

Шокар'ов Дмитро Анатолійович, к.т.н., доцент, кафедра електричних станцій +38(096)596-98-55, dmytro.shokarov@khpі.edu.ua, ORCID ID: 0000–0001–7038–3172

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002*

Лазуренко Олександр Павлович, к.т.н., проф, завідувач кафедри електричних станцій, +380(57)707-65-65, oleksandr.lazurenko@khpі.edu.ua, ORCID ID: 0000–0002–4409–629X

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002*

Волканін Євген Євгенович, к.т.н., завідувач кафедри електронних комунікацій, радіотехніки та авіоніки, +38(097)037-46-84, science.nv.klknau@gmail.com, ORCID:0000–0003–3507–1987

Харківський національний університет внутрішніх справ Кременчуцький льотний коледж

вул. Перемоги, 17/63, м. Кременчук, 9600

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В НАВЧАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ

Анотація Матеріал присвячено комплексному підходу до моделювання систем відновлюваної енергетики з акцентом на використання програмного продукту System Advisor Model (SAM) від NREL у навчальному процесі. У роботі розглядаються теоретичні основи та практичні інструменти для аналізу вітрових, сонячних електростанцій та систем накопичення енергії. Він спрямований на формування у майбутніх інженерів навичок роботи з реальними промисловими стандартами та базами даних, забезпечуючи перехід від теоретичних формул до проектування життєздатних енергетичних об'єктів.

Ключові слова: сонячна електростанція, вітрова електростанція, відновлювана енергетика, системи накопичення енергії, моделювання енергосистеми, System Advisor Model.

Shokarov Dmytro, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Power Plants, +38(096)596-98-55, dmytro.shokarov@khpі.edu.ua, ORCID ID: 0000–0001–7038–3172

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2, St. Kirpychova, Kharkiv, Ukraine, 61002*

Lazurenko Oleksandr, Ph.D. (Eng.), Professor, Head of Department of Power Plants, +380(57)707-65-65, oleksandr.lazurenko@khpі.edu.ua, ORCID ID: 0000–0002–4409–629X

*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2, St. Kirpychova, Kharkiv, Ukraine, 61002*

Volkaniin Yevhen, Ph.D. (Eng.), Head of Department, Department of Electronic Communications, Radio Engineering and Avionics Phone: +380 97 0374684 E-mail: science.nv.klknau@gmail.com, ORCID ID: 0000–0003–3507–1987

*Kharkiv National University of Internal Affairs Kremenchuk flight college
17/6 Peremohy Str., Kremenchuk, 39600*

MODELING OF OPERATING MODES OF RENEWABLE ENERGY SYSTEMS IN THE EDUCATIONAL PROCESS

Abstract. *The material is devoted to an integrated approach to modeling renewable energy systems with an emphasis on the use of the System Advisor Model (SAM) software product from NREL in the educational process. The paper examines the theoretical foundations and practical tools for the analysis of wind, solar power plants and energy storage systems. It is aimed at developing future engineers' skills in working with real industrial standards and databases, ensuring the transition from theoretical formulas to the design of viable energy facilities.*

Keywords: *solar power plant, wind farm, renewable energy, energy storage systems, power system modeling, System Advisor Model.*

Вступ. Моделювання режимів роботи систем енергетики з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) на сьогодні є складним науково-технічним завданням, що зумовлено насамперед стохастичним та випадковим характером природних ресурсів, таких як сонячна інсоляція та сила вітру. Залежно від обраного типу джерела енергії, сучасні математичні та комп'ютерні моделі фокусуються на різних фізичних параметрах: для вітрових електростанцій – це криві потужності та ефект «аеродинамічного сліду», для сонячних – розрахунок інсоляції залежно від географії та температури, а для систем накопичення – цикли деградації акумуляторів.

Незважаючи на наявність широкого спектру програмного забезпечення, актуальним залишається питання вибору інструменту для навчального процесу, який би поєднував у собі глибокий інженерний аналіз із фінансовим моделюванням. Найбільш ефективним рішенням у цьому контексті є використання програми System Advisor Model (SAM) від National Renewable Energy Laboratory (NREL), яка дозволяє майбутнім інженерам перейти від теоретичних формул до проектування життєздатних та економічно обґрунтованих енергетичних об'єктів.

Викладений матеріал спрямований на формування у студентів навичок роботи з реальними промисловими стандартами та базами даних, що є критично важливим для сучасної енергетичної галузі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій у галузі моделювання систем відновлюваної енергетики (ВДЕ) свідчить про активний розвиток інструментарію

для техніко-економічного прогнозування та перехід до складних гібридних рішень.

Згідно з аналізом, ключові напрямки досліджень в даному питанні є наступні аспекти:

Теоретична база та підручники: Фундаментальні основи функціонування ВДЕ, зокрема фізичні принципи та загальний огляд технологій, детально викладено у працях С. О. Кудрі [1] та І. В. Капліна [2].

