

Я.В. Бацала
І.І. Яремак

ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Практикум



Я.В. Бацала, І.І. Яремак

ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ



ПРАКТИКУМ

Івано-Франківськ
ІФНТУНГ
2020

УДК 621.396

Б - 1

Рецензент:

Михайлів М. І. доктор технічних наук, професор кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Івано-Франківського національного університету нафти і газу
Рекомендовано методичною радою університету (протокол № 3 від 18.02.2020 р.)

Бацала Я. В.

Б-31 Електрообладнання сонячних електростанцій: практикум / Я. В. Бацала, І. І. Яремак – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. – 56 с.
МВ 02070855 - 16009 – 2020

Практикум з навчальної дисципліни “Електрообладнання сонячних електростанцій” складений відповідно до робочої програми дисципліни згідно з навчальним планом підготовки фахівців спеціальності 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» для студентів денної, заочної та дистанційної форм навчання. Викладені в практикумі методи розв’язання задач допоможуть здійснити попередній вибір електрообладнання фотоелектричних станцій, отримати прогнозовану кількість згенерованої електроенергії, розрахувати економічний ефект. Обґрунтовано, як впливає тип фотомодуля та конструкція фотоелектричної станції на енергетичну ефективність.

УДК 621.396

© ІФНТУНГ, 2020

МВ02070855 - 16009 - 2020

Дане видання – власність ІФНТУНГ.
Забороняється тиражування та розповсюдження.

ЗМІСТ

	ВСТУП	4
1	ВИТЯГ З РОБОЧОЇ ПРОГРАМИ	5
1.1.	Зміст практичних занять	5
2	Практичне заняття №1. Розрахунок генерування електроенергії сонячними електростанціями в залежності від величини сонячної інсоляції	6
3	Практичне заняття №2. Обґрунтування вибору електрообладнання сонячних електростанцій	16
4	Практичне заняття №3. Техніко-економічний розрахунок впровадження сонячних електростанцій за «зеленим тарифом»	25
5	Практичне заняття №4. Порівняння генерування стаціонарних сонячних електростанцій та трекерних сонячних систем	37
6	Практичне заняття №5. Розрахунок показників ефективності сонячних електростанцій	43
7	Практичне заняття №6. Дослідження впливу сумісної роботи сонячних електростанцій в мережі на якість електроенергії	48
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	56

ВСТУП

Українська енергетична система стрімко розвивається та проводить політику диверсифікації джерел енергопостачання завдяки збільшенню частки відновлювальних джерел енергії, що в свою чергу зменшує техногенний вплив на довкілля, залежність від нафтової сировини та призводить до локалізації електричних мереж. Кожен свідомий громадянин, а особливо інженер-енергетик повинен розуміти необхідність підвищення енергоефективності процесів виробництва, передавання, перетворення та споживання енергії в цілому та електричної енергії зокрема, забезпечення об'єктивного обліку спожитої енергії. Сонячна енергетика є одним з найперспективніших напрямків сучасної енергетики і розвивається завдяки розвитку технологій Smart Grid та Energy Storage.

Практикум пояснює роль «зеленого тарифу» для енергетичного бізнесу України та світу, які проблеми можуть виникнути у власників фотоелектричних станцій, якщо вибір потужності та місця підключення їх джерел генерування не здійснювати з належним обґрунтуванням.

Методичні вказівки для практичних занять відповідають програмі курсу “Електрообладнання сонячних електростанцій” спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» і можуть використовуватися як додаток до практичних занять і самостійної роботи студента. Викладені в ньому приклади вибору електрообладнання фотоелектричних станцій та обґрунтування економічної ефективності роботи ФЕС в різних режимах роботи в електричній мережі дозволить систематизувати знання про роботу фотоелектричного обладнання.

Методичні вказівки для практичних занять можуть бути корисним для студентів-енергетиків, електромеханіків, слухачів курсів підвищення кваліфікації чи перекваліфікації, спеціалістів, які навчаються для одержання другої спеціальності.

1 ВИТЯГ З РОБОЧОЇ ПРОГРАМИ

1.1 Зміст практичних занять

Таблиця 1.1 –Зміст практичних занять

Тиж- день	№ заняття	Теми занять	Обсяг годин	Література	
				№ пор.	Розділ, підроз- діл
1	1	3	4	5	6
1	1	Розрахунок генерування електроенергії сонячними електростанціями в залежності від величини сонячної інсоляції	2	4	7
3	2	Обґрунтування вибору електро-обладнання сонячних електростанцій	2	4	7
5	3	Техніко-економічний розрахунок впровадження сонячних електростанцій за «зеленим тарифом»	2	4,2	7
7	4	Порівняння генерування стаціонарних сонячних електростанцій та трекерних сонячних систем	2	4	7
9	5	Розрахунок показників ефективності сонячних електростанцій	2	4	7
11	6	Дослідження впливу сумісної роботи сонячних електростанцій в мережі на якість електроенергії	2	4	7
13	7	Особливості розрахунку додаткових втрат при низькій якості електроенергії	2	4	7
15	8	Розрахунок економічних втрат через неякісну електроенергію	1	4	7
			15		

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №1

Тема: РОЗРАХУНОК ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СОНЯЧНИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ВЕЛИЧИНИ СОНЯЧНОЇ ІНСОЛЯЦІЇ

Мета заняття: Навчитися розраховувати кількість електроенергії, яку генеруватиме фотоелектрична станція заданої потужності та за умов визначеності даних.

I. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Сьогодні існує зростаючий попит на використання альтернативних джерел енергії в народному господарстві, промисловості та на побутовому рівні.

Сонячна енергетика є однією з найперспективніших альтернатив традиційним способам вироблення електроенергії, таким як спалення нафти, природного газу, мазуту, вугілля, використання атомної та гідроенергії. Перетворення сонячної енергії в електричну можливе шляхом використання фотоелектричних перетворювачів, принцип роботи яких базується на фотоелектричному ефекті та полягає в створенні електричного потенціалу в неоднорідному матеріалі при поглинанні фотону. Найбільш розповсюдженими на ринку продаж є сонячні елементи на основі полі- та монокристалічного кремнію з максимальною ефективністю близькою до 26 % у випадку фотоелектричної комірки, та 12-18 % для фотоелектричних модулів. При цьому вартість виробленої таким чином енергії не перевищує 1 долар за Вт, що є конкурентноздатним щодо електроенергії, яка виробляється традиційним способом. Це дає поштовх до створення енергосистем на основі фотоперетворювачів для енергозабезпечення об'єктів народного господарства, промислового сектору, приватних приміщень, тощо. Такі системи повинні бути спроектовані у відповідності до потреб споживача.

Основною метою заняття є вибір та розрахунок енергосистеми на основі фотоелектричних сонячних перетворювачів для використання у побуті. Вибір та розрахунок енергетичної системи для енергоживлення об'єкту залежить від місця розташування (заданих географічних координат), площі поверхні розміщення сонячних панелей, значеннями

річного енергоспоживання об'єкта та його режимом енергозабезпечення згідно з номером варіанта завдання.

Фотоелектричні станції можуть мати різну конфігурацію (автономні, мережеві, гібридні), але їх режим роботи також залежить від координат розміщення, потужності, наявності акумуляторних систем, місця під'єднання до мережі, типу обладнання.

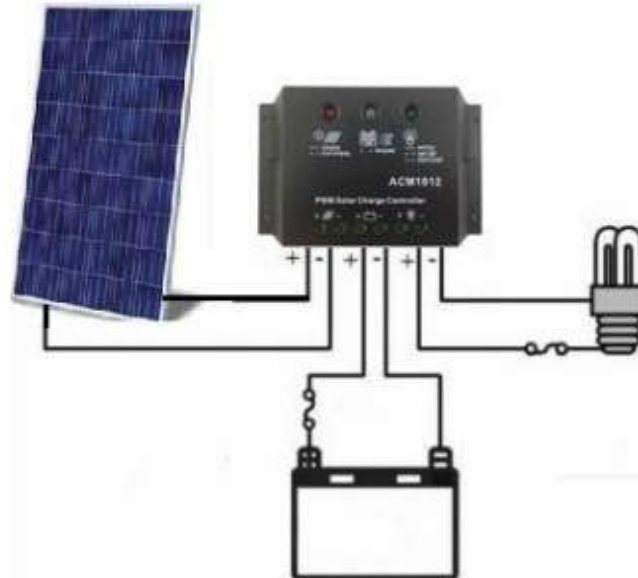


Рисунок 1.1 – Типова схема підключення автономної ФЕС

Автономні ФЕС можуть мати в своєму складі інвертор, який перетворює постійний струм напругою 12-48 В у змінний 220/380 В або працювати без інвертора з використанням контролера (рис.1.1.), але такі схеми використовують переважно для живлення навантаження з напругою 12 В.

Оскільки, більшість сучасних приладів працює на напрузі 220 В, то для ФЕС застосовують інвертори.

Залежно від типу використання інвертори можна розділити на три основні типи:

- Автономні (off grid) - інвертори, не підключені до зовнішньої електричної мережі, призначені для автономних фотоелектричних систем;

- Мережеві (on grid) - інвертори, що працюють синхронно з централізованою мережею електропостачання. Крім своїх прямих функцій такі прилади забезпечують регулювання основних

експлуатаційних параметрів мережі: частота напруги, амплітуда і т.д. У разі збою живлення, тобто невідповідності параметрів напруги, інвертор автоматично вимкнеться. Даний тип інверторів підходить для сонячних систем без акумуляторних батарей. Вся вироблена енергія генерується в загальну мережу за «зеленим тарифом».

- Гібридний (hybrid) - так званий «акумуляторно-мережевий» перетворювач, який поєднує властивості автономних і мережевих пристроїв. Такий інвертор має велику кількість налаштувань для оптимізації роботи сонячної системи від загальної електричної мережі та за наявності акумуляторних батарей. Такий інвертор здорожчує вартість електростанції, його рекомендують використовувати при проблемах з електропостачанням.

Внаслідок зміни інтенсивності сонячної інсоляції протягом року та дня потужність ФЕС змінюється, що необхідно враховувати при проектуванні.

Таблиця 1.1 – Дані генерування електроенергії ФЕС потужністю 1 кВт для різних областей України з полікристалічними модулями, в кВт·год

область	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
Івано-Франківська	27	41	87	122	155	153	160	139	93	60	30	21
Закарпатська	26	42	97	134	169	175	175	159	104	65	31	18
Львівська	23	37	87	125	160	162	163	143	94	58	27	18
Тернопільська	23	38	88	123	161	163	166	141	95	59	26	18
Чернівецька	27	43	95	131	170	169	177	151	102	65	31	22
Волинська	21	34	87	126	165	168	166	144	93	56	24	16
Вінницька	25	40	93	131	180	180	180	154	100	63	27	18
Київська	21	41	93	132	180	181	180	150	97	58	24	17
Одеська	33	55	111	149	198	200	203	179	122	79	39	27
Крим	38	57	106	148	196	198	206	182	128	85	46	32
Чернігівська	20	39	89	129	179	182	178	150	95	55	22	15
Луганська	26	46	96	139	186	182	190	169	111	65	30	18

Попередній розрахунок генерації електроенергії за допомогою сонячної електростанції легко виконати завдяки оновленому калькулятору, розробленим в Рентехно. [1] Ми розуміємо, що зробити

точний прогноз вироблення електроенергії ФЕС складно, оскільки кількість виробленої електроенергії залежить від багатьох чинників як, наприклад, від брендів і типів використовуваного обладнання або майбутніх метеоумов його експлуатації. Точність розрахунку може бути більше 5 %, але для попереднього розрахунку використаємо дані для визначення середньої кількості згенерованої електроенергії ФЕС при розміщенні фотомодулів на даху будинку з кутом 30° .

При використанні монокристалічних модулів, зміні кута встановлення фотопанелей, а також при уточненні координат місцевості дані будуть відрізнятися, тому для більш точного проектування використовують спеціалізовані програми.

При живленні будинків від фотоелектричних станцій потужність їх необхідно вибирати з врахуванням необхідного забезпечення споживачів.

