



Міністерство освіти і науки України

**ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет енергетики, робототехніки та  
комп'ютерних технологій**

**Кафедра електропостачання та  
енергетичного менеджменту**

**ПРОЕКТУВАННЯ  
ОБ'ЄКТІВ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

*Методичні вказівки до виконання РГЗ*

**Визначення параметрів енергетичної системи  
з відновлювальними джерелами енергії використовуючи  
веб-інструмент REopt**

*спеціальності*

*141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

**Харків  
2024**

Міністерство освіти і науки України

ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет енергетики, робототехніки та  
комп'ютерних технологій

Кафедра електропостачання та енергетичного менеджменту

О. М. Мороз, О. О. Мірошник

**ПРОЕКТУВАННЯ  
ОБ'ЄКТІВ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

*Методичні вказівки до виконання РГЗ*

**Визначення параметрів енергетичної системи  
з відновлювальними джерелами енергії використовуючи  
веб-інструмент REopt**

*спеціальності*

**141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Затверджено  
рішенням науково-методичної ради  
факультету енергетики,  
робототехніки та  
комп'ютерних технологій  
Протокол № 3  
від 26 грудня 2024 року

**Харків  
2024**

УДК 620.92(477)

Схвалено на засіданні кафедри  
електропостачання та енергетичного менеджменту  
Протокол №4 від 11.12.2024 р.

**Рецензенти:**

**Аманда Фартінг** - науковий співробітник III - Інжиніринг моделей, прискорене розгортання та підтримка прийняття рішень щодо інтегрованих енергетичних рішень, дослідницька тема Національної лабораторії відновлюваної енергетики.

**Андрій Павлов** – керівник компанії СК-Моноліт.

Проектування об'єктів альтернативної енергетики: Методичні вказівки до виконання РГЗ «Визначення параметрів енергетичної системи з відновлювальними джерелами енергії використовуючи веб-інструмент REopt» студентами другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навч., спец.: 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»; Державний біотехнологічний університет; упоряд.: О. М. Мороз, О. О. Мірошник – Харків: 2024. – 54 с.

Методичні вказівки включають інформацію про можливість веб-інструмент REopt та шляхи оптимізації енергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії і установками зберігання електроенергії, а також кроки виконання завдання. Виконання РГЗ допоможе майбутнім фахівцям оволодіти основами проектування мереж з розподіленими джерелами генерації.

Видання призначена для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

**УДК 620.92(477)**

Відповідальний за випуск: **О. О. Мірошник**, д-р техн. наук

© Мороз О.М., Мірошник О.О. 2024.

© ДБТУ, 2024

## *Зміст*

Вступ .....	4
1 Початок роботи .....	7
1.1 Вхід.....	7
1.2 Інформаційна панель користувача .....	8
1.3 Спеціальні профілі навантаження.....	8
2 Нова оцінка (New Evaluation) .....	9
2.1 Крок 0: Увійдіть і зберіть дані.....	9
2.2 Крок 1: Виберіть Аналіз одного сайту або портфоліо .....	9
2.3 Крок 2: Виберіть свої енергетичні цілі .....	10
2.4 Крок 3: Виберіть свої технології .....	11
2.5 Крок 4: Введіть дані свого об'єкту .....	11
2.6 Опція об'єкту та утиліти .....	11
2.7 Параметр Завантажити профілі .....	13
2.8 Параметр Стійкість.....	16
2.9 Фінансовий параметр .....	17
2.10 Опція Renewable Energy @ Emissions.....	17
2.11 Опція PV .....	17
2.12 Параметр Акумулятор.....	22
3. Вихідні дані (Outputs).....	25
3.1 Варіанти (Cases) .....	25
3.2 Розмір системи (System Size).....	26
3.3 Стратегія диспетчеризації (Dispatch Strategy).....	27
3.4 Економіка (Economics).....	27
3.5 Стійкість (Resilience).....	28
3.6 Стійкість і фінансове порівняння (Resilience vs. Financial Comparison) .....	29
3.7 Виробництво відновлюваної енергії (Renewable Energy Outputs).....	29
4. Результати (Results) .....	30
Кроки виконання завдання .....	42
Результати моделювання .....	46
Використані джерела інформації .....	54
Вихідні дані для розрахунку РГЗ .....	55

## *Вступ*

В останні роки у світі спостерігається інтенсивний розвиток відновлювальної енергетики з метою забезпечення надійного енергопостачання та зменшення впливу на оточуюче середовище від викопних видів палива. Інвестиції у чисту енергетику за три роки зросли майже на 40% [1]. У 2024 році відновлювана енергетика продовжує швидко розвиватися, збільшення потужності досягло рекорду близько 400 ГВт у 2023 році та зросте ще більше у 2024 році [2].

Розвиток відновлювальної енергетики неможливий без проведення техніко-економічного обґрунтування, що потребує використання сучасних спеціалізованих програм. Однією із таких програм є веб-інструмент REopt [3].

Платформа підтримки техніко-економічних рішень REopt використовується дослідниками NREL (Національної лабораторії відновлюваної енергії) для оптимізації енергетичних систем для будівель, кампусів, територіальних громад, мікромереж тощо. REopt визначає оптимальне поєднання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), традиційних технологій виробництва, зберігання електроенергії та електрифікації для досягнення цілей економії коштів, стійкості системи, скорочення викидів та енергоефективності [4]. Платформа доступна через веб-інтерфейс, інтерфейс прикладного програмування та відкритий код.

Веб-інструмент REopt оцінює економічну життєздатність підключених до мережі сонячних електростанцій (СЕС), вітрових, комбінованих теплових і електричних установок, теплових насосів і установок накопичення електроенергії, тепла та холоду на комерційних і малих промислових об'єктах [4]. Це дозволяє власникам об'єктів визначати розміри системи та стратегії диспетчеризації, які мінімізують вартість енергії протягом життєвого

циклу об'єкта. Веб-інструмент REopt також оцінює тривалість часу, протягом якого генерація та установки зберігання можуть підтримувати критичне навантаження системи під час відключення від електромережі, і дозволяє користувачеві оптимізувати енергозабезпечення. Веб-інструмент REopt дозволяє користувачам переглядати технічний та економічний потенціал технологій розподіленої енергії окремо або в поєднанні одна з одною. Користувач може вибрати параметри продуктивності за замовчуванням або ввести визначені параметри продуктивності, які відповідають архітектурі моделі та припущенням. За замовчуванням технологічні розміри визначатимуться моделлю, хоча замість цього користувач може вказати розмір, який потрібно оцінити, у попередньо визначеному діапазоні.

Веб-інструмент REopt в основному розроблено для двох випадків використання:

1) *Підтримка прийняття рішень щодо розробки проекту*: веб-інструмент REopt використовується для оцінки технічної та економічної доцільності проектів фотоелектричних, вітрових, когенераційних, теплових і акумулюючих електростанцій на ранніх етапах процесу розробки проекту. У типовому процесі розробки системи перевіряються за допомогою підходу ітераційного аналізу, який використовує все більший рівень точності та деталізації ключових входних припущень з кожною наступною ітерацією. Цей підхід призначений для швидкого виявлення потенційно фатальних недоліків з мінімальними зусиллями та витратами. Веб-інструмент REopt можна використовувати на передпроектних етапах з мінімальною інформацією про систему. За замовчуванням застосовуються припущення для багатьох параметрів, таких як змодельоване навантаження об'єкта та дані середньої вартості в галузі (значення за замовчуванням, особливо економічні параметри, в REopt базуються на середніх комерційних

показниках США), які потрібно б змінювати під економічні показники в Україні, але вони є достатніми для початкового аналізу. Проекти без очевидних недоліків повторно аналізуються з використанням зростаючого рівня фактичної інформації про систему і технології. У цьому випадку багато припущень за замовчуванням можуть бути замінені конкретними значеннями на основі більш детального дослідження та кваліфікації системи.

2) **Застосування пов'язане з дослідженнями:** веб-інструмент REopt використовується для повторного пошуку загальних умов і факторів, що визначають здійсненність проекту для розвитку ринку та аналізу політики. Наприклад, інструмент можна використовувати для дослідження комбінацій вартості технології та стимулюючої підтримки, яка необхідна для здійсненності проекту з різними типами будівель і за різними тарифними структурами. Веб-інструмент REopt доступний у веб-інтерфейсі: <https://reopt.nrel.gov/tool>. Веб-інтерфейс дозволяє користувачам легко вводити дані, запускати аналіз і переглядати результати для одного сайту в графічному інтерфейсі користувача.

Навантаження, витрати на оплату електричної енергії з мережі та відновлювані ресурси моделюються для кожної години одного року. Передбачається, що змодельований рік представляє типовий рік і що навантаження та ресурси не зміняться істотно протягом вибраного користувачем періоду аналізу. Веб-інструмент REopt вирішує однорічну оптимізацію для визначення N-річних грошових потоків, припускаючи постійне виробництво та споживання протягом усіх N років бажаного періоду аналізу. Веб-інструмент REopt передбачає ідеальне передбачення всіх майбутніх подій, включаючи погоду та навантаження. Електричне навантаження забезпечується мережею та будь-якими розподіленими джерелами енергії (РДЕ), що виробляють електроенергію, або розрядом акумулятора (рис. 1) [4].

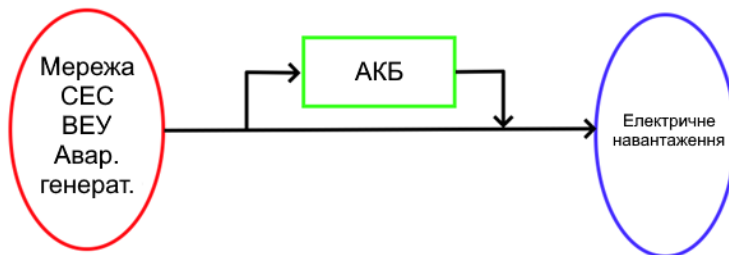


Рисунок 1 – Схема системи REopt потужності та навантажень

## 1 Початок роботи

### 1.1 Вхід

Отримавши доступ до веб-інструменту REopt (<https://reopt.nrel.gov/tool>), користувач має можливість створити або увійти в існуючий обліковий запис користувача за допомогою посилання «Log in/Register» у верхньому правому куті. Веб-інструмент REopt можна використовувати без реєстрації або входу в обліковий запис користувача. Однак, якщо користувач вирішить налаштувати обліковий запис і увійти до запуску моделювання, його моделі зберігаються, і до них можна отримати доступ пізніше.