Комп'ютерне симулювання в освіті: Питання створення та застосування комп'ютерних тренажерів для завдань електроенергетики розглядалися у [3]. Автори наголошують на необхідності переходу від теорії до інтерактивних моделей в системах електроенергетики.

Метою роботи є обґрунтування та розробка комплексного підходу до моделювання систем відновлюваної енергетики (ВДЕ) у навчальному процесі підготовки майбутніх інженерів.

Основна частина. Для забезпечення стабільного функціонування енергосистеми при інтеграції ВДЕ необхідно проводити аналіз у трьох ключових станах:

- Усталені режими: для визначення поточкорозподілу, рівнів напруги та втрат потужності в мережі.
- Перехідні процеси: для вивчення реакції системи на різкі зміни метеорологічних умов або короткі замикання.
- Оптимізаційні режими: для прогнозування генерації на добу наперед та мінімізації вартості виробленої енергії (LCOE).

На сьогодні в навчальному процесі широко використовуються різне програмне забезпечення для моделювання [1–3]. Вибір інструменту залежить від глибини дослідження, в табл.1 приведено аналіз найбільш популярних програм для моделювання режимів роботи ВДЕ:

Таблиця – 1 Аналіз найбільш популярних програм для моделювання режимів роботи ВДЕ

Програма	Призначення
PVSyst / PV*SOL/	Спеціалізоване моделювання сонячних електростанцій (виробіток, затінення).
HOMER Pro	Оптимізація мікромереж (Microgrids) та вибір складу обладнання.
MATLAB/Simulink	Глибоке моделювання силової електроніки та динамічних характеристик.
DIgSILENT PowerFactory	Професійний аналіз великих енергосистем з інтегрованими ВДЕ.
SAM	Спеціалізоване моделювання систем відновлюваної енергетики

Для використання в навчальному процесі найбільш ефективною є програма SAM – це один із найпотужніших безкоштовних інструментів для техніко-економічного моделювання систем ВДЕ [4]. На відміну від суто інженерних пакетів (як MATLAB), SAM дозволяє оцінити не тільки фізичні параметри, а й фінансову вигоду.

Програма SAM від NREL – це один із найпотужніших інструментів для «техніко-економічного» моделювання. Її головна особливість у тому, що вона не просто рахує фізику енергетичного перетворення (кіловати), а й одразу переводить їх у гроші (окупність, прибуток).

Ось основні можливості програми:

1. Моделювання технологій (Performance Models) [4, 8, 11].

SAM підтримує широкий спектр систем генерації:

– Фотоелектричні системи (PV): від невеликих дахових СЕС до промислових парків. Підтримує детальні моделі панелей (СЕС, Sandia) та інверторів.

– Вітроенергетика: моделювання окремих турбін або цілих вітропарків із врахуванням кривих потужності та висоти щогли.

– Концентраційна сонячна енергія (CSP): параболічні жолоби, сонячні вежі та лінійні лінзи Френеля.

– Накопичувачі енергії (Batteries): літій-іонні, свинцево-кислотні та проточні акумулятори.

– Інші джерела: геотермальна енергія, біомаса, сонячне нагрівання води та морська енергія (хвилі/припливи).

2. Фінансовий аналіз (Financial Models) [4, 8, 11].

Це «сильна сторона» SAM. Програма дозволяє моделювати різні типи енергетичних систем:

– Behind-the-meter (BTM, «за лічильником»): для житлових та комерційних об'єктів з існуючим споживанням, де головна мета зменшити рахунки за електрику.

– Front-of-meter (FOM, «перед лічильником»): для великих станцій, що продають енергію в мережу через PPA (угоди про купівлю електроенергії) або як незалежні виробники (Merchant Plant).

– Складні структури: лізинг, партнерські інвестиції (Partnership Flip) та третя сторона власності.

3. Аналіз даних та автоматизація [4, 8, 11].

SAM надає інструменти, які роблять його повноцінною дослідницькою платформою:

– Параметричний аналіз: дозволяє побачити, як змінюється результат при зміні одного або кількох параметрів (наприклад, як ціна панелей впливає на LCOE) [5–6].

– Аналіз чутливості (Tornado charts): виявлення факторів, що найбільше впливають на успіх проєкту.

– Метод Монте-Карло: моделювання ймовірнісних ризиків.

– P50/P90: оцінка ймовірності отримання певної кількості енергії з урахуванням мінливості погоди протягом років.

– Мова програмування LK: вбудована скриптова мова для автоматизації тисяч симуляцій.

4. Гібридизація та сучасні тренди [4, 8, 11].

Останні версії SAM (зокрема 2024–2025 років) включають:

- Гібридні системи: одночасне моделювання PV + Вітер + Батарея в одному проєкті [5].
- Агрівольтаїка: розрахунок затінення та впливу на землю для комбінування СЕС із сільським господарством.
- Двосторонні модулі (Bifacial): детальний розрахунок відбитого світла (альbedo) для задньої сторони панелей.