В залежності від рівня енергозабезпечення приміщення можна класифікувати наступні режими використання енергосистеми: повний, комфортний, помірний, базовий та аварійний. Кожен з режимів має різні вимоги до миттєвої потужності та енергозапасу системи, що впливає перш за все на вартість її встановлення [2].

Повне енергозабезпечення дозволяє провести заміну електроенергії за рахунок сонячних батарей. Воно досягається шляхом відповідного вибору потужності фотоелектричної енергосистеми, яка здатна покрити максимальні енергозатрати господарства і виключити необхідність живлення від зовнішньої електромережі. Щоб повністю відключитися від електромережі, але жодним чином не змінювати спосіб життя родини, необхідна система, здатна за місяць виробляти не менше 600 кВт·год електроенергії при потужності в тривалому режимі не менше 5 кВт, а споживання енергії за добу може досягати 50 кВт·год при середньому значенні від 10 до 20 кВт·год на добу.

У разі використання режиму комфортного енергозабезпечення енергосистема повинна забезпечувати живлення мало та середньопотужних приладів (< 4 кВт), в той самий час як енергозатратні прилади (електроплити, електродуховки, конвектори та електропідігрівачі великих площ) повинні живитися за рахунок зовнішньої електромережі.

Помірне енергозабезпечення характеризується комфортним режимом енергозабезпечення, але з більш раціональним підходом до використання високопотужного обладнання. Так, енергозатратні роботи

повинні проводитися в періоди максимального надходження сонячної енергії до фотоелектричної системи, а їх живлення здійснюватися за гібридною схемою з одночасним використанням зовнішньої електромережі та попередньо накопиченої енергії в акумуляторах енергосистеми.

Таблицю потужностей електроприладів наведемо в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Дані потужності та споживання електроенергії за місяць електрообладнанням

	Споживач	Потужність, Вт	годин на добу в роботі	Днів	Витрата електроенергії в місяць, Вт/год
1	Освітлення	12·6=72	6	30	12960
2	Інвертор	5	24	30	3600
3	Холодильник	450	1,4	30	18900
4	Котел газовий з вбудованим насосом	90	2	30	5400
5	Насос глибинний	500	0,4	30	6000
6	Пральна машина	2000	0,5	6	6000
7	Ноутбук	80	3	25	6000
8	Телевізор	100	2	20	4000
9	Порохотяг	1500	2	4	12000
10	Праска	1500	1	5	7500
11	Електрочайник	2000	0,3	30	18000
12	Електроінструмент	1000	0,6	8	4800
13	Кухонний комбайн	700	0,2	20	2800
14	Мікрохвильова піч	2000	0,2	25	10000
15	Принтер лазерний	1000	0,1	20	2000
18	Фен	1500	0,3	30	13500
19	Комп'ютер персональний	350	5	30	52500
20	Посудомийна машина	2000	0,35	30	21000
21	Електрична тепла підлога Кухня+Ванна	1500	1	20	30000
	Максимальна миттєва потужність	18347 Вт			
	Максимальне добове споживання електроенергії		13742 Вт/год		
	Місячне споживання електроенергії				236960 Вт/год

Базовий та аварійний режими характеризуються постійним живленням від зовнішньої електромережі з частковим застосуванням фотоелектричної енергосистеми для роботи малопотужних приладів або в аварійних ситуаціях, коли зовнішня електромережа відключена.

Для застосування ФЕС для приватних будинків проводимо розрахунок місячного споживання електроенергії. Складаємо таблицю споживання електроенергії для обраного режиму роботи.

Отож для забезпечення аварійного живлення будинку необхідно забезпечити 20-50 кВт/год в місяць залежно від наявності централізованого опалення, гарячої води і тд.

В базовому режимі споживання електроенергії ми вже можемо врахувати додаткові електроприлади: порошок, праску, пральну машину, телевізор, ноутбук. Отже, для базових потреб будинку необхідно забезпечити майже 100 кВт·год в місяць. В комфортному режимі ми вже можемо використовувати прилади, які несуть додатковий комфорт та зручність в наше життя: фен, електричний чайник, мікрохвильову піч. Прийmemo споживання 180-200 кВт·год в місяць. У повному режимі споживання електроенергії враховуємо додаткові електроприлади, без яких в інших випадках можна обійтись - електричну теплу підлогу, посудомийну машину, більш довге використання освітлення та інших приладів. Для цього режиму потрібно приблизно 300-400 кВт·год/місяць.

Проектування сонячної електростанції, як правило починається з вибору місця встановлення сонячних фотомодулів, розрахунку площі та кількості фотомодулів.

Оскільки, кількість виробленої електроенергії змінюється протягом року, аналізуємо чи вистачить нам виробленої електроенергії для обраної потужності в всі місяці року за допомогою таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Орієнтовне місячне вироблення електроенергії сонячними батареями. (кВт/год за міс)

Потужність сонячних батарей	Січ.	Лют.	Бер.	Квіт.	Трав.	Чер.	Лип.	Сер.	Вер.	Жов.	Лис.	Груд.
Сумарна добова інсоляція кВт*год/м.кв.	1,19	1,93	2,84	3,68	4,52	4,75	4,76	4,40	3,06	2,00	1,20	0,94
500 Вт	16 мало	29 мало	40 мало	54 авар.	65 авар.	70 авар.	67 авар.	63 авар.	43 мало	29 мало	17 мало	12 мало
1 кВт	33 мало	58 авар.	82 авар.	105 базов.	130 базов.	141 базов.	135 базов.	127 базов.	86 авар.	57 авар.	35 мало	26 мало
2,0 кВт	67 авар.	117 базов.	162 базов.	211 комф.	261 комф.	283 комф.	271 комф.	253 комф.	173 базов.	115 базов.	69 авар.	54 авар.
2,5 кВт	82 авар.	146 базов.	203 комф.	264 комф.	328 повн.	354 повн.	339 повн.	316 повн.	217 комф.	143 базов.	87 авар.	66 авар.
3,2 кВт	107 базов.	187 комф.	260 комф.	338 повн.	419 повн.	454 повн.	434 повн.	404 повн.	278 комф.	182 базов.	112 базов.	85 авар.
5,3 кВт	177 базов.	310 повн.	431 повн.	560 повн.	695 повн.	754 повн.	720 повн.	670 повн.	461 повн.	303 повн.	185 комф.	141 базов.
8,0 кВт	266 комф.	467 повн.	651 повн.	845 повн.	1048 повн.	1137 повн.	1086 повн.	1012 повн.	695 повн.	458 повн.	280 комф.	213 комф.
13,5 кВт	450 повн.	790 повн.	1100 повн.	1425 повн.	1770 повн.	1920 повн.	1834 повн.	1710 повн.	1174 повн.	773 повн.	479 повн.	360 повн.
31,5 кВт	1051 повн.	1844 повн.	2569 повн.	3329 повн.	4131 повн.	4480 повн.	4281 повн.	3990 повн.	2740 повн.	1804 повн.	1107 повн.	843 повн.

Для прикладу, розрахуємо площу даху для корпусів університету ІФНТУНГ. Зробити це можна вручну або за допомогою онлайн-додатків.

Google поповнила функціональність сервісу [Google Earth](#) – у ньому з'явився інструмент Measure.

Він дозволяє виміряти відстань між будь-якими двома точками на карті. Також з його допомогою можна дізнатися площу об'єктів або областей на карті, незалежно від їх масштабу. Щоб скористатися інструментом у веб-версії, потрібно вибрати його в сайдбарі зліва і відзначити дві довільні точки або намалювати потрібну фігуру по контурах об'єкта.

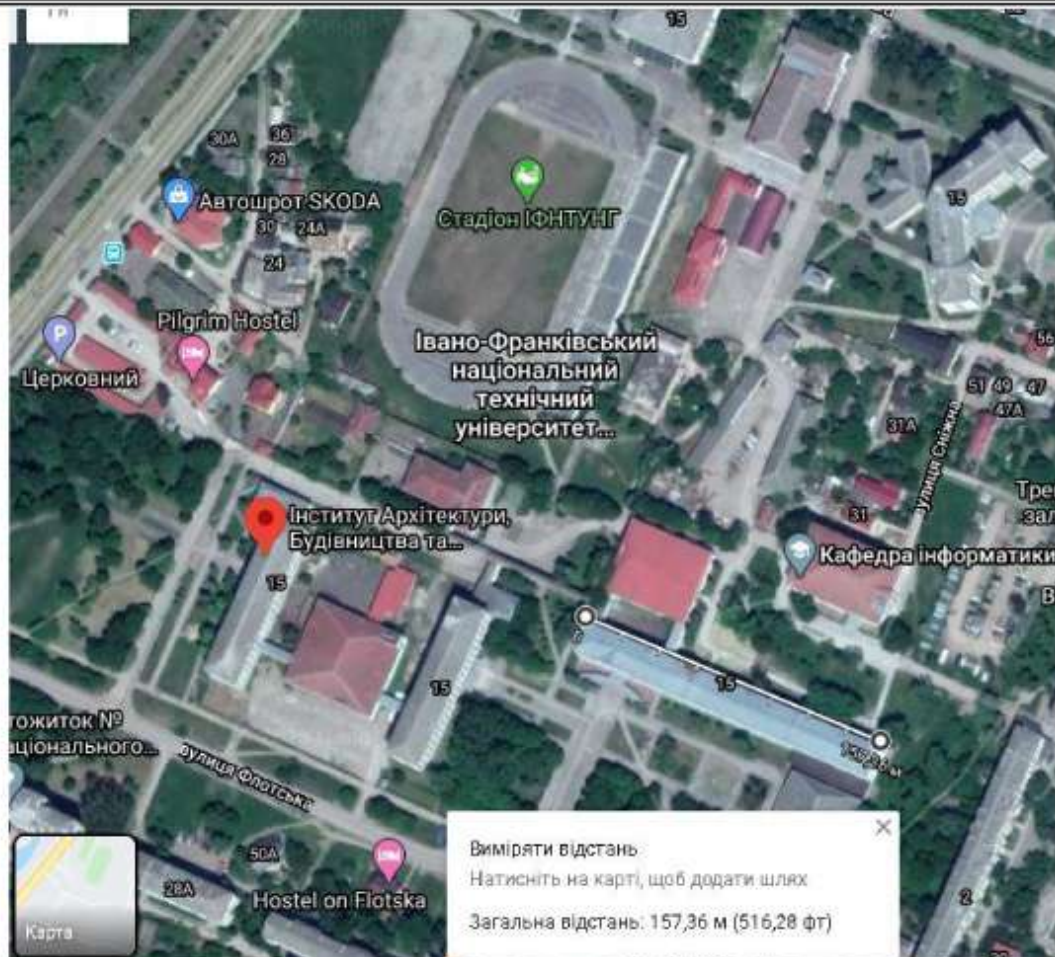


Рисунок 1.3 – Карта корпусів в ІФНТУНГ

Після визначення місця встановлення необхідно перейти до розрахунку кількості фотомодулів яка може поміститися на Вашу площу даху. Для більш грубого розрахунку потрібно виділену площу розділити на площу фотомодуля з урахуванням ширини міжпанельного зажиму як правило його ширина становить 26 мм.

Тепер необхідно дізнатися скільки фотомодулів можна розмістити на нашому даху.

Візьмемо для прикладу стандартний фотомодуль, нехай це буде панель AmeriSolar AS-6P30-280.

Габаритні розміри фотомодуля становлять 1640x992x35 мм, площа буде рівна 1,62 м². Слід також врахувати ширину міжпанельного зажиму яка як правило становить 26 мм, а це 0,042 м² по всій висоті фотомодуля.



Рисунок 1.4 – Врахування площі міжпанельного зажиму та площі фотомодуля

Тепер знаючи площу фотомодулів та площу даху можна взяти скільки фотомодулів можна розмістити на нашій кривлі та їх максимальну потужність.

Якщо площі і надалі недостатньо можна, використати більш потужніші фотомодулі, або побудувати наземну металоконструкцію.