Щоб створити детальний спеціальний тариф на електроенергію, побудувати спеціальний профіль критичного навантаження або керувати профілями типового та критичного навантаження, користувачі повинні бути зареєстровані та увійти до свого облікового запису. Є варіанти створення облікових записів за допомогою Google та/або Facebook. Користувачі можуть створити обліковий запис Google, пов'язаний з адресою, яка відмінна від gmail.com, натиснувши «Використовувати мою поточну адресу електронної пошти замість цього» (Use my current email address



instead), ввівши адресу електронної пошти та дотримуючись інструкцій, щоб підтвердити право власності на введену адресу електронної пошти. Користувачі, які входять за допомогою Facebook, повинні увійти у свій обліковий запис Facebook і мати в цьому обліковому записі ввімкнені програми платформи.

### **1.2 Інформаційна панель користувача**

Після входу в систему кнопка «Saved Evaluations» (Збережені оцінювання) спрямовує зареєстрованого користувача на інформаційну панель, на якій представлено зведення збережених даних із попередніх оцінювань, а також посилання для перегляду чи завантаження сторінки результатів кожного оцінювання у своєму браузері, копіювання оцінки як основи для створення відредагваної нової моделі оцінки або для видалення збереженої моделі оцінки.

### **1.3 Спеціальні профілі навантаження**

Кнопка «Load Profiles» (Профілі навантаження) надає зареєстрованому користувачеві можливість перегляду збережених типових навантажень або збережених критичних навантажень. Сторінка типових профілів навантаження містить кнопку для завантаження нового профілю навантаження та підсумку всіх раніше завантажених типових профілів навантаження, а також списки оцінок, які використовували кожен профіль навантаження, графік профілю навантаження та можливість завантажити профіль. Типові профілі навантаження можна видалити, якщо вони не пов'язані з жодними моделями оцінювання.

Сторінка «Critical Load Profiles» (Профілі критичного навантаження) містить кнопку для завантаження нового профілю критичного навантаження та іншу кнопку для створення нового профілю критичного навантаження.

## 2 Нова оцінка (New Evaluation)

### 2.1 Крок 0: Увійдіть і зберіть дані (Step 0: Login and Gather Data)

У розділі «Крок 0» докладно описано переваги додаткової реєстрації та входу в приватний обліковий запис, включаючи можливість зберігати моделі оцінки, створювати власні тарифи на електроенергію, створювати власні профілі критичного навантаження та керувати збереженими типовими та критичними профілями навантаження (рис. 2). Фінансова оцінка вимагає визначення місця розташування об'єкта, тарифу на електроенергію та спеціального профілю навантаження або комбінації типу будівлі та оцінки річного споживання енергії для цієї будівлі. Для оцінки стійкості знадобляться ці дані, а також дані, що визначають заплановане чи потенційне відключення електроенергії.

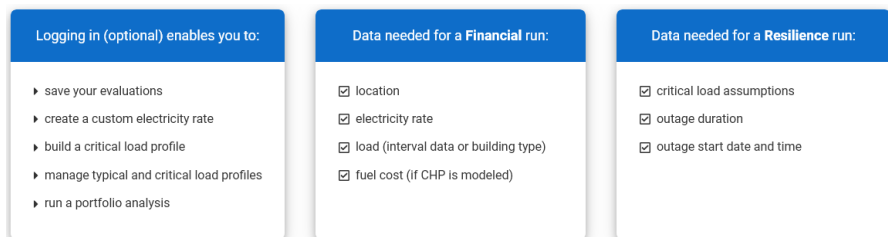


Рисунок 2 – Переваги входу в систему та дані для оцінки фінансів і стійкості (Financial and Resilience evaluation)

### 2.2 Крок 1: Виберіть аналіз одного сайту або портфоліо (Step 1: Select Single Site or Portfolio Analysis)

Єдиний сайт дозволяє користувачам переглядати один об'єкт. Можливість аналізу портфоліо дозволяє користувачам переглядати декілька об'єктів одночасно. Щоб отримати доступ до можливостей аналізу портфоліо, користувачі мають увійти в систему.

## 2.3 Крок 2: **Виберіть свої енергетичні цілі** (**Step 2: Choose Your Energy Goals**)

Є три енергетичні цілі (рис. 3).

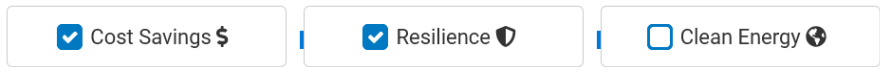
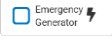


Рисунок 3 – Енергетичні цілі

Режим економії витрат оптимізує розміри системи та стратегію диспетчеризації, щоб мінімізувати вартість енергії протягом життєвого циклу об'єкту. Режим стійкості робить те саме, але з додатковим обмеженням, що локальні ресурси повинні витримувати критичне навантаження, без централізованої мережі, протягом визначеного періоду(ів) відключення. Цю модель можна використовувати для імітації відключень мережі шляхом вимкнення мережі на певні проміжки часу. Профіль навантаження також може бути змінений під час цих відключень мережі, щоб представляти «критичне» навантаження. Це дозволяє оцінити всі технології в моделі як під час підключення до мережі (переважну частину року), так і під час відключень мережі. Ця можливість особливо важлива для технологій відновлюваної енергетики, оскільки вони здатні генерувати електроенергію у режимі підключення до мережі, а також підтримувати критичне навантаження під час відключення мережі. Якщо було вибрано оцінку стійкості, на кроці 3 з'являється додаткове поле .

Режим «Clean Energy» (Чиста енергія) дозволяє користувачам вибрати або цільовий відсоток відновлюваної електроенергії (у вигляді мінімального та/або максимального відсотка річного електричного навантаження об'єкту, який повинен обслуговуватися відновлюваною електроенергією), або цільовий відсоток скорочення викидів (мінімальний або максимальний відсоток скорочення викидів протягом життєвого циклу відносно звичайного випадку (the business-as-usual case)).


### 2.4 Крок 3: **Виберіть свої технології** (*Step 3: Select Your Technologies*)

На цьому етапі вибираються технології, які будуть включені в аналіз – фотовольтаїчну систему (photovoltaic – PV), вітер, акумуляторні батареї, основні генератори чи будь-яку комбінацію цих технологій. Відображаються лише входи для вибраної технології. Вхідні дані для будь-якої невибраної технології приховані.

### 2.5 Крок 4: **Введіть дані свого об'єкту** (*Step 4: Enter Your Site Data*)

Ці дані включають інформацію про місцезнаходження об'єкту, тариф на електроенергію та споживання, а також фінансові обмеження. Для аналізу веб-інструменту REopt необхідні різні вхідні дані, але інструмент надає редаговані значення за замовчуванням для більшості цих параметрів. Усі поля, позначені зірочкою (\*), є обов'язковими для заповнення.

### 2.6 Опція об'єкту та утиліти *Option Site and Utility*

У полі  \* Site location   необхідно ввести назву локації, яка може бути написана англійською або українською мовами. Для України з'явиться наступний напис «Для введеного вами населеного пункту не знайдено тарифів на електроенергію. Будь ласка, спробуйте інше місце поблизу» (“*No electricity rates were found for the location you entered. Please try another location nearby*”). Потім слід використати наступне поле  Use custom electricity rate . Якщо тариф на електроенергію залишатиметься незмінним протягом року, виберіть опцію «Річний» (Annual) і введіть вартість електроенергії в доларах США/кВт·год і, якщо необхідно, вартість попиту в доларах США/кВт/місяць. Якщо плата за попит не стягується, введіть 0

\$/кВт/місяць. З 1 червня 2024 року вартість електроенергії для побутових споживачів України становить 4,32 грн/кВт·год [5], що становить близько 0,105 \$/кВт·год. Якщо натиснути поле

**+ Optional inputs**

, з'явиться наступне вікно (рис. 4).

Location

Site name ?

PV & wind space available  Land only  Roofspace only  Land & roofspace

Land available for PV & Wind (acres) ?

Electrical ?

Net metering system size limit (kW) ?

Technologies that can net meter ?  PV  
 Wind  
 CHP

Wholesale rate (\$/kWh) ?

Wholesale rate varies with time? ?

Solver settings

Solver optimality tolerance (%) ?

Solver Name ?

Optimization timeout (seconds) ?

Рисунок 4 – Вікно «Додаткові входи»


Можна вказати або не вказувати назву об'єкту, але вам потрібно вибрати, яке місце доступне для розміщення фотоелектричних модулів  Land only  Roofspace only  Land & roofspace . Якщо у вас обмежена площа землі для PV@Wind, вам потрібно вказати площу землі в акрах (ви можете скористатися цим калькулятором, щоб конвертувати гектари в акри <http://surl.li/gnqadj>). Якщо ваша енергосистема має «Net metering system», вам потрібно вказати обмеження розміру (кВт) (для домогосподарств максимальний розмір становить 30 кВт). Ціна продажу електроенергії за оптововідпускним тарифом може бути прийнята в розмірі 3 грн/кВт·год

або 0,07 \$/кВт·год. Дані в розділі налаштувань Solver змінювати не потрібно.

### *2.7 Параметр Завантажити профілі Option Load Profiles*

Параметр «Профіль навантаження» (Load Profiles) для змодельованих даних про навантаження базується на даних про будівлі та кліматичну зону США. Якщо використовується цей варіант моделювання навантаження, то необхідно перевірити змодельований профіль навантаження на відповідність клімату вибраного місця. Веб-інструмент REopt вимагає типових значень навантаження для кожної години року. Оскільки моделюється навантаження лише за один рік, неявним припущенням є те, що навантаження не змінюється суттєво з року в рік протягом періоду аналізу. Для аналізу PV, вітру та установок накопичення електроенергії потрібні лише електричні навантаження.

Якщо користувачеві доступно, то він завантажує дані про фактичне інтервальне навантаження для об'єкта. В інтерфейсі користувача веб-інструменту REopt це називається спеціальним профілем завантаження (custom load profile). Фактичні дані про навантаження дозволять отримати найточніші результати.

Якщо дані фактичного інтервалу недоступні, то користувач має доступ до 16 моделей навантажувальних профілів комерційних еталонних будівель (таблиця 1) у полі \* Type of building , які можна використовувати для аналізу одного або комбінації стандартних типів будівель або синтезувати введені користувачем річні чи місячні суми значення в погодинні профілі навантаження. Після вибору типу будівлі з'являється інформація про річне споживання електроенергії (рис. 5).