Використання SAM у навчальному процесі для студентів енергетичних та інженерних спеціальностей є надзвичайно ефективним. Ця програма дозволяє поєднати теоретичні знання з фізики напівпровідників та електротехніки з реальною економікою проєктів.

Щоб зробити навчальний курс комплексним, варто розділити лабораторні роботи за рівнями складності: від базового проєктування до інтеграції систем накопичення та аналізу ризиків [3].

Розглянемо основи роботи з вхідними даними (Input Parameters).

Для коректного моделювання в SAM необхідно налаштувати три основні блоки даних:

1. Метеодані (Location and Resource): Ви завантажуєте файл у форматі .erw або .csv (наприклад, з бази PVGIS для України). Програма використовує дані про пряму та дифузну інсоляцію, швидкість вітру та температуру (рис. 1).

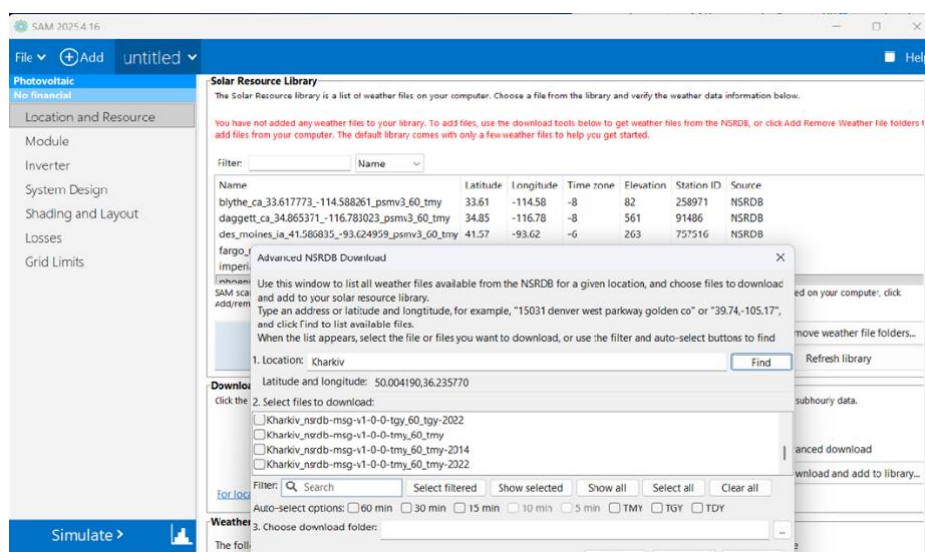


Рисунок 1 – Метеодані (Location and Resource)

Конфігурація обладнання (Module and Inverter) (рис. 2):

– Вибір конкретних панелей з бази даних (CEC або Sandia).

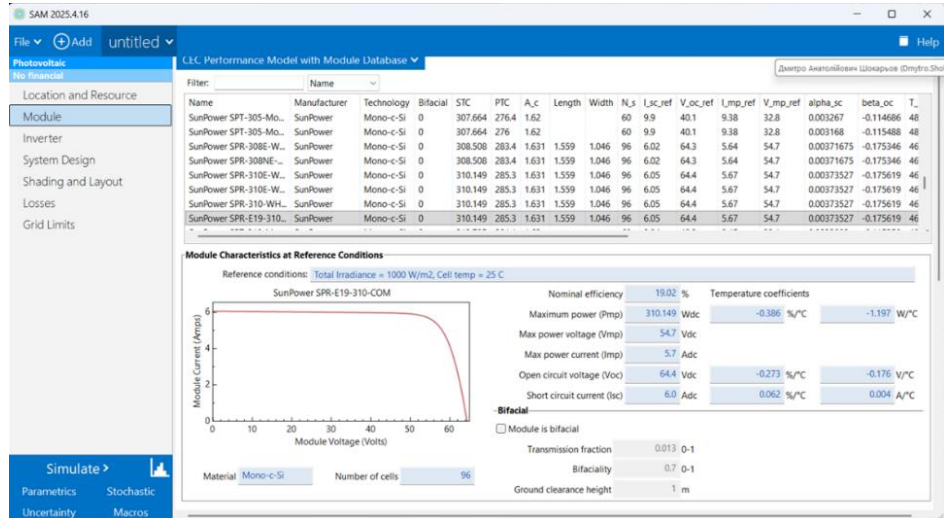


Рисунок 2 – Конфігурація обладнання (Module) and Inverter):

Вибір інвертора (враховується його крива ефективності та MPPT-діапазон) (рис. 3).