Сайт <https://abc-solar.com.ua> дозволяє врахувати вибраний фотомодуль, кількість, а також кут нахилу панелі та азимут.

Для розрахунку оптимального кута панелей іноді користуються такою формулою:

$$\alpha_{OPT} = GS \cdot 0,76 + 3,1^\circ, \quad (1.1)$$

де GS - географічна широта (для Івано-Франківська 48).

$$\alpha_{OPT} = 48 \cdot 0,76 + 3,1^\circ = 39,58^\circ.$$

Широту місця розташування станції можна легко визначити онлайн. Наприклад, за допомогою сервісу Google Maps, знайшовши необхідну точку на карті, та клікнувши по ній один раз.



Рисунок 1.5 – Розміщення корпусу №1
за допомогою сервісу Google Maps, а також його площа

2. ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Виконайте розрахунок кількості електроенергії, яку генеруватиме фотоелектрична станції потужністю X , кВт (X – номер варіанту) для вказаних областей України, які знаходяться на Заході, Сході, Півночі, Півдні країни, в столиці.
2. Розрахуйте споживання електроенергії будинком з визначеним навантаженням.
3. Визначте площу фотомодулів для обраної потужності ФЕС, застосувавши різні типи фотомодулів.

3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які чинники впливають на продуктивність фотоелектричних станцій.
2. Чим відрізняються мережеві, автономні та гібридні інвертори. В яких випадках встановлюють контролери?
3. Які режими споживання існують і як їх врахувати при виборі ФЕС?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №2

Тема: ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Мета заняття: Навчитися вибирати якісне та ефективне електрообладнання для сонячних електростанцій.

І. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Сонячні електростанції – це інженерні конструкції, які призначені перетворювати енергію Сонця на електричну енергію і складаються з фотомодулів (монокристалічні, полікристалічні, тонкоплівкові, з використанням діселеніда індію і міді (CIS технологія), телуриду кадмію (CdTe технологія), з використанням аморфного кремнію, з технологіями моно PERC, TOPCon, гетероструктурними технологіями (HJT), технологіями «Half-cut cell technology». Всі ці технології розробляють, щоб підвищити ефективність фотомодулів та збільшити їх продуктивність на одиницю площі.

В табл. 2.1 наведено потужності, розміри та основні параметри кількох фотомодулів

Таблиця 2.1 – Параметри фотомодулів

№	тип фотомодуля	потужність, Вт	площа	Ціна, грн	Voc	Isc
1	SunPower X22-370	380	1,55x1,05		69,5	6,7
2	SunPower E20-327	327	1,55x1,05		64,8	6,24
3	SunPower P19 - 405	405	2,067x1		52,9	9,87
4	Canadian Solar	340	1,7x0,99		43,7	9,81
5	SunPower P19 - 405	405	2,06x1		52,9	9,87
6	Алтек ALM-260P	260	1,65x0,99	3850	37,97	8,73
7	Алтек ALM-140M	140	1,48x0,67	3879	22,5	8,56
8	Алтек ALM-140P	140	1,48x0,67	3063	22,5	8,56
9	Алтек ALM-100M	100	1,13x0,68	2914	22,9	6,33
10	Алтек ALM-100P	100	1,13x0,68	2860	22,9	6,33
11	Алтек ALM-50M	50	0,52x0,68	1646	22,6	3,81
12	Алтек ALM-50P	50	0,52x0,68	1616	22,6	3,81

Основними характеристиками сонячних панелей є їх продуктивність, термін експлуатації та надійність виробника.

1. Продуктивність фотомодулів залежить від таких факторів:

- Потужність – найважливіший критерій сонячної панелі. Він означає, що, наприклад, фотомодуль потужністю 250 Вт буде генерувати не менше 250 Вт за умови: освітленість складе не менше 1000 Вт/м^2 за температури 25°C ; панель буде не затінена і повернена на південь під кутом, що відповідає азимуту.
- Похибка номінальної потужності – це критерій, який показує на скільки реальне значення потужності може відрізнятись від характеристик, зазначених у паспорті. Тобто, якщо потужність фотомодуля 300 Вт, а похибка номінальної потужності $\pm 5\%$, то це означає, що потужність панелі може коливатися від 285 до 315 Вт. Якісні панелі мають мінімальне відхилення від технічних характеристик, при цьому воно завжди направлено в позитивну сторону.
- Ефективність роботи фотоелементів (ККД) – параметр, який показує скільки світла, отриманого фотомодулем, буде перетворено в електроенергію. Чим вищий ККД тим більша продуктивність панелі. У сучасних фотомодулів ККД може сягати 20 %. Обравши сонячні панелі з високим ККД можна зменшити площу, необхідну для встановлення станції.
- Температурний коефіцієнт – показник, який відображає наскільки знизиться генерована потужність при підвищенні температури на 1 градус. Оскільки напруга і потужність модуля при підвищенні температури зменшуються, а струм підвищується, то починається скорочення обсягів генерації електроенергії. Чим менший температурний коефіцієнт зміни потужності, тим кращою є сонячна панель.

Термін експлуатації означає зниження їх ефективності з часом. Сьогодні практично всі виробники надають гарантію продуктивності фотомодулів на 25 років. Через цей час продуктивність сонячної панелі складе 80 % від вихідних показників, тобто, зниження генерації за 25 років експлуатації складе 20% .

Надійність визначаються класифікацією Tier 1,2,3.

Розглянемо фотомодулі, які використовуються в лабораторіях кафедри ЕЕМ (рис.2.1).



Рисунок 2.1 – Характеристика фотомодуля АКМ50

Верхня частина наклейки містить основні дані про панель – бренд виробника і якому типу відповідає даний фотомодуль (полі/монокристал).

Характеристики:

- 1) тип модуля, потужність при оптимальних робочих умовах (високий рівень інсоляції, температура нижче 25 градусів), в нашому прикладі 50 Вт, та тип панелі (полі або монокристал, відповідно літери P або M);
- 2) Толеранс - допустиме відхилення від номінальної потужності в позитивну сторону;
- 3) V_m – напруга при максимальній потужності. Визначає показник напруги при максимальній робочій потужності фотомодуля;
- 4) I_m – сила струму при максимальній потужності. Визначає показник сили струму при максимальній робочій потужності фотомодуля;
- 5) Open Circuit Voltage (V_{oc}) – напруга розімкнутого контуру, або ж напруга холостого ходу. Це максимально можлива напруга масиву сонячних панелей, яка досягається на контурі, не підключеного до навантаження або яке відсутнє на контурі;

6) Short Circuit Current (I_{sc}) – струм короткого замикання. Це максимально допустиме значення струму на контурі. При перевищенні значення, лінія розмикається автоматом;

7) Maximum System Voltage – максимально допустима напруга в мережі. (750 В);

8) Поля «Weight» та «Dimensions» визначають вагу та габарити фотомодуля відповідно. 700x510x30 мм;

Також можуть вказуватися температурні коефіцієнти та коефіцієнти STC, NOCT.

STC – стандартні тестові умови 25 ° C і освітленість 1000 Вт/м².

NOCT - номінальна робоча температура сонячного елемента (NOCT) вимірюється при температурі повітря 20 ° C і освітленості фотоелектричного модуля 800 Вт / м², чим він нижчий, тим модуль ефективніший. Середнє значення NOCT становить близько 48 ° C.

Інвертори крім класифікації за призначенням (мережеві, автономні та гібридні) поділяють залежно від вихідного сигналу (чистим синусоїдним, квазісинусоїдним та модифікованим).

Від інвертора з чистою синусоїдальною (чистий синус) формою можна живити будь-яке навантаження змінного струму. Несинусоїдальні інвертори з прямокутною (меандр) формою напруги не підходять для багатьох видів навантаження, наприклад, асинхронних двигунів або трансформаторів. До такого навантаження відносяться так само холодильники, різні насоси, пральні машини тощо. Інвертори з синусоїдальною вихідною напругою дорожче, ніж квазісинусоїдальні, але висока ціна цілком компенсується якістю одержуваної енергії і меншими втратами.

Ефективність інверторів залежить від потужності фотомодулів, які до нього під'єднано, а часто не в літні місяці ця потужність зменшується.

Явне зниження ефективності починається при навантаженні інвертора нижче 30 % від номінальної потужності. Оскільки, щонайменше, 40 % сонячного випромінювання потрапляє на сонячні модулі в діапазоні 100 - 400 Вт/м² (в діапазоні понад 1000 Вт / м² не більше 10 %) то завищення потужності інвертора може привести до істотного зниження ефективності перетворення струму. На підставі цих даних, слід приймати потужність інвертора значенню від 90 % до 120 % від номінальної потужності сонячних батарей.

Для вибору інвертора необхідно перевірити його основні характеристики:

1. Вхідна напруга (12 В – до 1000 Вт, 24 В – для потужності 1000-3000 Вт, 48 В – більше 3000 Вт)
2. Номінальна і пікова потужність
3. Форма вихідної напруги
4. Вага (якісні інвертори важать приблизно 1 кг на 100 Вт),
5. Охолодження
6. ККД
7. Потужність в режимі очікування
8. Захисти
9. Робочі напруги та температури.

Таблиця 2.2 – Параметри інверторів

фірма	Потужність	К-сть фаз	U, В	Ціна	Тип	Регулювання напруги	ККД
POWER MASTER	0,8	1	12	11043	АДБЖ	3%	75
Altek AEP	1	1	12	8185	АДБЖ	180-265	80
Altek AEP	2	1	24	13040	АДБЖ	180-265	80
POWER MASTER	6	1	48	42035	АДБЖ	3%	75
POWER MASTER	8	1	48	57850	АДБЖ	3%	75
Altek AEP	5	1	48	22200	АДБЖ	180-265	80
Huawei	33	3		90782	мережевий	200-1000V	98
Huawei	12	3		56928	мережевий	200-950V	98
Huawei	20	3		75085	мережевий	200-950V	98
Huawei	8	3		50119	мережевий	200-950V	98
Huawei	17	3		74328	мережевий	200-950V	98
Fronius	25	3		95164	мережевий	200-800	99
Fronius	25	3		91600	мережевий	200-800	98
Fronius	27	3		98000	мережевий	200-800	98
Fronius	10	3		64700	мережевий	200-800	98
Fronius	20	3		94500	мережевий	200-800	98

Fronius	3	3		32373	мережевий	200-800	98
Fronius	3,7	3		43550	мережевий	200-800	98
AGI-	0,3	1		3330	мережевий	190-260	97
Advanced Energy (REFUсол)	8,25	3		88900	мережевий		
Kaco	3	1		4000	мережевий	180-280	97
Advanced Energy (REFUсол)	10	3		90720	мережевий		98
Advanced Energy (REFUсол)	13	3		95100	мережевий		98
Advanced Energy (REFUсол)	17	3		99700	мережевий		98
Advanced Energy (REFUсол)	20	3		107000	мережевий		98
Huawei	23	3		87630	мережевий	200-950V	98
Fronius	3	3		40000	мережевий	200-800	99
Fronius	3	3		36325	мережевий	200-800	99
Fronius	3,7	3		40100	мережевий	200-800	99
Fronius	4,5	3		46000	мережевий	200-800	99
Fronius	4,5	3		42510	мережевий	200-800	99
Fronius	5	3		46710	мережевий	200-800	99
Fronius	5	3		43264	мережевий	200-800	99
Fronius	6	3		47700	мережевий	200-800	99

2. ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Розрахувати фотоелектричну систему, що забезпечує комфортний режим енергозабезпечення об'єкту розташованого в м. Івано-Франківськ. Площа на якій можна розмістити фотоелементи (дах будинка) задано в таблиці 2.3. Розрахувати варіанти для фотомодулів різної потужності (50, 100, 260, 340...).

Таблиця 2.3 – Площа даху об'єкту згідно варіанту

Площа даху в м. Івано-Франківськ									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
130	120	105	900	850	80	485	195	105	1100

Побудувати щомісячні залежності енергоспоживання об'єкту та генерування електроенергії для ФЕС згідно варіантів, якщо споживання дорівнює даним з таблиці 2.4 додавши $10 \cdot X$ кВтгод (X -номер варіанту). Проаналізувати можливість розташування сонячних панелей на відведеній території.