Таблиця 1 – Комерційні еталонні будівлі, які мають навантажувальні профілі

№ з.п.	Building type name	Тип будівлі	Площа (ft <sup>2</sup> )	К-сть поверхів
1.	Large Office	Великий офіс	498,588	12
2.	Medium Office	Середній офіс	53,628	3
3.	Small Office	Малий офіс	5,500	1
4.	Warehouse	Склад	52,045	1
5.	Stand-alone Retail	Магазин роздрібної торгівлі	24,962	1
6.	Strip Mall	Торговий центр	22,500	1
7.	Primary School	Початкова школа	73,960	1
8.	Secondary School	Середня школа	210,887	2
9.	Supermarket	Супермаркет	45,000	1
10.	Quick Service Restaurant	Ресторан швидкого обслуговування	2,500	1
11.	Full Service Restaurant	Ресторан із повним обслуговуванням	5,500	1
12.	Hospital	Лікарня	241,351	5
13.	Outpatient Health Care	Амбулаторна медична допомога	40,946	3
14.	Small Hotel	Невеликий готель	43,200	4
15.	Large Hotel	Великий готель	122,120	6
16.	Midrise Apartment	Середня квартира	33,740	4

Користувачі можуть регулювати профіль електричного навантаження збільшенням або зменшенням на певний відсоток за допомогою повзунка регулювання електричного навантаження (рис. 6). Значення за замовчуванням становить 100% від введеного навантаження, що означає, що коригування проводиться не буде. Введення значення, більшого за 100%, збільшить навантаження на кожному кроці часу. Якщо ввести значення менше 100%, навантаження на кожному кроці буде зменшено.

\* Type of building ?

Hotel - Small

[Building Details](#)

Annual  Monthly

Annual energy consumption (kWh) ?

767,538

Рисунок 5 – Інформація про тип будівлі та річне споживання електроенергії

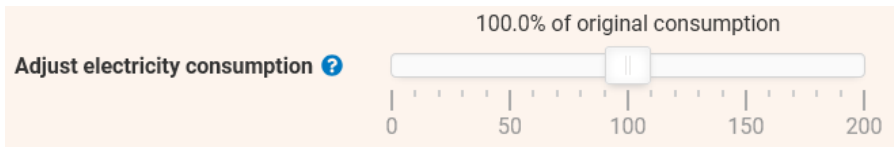


Рисунок 6 – Повзунок регулювання електричного навантаження

Типовий профіль електричного навантаження на основі вибору показаний на рис. 7. Цей профіль навантаження можна масштабувати за допомогою кнопок «1m», «3m», «6m».



Рисунок 7 – Типовий профіль електричного навантаження



## 2.8 Параметр *Стійкість*

### *Option Resilience*

За замовчуванням веб-інструмент REopt оптимізує системи, щоб максимально підвищити економіку підключення до мережі. Користувачі мають можливість вказати додаткові вимоги до стійкості, щоб спроектувати систему, яка також витримуватиме критичне навантаження протягом визначеного періоду відключення від мережі. Користувачі можуть вибрати один або чотири періоди відключення. Моделювання більшої кількості періодів відключень має призвести до більш надійного рішення щодо стійкості.

При цьому необхідно визначити величину критичного навантаження. Критичне навантаження - це навантаження, яке повинно бути обов'язково забезпечене електроенергією під час відключення мережі. Його можна розрахувати як відсоток типового профілю навантаження, завантажити як окремий спеціальний профіль навантаження або створити спеціально для відповідності важливим навантаженням на об'єкті.

Якщо вибрано опцію «Відсоток» (Percent), критичне навантаження є відсотком від типового профілю електричного навантаження. Якщо вибрано «Завантажити» (Upload), користувач може завантажити погодинні, 30-хвилинні або 15-хвилинні дані про критичне електричне навантаження за рік. Якщо вибрано «Побудувати» (Build), користувач може створити спеціальний профіль критичного електричного навантаження на основі вказаних компонентів навантаження.

У опції «Інформація про відключення» (Outage Information) потрібно вказати тривалість відключення (у годинах) і кількість відключень. Якщо ви обираєте модель кількох відключень, ви повинні використати поле  Use custom outage dates, а потім вказати «Дата початку відключення» (Outage start date) та «Час початку відключення» (Outage start time) для кожного відключення.

## 2.9 Фінансовий параметр

### *Option Financial*

Веб-інструмент REорт повідомляє про економічні показники фінансової життєздатності кожного випадку. Повідомлені показники включають витрати на оплату електроенергії з мережі за 1-й рік до сплати податків, витрати на оплату електроенергії протягом життєвого циклу після сплати податків, капітальні витрати до та після стимулювання, витрати на експлуатацію та технічне обслуговування за 1-й рік та життєвий цикл, загальну вартість життєвого циклу, NPV (чиста поточна вартість), період окупності, внутрішня норма прибутку та нормовану вартість енергії.

Дані для розрахунку фінансових показників рекомендовано приймати за замовчуванням (рис. 8).

Financial

Analysis period (years) 25

Host discount rate, nominal (%) 6.38%

Electricity cost escalation rate, nominal (%) 1.7%

Use third-party ownership model

Advanced inputs

Reset to default values

Рисунок 8 – Дані для розрахунку фінансових показників

### 2.10 Опція *Renewable Energy @ Emissions*

Дані для цього підрозділу прийняті за замовчуванням.

### 2.11 Опція *PV*

Витрати на фотоелектричні системи включають капітальні витрати та витрати на експлуатацію і технічне обслуговування. Капітальна вартість являє собою повну встановлену вартість, включаючи обладнання та робочу силу. Експлуатація та технічне

обслуговування включає очищення поверхні модулів та підтримування території станції в належному стані, витрати на адміністрування та заміну зламаних компонентів. Сюди також входить вартість заміни інвертора.

Капітальна вартість системи (\$/кВт-DC) базується на вартості обладнання, яке є на ринку. Для цих розрахунків рекомендується прийняти значення 800 \$/кВт.

Мінімальний і максимальний розмір PV (кВт-DC) визначається в залежності від потреб замовника, як правило, максимальне значення обмежується площею, що є доступною для встановлення модулів.

Витрати на експлуатацію та технічне обслуговування (\$/кВт-DC на рік) залежать від фактичних витрат, рекомендовано прийняти 8 \$/кВт-DC/рік.

Характеристики фотоелектричної системи визначаються низкою факторів. Як правило, модулі вибираються стандартними, тип масиву може бути на поверхні землі з фіксованим кутом нахилу модулів (Ground Mount (Fixed)), на даху з фіксованим кутом нахилу модулів (Rooftop (Fixed)), на поверхні землі з одною віссю обертання (Ground Mount (1-Axis Tracking)) (рис. 9).

The image shows a software interface for configuring photovoltaic system characteristics. It features a light orange background with several input fields and a dropdown menu. The fields are labeled as follows:

- Array type**: A dropdown menu currently showing "Ground Mount, Fixed". The dropdown list is open, showing three options: "Ground Mount, Fixed", "Rooftop, Fixed", and "Ground Mount, 1-Axis Tracking".
- Array azimuth (deg)**: An input field with a question mark icon.
- Array tilt (deg)**: An input field with a question mark icon.
- DC to AC size ratio**: An input field containing the value "1.2".
- System losses (%)**: An input field containing the value "14%".

Рисунок 9 – Характеристики фотоелектричної системи

Для фіксованого масиву азимутальний кут – це кут за годинниковою стрілкою від справжньої півночі, що описує напрямок, куди повернутий масив. Азимутальний кут  $180^\circ$  відповідає орієнтації поверхні модулів на південь групи, а азимутальний кут  $0^\circ$  – для поверхні модулів орієнтованих на північ. Для модулів з відстеженням по одній осі азимутальний кут – це кут за годинниковою стрілкою від справжньої півночі від осі обертання.

Кут нахилу – це кут від горизонталі фотоелектричних модулів у масиві. Для фіксованого масиву кут нахилу – це кут від горизонталі масиву, де  $0^\circ$  відповідає горизонтальному розміщенню модулів, а  $90^\circ$  – вертикальному. Для масивів з одновісним відстеженням кут нахилу є кутом від горизонталі до осі відстеження. Влітку краще використовувати менші кути нахилу, щоб максимізувати виробництво енергії, коли положення сонця високе. І навпаки, більші кути нахилу вигідні взимку для оптимізації меншого сонячного випромінювання. Для фотоелектричних модулів на даху будівлі зазвичай вибирають кут нахилу, що відповідає куту нахилу даху.

Коефіцієнт відношення значення постійного струму (DC) до змінного струму (AC) – це співвідношення номінального змінного струму інвертора до номінального постійного струму. Збільшення коефіцієнта збільшує продуктивність системи протягом року, але також збільшує вартість масиву. Значення за замовчуванням становить 1,20, що означає, що при номінальному значенні постійного струму 4 кВт масиву PV величина змінного струму інвертора буде 3,33 кВт. Для системи з високим співвідношенням розміру постійного струму до змінного струму, коли вихідна потужність постійного струму масиву перевищує номінальну потужність входу постійного струму інвертора, інвертор обмежує вихідну потужність масиву, збільшуючи робочу напругу постійного струму, що переміщує робочу точку масиву вниз його

кривої струм-напруга. Стандартне значення 1,20 прийняте для більшості систем.

Значення за замовчуванням для системних втрат 14% базуються на категоріях у таблиці 2.

Таблиця 2 – Значення за замовчуванням для категорій системних втрат

Категорія	Значення за замовчуванням, %
Забруднення поверхні PV ( <i>Soiling</i> )	2
Затінення ( <i>Shading</i> )	3
Неоднорідність параметрів PV ( <i>Shading</i> )	2
Втрати в проводах ( <i>Wiring</i> )	2
Втрати у з'єднаннях ( <i>Connections</i> )	0,5
Деградація PV ( <i>Light-Induced Degradation</i> )	1,5
Відхилення параметрів PV від номінальних ( <i>Nameplate Rating</i> )	1
Доступ до мережі ( <i>Availability</i> )	3

*Soiling* – втрати через бруд та інші сторонні речовини на поверхні ФЕМ, які перешкоджають сонячному випромінюванню досягати активних елементів. Забруднення залежить від місця розташування станції та умов погоди. Більші втрати від забруднення спостерігаються в районах з інтенсивним рухом транспорту, при проведенні сільськогосподарських робіт недалеко від СЕС, при тривалих періодах відсутності дощів.

*Shading* – зменшення падаючого сонячного випромінювання від тіней, спричинених об'єктами поблизу масиву, такими як будівлі чи дерева, або самозатіненням для модулів, розташованих у ряди, коли модулі в одному ряду створюють тіні на модулях у сусідньому ряду.

*Mismatch* – електричні втрати через невеликі відмінності, спричинені недосконалістю виробництва між модулями в масиві, через які модулі мають дещо відмінні характеристики струму й напруги.

*Wiring* – резистивні втрати в проводах постійного та змінного струму, що з'єднують модулі, інвертори та інші частини системи.

*Connections* – резистивні втрати в електричних з'єднувачах в системі.

*Light-Induced Degradation* – деградація, викликана світлом. Вплив зниження потужності масиву протягом перших кількох місяців його роботи, викликаного індукованим світлом деградацією фотоелементів.

*Nameplate Rating* – невідповідність показників обладнання, заявлених виробником. Польові вимірювання електричних характеристик фотоелектричних модулів у масиві можуть показати, що вони відрізняються від номінальних даних, зазначених в паспортних даних.

*Availability* – доступність. Зменшення продуктивності системи викликане запланованим і позаплановим відключенням системи для технічного обслуговування, аваріями в електромережі та іншими експлуатаційними факторами.