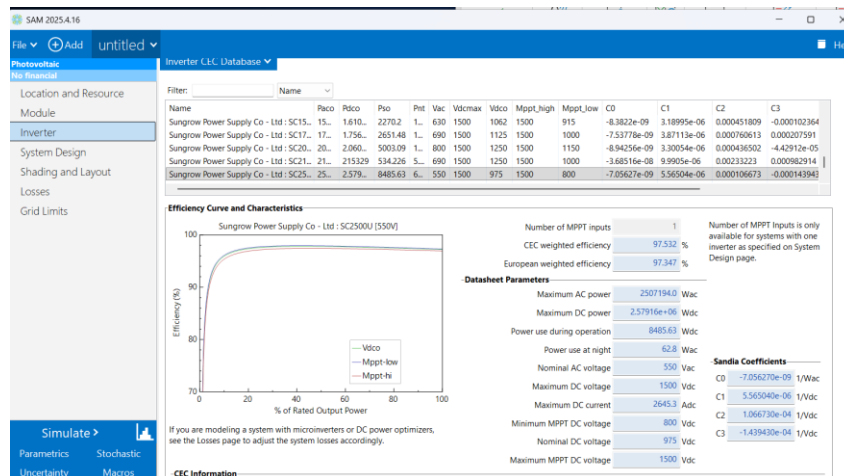


Рисунок 3 – Конфігурація обладнання (Inverter):

Дизайн системи (System Design) (рис. 4):

Визначення кількості модулів у стрінгу та кількості паралельних стрінгів. Тут розраховується DC-to-AC Ratio (співвідношення потужності панелей до потужності інвертора).

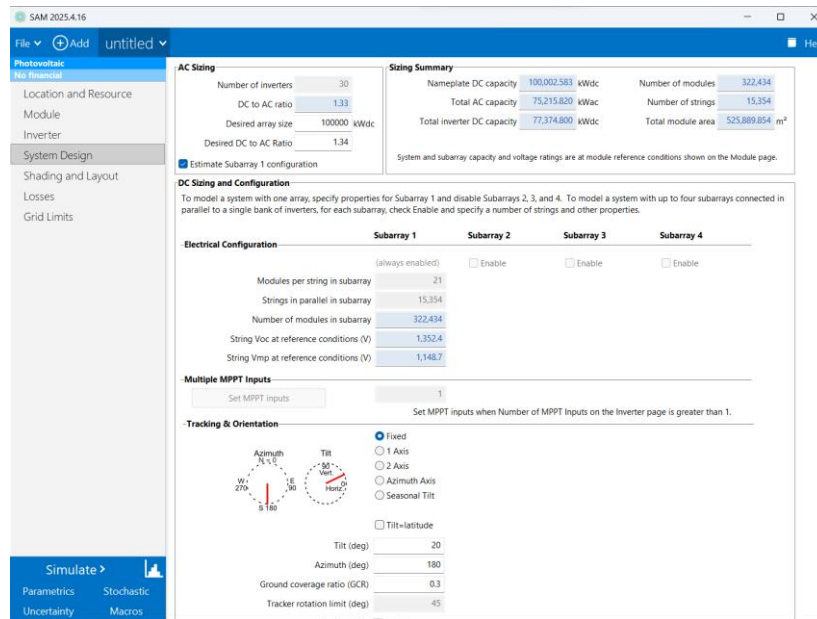


Рисунок 4 – Дизайн системи (System Design):

Моделювання втрат (Losses) (рис. 5). Це критичний етап, де SAM дозволяє деталізувати, куди зникає енергія:

- Затінення (Shading): Врахування об'єктів поруч або взаємного затінення рядів.
- Забруднення (Soiling): Втрати через пил або сніг.

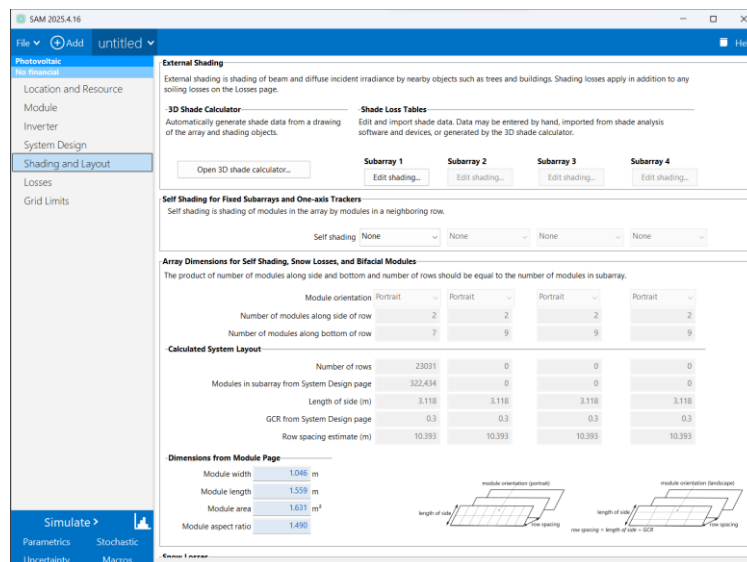


Рисунок 5 – Моделювання втрат (Losses)

2. Електричні втрати (рис. 6):

- Втрати у кабелях постійного та змінного струму.
- Снігове навантаження.

— Моделювання періодів, коли панелі повністю закриті снігом.