Визначити величину напруги постійного струму енергосистеми.

Виконати вибір контролеру заряду, блоку акумуляторів та інверторів. Визначити сумарну вартість енергосистеми.

Оскільки енергосистема працює в комфортному режимі автономного забезпечення, то вона повинна забезпечувати 70 % щомісячних енергозатрат об'єкта. Відповідні дані наведені у таблиці 7.

Таблиця 2.4 - Щомісячне споживання електроенергії об'єктом у комфортному режимі автономного забезпечення.

Режим автономного забезпечення	Щомісячне споживання електроенергії (кВт·год)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
комфортний	90	80	70	60	60	50	60	60	70	80	90	95

Вибір фотомодулів.

Для установки нами була вибраний фотомодуль фірми «...», основні характеристики якої наведені в таблиці 2.5.

Вибір даної батареї обумовлений наступними міркуваннями.

Слід відзначити, що струм в одному блоці енергосистеми, не повинен перевищувати (100-200) А, що обумовлено робочими особливостями сучасних інверторів. У блоці сонячні панелі були підключені паралельно.

Контролер заряду. Напруга – 12/24/36/48 В. Максимальний струм на вході – 60-200 А.

Максимальний струм навантаження – А.

Таблиця 2.5. Основні параметри сонячної батареї

Параметр	Значення
тип	
вихідна потужність (Вт)	
номінальна напруга (В)	
номінальна сила струму (А)	
максимальна напруга (В)	
максимальна сила струму (А)	
розміри (мм)	
вага (кг)	
робоча температура (°C)	
термін експлуатації (80 % потужності після 20 років експлуатації)	

Примітка: параметри представлені при експлуатаційній температурі 25 °C, освітленні 1000 Вт/м², АМ – 1,5.

Блок акумуляторів. При виборі акумуляторів будемо орієнтуватися на свинцево-кислотні акумулятори, оскільки вони мають найкраще співвідношення ціна-ємність та є безпечними у випадку стаціонарного розміщення.

Далі необхідно визначити максимальне середньодобове значення вироблення електроенергії. Найбільш поширеними є акумулятори з напругою 12 В та номінальною ємністю 200 А·год (2,4 кВт·год). Як було зазначено, глибина розряду акумулятора повинна складати не більше 20 % від його номінальної ємності, в даному випадку становити – 0,48 кВт·год. Робоча ємність складає 0,96 кВт·год.

В цьому випадку для ефективного зберігання згенерованої енергосистемою, що розраховується, електроенергії необхідно використати 10 акумуляторів (GPL 12-200 (12В-200А)).

Блок інверторів. Для вибору інвертора потрібно визначити місяць у якому фотоелектрична система виробляє максимальну середньодобову кількість енергії.

Важливо відмітити, що якісний інвертор повинен мати синусоїдальну форму вихідного сигналу з похибкою форми не більшою 3 % та щоб він не змінював амплітуду напруги при підключенні навантаження більшого 10 % від номінальних значень. Інвертор також

повинен володіти значним запасом по перевантаженню, набором захисних функцій від короткого замикання, неправильного підключення або несправності акумуляторів, від перевантаження.

Сумарна вартість енергосистеми буде рівна... (визначаємо).

3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які типи фотомодулів Ви знаєте, в чому їх різниця?
2. Які параметри фотомодулів зазначають на етикетці? За яких умов вони зняті?
3. В чому особливість вибору інвертора?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №3

Тема: ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК. ВПРОВАДЖЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ЗА «ЗЕЛЕНИМ ТАРИФОМ»

Мета заняття: Навчитися визначати економічні показники сонячних електростанцій з врахуванням «зеленого тарифу».

I. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Згідно закону про електроенергетику: **зелений тариф** - тариф, за яким оптовий ринок електричної енергії України зобов'язаний закуповувати електричну енергію, вироблену на об'єктах електроенергетики з альтернативних джерел енергії (крім доменного та коксівного газів, а з використанням гідроенергії - вироблена лише мікро-, міні-та малими гідроелектростанціями), у тому числі на введених в експлуатацію пускових комплексах. Енергопостачальники зобов'язані купувати електричну енергію, у випадках, обсягах та за цінами, визначеними національною комісією регулювання електроенергетики України (НКРЕ).

Зелений тариф - механізм, призначений для заохочення населення для вироблення електроенергії з альтернативних джерел енергії [3].

Законодавством прописані варіанти встановлення:

- приватні електростанції потужністю до 30 кВт, встановлені на даху або фасаді,
- потужні сонячні електростанції потужністю від 100 кВт до кількох МВт.

Порядок впровадження таких проектів і потрібні інвестиції суттєво розрізняються. Час на впровадження та умови, необхідні для реалізації проектів, також різні.

Розмір зеленого тарифу:

Сонячні електростанції:

для наземних СЕС: 17,0-16,0-15,0 €/кВт·год протягом найближчих 3 років, 10 %- зниження з 2020 та 2025 рр.,

для дахових СЕС: 18,0 €/кВт·год,

для приватних домогосподарств: 20,0 €/кВт·год.

Геотермальна енергія: 15,0 €/кВт·год.

Вітрові електростанції: 10,2 €/кВт·год.

Гідроелектростанції: 17,5, 14,0 і 10,5 €/кВт·год для мікро-, міні- та малих ГЕС відповідно).

Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних (НКРЕКП) послуг постановою від 29 грудня 2016 року № 2382, встановила нові «зелені» тарифи на електричну енергію для приватних домогосподарств.

В 2019 році анонсовано про поступове зменшення «зеленого тарифу» для ФЕС, а в діючий закон "Про альтернативні джерела енергії" (Відомості Верховної Ради України, 2003 р., № 24, ст. 155; 2017 р., № 27-28, ст. 312; 2019 р., № 23, ст. 89) внесено такі зміни:

"Коефіцієнт "зеленого" тарифу для електроенергії, виробленої генеруючими установками приватних домогосподарств з використанням альтернативних джерел енергії з 01.01.2020 по 31.12.2024, встановлюється на рівні:

для електроенергії, виробленої з енергії сонячного випромінювання генеруючими установками приватних домогосподарств, встановлена потужність яких не перевищує 30 кВт	3,02
для електроенергії, виробленої з енергії вітру генеруючими установками приватних домогосподарств, встановлена потужність яких не перевищує 50 кВт	1,94
для електроенергії, виробленої з енергії вітру та сонця на комбінованих вітро-сонячних генеруючих системах приватних домогосподарств, встановлена потужність яких не перевищує 50 кВт	2,28

У цілому розмір «зеленого» тарифу розраховується за формулою, передбаченою Законом про електроенергетику:

$$PЗТ = PЦ * K * КПН,$$

де PЗТ – це розмір «зеленого» тарифу залежно від виду альтернативного джерела енергії;

PЦ – роздрібна ціна на електроенергію для споживачів другого класу;

К – коефіцієнт, встановлений законом про електроенергетику,
КПН – коефіцієнт пікового навантаження для трьох зон тарифної класифікації

В Україні “зелений тариф” генерацій прив’язаний до курсу євро — інвестор гарантовано отримає дохід. У березні, згідно з постановою НКРЕКП, тариф для малих ГЕС становив від 3 до 5 гривень за кВт/г залежно від потужності. Побутові споживачі з 1 квітня сплачують 36,6 або 63 копійки за кВт/г залежно від обсягів споживання.

Таким чином, якщо фотоелектрична станція виробляє біля 9900 - 12000 кВтгод електроенергії в рік за «зеленим» тарифом, а власне споживання на домогосподарство складає 200-300 кВтгод в місяць, або 2400 — 3600 кВтгод в рік, маємо суттєву різницю між виробленою і спожитою електроенергією, що пояснює економічну ефективність від впровадження подібних проектів.

Таблиця 4.1 – Величина «зеленого тарифу» для сонячних електростанцій до змін в законодавстві 2015 року

Вид альтернативного джерела енергії	Потужність електростанції та інші чинники, що впливають на розмір «зеленого» тарифу	РЦ, EUR/кВт·г	К	КПН	Ставка тарифу (євро/кВт)
Вітер	До 600 кВт включно	0,05385	1,2	—	0,06462
	Більше 600, але не перевищує 2000 кВт	0,05385	1,4	—	0,07539
	Понад 2000 кВт	0,05385	2,1	—	0,113085
Сонячна енергія	Електростанції на поверхні землі	0,05385	3,5	1,8	0,339255
	Електростанції на дахах та/або фасадах будинків з потужністю, що перевищує 100 кВт	0,05385	3,6	1,8	0,348948
	Електростанції на дахах та/або фасадах будинків з потужністю до 100 кВт включно	0,05385	3,7	1,8	0,358641
	Електростанції на дахах та/або фасадах приватних домогосподарств із потужністю до 10 кВт включно	0,05385	3,7	1,8	0,358641
Біомаса та біогаз	Відходи	0,05385	2,3	—	0,123855
Гідроелектростанції	Мікрогідроелектростанції (до 200 кВт включно)	0,05385	2	1,8	0,19386
	Міні-гідроелектростанції (понад 200 кВт, але не більше 1000 кВт)	0,05385	1,6	1,8	0,155088
	Малі гідроелектростанції (до 10 000 кВт включно)	0,05385	1,2	1,8	0,116316

Для суб’єктів господарювання, приватних домогосподарств і споживачів, у тому числі енергетичних кооперативів, які виробляють електричну енергію з використанням альтернативних джерел енергії, "зелений" тариф встановлюється до 1 січня 2030 року.

Розмір плати за придбану у побутового споживача електричну енергію, вироблену генеруючою установкою приватного домогосподарства, в обсязі, що перевищує місячне споживання електроенергії такими приватними домогосподарствами визначається за формулою:

$$Pr = (W_G - W_C) Z_m.$$

Розрахуємо собівартість електроенергії університету, яку він купує в Прикарпаттяобленерго (тепер Прикарпаттяенерготрейд) та порівняємо її з собівартістю електроенергії, яка буде вироблена сонячною електростанцією.

З сайту Прикарпаттяенерготрейд шукаємо вартість купленої електроенергії і зводимо її в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Вартість електроенергії для університету

№ п/п	місяць	тариф 2019, грн/кВтгод	тариф 2019, з ПДВ, грн/кВтгод	тариф 2018, грн/кВтгод	тариф 2018, з ПДВ, грн/кВтгод
1	січень	2,58	3,096	2,21	2,652
2	лютий	2,58	3,096	2,28	2,736
3	березень	2,58	3,096	2,26	2,712
4	квітень	2,6	3,12	2,39	2,868
5	травень	2,6	3,12	2,39	2,868
6	червень	2,6	3,12	2,39	2,868
7	липень	2,98	3,576	2,41	2,892
8	серпень	2,8	3,36	2,41	2,892
9	вересень	2,6	3,12	2,41	2,892
10	жовтень	2,72	3,264	2,42	2,904
11	листопад	2,72	3,264	2,42	2,904
12	грудень	2,72	3,264	2,42	2,904

Розрахуємо кількість електроенергії, яку споживає корпус №Х університету кожного місяця, кількість електроенергії, яку генеруватиме сонячна електростанція потужністю 100 кВт, фотомодулі якої направлені на південь з оптимальним кутом за азимутом. Вартість мережевої СЕС

потужністю 100 кВт становить 104500 доларів (2612500 грн за курсом 1 долар=25 грн). джерело <https://solar-tech.com.ua/ua/complete-systems/setevye-stancii/network-station-100-kwt-for-business.html>).