Стимули PV і режим оподаткування (PV Incentives and Tax Treatment) не враховуються, тому потрібно поставити «0» у всіх полях.

У полях *MACRS schedule* і *MACRS bonus depreciation* потрібно поставити «No MACRS» і «0» відповідно.

## 2.12 Параметр Акумулятор

### *Option Battery*

Накопичувач енергії моделюється як «резервуар» у веб-інструменті REopt, щоб енергію, яка вироблена під час одного періоду часу, можна було споживати під час іншого. Веб-інструмент REopt не моделює хімічний склад батареї, а включає параметри вартості, ефективності та стан заряду SOC (state of charge), які можна налаштувати відповідно до різних хімічних складів. Значення за замовчуванням є типовими для літій-іонних батарей.

Потужність батареї (кВт-АЧ) і ємність (кВт·год) незалежно оптимізуються для економічних показників і відмовостійкості, співвідношення потужності та енергії не визначено заздалегідь. За замовчуванням будь-яка технологія може заряджати накопичувач енергії, але заряд також можна обмежити певними технологіями.

Користувач може визначити характеристики моделі накопичувача енергії батареї, включаючи мінімальний SOC, початковий SOC, ефективність, мінімальний розмір, максимальний розмір, капітальні витрати та вартість заміни. Мінімальний SOC застосовується для фінансової оптимізації під час прив'язки до мережі. Під час відключення мережі SOC батареї може впасти до нуля. Користувач також може вирішити, чи можна використовувати мережу для зарядки акумулятора. Погіршення роботи батареї не включено в модель; прийнявши до уваги, що батарею буде замінено один раз протягом періоду аналізу (у десятому році за замовчуванням) на основі погіршення показників, тому виникають додаткові амортизаційні витрати на заміну батареї.

Вартість батареї визначається двома параметрами: вартістю енергетичної ємності (\$/кВт·год) і вартістю потужності (\$/кВт). Вартість енергетичної ємності – це вартість енергетичних компонентів акумуляторної системи. Вартість потужності – це вартість

компонентів живлення та взаємозв'язку акумуляторної системи (наприклад, інвертор і баланс системи). Кількість енергії, яку може зберігати акумулятор, визначається його ємністю (кВт·год), а швидкість, з якою він заряджається або розряджається, визначається його номінальною потужністю (кВт). У той час як вартість фотоелектричної системи зазвичай оцінюється лише на основі номінальної потужності (кВт), а вартість акумулятора оцінюється як по ємності (кВт·год), так і по потужності (кВт).

Енергетичні компоненти системи (наприклад, інвертор, баланс системи) враховуються показником потужності \$/кВт, а енергетичні компоненти системи (наприклад, батарея) враховуються показником енергії \$/кВт·год. Це дозволяє індивідуально оптимізувати ємність (кВт·год) і потужність (кВт) батареї для досягнення максимальної економічної ефективності на основі навантаження, тарифу та вимог до відмовостійкості системи. Деякі системи оптимізовані для забезпечення високої потужності (кВт), тоді як інші оптимізовані для більш тривалого розряду за рахунок більшої потужності (кВт·год). Для підвищення стабільності системи найкращим варіантом є можливість заряджати батарею від мережі, без обмеження розміру батареї.

Веб-інструмент REopt дозволяє користувачеві вказати, чи можна використовувати електромережу для зарядки акумулятора. Якщо для цього встановлено значення «ні», мережа не зможе зарядити акумулятор і тоді лише система відновлюваної енергії заряджатиме акумулятор. Якщо встановлено значення «Так», або мережа, або система відновлюваної енергії можуть заряджати акумулятор.

Необхідні параметри акумулятора для розрахунку вартості акумулятора наведені на рис. 10.



Energy capacity cost (\$/kWh) ?	\$455
Power capacity cost (\$/kW) ?	230
Allow grid to charge battery ?	Yes
Minimum energy capacity (kWh) ?	0
Maximum energy capacity (kWh) ?	Unlimited

Рисунок 10 – Дані для розрахунку вартості акумулятора

Витрати на заміну визначаються енергетичною потужністю та вартістю енергетичної потужності, а також роком заміни. Це очікувана вартість по ціні вартості доларів на сьогодні заміни енергетичних компонентів акумуляторної системи та силових компонентів акумуляторної системи протягом життєвого циклу проекту. Рік заміни – рік, у якому енергетичні або енергетичні компоненти акумуляторної системи замінюються протягом життєвого циклу проекту; за замовчуванням – рік 10.

Вартісні показники при заміні батареї наведені на рис. 11.

Energy capacity replacement cost (\$/kWh) ?	358
Energy capacity replacement year ?	10
Power capacity replacement cost (\$/kW) ?	159
Power capacity replacement year ?	10

Рисунок 11 – Вартісні показники при заміні батареї

Характеристики батареї приймаються за замовчуванням, а рівень заряду батареї краще вибрати, як зазначено на рис. 12.

Minimum state of charge (%) ?	20%
Initial state of charge (%) ?	50%

Рисунок 12 – Рекомендований рівень заряду батареї

Стимули для акумуляторів і податковий режим не потрібно враховувати в розрахунках (*стимули за замовчуванням, включені в REopt, відображають поточні федеральні стимули в США і тому не можуть бути застосовані в Україні*), тому «Загальна відсоткова пільга (%)» (Total percentage-based incentive) і «Знижка за загальну потужність електроенергії (\$/кВт)» (Total power capacity rebate) дорівнюють «0». Крім того, у полях **MACRS schedule** і **MACRS bonus depreciation** потрібно поставити «No MACRS» і «0» відповідно.

Для запуску сформованої моделі необхідно натиснути кнопку «Отримати результати» (Get Results).

### 3. Вихідні дані (Outputs)

#### 3.1 *Варіанти (Cases)*

Веб-інструмент REopt надає результати для трьох випадків: «Звичайний бізнес» (Business-as-Usual), «Фінансовий» (Financial) і «Стійкість» (Resilience).

*Звичайний бізнес:* у цьому випадку система закуповує електроенергію виключно від централізованої мережі. У сценарії, що моделює відключення мережі, коли критичне навантаження може повністю покриватися існуючим генератором протягом певного періоду часу, тоді «Звичайний бізнес» також включає витрати на використання цієї наявної генеруючої потужності протягом цього часу.

*Фінансовий:* випадок, який мінімізує поточну вартість усіх майбутніх витрат на енергію протягом періоду аналізу. Цей випадок може включати комбінацію мережі, PV та батареї. Цей випадок не оптимізований для випадку відключення мережі.

*Стійкість:* цей випадок оптимізований для підтримки критичного навантаження в разі відключення електромережі, одночасно мінімізуючи поточну вартість усіх майбутніх витрат на

енергію протягом періоду аналізу. Цей випадок може включати в себе комбінацію мережі, PV, акумулятора та резервного генератора.

### 3.2 *Розмір системи (System Size)*

Веб-інструмент REopt використовує математичну модель оптимізації для визначення оптимального за витратами розміру та розподілу розподілених джерел енергії (РДЕ), включно з PV, акумулятором, навантаженням системи, вартістю електроенергії та палива, сонячними ресурсами та іншими фінансовими витратами.

Технологія, як правило, рекомендована, якщо вона зменшує вартість енергії протягом життєвого циклу для об'єкту. Загалом РДЕ часто є економічно ефективним на об'єктах, які мають вищу ставку корисності, вищий рівень вартості електроенергії, нижчу вартість РДЕ, хороші стимули та хороший відновлюваний ресурс, що робить енергію, вироблену РДЕ, дешевшою, ніж енергія, придбана з мережі.

Якщо РДЕ не рекомендовано, це, ймовірно, тому, що вартість електроенергії з мережі та відновлюваних ресурсів є низькими, і тому РДЕ можуть бути неконкурентоспроможним з цінами на електроенергію з мережі на даний момент. Найдешевшим варіантом може бути продовження закупівлі електроенергії з мережі. З іншого боку, якщо модель генерує більшу кількість електроенергії, яка потрібна для системи, внаслідок чого використання електроенергії з мережі скорочується або вона віддається в мережу без будь-якої вартості, це ймовірно тому, що вартість, яку система отримує від енергії, виробленої в інший час, зменшує загальну вартість життєвого циклу енергії, навіть якщо енергія обмежена в певні години. Якщо користувач вказав мінімальний

розмір РДЕ або вимогу до відмовостійкості, РДЕ можуть бути рекомендовані відповідати цим вимогам, навіть якщо це не зменшує вартість життєвого циклу енергії.

### 3.3 *Стратегія диспетчеризації (Dispatch Strategy)*

Модель оптимізує стратегію диспетчеризації кожної технології для забезпечення навантаження за мінімальних витрат енергії протягом життєвого циклу. На кожному часовому етапі генерація може обслуговувати навантаження, зберігатися, скорочуватися або, у випадку електроенергії, експортуватися назад в мережу. Технології зберігання можуть використовуватись для зарядження або розрядження батареї. Стратегії диспетчеризації для електричних навантажень представлені в інтерактивних графіках, які дозволяють користувачеві прокручувати рік, збільшувати масштаб у вибрані дні та зменшувати його, щоб побачити дані за весь рік.

### 3.4 *Економіка (Economics)*

Веб-інструмент REopt повідомляє про економічні показники фінансової життєздатності кожного випадку. Ці показники включають витрати на електроенергію з мережі за 1 рік до оподаткування, витрати на електроенергію з мережі протягом життєвого циклу після оподаткування, капітальні витрати до та після стимулів, витрати на експлуатацію та обслуговування за 1 рік та життєвий цикл, загальну вартість життєвого циклу, NPV (net present value), період окупності, внутрішню норму прибутку та нормовану вартість енергії.

Метою оптимізації є мінімізація витрат життєвого циклу (і, отже, максимізація NPV). Вартість життєвого циклу – це поточна вартість витрат після сплати податків і пільг, пов'язаних з кожним випадком. Для звичайного випадку це включає лише попит

на електроенергію з мережі та витрати на інші види енергії, а також майбутні витрати на експлуатацію та технічне обслуговування для будь-яких існуючих PV та генераторів. У сценарії, коли критичне навантаження повністю задовольняється існуючим резервним дизель-генератором, цей розрахунок також включає витрати на паливо та експлуатацію використання цієї існуючої генеруючої потужності для випадку відключення від мережі. Для фінансових випадків або випадків стійкості це включає попит на електроенергію з мережі та витрати на інші види енергії, а також капітальні витрати, податкові пільги та стимули, а також витрати на експлуатацію та технічне обслуговування, пов'язані з проектом, включаючи PV та зберігання енергії.