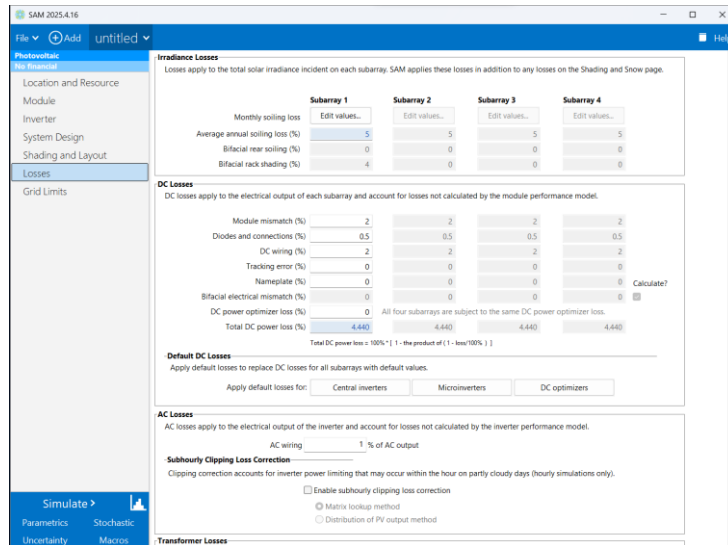


Рисунок 6 – Електричні втрати

Отримання результатів (Simulation Outputs)

Після запуску симуляції SAM видає детальні звіти, які поділяються на технічні та економічні [7, 8].

Технічні показники (рис. 7):

- Annual Energy: Загальна кількість виробленої енергії за рік (кВт·год).
- Capacity Factor: Коефіцієнт використання встановленої потужності.
- Performance Ratio (PR): Показник якості системи, що відображає відношення реальної генерації до теоретично можливої за даних погодних умов.

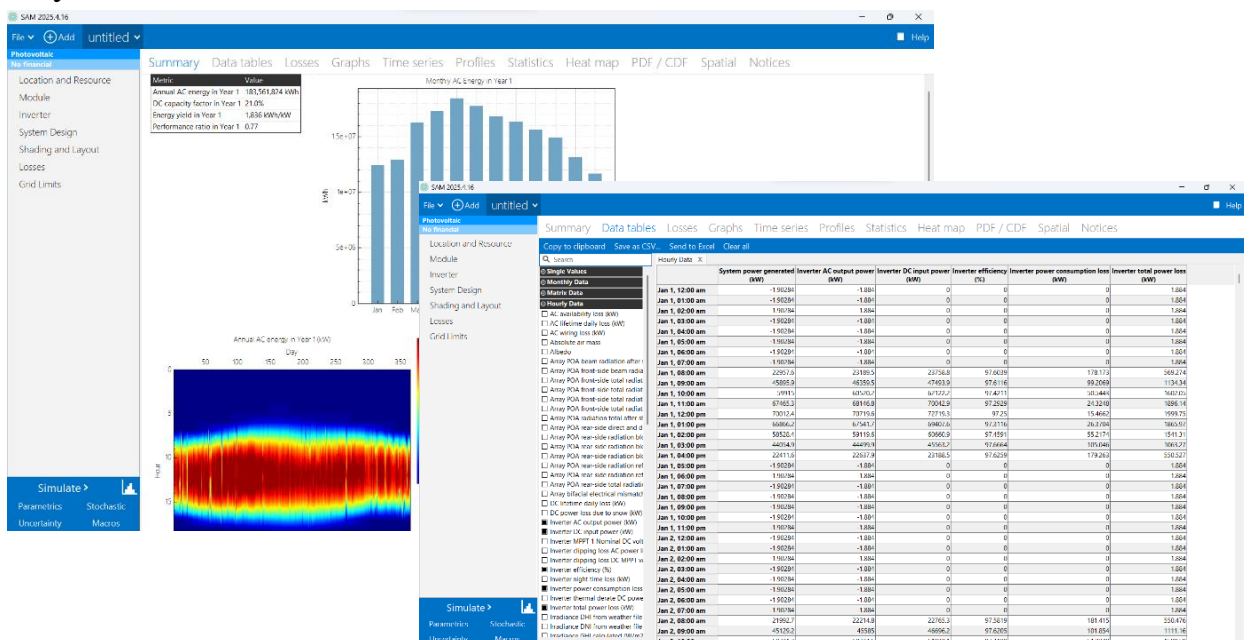


Рисунок 7 – Отримання технічних результатів

3. Економічні показники (рис. 8):

- LCOE (Levelized Cost of Energy): Собівартість однієї кВт·год енергії за весь життєвий цикл станції (\$/kWh).
- NPV (Net Present Value): Чиста приведена вартість проєкту.
- Payback Period: Термін окупності інвестицій.