Таблиця 3.2 – Кількість електроенергії, яку споживає корпус №Х університету і генерує сонячна електростанція 50 кВт

місяць	кількість електроенергії, яку генерує за місяць СЕС 1 кВт	кількість електроенергії, яку генерує за місяць СЕС 50 кВт	середня кількість спожитої електроенергії, кВтгод	різниця електроенергії, яку можна продати за "зеленим тарифом", кВтгод
січень	19	950	3000	-2050
лютий	43	2150	4000	-1850
березень	70	3500	3200	300
квітень	101,4	5070	3000	2070
травень	118,3	5915	2800	3115
червень	128,96	6448	2000	4448
липень	131	6550	1500	5050
серпень	119	5950	1300	4650
вересень	86,1	4305	2100	2205
жовтень	51,8	2590	2700	-110
листопад	21,3	1065	3200	-2135
грудень	14,2	710	3100	-2390
сума за рік		45203	31900	

Складемо детальний кошторис проекту.

До основних витрат входить:

- попередня оцінка можливості виконання проекту (виїзд на об'єкт;
- аналіз документів;
- передпроектні та проектні роботи, оформлення "зеленого" тарифу та дозвільної документації (уточнення вихідних даних; підготовка проектно-кошторисної документації; узгодження проектно-кошторисної документації; отримання ліцензії на виробництво електроенергії; підключення "зеленого" тарифу; юридичний супровід об'єкта),

- обладнання (Сонячні батареї, полікристал, з ТОП-10 світових лідерів ринку (Trina, Jinko, JA solar, Risen, Suntech і т.п.), інвертори, кріплення, Система захисту та автоматики, кабельна продукція, витратні матеріали, розподільчі пристрої; система захисту по постійному струму; система захисту по змінному струму; кабель на стороні постійного струму; кабель по стороні змінного струму; АСКУЕ;

- монтаж і пуско-налагоджувальні роботи.

Всі витрати зводимо в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Детальний кошторис проекту «СЕС 50 кВт»

№	Назва	Сума, грн
1	Попередня оцінка можливості виконання проекту	0
2	Передпроектні та проектні роботи, оформлення "зеленого" тарифу та дозвільної документації	20 000
3	<i>Обладнання:</i>	
	Сонячні батареї, полікристал, з ТОП-10 світових лідерів ринку (Trina, Jinko, JA solar, Risen, Suntech и т.п.)	540 000
	Інверторне обладнання з ТОП-10 світових лідерів ринку (ABB, Fronius, SMA и т.п.)	107 000
	Система кріплення сонячних батарей	16 500
	Система захисту та автоматики, кабельна продукція, витратні матеріали розподільчі пристрої; система захисту по постійному струму; система захисту по змінному струму; кабель по стороні постійного струму; кабель по стороні змінного струму; АСКУЕ	50 000
4	Монтаж і пуско-налагоджувальні роботи	6 500
Всього		740 000

Розрахуємо скільки коштів заплатив університет за спожиту електроенергію згідно вказаних тарифів і зведемо розрахунок в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Вартість електроенергії для університету

	тариф 2018, з ПДВ, грн/кВт год	оплата за електр оенергі ю 2018, грн	тариф 2019, з ПДВ, грн/кВ тгод	оплата за електро енергію 2019, грн	оплата за електро енергію 2016, грн	оплата за електро енергію 2015, грн
січень	2,652	7956	3,096	9288	6060	4800
лютий	2,736	10944	3,096	12384	8080	6400
березень	2,712	8678,4	3,096	9907,2	6464	5120
квітень	2,868	8604	3,12	9360	6060	4800
травень	2,868	8030,4	3,12	8736	5656	4480
червень	2,868	5736	3,12	6240	4040	3200
липень	2,892	4338	3,576	5364	3030	2400
серпень	2,892	3759,6	3,36	4368	2626	2080
вересень	2,892	6073,2	3,12	6552	4242	3360
жовтень	2,904	7840,8	3,264	8812,8	5454	4320
листопад	2,904	9292,8	3,264	10444,8	6464	5120
грудень	2,904	9002,4	3,264	10118,4	6262	4960
сума за рік		90255		101575	64438	51040

Собівартість корисної одержаної електроенергії включає витрати підприємства на оплату електроенергії, річні експлуатаційні витрати на утримання загальної схеми електропостачання.

Внутрішньо університетська собівартість електроенергії

$$S_{\text{внутр}} = \frac{П_{\text{ен.сп}} + U_{\text{екс}}}{E_{\text{пр}}},$$

де $U_{\text{екс}}$ – експлуатаційні витрати, грн.

$$П_{\text{ен.сп}} = \tau_1 \cdot E_{\text{ОДЕР}},$$

де τ_1 – тариф на електроенергію, для нашого університету грн/кВт·год.

Оскільки, тариф на електроенергію змінюється кілька раз на рік врахуємо дані, як він змінювався за останні роки.

Середня закупівельна ціна електроенергії за останні 5 років:

$$S_{\text{внутр}} = (101575 + 90255 + 78570 + 64438 + 51040 + 0,54) / 159500 = 2,42 \text{ грн/кВт·год.}$$

Якщо університет буде продавати різницю електроенергії між споживанням та генеруванням за «зеленим тарифом» 4,14 грн/кВт·год, то в деякі осінні та зимові місяці (жовтень, листопад, грудень, січень, лютий) буде не вистачати електроенергії і ми будемо її купувати, в інші місяці продавати.

В результаті ми отримаємо прибуток

$$\Pi = 90409 - 27203 = 63206 \text{ грн/рік.}$$

Термін окупності

$$T_{\text{ок}} = K / \Pi = 740000 / 63206 = 11,7 \text{ років.}$$

Розрахуємо собівартість електроенергії виробленою СЕС з терміном роботи 20 років

$$S_{\text{внутр}} = \frac{740000}{45203 \cdot 20} = 0,8 \text{ грн/кВт·год.}$$

Результати зводимо в таблицю 3.5.

Таблиця 3.5 – Рух коштів за спожиту та згенеровану електроенергію

місяць	різниця електроенергії, яку можна продати за "зеленим тарифом", кВтгод	Витрата коштів на купівлю, грн	Прибуток від продажу за "зеленим тарифом", грн
січень	-2050	-6346,8	
лютий	-1850	-5727,6	
березень	300		1242
квітень	2070		8569,8
травень	3115		12896,1
червень	4448		18414,72
липень	5050		20907
серпень	4650		19251
вересень	2205		9128,7
жовтень	-110	-359,04	
листопад	-2135	-6968,64	
грудень	-2390	-7800,96	
сума за рік		-27203	90409,32

Собівартість електроенергії, яка виробляє СЕС значно вища за ринкову вартість електроенергії.

Розрахуємо також чистий приведений дохід (Net Present Value). NPV характеризує загальний результат інвестиційної діяльності, її кінцевий ефект.

$$NPV = \sum \frac{ПП}{(i+1)^N} - K,$$

де i – ставка дисконту, N – рік реалізації проекту, K – інвестиції.

Результати розрахунку зводимо в табл.3.6.

Таблиця 3.6 – Розрахунок чистого приведенного доходу

рік	Пр	сума пр	NPV	ARR
0	63206	63206	-676794	
1	52671,67	52671,66667	-687328	0,071178
2	43893,06	96564,72222	-643435	0,065246
3	36577,55	133142,2685	-606858	0,059974
4	30534,3	163676,568	-576323	0,055296
5	25404,34	189080,9089	-550919	0,051103
6	21167,45	210248,357	-529752	0,047353
7	17655,31	227903,6642	-512096	0,043997
8	14699,07	242602,734	-497397	0,04098
9	12249,22	254851,9588	-485148	0,038266
10	10210,99	265062,9443	-474937	0,035819
11	8506,864	273569,8083	-466430	0,033608
12	7085,874	280655,6828	-459344	0,031605
13	5907,103	286562,7856	-453437	0,029788
14	4922,586	291485,3712	-448515	0,028136
15	4101,622	295586,9936	-444413	0,026629
16	3418,388	299005,3819	-440995	0,025254
17	2848,4	301853,7821	-438146	0,023995
18	2374,38	304228,1622	-435772	0,02284
19	1978,279	306206,4408	-433794	0,021779
20	1648,996	307855,4363	-432145	0,020801

Оскільки значення даного критерію негативне, то це означає, що за аналізований період 20 років дохід не переважає витрати, варіант вважають економічно не вигідним, так як не забезпечується повернення вкладених інвестицій за термін служби і отримання прибутку. Для дохідного проекту необхідно звести до мінімуму споживання електроенергії корпусом або зменшити вартість проекту.

Коефіцієнт рентабельності (ARR)

$$ARR = \frac{\sum \Pi}{N} \cdot \frac{1}{K}$$

2. ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Задача 3.1

Розрахувати термін окупності сонячної електростанції, яка має споживання електроенергії X кВт·год за місяць, якщо задана її потужність, вартість та час введення в експлуатацію.

Варіант	Потужність СЕС, кВт	Вартість, грн	Введено в експлуатацію	Спожита потужність будинком, кВт·год/місяць
1	3	83720	01.2012	100
2	5	162400	06.2013	200
3	5 (ЕКО)	145600	01.2013	300
4	5 (Економ)	125020	06.2015	150
5	7	235200	01.2014	200
6	10	320400	06.2016	120
7	10 (Економ)	215600	01.2017	20
8	20	615000	06.2017	30
9	30	930000	01.2011	20
10	1	29000	01.2016	10

РОЗВ'ЯЗАННЯ

Розглянемо приклад розрахунку для сонячної електростанції потужність 1 кВт, яка коштує 29000 грн і введена в експлуатацію 05 квітня 2013 року. Електроенергію вона буде відпускати по ціні 987,44 коп/кВт·год.

За рік електростанція виробить 996 кВт·год електроенергії, але оскільки будинок споживав по 10 кВт·год за місяць, то за рік споживання будинку $996 - 120 = 876$ кВт·год.

Прибуток від вироблення електроенергії за зеленим тарифом:

$$9,87 \cdot 876 = 8650 \text{ грн.}$$

Термін окупності даної електростанції

$$T_{\text{ок}} = \frac{29000}{8650} = 3,4 \text{ року.}$$

Задача 3.2

Для будинку з заданою кількістю спожитої електроенергії розрахувати, яку потужність сонячної електростанції необхідно. Скласти детальний кошторис проекту «СЕС вибраної потужності», оцінити можливість продажу за «зеленим тарифом». Розрахувати чистий приведений дохід та коефіцієнт рентабельності.

Варіант	Спожита потужність будинком, кВтгод/місяць
1	100
2	200
3	300
4	150
5	250
6	120
7	20
8	30
9	20
10	10

3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке «зелений тариф»?
2. Наведіть переваги та недоліки застосування автономних сонячних та вітрових електростанцій з акумуляторами.
3. Як визначити необхідну потужність сонячної електростанції для будинку?
4. Яку потужність дозволено підключати до «зеленого тарифу» для приватних сонячних електростанцій.
5. Як визначити окупність введення в експлуатацію сонячної електростанції?
6. Що таке чистий приведений дохід та коефіцієнт рентабельності?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №4

Тема: ПОРІВНЯННЯ ГЕНЕРУВАННЯ СТАЦІОНАРНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ТА ТРЕКЕРНИХ СОНЯЧНИХ СИСТЕМ

Мета заняття: Виконати порівняння ефективності генерування стаціонарних та трекерних сонячних систем за умов заданих кліматичних та географічних факторів.

I. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Сонячний трекер – це система, призначена для орієнтації на Сонце робочих поверхонь систем, які генерують електроенергію. В даному випадку робочою поверхнею виступають сонячні фотоелектричні модулі.

Розрізняють стаціонарні (статичні) системи та динамічні (трекерні), які в свою чергу поділяються на одноосьові (з вертикально орієнтованою віссю, з горизонтально орієнтованою віссю та з похилою віссю) та двохосьові трекери (з опорною площиною та на несучому стовпі).

Кут нахилу сонячної батареї має велике значення для її продуктивності. Справа в тому, що ефективніше всього фотомодулі працюють тільки тоді, коли їх поверхня орієнтована перпендикулярно падаючому сонячному потоку. Іншими словами, фотоелектричні модулі повинні бути змонтовані таким чином, щоб сонячні промені падали на робочу поверхню модуля під кутом 90° . У цьому випадку фотоелементи поглинають максимальну кількість фотонів і виробляють максимальний електричний струм.

