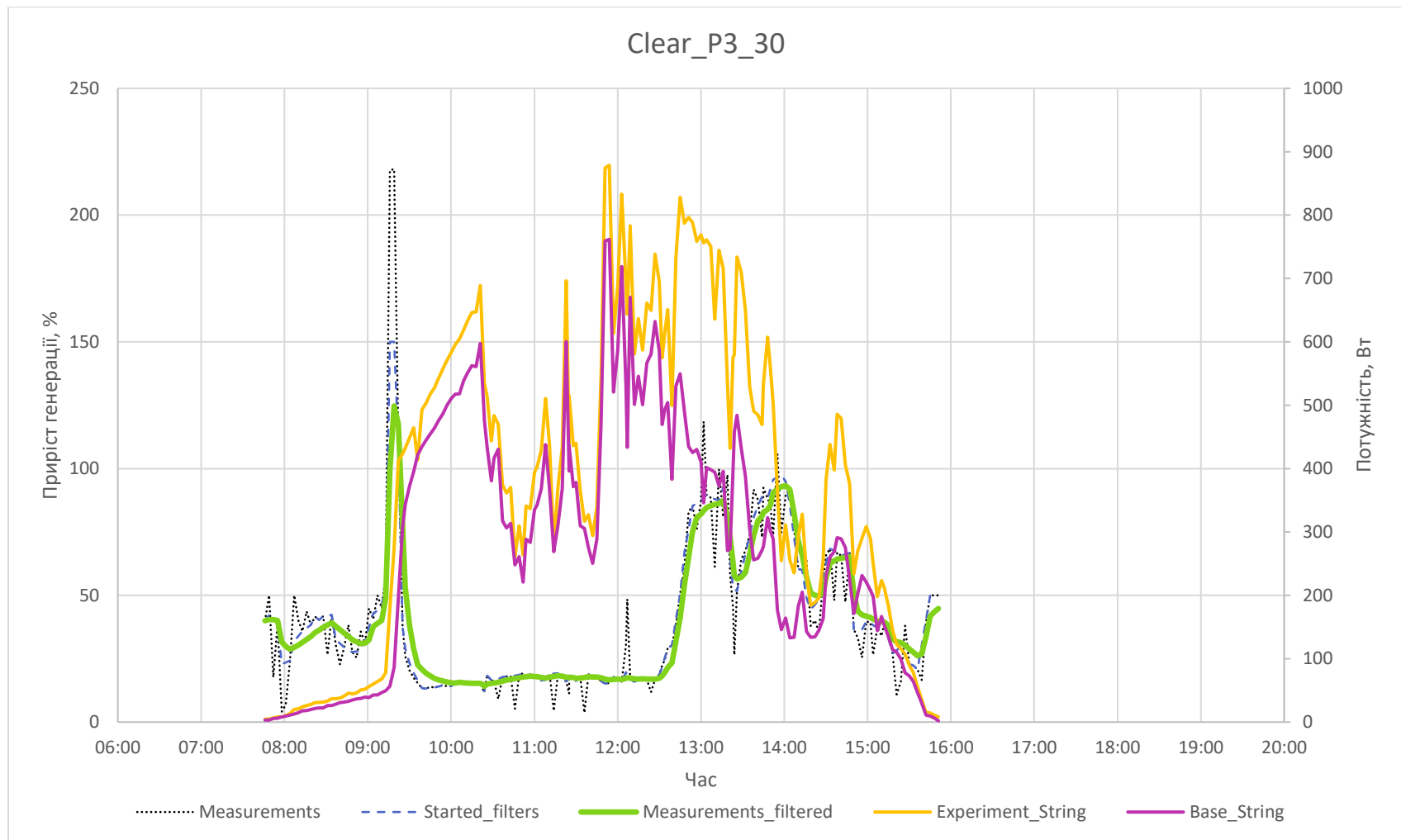


Рисунок Е.30 — Графік генерації за 30-те листопада.

Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня відсутня. Наявний сніговий покрив.