NPV (net present value) – це теперішня вартість заощаджень (або витрат, якщо вони від'ємні), реалізованих проектом. Вона розраховується як різниця між вартістю енергії протягом життєвого циклу у звичайному випадку та вартістю енергії протягом життєвого циклу у випадку стійкості або фінансовому випадку. Для фінансового аналізу NPV буде більшим або дорівнює нулю. Для аналізу стійкості NPV може бути позитивним або негативним. Від'ємне значення NPV вказує на те, що проект не є економічно життєздатним, або, іншими словами, власник системи платитиме більше, ніж базова вартість електроенергії.

### 3.5 *Стійкість (Resilience)*

Якщо користувач вибирає оцінку стійкості, веб-інструмент REopt оптимізує систему для задоволення типового навантаження за мінімальних витрат протягом життєвого циклу з додатковим обмеженням, що навантаження має виконуватися без мережі протягом визначених періодів відключень. Потім результати порівнюють систему, яка оптимізована для стійкості, з оптимізованою для фінансової вигоди. Крім того, користувачі можуть отримати доступ до інструменту Energy Resilience Performance

(ERP) на сторінці результатів. Результат оптимізації припускає, що РДЕ доступні на початку відключень і не буде збою під час відключення. ERP дозволяє користувачеві оцінити оптимізаційну архітектуру REорт за допомогою реальних значень продуктивності надійності для різних типів РДЕ.

### ***3.6 Стійкість і фінансове порівняння (Resilience vs. Financial Comparison)***

У таблиці порівняння стійкості та фінансових показників показано відмінності в архітектурі та вартості між системою стійкості та фінансовою системою, яка не враховує вимог до стійкості. Технології РДЕ, вибрані для системи Resilience, та їхні розміри передбачають, що вони на 100% доступні та надійні. Щоб оцінити ймовірність обслуговування критичного навантаження з урахуванням змінної надійності та для всіх можливих відключень протягом року, необхідно запустити ERP, доступ до якого можна отримати на сторінці результатів REорт у розділі Інструмент оцінки енергетичної стійкості (Energy Resilience Performance Tool).

### ***3.7 Виробництво відновлюваної енергії (Renewable Energy Outputs)***

У таблиці порівняння результатів веб-інструмент REорт повідомляє про відсоток річного споживання електроенергії, що забезпечується локальною генерацією відновлюваної енергії. За замовчуванням цей відсоток включає будь-яку відновлювану електроенергію, яка експортується в мережу, але користувач може змінити це припущення на сторінці введення.

## 4. Результати (Results)

Результати REopt узагальнюють найбільш рентабельну комбінацію фотоелектричної системи, накопичувача акумулятора та аварійного генератора, призначеного для підтримки критичного навантаження на систему.

Рекомендований розмір сонячної установки, потужність і ємність батареї наведені нижче (рис. 13).



Рисунок 13 – Рекомендований розмір сонячної установки, потужність і ємність акумулятора

Потенційна економія протягом життєвого циклу (25 років) для даного проекту є збитковою (рис. 14).

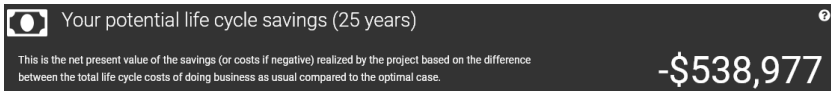


Рисунок 14 – Потенційна економія протягом життєвого циклу (25 років)

Потенційна стійкість системи забезпечується протягом 72 годин при різних періодах відключень і 50% критичного навантаження (рис. 15).

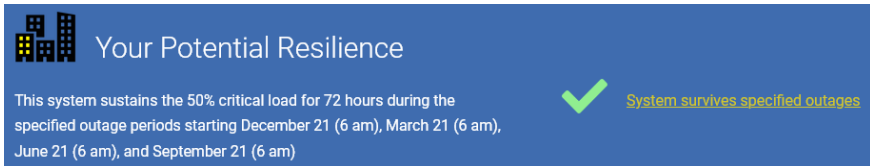


Рисунок 15 – Потенційна стійкість системи

Для аналізу режимів роботи системи під час відключень необхідно проаналізувати інтерактивні графіки роботи системи в її нормальних режимах роботи за ті ж періоди (рис. 16-19).

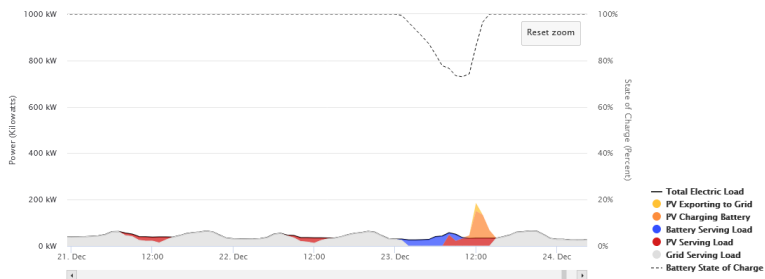


Рисунок 16 – Інтерактивні графіки робота системи з 6 ранку 21 грудня протягом 72 год

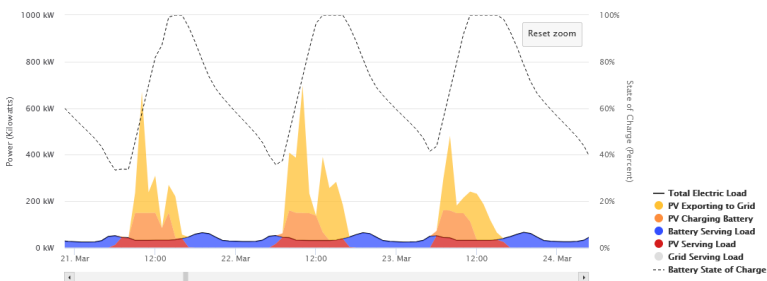


Рисунок 17 – Інтерактивні графіки робота системи з 6 ранку 21 березня протягом 72 год

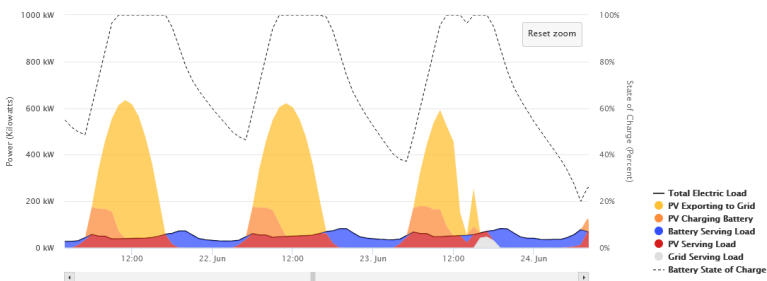


Рисунок 18 – Інтерактивні графіки робота системи з 6 ранку 21 червня протягом 72 год



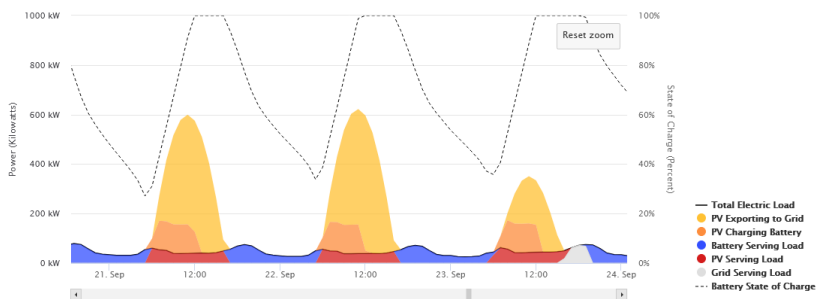


Рисунок 19 – Інтерактивні графіки роботи системи з 6 ранку 21 вересня протягом 72 год

Як видно з інтерактивних графіків, режими роботи системи залежать від генерації та навантаження СЕС. Так, у грудні навантаження обслуговувалося від мережі, і лише невелика кількість електроенергії була вироблена в денний час роботи СЕС. 23 грудня спостерігалось збільшення генерації СЕС і, відповідно, покриття навантаження за рахунок батареї та СЕС. В результаті значної генерації СЕС електроенергія заряджала батарею, а певна частина виробленої електроенергії експортувалася в мережу.

У березні, червні та вересні режими роботи системи відрізняються через значну генерацію електроенергії СЕС. Навантаження покривається акумулятором і СЕС, значна частина електроенергії експортується в мережу. Короткочасно (23 червня та 23 вересня у вечірній час) навантаження системи було забезпечено з мережі.

Річне виробництво електроенергії PV та її використання показано на рис. 20.

Average Annual Dispatch Results	
PV Serving Load (kWh)	156,220
PV Charging Battery (kWh)	182,600
PV Exported to Grid (kWh)	633,601
PV Curtailment (kWh)	0
<b>PV Total Electricity Produced (kWh)</b>	<b>972,421</b>

Рисунок 20 – Річне виробництво електроенергії системою та її використання

Середньорічні результати використання заряду батареї для покриття навантаження показані на рис. 21.

Average Annual Dispatch Results	
<b>Battery Serving Load (kWh)</b>	<b>164,339</b>

Рисунок 21 – Середньорічні результати використання заряду батареї для покриття навантаження

Графік тривалості чистого навантаження (рис. 22) представляє потенційне зниження пікового електричного навантаження мережі за кожну годину року, яке забезпечуватимуть рекомендовані технології, якщо їх буде впроваджено.

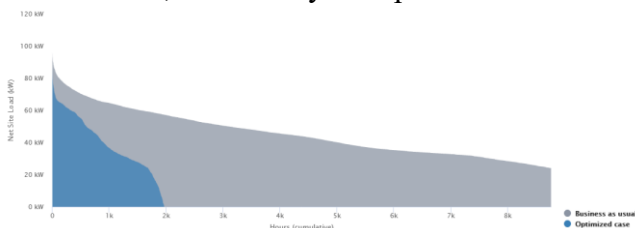


Рисунок 22 – Графік тривалості чистого навантаження

Порівняння показників системи при опціях стійкості та фінансів (Resilience vs. Financial Comparison) (рис. 23) показує від-

мінності в архітектурі та вартості між системою стійкості та фінансовою системою, яка не враховує вимоги до стійкості. Технології РДЕ, вибрані для системи Resilience, та їхні розміри передбачають, що вони на 100% доступні та надійні. Для оцінки ймовірності обслуговування критичного навантаження з урахуванням змінної надійності та для всіх можливих відключень протягом року необхідно перейти до показників енергетичної стійкості (the Energy Resilience Performance – ERP).

	Business As Usual	Resilience	Financial
System	None	887 kW PV 117 kW Battery 923 kWh Battery	96 kW PV 0 kW Battery 0 kWh Battery
NPV	\$0	-\$538,977	\$15,938

Рисунок 23 – Порівняння показників системи за варіантами стійкості та фінансів

Рекомендовані системні параметри для варіанту «Стійкість» такі: потужність PV становить 887 кВт-DC, потужність батареї – 117 кВт-AC, ємність батареї – 923 кВт·год. Цей випадок оптимізований для підтримки критичного навантаження в разі збою мережі. Ці розміри системи мінімізують вартість життєвого циклу енергії на місці, враховуючи набір вхідних даних, що використовуються в цьому аналізі.