Встановлення фотоелектричних модулів відбувається на спеціальних конструкціях, які забезпечують оптимальну орієнтацію на сонце і надійне кріплення до різних типів поверхонь на місцях установки: наземні фундаменти, дахи, а також вертикальні поверхні.

Кут нахилу та орієнтація фотомодулів для максимальної продуктивності залежить від координат місця встановлення.

Оптимальний кут нахилу сонячних панелей залежить від широти місцевості, а так само може бути змінений, в залежності від того, якої оптимізації у виробництві енергії необхідно домогтися. Так, його може бути зменшено від оптимального значення, якщо фотоелектрична система

працює в літній період, збільшений, якщо фотоелектрична система експлуатується в основному в осінньо-зимовий період, або прийнято середнім за значенням, якщо фотоелектрична система призначена для цілорічної експлуатації.

Розміщувати масив сонячних модулів можна будь-де, потрібно лише дотримуватись кількох основних правил:

- генеруюча поверхня модулів, наскільки це можливо, повинна бути направлена на південь ($\pm 15^\circ$);
- затінення сонячних модулів повинно бути мінімальним;
- сонячні батареї не повинні підлягати впливу підвищених температур, рекомендовано розташовувати їх в місці, де вони будуть обдуватися вітром;

Таблиця 4.1 - Оптимальний кут нахилу для встановлення сонячних панелей

Область	Широта	«Літній» кут нахилу	«Середній» кут нахилу	«Зимовий» кут нахилу
Вінницька	49°	34°	49°	64°
Волинська	50°	35°	50°	65°
Дніпропетровська	48°	33°	48°	63°
Донецька	48°	33°	48°	63°
Житомирська	50°	35°	50°	65°
Закарпатська	48°	33°	48°	63°
Запорізька	47°	32°	47°	62°
Івано-Франківська	48°	33°	48°	63°
Київська	50°	35°	50°	65°
Кіровоградська	48°	33°	48°	63°
Луганська	48°	33°	48°	63°
Львівська	49°	34°	49°	64°
Миколаївська	46°	31°	46°	61°
Одеська	46°	31°	46°	61°
Полтавська	49°	34°	49°	64°
Рівненська	48°	33°	48°	63°
Сумська	50°	35°	50°	65°
Тернопільська	49°	34°	49°	64°
Харківська	50°	35°	50°	65°
Херсонська	46°	31°	46°	61°
Хмельницька	49°	34°	49°	64°
Черкаська	49°	34°	49°	64°
Чернівецька	48°	33°	48°	63°
Чернігівська	51°	36°	51°	66°
АР Крим	44°	29°	44°	59°

Характеристики покрівлі мають бути достатніми для додаткового вагового навантаження.

Змінимо кут нахилу, а результати занесемо в таблицю 4.2 і 4.3.

Таблиця 4.2 – Зміна кількості згенерованої електроенергії за рік від кута нахилу фотомодулів потужністю 20 кВт

кут	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	Сума за рік
0	78	231	468	811	1060	1202	1172	944.77	567.2	268.97	85.57	51.06	211856
10	112	296	554	905	1144	1283	1266	1056.42	674.0	349.23	124.17	78.19	239338
20	143	353	623	971	1193	1326	1321	1135.97	760.4	418.90	159.00	102.94	259551
30	170	398	674	1008	1206	1328	1336	1181.00	823.7	475.84	188.97	124.58	271876
35	181	417	691	1015	1199	1313	1328	1190.13	846.0	499.00	201.87	134.00	274956
40	191	432	704	1014	1183	1289	1310	1190.16	861.9	518.32	213.23	142.42	275941
45	199	444	711	1005	1158	1255	1283	1181.16	871.3	533.74	222.93	149.74	274828
50	206	452	712	989	1124	1212	1245	1163.16	874.0	545.06	231.00	155.94	271623
60	215	459	699	935	1030	1097	1142	1100.81	859.5	555.23	241.73	164.71	259049
70	218	452	665	851	905	949	1004	1005.00	818.8	548.55	245.13	168.48	238605
80	214	431	610	742	753	773	835	878.68	753.3	525.16	241.10	167.13	210911
90	203	397	537	611	577	573	641	725.65	664.9	485.84	229.70	160.71	176807
110	164	29	344	297	180	127	201	358.74	430.8	364.55	186.60	133.55	93684
135	88	117	48	0	0	0	0	0.00	69.1	153.35	101.90	77.55	19827

З таблиці 4.2 видно, що оптимальна вироблення протягом року це нахилити сонячні батареї 35-45 ° в південному напрямку, і при цьому Ви можете оцінити втрати, якщо збираєтеся розташувати Вашу сонячну електростанцію з відхиленням.

Таблиця 4.3 – Зміна кількості згенерованої електроенергії за рік азимуту

азимут	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	Сума за рік
120	125	304	531	817	997	1105	1104	956	648	362	139	90	219119
150	173	398	657	961	1133	1240	1255	1127	804	476	193	128	260716
південь (180)	191	432	704	1014	1183	1289	1310	1190	861	518	213	142	275941
210	173	398	657	961	1133	1240	1255	1127	804	476	193	128	260716
240	125	304	531	817	997	1105	1104	956	648	362	139	90	219119

Якщо немає можливості регулювання кута нахилу відносно азимуту, то фотопанелі повинні розташовуватися під оптимальним кутом, значення якого часто приймається рівним широті місцевості. Невеликі відхилення до 5 градусів від цього оптимуму надають незначний ефект на продуктивність сонячних панелей.

2. ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Визначити вартість трекерної системи та порівняти, як зміниться генерування електроенергії ФЕС потужністю $P=X+5$ кВт, де X – номер варіанту, якщо кут нахилу фотомодулів 20, 40, 60, 80 градусів.

Вартість комплекту трекерної системи сонячної електростанції знаходимо в інтернеті, наприклад сайт <http://greenchip.com.ua/26-0-0-0.html> та зводимо варіанти трекерних комплектів в таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 – Вартість трекерних систем сонячних електростанцій

Назва комплекту	Потужність фотомодулів, Вт	Принцип роботи	Вартість, грн
Система слідкування за Сонцем ST1500	до 2000 (6 панелей)	двохосьовий, рух по параболі, кут повороту 180° , розрахунок положення Сонця по даних GPS	15000
Система слідкування за Сонцем ST1000	до 1400 (4 панелей)	+	11000
Сонячний трекер ST10	до 5000 (20 панелей)	Опорно-поворотний привід SE9 + GPS	85000
Сонячний трекер ST20	до 10000 (40 панелей)	Опорно-поворотний привід SE14 + GPS	105000
Система орієнтування ST600	до 700	GPS	8000

Для прикладу візьмемо ФЕС потужністю 1 кВт, відповідно вартість трекерної системи 11000 грн.

Для порівняння генерування нерухомими та трекерними системами використаємо додаток https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP

При встановленні фотомодулів під кутом 20° ФЕС згенерує 259551 кВт-год електроенергії.



Рисунок 4.1 – Вхідні параметри для розрахунку в програмі PVGIS

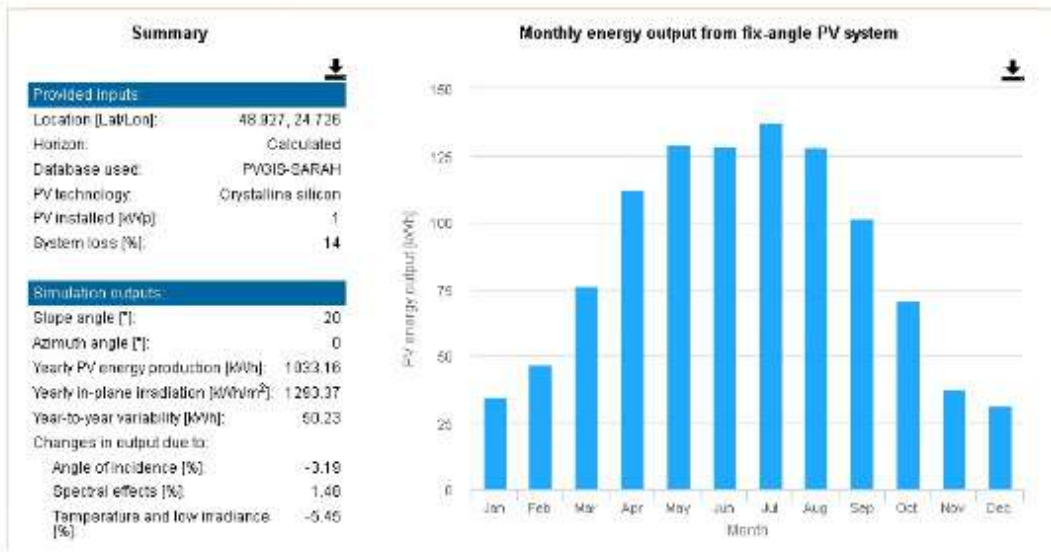


Рисунок 4.2 – Результати розрахунку в програмі PVGIS для стаціонарної нерухомої системи при куті нахилу 20°



Рисунок 4.3 – Результати розрахунку в програмі PVGIS для трекерних систем

Визначимо різницю між генеруванням стаціонарної ФЕС та трекерною одновісною системою:

$$\Delta W_{20^\circ} = W_1 - W_0 = 1357 - 1033 = 324 \text{ кВтгод};$$

$$\Delta W_{40^\circ} = W_1 - W_0 = 1357 - 1070 = 287 \text{ кВтгод};$$

$$\Delta W_{60^\circ} = W_1 - W_0 = 1357 - 1010 = 347 \text{ кВтгод};$$

$$\Delta W_{80^\circ} = W_1 - W_0 = 1357 - 855 = 502 \text{ кВтгод};$$

Термін окупності одновісного трекера

$$T_{ок} = \frac{K}{E} = \frac{11000}{287 \cdot 0,16 \cdot 29} = \frac{11000}{1332} = 8,3 \text{ року.}$$

3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Чим відрізняються трекери за функціональністю?
2. Що таке трекери?
3. На скільки відсотків знижує ефективність фотомодулів затінення?
4. Які типи трекерних систем Вам відомі?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №5

Тема: РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Мета заняття: Навчитися знаходити розв'язки систем нелінійних рівнянь для визначення параметрів електричних кіл з нелінійними елементами.

І. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Коефіцієнт корисної дії сонячної установки можна визначити за формулою:

$$\eta = \frac{P_2}{E_i \cdot S},$$

де P_2 - вихідна потужність сонячного джерела, Вт,

E_i - сонячна інсоляція, яка падає на поверхню фотомодуля, Вт/м²;

S - площа поверхні, м².

Оскільки, сонячна інсоляція є змінною величиною, то буде змінюватися й потужність, яку віддає фотомодуль. При ясному небі сонячна інсоляція 1000-1200 Вт/м², при мінливій хмарності 600-800 Вт/м², в похмурий день, коли небо вкрите хмарами 100-400 Вт/м².

ККД сучасних фотопанелей 10-25 %, але він зменшується під час експлуатації і залежить від типу кристалів.

Для визначення продуктивності фотоелектростанції необхідно визначити, як будуть змінюватися параметри кожного з фотомодулів при зміні інсоляції.

Використаємо математичну модель для дослідження параметрів фотомодуля. Вхідними даними є параметри температури, інсоляції, відповідно яких дана модель буде ВАХ фотомодуля.

$$P = U \cdot I = U \cdot I_{PH} - I_s \left(e^{\frac{q}{nkT} \left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right)} - 1 \right),$$

де вихідний струм прямопропорційний енергії сонячного випромінювання

$$I_{\beta} = (E, T) = \frac{E_x}{E_{\text{ном}}} \cdot I_{\text{КЗ}} + k_i (T - T_s),$$

де $I_{\text{КЗ}}$ - струм КЗ при нормальній роботі, $\frac{E_x}{E_{\text{ном}}}$ - відношення величини сонячної інсоляції до нормованої величини сонячної інсоляції ($\text{Вт}/\text{м}^2$),

k_i - температурний коефіцієнт струму КЗ,

T - температура модуля, $^{\circ}\text{C}$

T_s - температура модуля при стандартних тестових умовах (25°C).