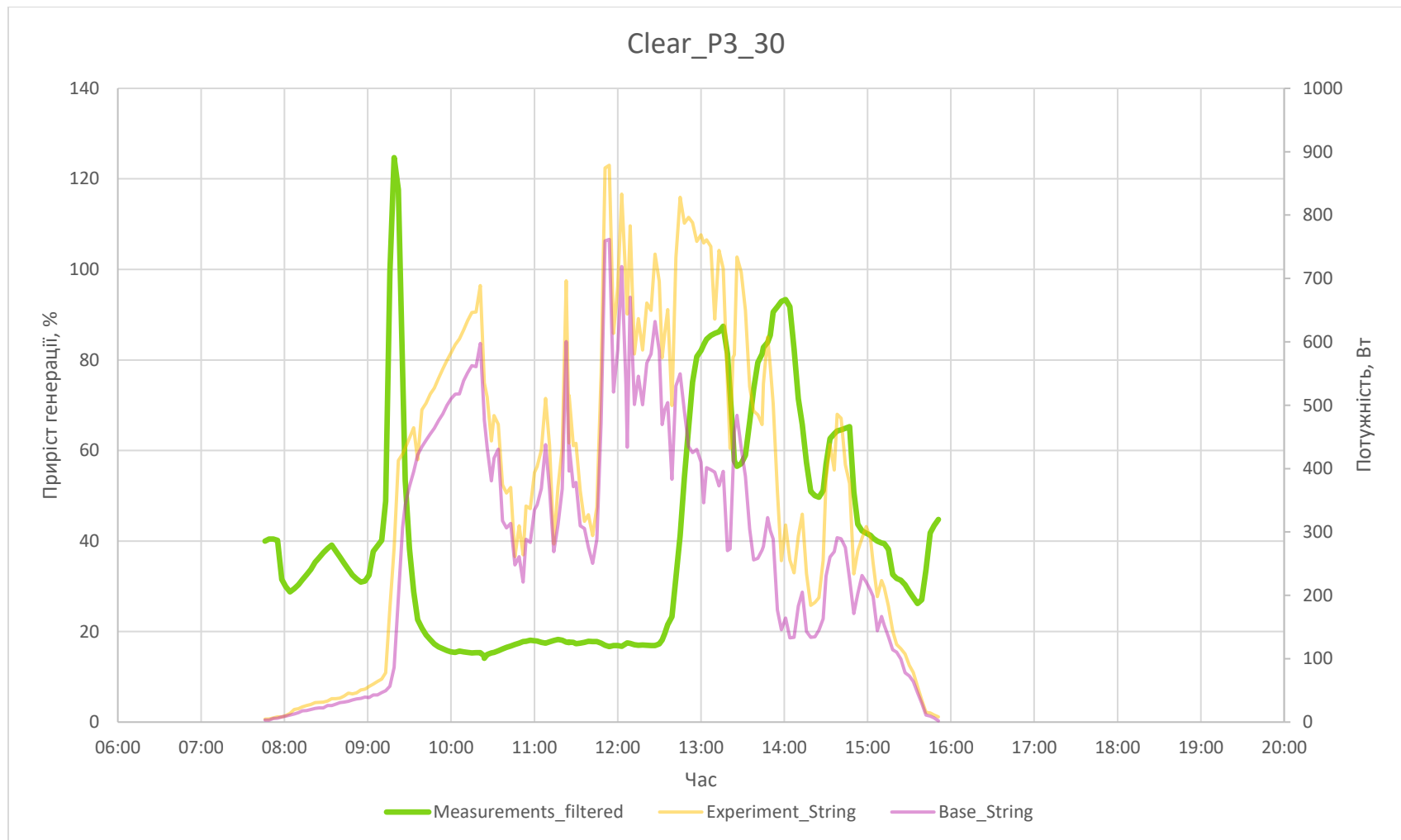


Рисунок Е.31 — Відфільтрований графік генерації за 30-те листопада.

Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня відсутня. Наявний сніговий покрив.