Випадок «Фінансовий» мінімізує поточну вартість усіх майбутніх витрат на енергію протягом періоду аналізу. Цей випадок включає в себе комбінацію корисності та PV.

Поточна вартість заощаджень (або витрат, якщо вони від’ємні), що реалізовані проектом, розраховується як різниця між вартістю енергії протягом життєвого циклу у випадку «Бізнес як завжди» та вартістю енергії протягом життєвого циклу у випадку «Стійкість» або вартістю енергії протягом життєвого циклу у

варіанті «Фінансовий». Як видно NPV для випадку «Стійкість» є від’ємним, а для випадку «Фінансовий» – позитивним.

Електричне навантаження на кожну годину періоду відключення має забезпечуватися PV енергією, накопичувачем або резервним дизель-генератором. PV генерують енергію відповідно до того, коли ресурс доступний, і або обслуговують навантаження, або заряджають батарею. Навантаження не може бути забезпечене тільки генерацією PV, воно забезпечується або розрядкою батареї, або резервним дизель-генератором. Під час відключення мережі надлишок виробленої електроенергії обрізається інверторами. Модель оптимізації вирішує, заряджати, розряджати або нічого не робити з акумулятором щогодини. Якщо він заряджається чи розряджається, система також вирішує, наскільки. Рівень заряду акумулятора на графіках показано чорною пунктирною лінією. Розмір батареї визначається таким чином, щоб мінімізувати вартість енергії протягом життєвого циклу.

На першому графіку відключення (рис. 24), який почався 21 грудня о 6 ранку, можна побачити, що рівень заряду батареї в цей час повинен становити 97%, і вона була розряджена о 8 ранку 23 грудня, а потім заряджена від PV до рівня 37%, і потім була повністю розряджена о 6 ранку 24 грудня.

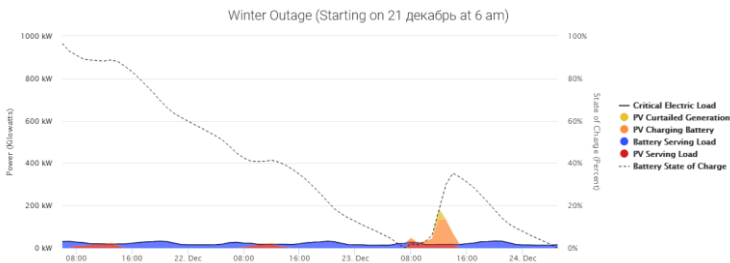


Рисунок 24 – Режими роботи обладнання системи, відключення 21 грудня о 6 годині на 72 години

Розподіл виробництва електроенергії при першому відключенні (рис. 25) показує, яким чином обслуговується критичне навантаження для цього відключення, включаючи розбивку того, як відбувається виробництво електроенергії за технологіями.

PV	
Average Annual Dispatch Results	
Outage 1: PV Serving Load (kWh)	316
Outage 1: PV Charging Battery (kWh)	359
Outage 1: PV Curtailment (kWh)	51
Outage 1: PV Total Electricity Produced (kWh)	726

Battery	
Average Annual Dispatch Results	
Outage 1: Battery Serving Load (kWh)	1,197

Рисунок 25 – Розподіл виробництва електроенергії при відключенні 21 грудня

На другому графіку відключення (рис. 26), який почався 21 березня о 6 годині ранку, видно, що живлення навантаження було за рахунок PV, більша частин енергії, згенерованої PV було обрізана, деяка частина була використана для заряджання батареї. Мінімальний рівень заряду батареї для забезпечення критичного навантаження протягом ночі становив 30%.

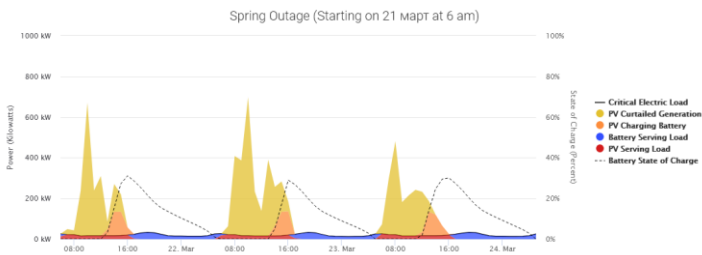


Рисунок 26 – Режими роботи обладнання системи, відключення 21 березня о 6 годині на 72 години

Розподіл виробництва електроенергії при відключенні 2 (рис. 27) показує, як у цьому випадку обслуговується критичне навантаження. Близько 80% електроенергії, виробленої PV, було зрізано, це означає, що PV під час цього відключення може жити все навантаження.

PV	
Average Annual Dispatch Results	
Outage 2: PV Serving Load (kWh)	600
Outage 2: PV Charging Battery (kWh)	877
Outage 2: PV Curtailment (kWh)	5,898
Outage 2: PV Total Electricity Produced (kWh)	7,375

Battery	
Average Annual Dispatch Results	
Outage 2: Battery Serving Load (kWh)	801

Рисунок 27 – Розподіл виробництва електроенергії при відключенні 21 березня

На третьому графіку відключення (рис. 28), який розпочався 21 червня о 6 годині ранку, видно, що навантаження живилося від PV, більша частина електроенергії була обрізана інверторами, незначна частина використовувалася для заряджання батареї. Мінімальний рівень заряду батареї для обслуговування навантаження вночі залежить від прогнозу сонячного випромінювання на наступний день. Протягом періоду відключення необхідний мінімальний рівень заряду батареї змінювався з 23 до 38%.

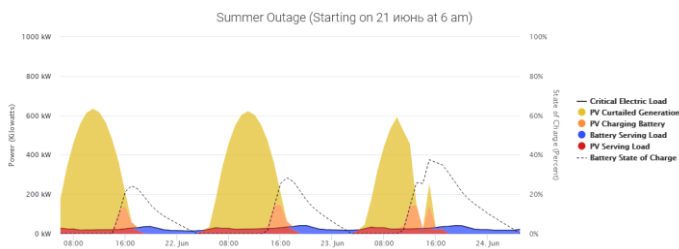


Рисунок 28 – Режими роботи обладнання системи, відключення 21 червня о 6 годині на 72 години

Розподіл виробництва електроенергії при третьому відключенні (рис. 29) показує, як обслуговується критичне навантаження. Близько 86% електроенергії, виробленої PV, було зрізано інверторами, це означає, що фотоелектрична енергія під час цього відключення може забезпечувати все навантаження.

PV	
Average Annual Dispatch Results	
Outage 3: PV Serving Load (kWh)	1,051
Outage 3: PV Charging Battery (kWh)	883
Outage 3: PV Curtailment (kWh)	11,817
Outage 3: PV Total Electricity Produced (kWh)	13,751

Battery	
Average Annual Dispatch Results	
Outage 3: Battery Serving Load (kWh)	793

Рисунок 29 – Розподіл виробництва електроенергії при відключенні 21 червня

На четвертому графіку відключення (рис. 30), яке почалося 21 вересня о 6 годині ранку, видно, що навантаження було забезпечено PV і більша частина енергії було зрізана, деяка частина енергії використовувалася для заряджання акумулятора. Мінімальний рівень заряду батареї для обслуговування навантаження протягом наступних ночей залежить від прогнозу сонячного випромінювання на наступний день. Цей рівень заряду змінювався від 30 до 37%.

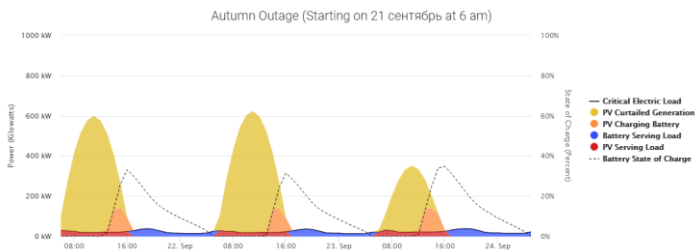


Рисунок 30 – Режими роботи обладнання системи, відключення 21 вересня о 6 годині на 72 години

Показники виробництва електроенергії та її споживання під час відключення у вересні наведено на рис. 31. Близько 84,5% електроенергії, виробленої PV, було обрізано інверторами, це означає, що PV під час цього відключення може повністю забезпечити все навантаження системи, а не тільки критичне навантаження.

The screenshot displays two sections: 'PV' and 'Battery'. Each section has a header 'Average Annual Dispatch Results' and a table of metrics for 'Outage 4'.

PV	
Average Annual Dispatch Results	
Outage 4: PV Serving Load (kWh)	746
Outage 4: PV Charging Battery (kWh)	966
Outage 4: PV Curtailment (kWh)	9,366
Outage 4: PV Total Electricity Produced (kWh)	11,078

Battery	
Average Annual Dispatch Results	
Outage 4: Battery Serving Load (kWh)	868

Рисунок 31 – Розподіл виробництва електроенергії при відключенні 21 вересня

Рішення з оптимізації вибирається для підтримки критичного навантаження протягом указанного(их) періоду(ів) відключень від мережі за найменших витрат. Рішення передбачає, що розподілені енергетичні ресурси абсолютно надійні. Ефективність енергетичної стійкості рішення оцінюється на основі надійності включених активів для всіх можливих періодів простою протягом року. SOC для початку відключення в будь-який час року базується на результатах диспетчеризації оптимізації. Доступність батареї становить 97%, а PV – 98%.

Порівняння результатів варіантів звичайного ведення бізнесу з оптимальним випадком показано на рис 32.

Таблиця порівняння показує різницю в архітектурі та вартості між системою стійкості та фінансовою системою, яка не враховує вимоги стійкості. Технології РДЕ, що вибрані для системи Resilience, та їхні розміри передбачають, що вони на 100% доступні та надійні.



	Business As Usual	Resilience	Financial
System Size			
PV Size	0 kW	887 kW	96 kW
Battery Power	0 kW	117 kW	0 kW
Battery Capacity	0 kWh	923 kWh	0 kWh
Energy Production and Fuel Use			
Average Annual PV Energy Production	0 kWh	972,421 kWh	105,556 kWh
Original Average Annual Energy Supplied from Grid	767,538 kWh	N/A	N/A
Adjusted Average Annual Energy Supplied from Grid	399,120 kWh	78,560 kWh	311,739 kWh
Renewable Energy Metrics			
Annual Renewable Electricity (% of electricity consumption)	0%	239%	26%

Рисунок 32 – Порівняння результатів

Для системи, яка визначена за фінансовими показниками, видно, що розмір PV становить 96 кВт, а річна генерація відновлюваної енергетики забезпечить 26% потреб навантаження системи. Для системи Resilience потрібна PV потужністю 887 кВт, потужність батареї 117 кВт і ємність батареї 923 кВт·год. Скоригований середньорічний обсяг енергії, що постачається з мережі для системи Resilience, становить 78560 кВт·год, а для фінансової системи – 311739 кВт·год, і відповідно 19,7% та 78% від випадку «Бізнес як завжди».