Сонячні елементи із кремнію являються нелінійними пристроями, тому для опису їх роботи необхідно користуватися вольт-амперними характеристиками.

Модель ВАХ для сонячного елемента зображена на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 - Модель ВАХ для сонячного елемента

Рівень потужності ФЕС залежить від температури та величини сонячної інсоляції і обчислюється шляхом прямого використання інформації про погоду, або визначається за допомогою формул:

$$T_{PV} = T_i + E_{\beta} \frac{(T_0 - 20)}{0,8}, \quad (1)$$

$$I_{PV} = \frac{I_{\beta}}{I_K} (I_K + k_i (T_0 - 25)), \quad (2)$$

$$U_{PV} = U_X - k_U T_{PV}, \quad (3)$$

$$P_{PV} = N \cdot FF \cdot U_{PV} I_{PV}, \quad (4)$$

$$FF = \frac{U_{MPP} I_{MPP}}{U_X I_K}, \quad (5)$$

де T_{PV} - фактична температура на сенсорі фотомодуля, $^{\circ}\text{C}$;

T_i - температура навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$;

E_{β} - величина сонячної інсоляції, Вт/м^2 ;

I_{β} - струм при заданій сонячній інсоляції, А ;

T_0 - температура на сенсорі фотомодуля за температури навколишнього середовища 20°C , сонячної інсоляції 800 Вт/м^2 та швидкості вітру 1 м/с ;

I_K - струм короткого замикання;

k_i - струмо-температурний коефіцієнт, $\text{А/}^{\circ}\text{C}$;

U_X - напруга холостого ходу;

k_U - напруго-температурний коефіцієнт $\text{В/}^{\circ}\text{C}$;

FF - коефіцієнт (full factor);

U_{MPP} - напруга при пошуку максимальної потужності (MPPT - Maximum power point tracker);

I_{MPP} - струм при MPPT.

2. ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Для заданого фотомодуля побудувати графік зміни потужності від зміни сонячної інсоляції при заданих значеннях температури повітря та температури нагрівання фотомодуля.

Для фотомодуля АКМ50 і його параметрів визначимо максимальну потужність:

$$P_M = V_m I_m = 18,6 \cdot 2,69 = 50,034 \text{ Вт.}$$

Якщо температура повітря 30°C , та інсоляція 500 Вт/м^2

$$I_{\beta} = (E, T) = \frac{E_x}{E_{НОМ}} \cdot I_{KZ} + \alpha_s (T - T_s) =$$

$$= \frac{500}{1000} 2,9 + (-0,0005)(50 - 45) = 1,1575 \text{ A}$$

$$I_{PV} = \frac{I_{\beta}}{I_K} (I_K + k_i (T_0 - 25)) = \frac{1,1575}{2,9} (2,9 - 0,0005(30 - 25)) = 1,1565 \text{ A.}$$

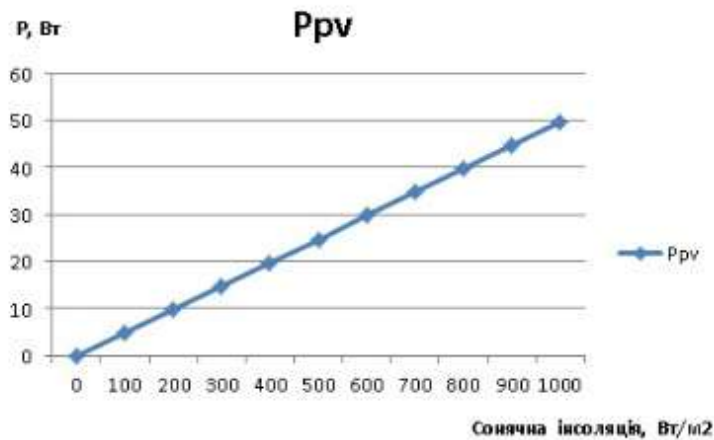
$$U_{PV} = U_X - k_U T_{PV} = 22,3 - 0,0034 \cdot 45,6 = 22,14 \text{ В.}$$

$$FF = \frac{U_{MPP} I_{MPP}}{U_X I_K} = \frac{18,6 \cdot 2,69}{22,3 \cdot 2,9} = 0,77$$

Потужність при заданих параметрах:

$$P_{PV} = N \cdot FF \cdot U_{PV} I_{PV} = 1 \cdot 0,77 \cdot 22,14 \cdot 1,1565 = 24,77 \text{ Вт.}$$

Будуємо залежність зміни потужності від зміни сонячної інсоляції для заданої моделі.



2. Для заданих ВАХ фотомодулів провести апроксимацію функції:
- за допомогою заданих трьох (п'ятьох) точок провести апроксимацію методом мінімізації суми квадратів нев'язок;
 - здійснити апроксимацію за допомогою онлайн-калькулятора.

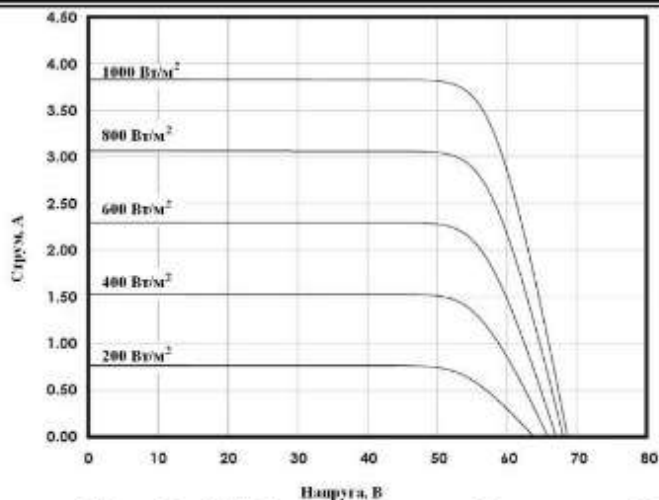


Рисунок 5.3 – ВАХ фотомодуля «hit power 200»

Таблиця 5.2 – Приклад значення струмів та напруг

№п/п	Струм, А	Напруга, В
1	3,83	0
2	3,82	48,59
3	3,8	51
4	3,76	53
5	3,67	55
6	3,56	56
7	3,44	57
8	3,09	59
9	2,85	60
10	2,25	62,18
11	1,75	63,85
12	1,25	65,38
13	0,75	66,74
14	0,25	68,08
15	0	68,7

3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Чому дорівнює ККД фотоелементу?
2. Чому ККД сонячного модуля нижчий, ніж ККД його складових сонячних елементів?
3. Як впливає температура на ефективність фотопанелі?
4. Від яких факторів залежить ефективність роботи сонячного модуля?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №6

Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СУМІСНОЇ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В МЕРЕЖІ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Мета заняття: Навчитися застосувати методи для розв'язку нелінійних диференціальних рівнянь.

І. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Згідно з європейським стандартом EN50160 (ІЕС 50160) показники якості електроенергії, що передається в енергосистему, в більшості європейських країнах нормуються та контролюються операторами енергосистеми.

Крім відхилень частоти та напруги, особлива увага приділена коефіцієнтам несиметрії, коефіцієнтам гармонічних складових та дозі флікеру.

Електромагнітна сумісність (ЕМС) — здатність радіоелектронних засобів і випромінювальних пристроїв одночасно функціонувати з обумовленою якістю в реальних умовах експлуатації з урахуванням впливу ненавмисних радіозавад і не створювати неприпустимих радіозавад іншим радіоелектронним засобам

Дані показники слід віднести до показників електромагнітної сумісності, що регламентують:

- ДСТУ ІЕС 60050-161:2003 Словник електротехнічних термінів. Глава 161, Електромагнітна сумісність;

- ДСТУ EN 61000-2-2:2012 Електромагнітна сумісність. Частина 2. Електромагнітна обстановка. Рівні сумісності для низькочастотних кондуктивних завад і сигналів систем сигналізації в низьковольтних електропостачальних системах загальної призначеності,

- ДСТУ EN 61000-3-3:2012 Електромагнітна сумісність. Частина 3-3. Норми на рівні флуктуацій напруги та флікера в низьковольтних системах електроживлення для устаткування з номінальною силою струму до 16 А на фазу, не призначеного для підключення за певних умов,

- ДСТУ ІЕС 61000-4-11:2007 Електромагнітна сумісність. Частина 4-11. Методики випробування та вимірювання. Випробування на

несприйнятливість до провалів напруги, короточасних переривань і змінень напруг,

- ДСТУ ІЕС 61000-4-30:2010 Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії.

Таблиця 6.1 – Вимоги відповідно нормативних документів до ФЕС, увімкнених в мережу для різних країн

Показник	ГОСТ 32144-2013	EN 50160	EN 61000 (низьковольтні мережі)
Відхилення напруги	Нормально допустиме відхилення напруги $\pm 5\%$, гранично допустиме $\pm 10\%$,	Нормально допустиме відхилення напруги $\pm 4\%$, гранично допустиме $\pm 6\%$,	Нормально допустиме відхилення напруги $\pm 5\%$, гранично допустиме $\pm 10\%$,
Відхилення частоти	Допустиме відхилення частоти $\pm 0,2$ Гц, граничне значення $\pm 0,4$ Гц	Відхилення частоти $\pm 2\%$	$\pm 1\%$ (49,5 – 50,5 Гц) 95 % часу тижня, максимальні відхилення (-6% до +4%) (47–52 Гц)
Коефіцієнти гармонічних спотворень	Від 0,2 % до 6 % від $U_{\text{ном}}$	6%-5а гармоніка, 5%-7а, 3.5%-11а, 3%-13а, THD <8%	5% - 3я, 6%- 5а, 5%- 7а, 1.5% 9-а, 3.5% 11-а, 3% 13-а, 0.3% 15а, 2% 17-а
Коефіцієнти несиметрії	$K_{0U} \leq 2\%$ протягом 95% часу інтервалу, $K_{2U} \leq 4\%$ протягом 95% часу інтервалу		
Флікер	Доза флікера $P_{ST} < 1,38$; доза флікера $P_{LT} < 1,0$	-	Доза флікера при зміні напруги $P_{LT} < 1$,

Електромагнітна складова збитку від втрат електроенергії може мати кілька складових: збитки від несинусоїдальності:

Додаткові втрати активної потужності зумовлені несинусоїдністю

$$\Delta P_{NSIN} = \frac{\Delta P_H}{Z_{1*}} \sum_{n=2}^S \frac{U_{H*}}{n\sqrt{n}}, \quad (6.1)$$

де ΔP_H - номінальні втрати активної потужності в струмоведучих частинах обладнання, кВт,

$$Z_{1*} = \frac{Z_1}{Z_H} \quad - \text{відносний повний опір елемента мережі струму}$$

основної гармоніки,

$$U_{H*} = \frac{U_n}{U_H} \quad - \text{відносне значення напруги } n\text{-ої гармоніки,}$$

n – число гармонік, яке розглядається.

З врахуванням втрат через несинусоїдальності річні збитки, зумовлені втратами потужності через несинусоїдність:

$$Z_{NSIN} = \beta T_C \Delta P_{NSIN} 10^3 + \Delta I_P K_P, \quad (4.2)$$

де ΔI_P - нормативний коефіцієнт відрахування на реновацію від капітальних затрат K ,

β - вартість втрат електроенергії.

Додаткові втрати від несиметрії

$$\Delta P_{НСиметр} = \frac{U_H^2 r_2}{Z_2^2} \alpha_U^2, \quad (4.3)$$

де r_2 і Z_2^2 - активний і повний опір елементів системи електропостачання струму зворотної послідовності, відповідно річний збиток від несиметрії

$$Z_{НСиметр} = \beta T_C \Delta P_{НСиметр} 10^3 + \Delta I_P K_P. \quad (4.4)$$

Розрахуємо максимальні втрати від несинусоїдності та несиметрії згідно виміряних значень за допомогою системи контролю.