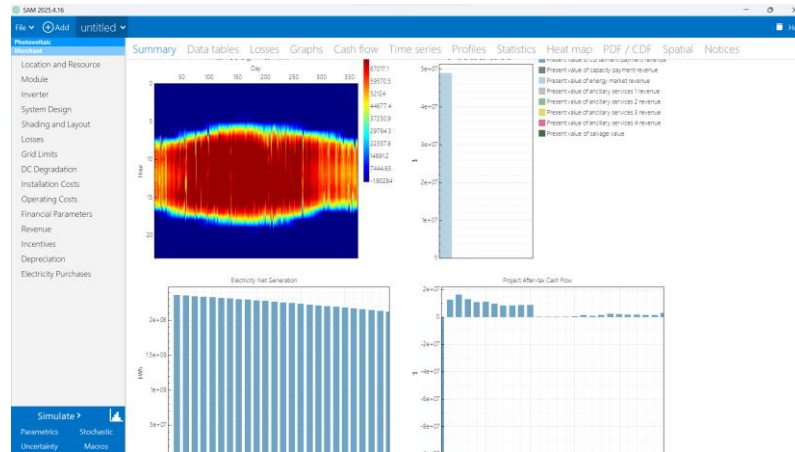


Рисунок 8 – Отримання результатів економічних показників

У програмі SAM блок витрат є надзвичайно детальним. Це дозволяє студентам зрозуміти, що вартість проєкту — це не лише ціна сонячних панелей, а ціла структура капітальних та операційних інвестицій.

Для розрахунку затрат у SAM використовується вкладка «System Costs» (рис. 9). Ось як вони класифікуються та моделюються [9, 10]::

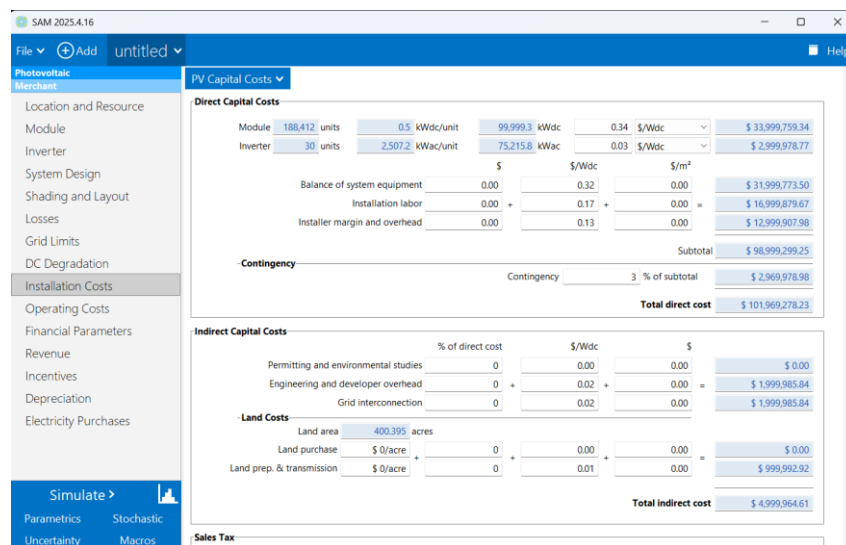


Рисунок 9 – System Costs

1. Капітальні витрати (CAPEX / Direct Costs)

Це одноразові витрати на будівництво станції. У SAM вони розбиваються на:

Вартість обладнання (Hard Costs):

- Modules: Вартість фотоелектричних панелей (\$/W).
- Inverters: Вартість інверторів (\$/W або за одиницю).
- Battery System: Вартість акумуляторів та систем керування ними.
- Баланс системи (BOS – Balance of System):
- Mounting Equipment: Металоконструкції, системи кріплення.
- Electrical Wiring: Кабелі, роз'єднувачі, трансформатори.

Роботи та інсталяція:

- Installation Labor: Оплата праці монтажників.
- Permitting & Interconnection: Витрати на дозволи та підключення до мережі.

2. Непрямі витрати (Indirect Costs)

Ці витрати часто ігноруються початківцями, але SAM дозволяє їх врахувати:

- Engineering & Design: Проектні роботи.
- Land Purchase / Lease: Купівля або оренда землі.
- Contingency: Резервний фонд на непередбачувані витрати (зазвичай 5–10% від загальної суми).

від загальної суми).

3. Експлуатаційні витрати (OPEX / O&M Costs)

Витрати, що виникають протягом усього терміну життя станції (20–25 років):

- Fixed O&M (\$/kW–year): Регулярний сервіс, охорона, моніторинг.
- Variable O&M (\$/MWh): Витрати, що залежать від обсягу виробленої енергії.
- Replacement Costs: Заміна обладнання (наприклад, інвертори зазвичай замінюють через 10–12 років, що обов'язково вноситься в модель SAM).

4. Аналіз у навчальному процесі

SAM автоматично розраховує ключові економічні показники на основі введених затрат:

5. Аналіз часових рядів (Time Series Analysis)

SAM дозволяє переглянути генерацію з кроком у 1 годину (або навіть 1 хвилину). Це важливо для розуміння:

- Як система працює в похмуру погоду.
- Чи вистачає напруги від панелей для «запуску» інвертора рано–вранці.
- Які піки навантаження покриваються власною генерацією.