Підсумкові фінансові показники показані на рис. 33.

Total Upfront Capital Cost Before Incentives	N/A	\$1,156,260	\$77,013
Year 1 O&M Cost, Before Tax	\$0	\$15,963	1,733
Total Life Cycle Costs	\$455,068	\$994,045	\$439,130
Net Present Value	\$0	-\$538,977	\$15,938
Payback Period	N/A	0 yrs	10.89 yrs
Internal Rate of Return	N/A	0.0%	8.0%
PV Levelized Cost of Energy	N/A	\$0.075/kWh	\$0.075/kWh

Рисунок 33 – Підсумкові фінансові показники

Вартість життєвого циклу – теперішня вартість витрат після сплати податків і стимулів, пов'язаних з кожним випадком. Для звичайного випадку це включає лише витрати на закупівлю електричної енергії з мережі, майбутні витрати на експлуатацію та технічне обслуговування будь-якої існуючої фотоелектричної

системи та генератора. У сценарії, коли критичне навантаження повністю задовольняється існуючим резервним дизель-генератором, цей розрахунок також включає витрати на паливо та експлуатацію використання цієї існуючої генеруючої потужності для забезпечення навантаження під час відключення від мережі. Для фінансових випадків або випадків стійкості це включає витрати на закупівлю електроенергії, а також капітальні витрати, податкові пільги та стимули, а також витрати на експлуатацію та технічне обслуговування, пов'язані з проектом, включаючи PV, накопичувач енергії та загальний резервний дизельний генератор.

NPV – це поточна вартість заощаджень (або витрат, якщо вони від'ємні), реалізованих проектом. Це розраховується як різниця між вартістю енергії протягом життєвого циклу у звичайному випадку та вартістю енергії протягом життєвого циклу у випадку стійкості або фінансовому випадку. Для фінансового аналізу NPV буде більшим або дорівнює нулю, якщо тільки користувач не встановив мінімальний розмір технології. Для аналізу стійкості NPV може бути позитивним або негативним. Негативний NPV для Resilience Case вказує на те, що проект не є економічно життєздатним. Позитивний NPV для фінансового обґрунтування вказує на те, що проект є економічно життєздатним, а період окупності становить 10,89 років.

## Кроки виконання завдання

Для виконання завдання необхідно виконати такі кроки:

1. Увійти в програму [REopt](#) і вибрати вкладку REopt Tool.

2. Зробити Step 1.

Single Site 🏠

3. Зробити Step 2.

Cost Savings \$

Resilience 🛡️

4. Зробити Step 3.

PV ⚙️

Battery 🔋

Grid ⚡

5. Ввести дані в закладці «**Site and Utility**»

\* Site location ? Мерефа, Харьковская область, Украина, 62472 [Use sample site](#)

\* Electricity rate ?

Use custom electricity rate ?

Annual  Monthly  Detailed  URDB Label  Hourly Upload

Energy Cost (\$/kWh) Demand Cost (\$/kW/month)

0.105 0.01

6. Натиснути

[+ Optional inputs](#)

7. Визначити поверхню розміщення та площу доступну для розміщення СЕС. Для перерахунку гектарів у акри використуйте [калькулятор](#).

PV & wind space available  Land only  Roofspace only  Land & roofspace

Land available for PV & Wind (acres) ? 1.24 default = Unlimited

8. Вказати параметри

Net metering system size limit (kW) ? 30

Technologies that can net meter ?

PV

Wind

CHP

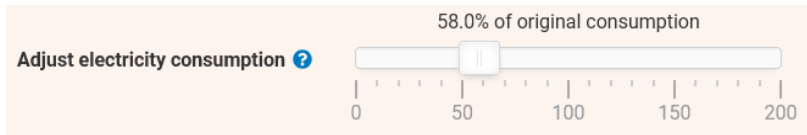
Wholesale rate (\$/kWh) ? 0.07

9. В закладці «**Load Profiles**» в залежності від умов завдання вибрати тип будівлі

\* Type of building ?

Office - Small

10. В залежності від умов завдання вибрати величину річного споживання електроенергії, яка регулюється повзунком. Для даного завдання річне споживання електричної енергії об'єкту складає 50000 кВт\*год



11. Ввести в закладці «**Site and Utility**» величину критичного навантаження в залежності від умов завдання

Critical load factor (%) ?

45

12. В залежності від умов завдання ввести дані тривалості відключень та дати і години відключень

\* Outage duration (hours) ? 48

\* Number of Outages ? Multiple-Outage Model

Use custom outage dates ?

	Outage 1	Outage 2	Outage 3	Outage 4
* Outage start date ?	January 15	April 15	September 15	December 15
* Outage start time ?	6 AM	6 AM	6 AM	6 AM

13. В закладках «**Financial**» і «**Renewable Energy & Emissions**» показники прийняти за замовчуванням.

14. В закладці «**PV**» встановити показники в залежності від умов завдання та за замовчуванням

System capital cost (\$/kW-DC) [?](#)

Existing PV system?

Minimum new PV size (kW-DC) [?](#)

Maximum new PV size (kW-DC) [?](#)

Show fewer inputs

PV Costs

O&M cost (\$/kW-DC per year) [?](#)

PV System Characteristics

Module type [?](#)

Array type [?](#)

Array azimuth (deg) [?](#)

Array tilt (deg) [?](#)

DC to AC size ratio [?](#)

System losses (%) [?](#)

PV generation profile [?](#)  Файл не выбран.

PV Station Search Radius (mi) [?](#)

MACRS schedule [?](#)

MACRS bonus depreciation [?](#)

## 15. В закладці «Battery» встановити показники

Energy capacity cost (\$/kWh) [?](#)

Power capacity cost (\$/kW) [?](#)

Allow grid to charge battery [?](#)

Minimum energy capacity (kWh) [?](#)

Maximum energy capacity (kWh) [?](#)

Energy capacity replacement cost (\$/kWh) ?	<input type="text" value="358"/>
Energy capacity replacement year ?	<input type="text" value="10"/>
Power capacity replacement cost (\$/kW) ?	<input type="text" value="159"/>
Power capacity replacement year ?	<input type="text" value="10"/>
Minimum state of charge (%) ?	<input type="text" value="20%"/>
Initial state of charge (%) ?	<input type="text" value="50%"/>
Total percentage-based incentive (%) ?	<input type="text" value="0"/>
Total power capacity rebate (\$/kW) ?	<input type="text" value="0"/>
MACRS schedule ?	<input type="text" value="No MACRS"/>
MACRS bonus depreciation ?	<input type="text" value="0%"/>

16. Запустити процес моделювання

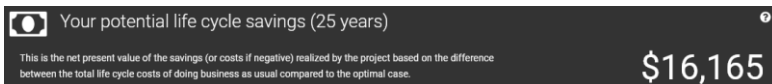
Get Results →

## Результати моделювання

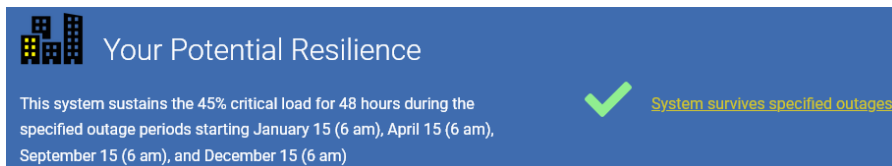
### 1. Рекомендовані розміри PV та батареї



### 2. Потенційні заощадження за 25 років

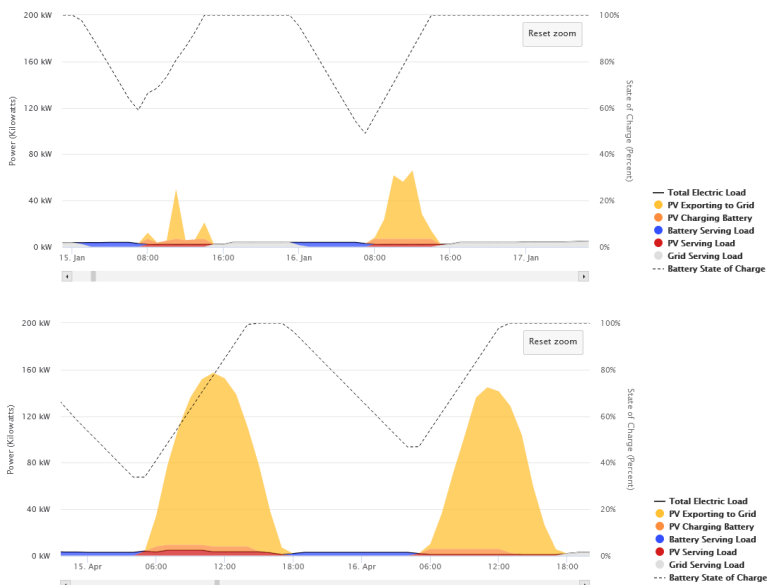


### 3. Потенційна стійкість системи



### 4. Графіки нормальних режимів роботи системи у визначені

дні





## 5. Річні показники роботи елементів системи

### PV

#### Average Annual Dispatch Results

PV Serving Load (kWh)	27,258
PV Charging Battery (kWh)	11,845
PV Exported to Grid (kWh)	187,507
PV Curtailment (kWh)	0
<b>PV Total Electricity Produced (kWh)</b>	<b>226,610</b>

### Battery

#### Average Annual Dispatch Results

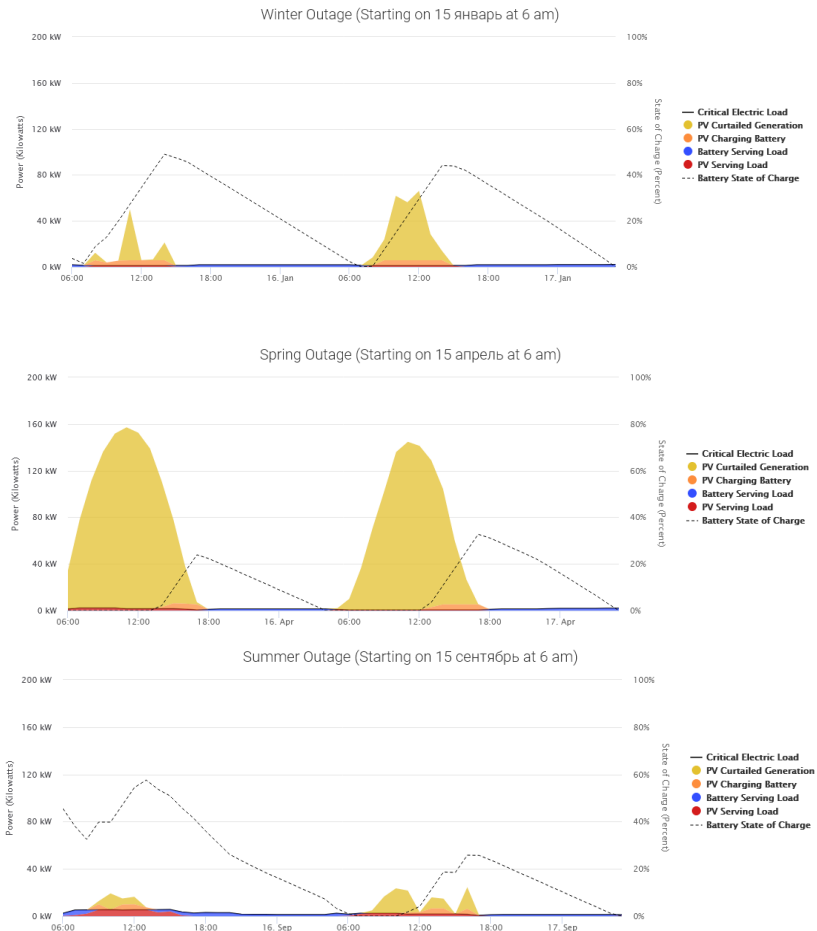
<b>Battery Serving Load (kWh)</b>	<b>10,660</b>
-----------------------------------	---------------