Приведемо формулу втрат від гармонік до такого вигляду:

$$\Delta P_{NSIN} = \Delta P_X \sum K_{U(n)}^2 + 0,6 \frac{\Delta P_K}{U_{K\%}} \sum (K_{U(n)}^2 \cdot \frac{1}{n\sqrt{n}}),$$

де $K_{U(n)}^2$ - коефіцієнти гармонічної складової напруги взятої в вимірювальних одиницях, n - номер гармонік.

2. ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Системою контролю якості було визначено коефіцієнти п-гармонічної складової на шинах 10 кВ сонячної електростанції потужністю 1000 кВт, яка віддає електроенергію в мережу через трансформатор ТМЗ-1000/10. Визначити, які додаткові втрати спричинить неякісна електроенергія для трансформатора та асинхронного двигуна?

Таблиця 6.2 – Виміряні коефіцієнти

Коефіцієнт п-ої гармонічної складової $K_{U(n)}$		
n	Вимірний $K_{U(n)}$	Нормативний $K_{U(n)}$
2	0,47	1,5
3	2,55	3,0
4	0,62	0,7
5	6,00	4
6	0,57	0,3
7	4,50	3,0
8	0,29	0,3
9	0,9	1
10	0,13	0,3
11	2,99	2,0
12	0,13	0,2
13	2,99	2,0
14	0,13	0,2
15	2,55	0,3
16	0,15	0,2
17	2,55	1,5
18	0,13	0,2
19	2,55	1,0

Визначимо додаткові втрати в трансформаторах на ТП СЕС, параметри трансформаторів наведено в табл.4.1.

Таблиця 4.1 – Паспортні дані трансформаторів

Тип	$S_{ном},$ МВА	$U_{ном.ВН},$ кВ	$U_{ном.НН},$ кВ	$u_k, \%$	$P_{кз},$ кВт	$P_{хх},$ кВт	$I_{х.х},$ %
ТМЗ-1000/10	1	10	0,4	5,5	10,8	1,4	1,2

Активний струм трансформатора

$$I_T = \frac{S_{HK}}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10000} = 0,058 \text{ кА},$$

Активний опір трансформатора

$$R_T = \frac{\Delta P_K \cdot U_H^2}{S_H^2} = \frac{0,0108 \cdot 10^2}{1} = 1,08 \text{ Ом},$$

де ΔP_K - втрати короткого замикання трансформатора.

Номинальні втрати потужності

$$\Delta P_{T.ном} = \Delta P_{хх} + 3 \cdot I^2 \cdot R_T = 1,4 + 3 \cdot 58^2 \cdot 1,08 \cdot 10^{-3} = 12,3 \text{ кВт}.$$

де $\Delta P_{хх}$ - втрати холостого ходу трансформатора.

$$\begin{aligned} \Delta P_{NSIN} = & 1,55(0,025^2 + 0,06^2 + 0,045^2 + 0,029^2 + 0,0299^2 + 0,0255^2 + 0,025^2) \\ & + 0,6 \frac{12,3}{0,055} (0,025^2 \cdot \frac{1}{3\sqrt{3}} + 0,06^2 \cdot \frac{1}{5\sqrt{5}} + 0,045^2 \cdot \frac{1}{7\sqrt{7}} + 0,029^2 \cdot \frac{1}{9\sqrt{9}} + 0,0299^2 \cdot \frac{1}{11\sqrt{11}} + \\ & + 0,0255^2 \cdot \frac{1}{13\sqrt{13}} + 0,0255^2 \cdot \frac{1}{15\sqrt{15}} + 0,025^2 \cdot \frac{1}{17\sqrt{17}}) = 0,164 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Сумарні додаткові втрати в двох трансформаторах:

$$\sum P = 0,164 \cdot 2 = 0,328 \text{ кВт}.$$

Втрати в асинхронному двигуні.

Номинальний струм асинхронного двигуна:

$$I_T = \frac{P_{AD}}{\sqrt{3} \cdot U_H \cos \varphi} = \frac{0,08}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,91} = 0,005 \text{ кА},$$

Активний опір обмотки статора

$$R_T = \frac{K_M}{K_I^2} \frac{U_H^2}{P_H} = \frac{1,2}{5,1^2} \frac{10^2}{0,8} = 5,7 \text{ Ом},$$

Номинальні втрати потужностей

$$\Delta P_{M, \text{НОМ}} = 3 \cdot I^2 \cdot R = 3 \cdot 5^2 \cdot 5,7 \cdot 10^{-3} = 0,42 \text{ кВт}.$$

Додаткові втрати від струмів вищих гармонік:

$$\begin{aligned} \Delta P_{NSIN} &= 2 \Delta P_{MH} \cdot K_I^2 \sum (K_U^2 \cdot \frac{1}{n\sqrt{n}}) = \\ &= 2 \cdot 0,42 \cdot 5,1^2 (0,025^2 \cdot \frac{1}{3\sqrt{3}} + 0,06^2 \cdot \frac{1}{5\sqrt{5}} + 0,045^2 \cdot \frac{1}{7\sqrt{7}} + 0,029^2 \cdot \frac{1}{9\sqrt{9}} + 0,0299^2 \cdot \frac{1}{11\sqrt{11}} + \\ &+ 0,0255^2 \cdot \frac{1}{13\sqrt{13}} + 0,0255^2 \cdot \frac{1}{15\sqrt{15}} + 0,025^2 \cdot \frac{1}{17\sqrt{17}}) = 0,14 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Задача 2.

Розрахуємо додаткові втрати активної потужності в елементах СЕП (систем електропостачання) при підключенні сонячної електростанції при заданих коефіцієнтах несиметрії – 6 %, та гармонічних складових напруги: $U_3 = 8 \%$, $U_5 = 3,5 \%$, $U_7 = 4 \%$, $U_{11} = 3 \%$. Від шин 10 кВ підприємства живляться високовольтні асинхронні двигуни загальною потужністю 2000 кВт, низьковольтні – 5000 кВт, синхронні двигуни – 2500 кВт, трансформатори цехові 10/0,4 кВ – загальною потужністю 17500 кВА, силові конденсатори – 5500 квар; на ГПП встановлено два трансформатори 110/10 кВ потужністю 25 МВА кожен.

Додаткові втрати від несиметрії й несинусоїдності:

– асинхронних двигунів згідно з [5,6]:

$$\Delta P_{AD} = 2,29 \cdot (2,41 \cdot 0,06^2 + 2 \cdot (\frac{0,08^2}{3\sqrt{3}} + \frac{0,035^2}{5\sqrt{5}} + \frac{0,04^2}{7\sqrt{7}} + \frac{0,03^2}{11\sqrt{11}})) \cdot 7000 = 185,7 \text{ кВт},$$

– синхронних двигунів

$$\Delta P_{CD} = (0,68 \cdot 0,06^2 + 1,12 \cdot (\frac{0,08^2}{3\sqrt{3}} + \frac{0,035^2}{5\sqrt{5}} + \frac{0,04^2}{7\sqrt{7}} + \frac{0,03^2}{11\sqrt{11}})) \cdot 2500 = 10,27 \text{ кВт},$$

– силових трансформаторів

$$\Delta P_T = (2,67 \cdot 0,06^2 + 1,62 \cdot (\frac{1+0,05 \cdot 3^2}{3\sqrt{3}} \cdot 0,08^2 + \frac{1+0,05 \cdot 5^2}{5\sqrt{5}} \cdot 0,035^2 + \frac{1+0,05 \cdot 7^2}{7\sqrt{7}} \cdot 0,04^2 + \frac{1+0,05 \cdot 11^2}{11\sqrt{11}} \cdot 0,03^2)) \cdot 17500 = 239,2$$

З розрахунків зрозуміло, що економічні збитки від зниження якості електроенергії, що виникають в результаті впливу несиметрії струмів і напруги, обумовлені погіршенням енергетичних показників і скороченням терміну служби електроустаткування, загальним зниженням надійності функціонування електричних мереж, збільшенням втрат активної потужності і споживання активної та реактивної потужностей.

Задача 3.

Визначимо додаткові втрати потужності в асинхронному двигуні типу А4-450У-4У3 ($P_{ном} = 1000$ кВт, $K_p = 5,7$, $\eta_{ном} = 95,5\%$) від ВГ і несиметрії при наявності в спектрі наступних гармонік напруги: $U_{11} = 1,9\%$, $U_{13} = 1,5\%$.

Коефіцієнт несиметрії $K_{2U} = 1,8\%$.

Втрати потужності в АД при номінальному режимі роботи

$$\Delta P_{ном} = P_{ном} \frac{1 - \eta_{ном}}{\eta_{ном}} = 1000 \cdot \frac{1 - 0,955}{0,955} = 47,12 \text{ кВт}.$$

Вплив ВГ

$$\Delta P_n = \Delta P_{ном} \rho \sum_{n=2}^n \Lambda_n U_{nx}^2,$$

де $\Lambda_n = \frac{1}{n\sqrt{n}}$ - кратність гармонічних втрат,

ρ - індекс втрат для ВГ.

$$\text{Для АД } \rho = K_p^2 =$$

$$\Delta P_n = 47,12 \cdot 5,7^2 (0,027 \cdot 0,019^2 + 0,021 \cdot 0,015^2) = 0,022 \text{ кВт}$$

Несиметрія напруги

$$\Delta P_{нс} = \Delta P_{ном} \rho_{нс} K_{2U}^2 = 47,12 \cdot 2,41 \cdot 5,7 \cdot 0,018^2 = 0,21 \text{ кВт}.$$

3. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке електромагнітна сумісність?
2. Які показники якості електроенергії нормуються для сонячних електростанцій?
3. Як впливає несиметрія та гармонічні спотворення на втрати електроенергії?

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Калькулятор сонячної електростанції. Рентехно. Режим доступу: <https://rent techno.ua/ua/solar-calc.html>
2. А. С. Опанасюк, О. А. Доброжан. Методичні вказівки та завдання до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни фізико-технологічні основи перетворення сонячної енергії. / Суми. Сумський державний університет, 2016. – 37 с.
3. Гладь І. В. Основи енергоефективності. [Текст] / І. В. Гладь, Я. В. Бацала // Конспект лекцій.– Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016.– 113 с.
4. <http://www.reee.org.ua/energy-efficiency/systemy-enerhetychnoho-menedzhmentu/>
5. Енергетичний менеджмент. Посібник для слухачів навчальних курсів з енергетичного менеджменту/ Укладач А.А. Маліновський . – Львів: Регіональний центр з перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів у сфері енергозбереження та енергоменеджменту Національного університету «Львівська політехніка», 2001. - 100 с. (Бібліотека енергоменеджера, випуск 2).
6. Державна інспекція енергетичного нагляду України [Текст] / Режим доступу: <https://den.energy.gov.ua/77-aktualni-pitannya/533-shchodonerivnomirnosti-dobovoho-hrafika-navantazhennia-oes-ukrainy-ta-rehuliuвання-rezhymiv-elektrospozhyvannia> .
7. Споживання електроенергії побутовими приладами [Текст] / Режим доступу: <https://olympica.com.ua/164363-spozhyvannya-elektroenergi-pobutovimi-priladami.html>
8. Енергозбереження та енергоефективність. Сайт ВПУ № 7 м. Кременчук [Текст] / Режим доступу: http://energovpu7.ucoz.ua/load/tema_4/markuvannya_pobutovoji_tekhniki/14-1-0-46
9. Козак К. М. Системний підхід до оцінки енергоефективності джерел світла та освітлювальних установок / Козак К.М. — Тернопіль , 2014 — 200 с.
10. Прогнозування ефективності інвестиційного проекту. Навчальні матеріали онлайн. [Текст] / Режим доступу: <http://pidruchniki.com/>
11. Екоцентр. Впровадження систем на альтернативних джерелах енергії. [Текст] / Режим доступу: <http://www.ecosvit.net/ua/>
12. СТЕМ. Інтелектуальні системи. [Текст] / Режим доступу: <http://sudem.com.ua/>
13. Півняк Г. Г., Жежеленко І. В., Папаїка Ю. В. Енергетична ефективність систем електропостачання: монографія; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – 2-ге вид., переробл. і допов.– Дніпро: НТУ «ДП», 2018. – 148 с