Таблиця 2 – Економічні показники

Показник	Значення для студента
Total Installed Cost	Повна вартість «під ключ». Дозволяє порівняти різні технології.
LCOE (Levelized Cost of Energy)	Показує, чи є проєкт конкурентним порівняно з ціною електроенергії з мережі.
Simple Payback Period	Час, за який чистий дохід покриває капітальні затрати.

Приклад практичного висновку: Якщо в результаті моделювання LCOE виявляється вищою за тариф на електроенергію з мережі, ви можете в SAM змінити тип панелей на більш ефективні або додати систему трекінгу (відстеження сонця), щоб побачити, чи покращить це окупність.

Ось чому в SAM можна присвятити цілий цикл занять (приблизні варіанти лабораторних робіт):

Варіант 1: Оптимізація геометрії та орієнтації (Базовий рівень)

Мета: Вивчити вплив просторового розміщення панелей на ефективність СЕС.

Завдання: Порівняти фіксовану систему (Fixed Roof/Ground) з одноосьовим трекером (1-axis Tracking).

Дослідження: Студенти повинні знайти "точку беззбитковості", де додаткові витрати на трекер окупаються за рахунок збільшення генерації.

Ключовий інструмент: Parametric Suite (зміна кута нахилу та азимуту).

Варіант 2: Моделювання систем накопичення енергії

Мета: Навчитися керувати піками споживання за допомогою акумуляторів.

Завдання: Спроекувати систему "СЕС + Акумулятор" для промислового об'єкта.

Дослідження: Вибір стратегії роботи батареї: "Automated Dispatch" (автоматичне згладжування піків) проти "Manual Dispatch" (зарядка вночі за дешевим тарифом, розрядка вдень).

Аналіз: Розрахунок деградації батареї протягом 10 років залежно від глибини розряду (DoD).

Варіант 3: Вітроенергетика та ресурсний аналіз

Мета: Оцінити потенціал вітрової генерації для конкретної місцевості.

Завдання: Обрати вітрогенератор із бібліотеки (наприклад, Vestas або Siemens) та задати висоту щогли.

Дослідження: Вплив висоти вежі на річний виробіток (через зміну швидкості вітру за логарифмічним законом).

Аналіз: Вивчення "Рози вітрів" та її впливу на розташування турбін.

Варіант 4: Гібридні системи (PV + Wind + Battery)

Мета: Дослідження синергії різних джерел енергії для стабілізації графіка видачі потужності.

Завдання: Створити модель, що поєднує сонячні панелі та вітрогенератор на одному майданчику.

Дослідження: Проаналізувати, як комбінація джерел зменшує потребу в ємності акумуляторів (оскільки вітер часто посилюється вночі або в похмуру погоду, коли сонце не має).

Ключовий показник: Коефіцієнт автономності (Fraction of load met by RE).

Варіант 5: Моделювання систем власного споживання (Self-Consumption) для бізнесу

Мета: Розрахунок економічної вигоди без використання "Зеленого тарифу".

Завдання: Завантажити профіль споживання реального офісного центру або заводу (Load Profile) у SAM.

Дослідження: Визначити, який відсоток генерації споживається одразу, а який скидається в мережу (або обмежується).

Оптимізація: Підібрати таку встановлену потужність СЕС, щоб мінімізувати термін окупності без надлишкової генерації.

Висновки:

Аналіз програмного продукту SAM для моделювання систем відновлюваної енергетики в навчальному процесі дає можливість сформулювати наступні програмні результати навчання та досягти таких переваг:

1. Глибоке розуміння фізичних процесів в енергетичній системі. Студенти можуть бачити, як зміна окремих параметрів впливає на всю систему (Вплив температури, наочна демонстрація того, як при підвищенні температури сонячної панелі падає її напруга та ККД; Спектральні втрати та затінення: Можливість змоделювати складні сценарії (наприклад, дерева поруч із об'єктом) та побачити реальні втрати у графіках потужності).

2. Формування навичок техніко-економічного аналізу. Це головна перевага SAM. Студенти вчаться не просто проектувати станцію, а порахувати її доцільність. Робота з LCOE: Розуміння того, як капітальні витрати (CAPEX) та експлуатаційні витрати (OPEX) формують кінцеву ціну кіловата. Моделювання тарифів: Можливість завантажити складні тарифні сітки (денний/нічний тарифи) та розрахувати термін окупності для приватного домогосподарства або великого підприємства.

3. Робота з реальними базами даних. SAM привчає майбутніх інженерів до стандартів індустрії. Використання метеоданих форматів TMY2/TMY3 або даних NSRDB. Вибір обладнання з актуальних бібліотек світових виробників (Longi Solar, Huawei, SMA тощо).