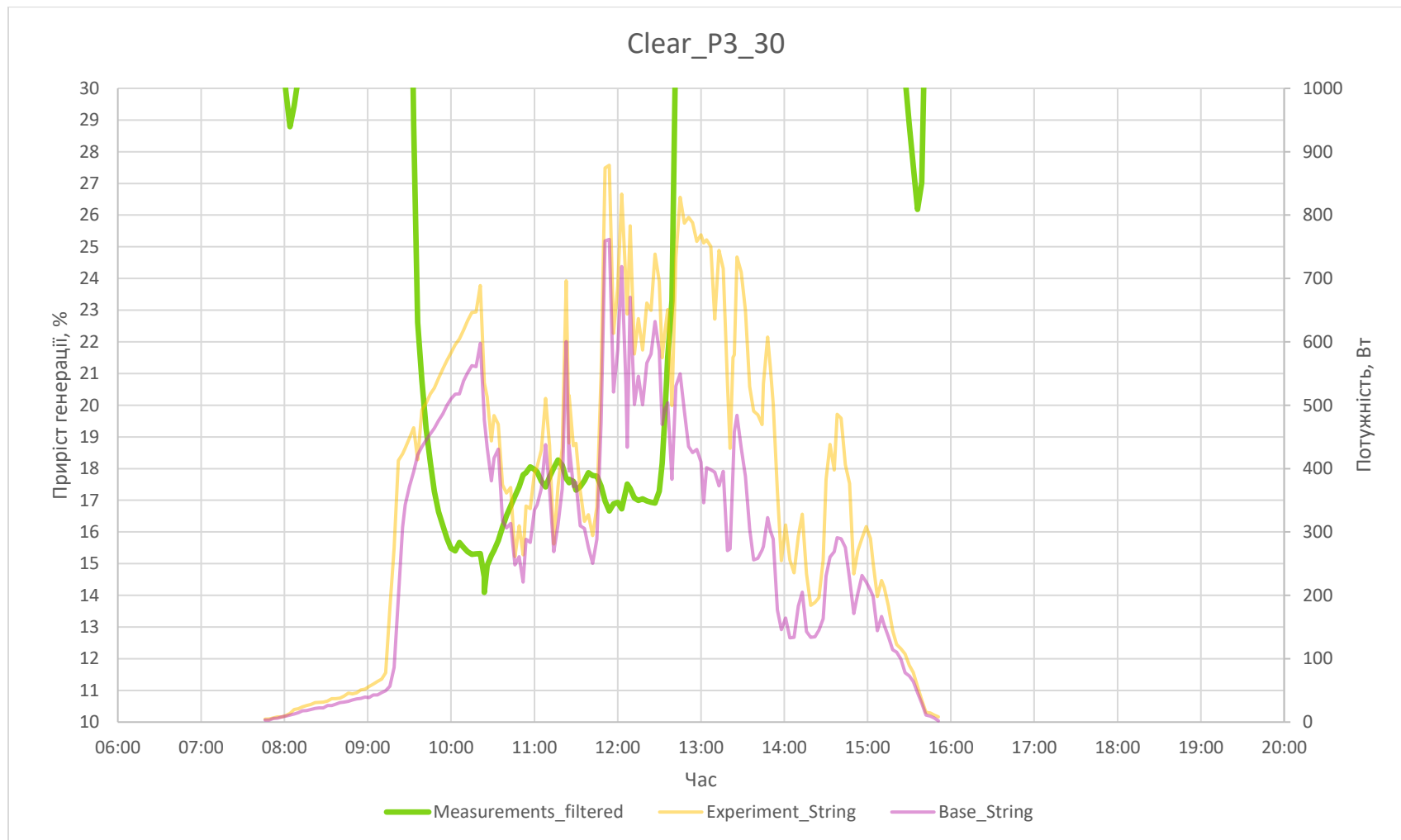


Рисунок Е.32 — Відфільтрований графік генерації за 30-те листопада; форматована вісь.
Погода: сонячно, місцями хмарно. Відбиваюча поверхня відсутня. Наявний сніговий покрив.

ДОДАТОК Ж

Порівняльна таблиця приросту генерації за рахунок двосторонніх фотомодулів та цін систем на двосторонніх фотомодулях з врахуванням генерації тильної сторони; приклад для 5 кВт станції.

Вартість системи з використанням односторонніх фотомодулів, дол. США	Вартість системи з використанням двосторонніх фотомодулів, дол. США	Збільшення ціни при використанні двосторонніх фотомодулів, дол. США	Різниця вартості при використанні двосторонніх фотомодулів, дол. США	Приріст потужності за рахунок двосторонніх фотомодулів, %	Загальна потужність сонячних двосторонніх фотомодулів з врахуванням тильної сторони, кВт	Ціна системи за 1 Вт при використанні односторонніх фотомодулів, дол. США	Ціна системи за 1 Вт при використанні двосторонніх фотомодулів з врахуванням тильної сторони, дол. США	Збільшення ціни при використанні двосторонніх фотомодулів, %
14250	14750	0,1	500	5	5,25	2,85	2,810	3,508
				6	5,3		2,783	
				7	5,35		2,757	
				8	5,4		2,731	
				9	5,45		2,706	
				10	5,5		2,682	
				11	5,55		2,658	
				12	5,6		2,634	
				13	5,65		2,611	
				14	5,7		2,588	
				15	5,75		2,565	
14250	14800	0,11	550	5	5,25	2,85	2,819	3,859
				6	5,3		2,792	
				7	5,35		2,766	
				8	5,4		2,741	
				9	5,45		2,716	
				10	5,5		2,691	
				11	5,55		2,667	
				12	5,6		2,643	
				13	5,65		2,619	
				14	5,7		2,596	