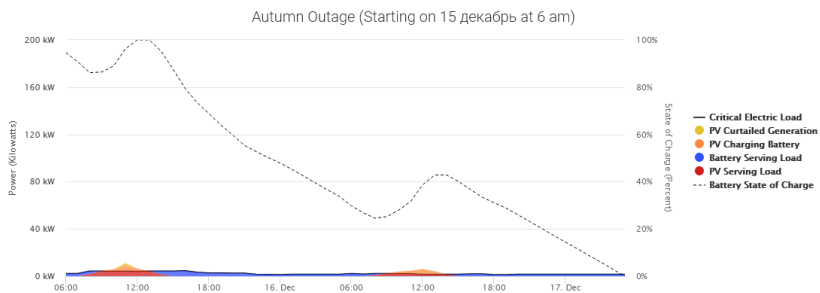


## 6. Показники параметрів системи при різних варіантах проектування

	Business As Usual ?	Resilience ?	Financial ?
System ?	None	207 kW PV 5 kW Battery 61 kWh Battery	207 kW PV 0 kW Battery 0 kWh Battery
NPV ?	\$0	\$16,165	\$44,352

## 7. Графіки режимів роботи системи у дні відключень від мережі





## 8. Показники параметрів системи при відключеннях

PV	
Average Annual Dispatch Results	
Outage 1: PV Serving Load (kWh)	16
Outage 1: PV Charging Battery (kWh)	59
Outage 1: PV Curtailment (kWh)	290
Outage 1: PV Total Electricity Produced (kWh)	365

Battery	
Average Annual Dispatch Results	
Outage 1: Battery Serving Load (kWh)	57

PV	
Average Annual Dispatch Results	
Outage 2: PV Serving Load (kWh)	27
Outage 2: PV Charging Battery (kWh)	36
Outage 2: PV Curtailment (kWh)	2,101
Outage 2: PV Total Electricity Produced (kWh)	2,164

Battery	
Average Annual Dispatch Results	
Outage 2: Battery Serving Load (kWh)	33

PV	
Average Annual Dispatch Results	
Outage 3: PV Serving Load (kWh)	59
Outage 3: PV Charging Battery (kWh)	33
Outage 3: PV Curtailment (kWh)	120
Outage 3: PV Total Electricity Produced (kWh)	212

Battery	
Average Annual Dispatch Results	
Outage 3: Battery Serving Load (kWh)	58

PV	
Average Annual Dispatch Results	
Outage 4: PV Serving Load (kWh)	37
Outage 4: PV Charging Battery (kWh)	21
Outage 4: PV Curtailment (kWh)	2
Outage 4: PV Total Electricity Produced (kWh)	59

Battery	
Average Annual Dispatch Results	
Outage 4: Battery Serving Load (kWh)	75

## 9. Результати порівняння варіантів

	Business As Usual	Resilience	Financial
System Size			
PV Size	0 kW	207 kW	207 kW
Battery Power	0 kW	5 kW	0 kW
Battery Capacity	0 kWh	61 kWh	0 kWh
Energy Production and Fuel Use			
Average Annual PV Energy Production	0 kWh	226,610 kWh	226,610 kWh
Original Average Annual Energy Supplied from Grid	86,113 kWh	N/A	N/A
Adjusted Average Annual Energy Supplied from Grid	49,946 kWh	12,027 kWh	22,687 kWh
Renewable Energy Metrics			
Annual Renewable Electricity (% of electricity consumption)	0%	451%	454%

## 10. Висновки на основі отриманих результатів

За результатами моделювання енергетичної системи, яка складається із PV і Battery, яка під'єднана до мережі і яка використовується для забезпечення електричною енергією малої офісної будівлі розміщеної на території м. Мерефа Харківської області і яка споживає 50000 кВт\*год електроенергії за рік з критичним навантаженням 45% та тривалістю відключень 48 годин 15 січня, 15 квітня, 15 вересня та 15 грудня встановлено, що рекомендована потужність СЕС повинна бути 207 кВт, потужність батареї 5 кВт і ємність 61 кВт\*год. В цьому випадку дана система забезпечить стійкість при відключеннях і потенційні заощадження за 25 років будуть складати 16165 доларів США.

За рік експлуатації СЕС даної енергетичної системи зможе згенерувати 226610 кВт\*год електричної енергії, 82,3% якої буде передано до мережі, 12 % буде спожито навантаженням системи і 5,2% буде використано для зарядки батареї.

З економічної точки зору система повинна мати тільки СЕС потужністю 207 кВт і не мати батареї. У цьому випадку заощадження будуть складати 44352 долари США.

Найгіршим варіантом відключення системи від мережі є відключення 15 грудня, коли спостерігається мінімальна генерація СЕС і навантаження системи забезпечується в основному за рахунок батареї.

При створенні енергетичної системи з PV і Battery споживання електричної енергії з мережі значно зменшується, і для системи, що побудована на основі показників стійкості (Resillience), електроенергія з мережі буде складати 25% для забезпечення навантаження. У випадку системи, побудованої на основі економічних показників (Financial), електроенергія з мережі буде складати 45,4% для забезпечення навантаження.

## *Питання для самоконтролю*

1. З якою метою використовується веб-інструмент REopt?
2. Які основні випадки використання веб-інструменту REopt?
3. З яким кроком часу моделюються процеси веб-інструментом REopt?
4. Якими джерелами може забезпечуватися електричне навантаження у веб-інструменті REopt?
5. Які переваги реєстрації та створення облікового запису у веб-інструменті REopt?
6. Яке призначення Step 0?
7. Яке призначення Step 1?
8. Яке призначення Step 2?
9. Яке призначення Step 3?
10. Яке призначення Step 4?
11. Яка вартість електроенергії для побутових споживачів України з 1.06.2024 року?
12. Які є варіанти місць розміщення фотоелектричних модулів?
13. Як можна регулювати профіль електричних навантажень типових будівель?
14. Скільки періодів відключень передбачено у веб-інструменті REopt?
15. Які фактори враховуються при визначенні економічних показників?
16. Що таке DC to AC ratio?
17. Які категорії втрат враховуються при розрахунках?
18. За якими показниками визначається вартість батареї?
19. Яка періодичність заміни батареї?
20. Для яких випадків надаються результати моделювання?

## *Використані джерела інформації*

1. World Energy Outlook 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.
2. Energy outlook 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2024>.
3. REopt: Renewable Energy Integration & Optimization. URL: <https://www.nrel.gov/reopt/>.
4. The REopt Web Tool User Manual. Kate Anderson, Dan Olis, Bill Becker, Linda Parkhill, Nick Laws, Xiangkun Li, Sakshi Mishra, Ted Kwasnik, Andrew Jeffery, Emma Elgqvist, Kathleen Krah, Dylan Cutler, Alex Zolan, Nick Muerdter, Rob Eger, Andy Walker, Chris Hampel, Gregg Tomberlin, Amanda Farthing, Jeffrey Marqusee, Hallie Dunham. URL: <https://reopt.nrel.gov/tool/reopt-user-manual.pdf#page=5>.
5. Постанова Кабінету Міністрів України від 31 травня 2024 р. № 632. URL: <http://surl.li/mpwdqs>.

## *Вихідні дані для розрахунку РГЗ*

1. Місцем розміщення енергетичного об'єкту є місце проживання студента/студентки або його/її батьків.

2. Площа доступна для розміщення СЕС (га) – день народження студента/студентки це % від площі 2 га (якщо студент/студентка народилася 12 числа, то площа  $2 * 0,12 = 0,24$  га).

3. Тип будівлі (табл. 1) визначається за номером місяця народження студента/студентки (якщо місяць народження квітень, то тип будівлі Warehouse).

4. Річне споживання електроенергії визначається у % від номінального споживання будівлі в залежності від місяця народження студента/студентки (зимові місяці – 20%, весняні – 30%, літні – 40%, осінні – 50%).

5. Критичне навантаження для всіх варіантів 40% від номінального навантаження.

6. Дата першого відключення від мережі визначається датою народження студента/студентки (якщо дата народження 12 вересня, то перше відключення від мережі теж 12 вересня). Інші дати відключення повинні бути з інтервалом 3 місяці (відповідно 12 грудня, 12 березня і 12 червня).

7. Тривалість відключення об'єкту від мережі визначається в залежності від місяця народження студента/студентки (зимові місяці – 12 години, весняні – 10 годин, літні – 8 години, осінні – 6 годин).

8. Кут нахилу модулів СЕС прийняти  $37^{\circ}$ , азимут  $180^{\circ}$ .

## *Зразок титульного листка РГЗ*

Державний біотехнологічний університет  
Факультет енергетики, робототехніки та комп'ютерної інженерії  
Кафедра електропостачання та енергетичного менеджменту

*Розрахунково-графічне завдання*

### **Визначення параметрів енергетичної системи з відновлювальними джерелами енергії використовуючи веб-інструмент REopt**

Місце розміщення енергетичної системи  
м. Мерефа Харківської області

Виконав студент  
гр. 141-22м-01 (51-Ем ОНП)  
**Микола Шевченко**  
Перевірив  
професор **Олександр Мороз**

Харків, 2024



Навчальне видання

## **ПРОЕКТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

**Методичні вказівки до виконання РГЗ**

**Визначення параметрів енергетичної системи  
з відновлювальними джерелами енергії використовуючи  
веб-інструмент REopt**

Укладачі:

**МОРОЗ** Олександр Миколайович  
**МІРОШНИК** Олександр Олександрович

Формат 60×84/16. Гарнітура Times New Roman  
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.  
Ум. друк. арк. 3,2. Наклад 100 пр.

Державний біотехнологічний університет  
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44