4. Гнучкість для наукових досліджень (Кваліфікаційні дипломні роботи). Для студентів старших курсів SAM пропонує розширені можливості: Параметричний аналіз (Parametric Analysis): Створення графіків залежності, наприклад, «Кут нахилу панелей та Річна генерація», що ідеально підходить для наукових розділів дипломів. Макроси та скрипти це можливість автоматизації розрахунків через вбудовану мову програмування LK, що розвиває навички алгоритмізації.

5. Для викладача SAM – це інструмент, який перетворює «сухі» формули на живий проект. Замість розрахунку однієї точки на папері, студент може промодельовати 8760 годин роботи станції за лічені секунди.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Кудря С. О. Відновлювані джерела енергії : підручник. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. 392 с.
2. Каплін І. В. Моделювання систем відновлюваної енергетики : навч. посіб. Кременчук : КрНУ, 2019. 145 с.
3. Shokarov D., Zacheпа I., Zacheпа N., Ganzevich I., Cherkashyna H. / The principles of creation and application of computer simulators in the tasks of electric power industry / *Енергозбереження Енергетика Енергоаудит // Загальнодержавний науково-виробничий та інформаційний журнал*, 2022 р. №11–12 (177–178). С. 34–41. <https://doi.org/doi: 10.20998/2313–8890.2022.11.03>
4. System Advisor Model (SAM) Help System. System Advisor Model (SAM) Technical Documentation. Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory, 2024. URL: <https://sam.nrel.gov/knowledge-base.html> (дата звернення: 05.01.2026).
5. Shokarov D., Chorna V., Bogodist K. Economic feasibility study of expediency of establishment of solar modules in the private household // *Вісник Нац. ун-ту «ХПІ» : зб. наук. пр. Сер. : Енергетика: надійність та енергоефективність*. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. № 31 (1253). С. 87–92.
6. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind. 4th ed. Hoboken : Wiley, 2013. 928 p.
7. Masters G. M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. 2nd ed. Hoboken : Wiley–IEEE Press, 2013. 712 p.
8. Blair N., DiOrio N., Freeman J. System Advisor Model (SAM) General Description (Version 2018.11.11). Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory, 2018. 35 p. (Technical Report NREL/TP–6A20–72981).
9. DiOrio N., Dobos A., Janzou S. Economic Models in the System Advisor Model (SAM). Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory, 2015. 42 p. (Technical Report NREL/TP–6A20–63765).
10. National Solar Radiation Database (NSRDB). *NREL Data Portal*. URL: <https://nsrdb.nrel.gov> (дата звернення: 05.01.2026).
11. System Advisor Model (SAM) Learning Channel. *YouTube*. URL: <https://www.youtube.com/@SAMModel> (дата звернення: 05.01.2026).

REFERENCES:

1. Kudrya S. O. Renewable Energy Sources: Textbook. Kyiv: Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2020. 392 p.
2. Kaplin I. V. Modeling of renewable energy systems. Manual. Kremenchuk: KrNU, 2019. 145 p..
3. Shokarov D., Zacheпа I., Zacheпа N., Ganzevich I., Cherkashyna H. / The principles of creation and application of computer simulators in the tasks of electric power industry / *Energy saving Energy Energy audit – National Scientific, Production and Information Journal*, 2022. No. 11–12 (177–178). P. 34–41. <https://doi.org/doi: 10.20998/2313–8890.2022.11.03>
4. System Advisor Model (SAM) Help System. System Advisor Model (SAM) Technical Documentation. Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory, 2024. URL: <https://sam.nrel.gov/knowledge-base.html> (accessed 05.01.2026).
5. Shokarov D., Chorna V., Bogodist K. Economic feasibility study of expediency of establishment of solar modules in the private household // *Visnyk Nats. Tech. University «KhPI» : coll. Sciences. Pr. Ser. : Energy: reliability and energy efficiency*. Kharkiv : NTU «KhPI», 2017. № 31 (1253). P. 87–92.

6. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind. 4th ed. Hoboken : Wiley, 2013. 928 p.
7. Masters G. M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. 2nd ed. Hoboken : Wiley–IEEE Press, 2013. 712 p.
8. Blair N., DiOrio N., Freeman J. System Advisor Model (SAM) General Description (Version 2018.11.11). Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory, 2018. 35 p. (Technical Report NREL/TP–6A20–72981).
9. DiOrio N., Dobos A., Janzou S. Economic Models in the System Advisor Model (SAM). Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory, 2015. 42 p. (Technical Report NREL/TP–6A20–63765).
10. National Solar Radiation Database (NSRDB). NREL Data Portal. URL: <https://nsrdb.nrel.gov> (accessed 05.01.2026).
11. System Advisor Model (SAM) Learning Channel. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/@SAMModel> (accessed 05.01.2026).

*Стаття надійшла до редакції: 18.10.2025; рецензування: 28.10.2025;
прийнята до публікації 02.11.2025. Автори прочитали и дали згоду рукопису.
The article was submitted on 18.10.2025; revised on 28.10.2025; and accepted for publication
on 02.11.2025. The authors read and approved the final version of the manuscript.*