				15	5,75		2,574	
14250	14850	0,12	600	5	5,25	2,85	2,829	4,210
				6	5,3		2,802	
				7	5,35		2,776	
				8	5,4		2,750	
				9	5,45		2,725	
				10	5,5		2,700	
				11	5,55		2,676	
				12	5,6		2,652	
				13	5,65		2,628	
				14	5,7		2,605	
				15	5,75		2,583	
14250	14900	0,13	650	5	5,25	2,85	2,838	4,561
				6	5,3		2,811	
				7	5,35		2,785	
				8	5,4		2,759	
				9	5,45		2,734	
				10	5,5		2,709	
				11	5,55		2,685	
				12	5,6		2,661	
				13	5,65		2,637	
				14	5,7		2,614	
				15	5,75		2,591	
14250	14950	0,14	700	5	5,25	2,85	2,848	4,912
				6	5,3		2,821	
				7	5,35		2,794	
				8	5,4		2,769	
				9	5,45		2,743	
				10	5,5		2,718	
				11	5,55		2,694	
				12	5,6		2,670	
				13	5,65		2,646	

				14	5,7		2,623	
				15	5,75		2,600	
14250	15000	0,15	750	5	5,25	2,85	2,857	5,263
				6	5,3		2,830	
				7	5,35		2,804	
				8	5,4		2,778	
				9	5,45		2,752	
				10	5,5		2,727	
				11	5,55		2,703	
				12	5,6		2,679	
				13	5,65		2,655	
				14	5,7		2,632	
				15	5,75		2,609	
14250	15050	0,16	800	5	5,25	2,85	2,867	5,614
				6	5,3		2,840	
				7	5,35		2,813	
				8	5,4		2,787	
				9	5,45		2,761	
				10	5,5		2,736	
				11	5,55		2,712	
				12	5,6		2,688	
				13	5,65		2,664	
				14	5,7		2,640	
				15	5,75		2,617	
14250	15100	0,17	850	5	5,25	2,85	2,876	5,964
				6	5,3		2,849	
				7	5,35		2,822	
				8	5,4		2,796	
				9	5,45		2,771	
				10	5,5		2,745	
				11	5,55		2,721	
				12	5,6		2,696	

				13	5,65		2,673	
				14	5,7		2,649	
				15	5,75		2,626	
14250	15150	0,18	900	5	5,25	2,85	2,886	6,315
				6	5,3		2,858	
				7	5,35		2,832	
				8	5,4		2,806	
				9	5,45		2,780	
				10	5,5		2,755	
				11	5,55		2,730	
				12	5,6		2,705	
				13	5,65		2,681	
				14	5,7		2,658	
				15	5,75		2,635	
14250	15200	0,19	950	5	5,25	2,85	2,895	6,667
				6	5,3		2,868	
				7	5,35		2,841	
				8	5,4		2,815	
				9	5,45		2,789	
				10	5,5		2,764	
				11	5,55		2,739	
				12	5,6		2,714	
				13	5,65		2,690	
				14	5,7		2,667	
				15	5,75		2,643	
14250	15250	0,2	1000	5	5,25	2,85	2,905	7,017
				6	5,3		2,877	
				7	5,35		2,850	
				8	5,4		2,824	
				9	5,45		2,798	
				10	5,5		2,773	
				11	5,55		2,748	

				12	5,6		2,723	
				13	5,65		2,699	
				14	5,7		2,675	
				15	5,75		2,652	

ДОДАТОК И

ПОДЯКА

людям, що допомагали тим чи іншим чином з експериментальною установкою,
та без яких дана магістерська дисертація не була б написана в тому вигляді,
в якому вона наявна:

Барам Костянтин	Ковпак Олександр
Будько Василь	Коротченко Дмитро
Гаєвська Ганна	Лаєвський Антон
Гаєвський Олександр	Лазорко Микола
Горєлов Іван	Нестеренко Артем
Делєв Данило	Нечай Інна
Долотов Юрій	Паламар Богдан
Іванчук Владислав	Петровська Анна
Ілляшенко Юлія	Понідзельський Іван
Калитюк Валентина	Скрипчук Владислав
Кардаш Олександр	Турчин Володимир
Кириленко Катерина	Щербаков Сергій
Коваль Максим	Янковський Борис

а також всім, кого по тим чи іншим причинам немає в цьому списку, однак вони були причетні до даної роботи.