

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій то технічного захисту інформації

Кафедра Радіотехнологій та інформаційно-комунікаційних систем

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА **Пояснювальна записка**

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ГЮІК.ХХХХХХ.001ПЗ

Методика оцінювання якісних показників роботи сонячних енергетичних

систем

(тема)

Виконала:

студентка ІІ курсу, групи ІВДЕМ-18-1

Чертова Д. О.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність

172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми

освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма

Інженерія відновлювальних джерел енергії

(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент Зарудний О. А.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Цопа О.І.

(прізвище, ініціали)

2019 р.

Не містить відомостей заборонених для відкритого публікування.

Студент

Д. О. Чертова

Керівник

О. А. Зарудний

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Інженерія відновлювальних джерел енергії

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«_____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Чертовій Дар'ї Олександрівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методика оцінювання якісних показників роботи сонячних енергетичних систем

затверджена наказом по університету від 4 листопада 2019 р. № 1646
СТ _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10 грудня 2019 р.

3. Вихідні дані до роботи Література за темою атестаційної магістерської роботи

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1) Особливості розбудови та перспективи розвитку сонячної енергетики

2) Аналіз факторів, що впливають на освітленість земної поверхні

3) Дослідження та моделювання режимів роботи АКБ

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п. 5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)
Слайди презентації

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основна частина	Зарудний О. А.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	ОСОБЛИВОСТІ РОЗБУДОВИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ	5.11 – 13.11	
2	АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ОСВІТЛЕНІСТЬ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ	13.11 – 20.11	
3	ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ	20.11 – 4.12	
4	Оформлення пояснювальної записки та виготовлення слайдів презентації	4.12 – 10.12	

Дата видачі завдання _____ 20__ р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис) _____
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська атестаційна робота складається з пояснювальної записки, котра містить: 86 сторінок тексту, 37 рисунків, 5 таблиць, 24 джерел та 2 додатки.

СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ. СОНЯЧНЕ СЯЙВО. СОНЯЧНА БАТАРЕЯ. АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ.

У роботі розглянута методика оцінювання якісних показників роботи сонячних енергетичних систем.

У якості елемента дослідження було вибрано найбільш енергонасичений і найбільш небезпечний елемент енергопостачання – акумуляторний накопичувач

Методика оцінювання полягала у тому, що були визначенні критерії завдяки яким накопичувач міг вийти з ладу або створити небезпеку, яка могла полягати у спалаху або вибуху

Результатом розробки методики оцінювання явилось визначення оптимального режиму роботи накопичувача, при якому вказані проблеми сводилися до мінімуму. Одним із критеріїв оцінювання являлось відхилення роботи накопичувача від вимог обумовлених стандартними вимогами експлуатації.

ABSTRACT

The master's degree work consists of an explanatory note containing: 86 pages of text, 37 figures, 5 tables, 24 sources and 2 appendices.

SOLAR POWER PLANT. SUNLIGHT. SOLAR BATTERY. BATTERY.

The method of estimation of qualitative indicators of work of solar energy systems is considered in the work.

The most energy-intensive and the most dangerous element of energy supply was selected as the research element - the battery store

The assessment technique was to determine the criteria by which the drive could malfunction or create a hazard that could result in a flash or explosion.

The result of the development of the evaluation method was to determine the optimal mode of operation of the drive, in which these problems were minimized. One of the evaluation criteria was the deviation of the drive from the requirements of the standard operating requirements.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 ОСОБЛИВОСТІ РОЗБУДОВИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ	11
1.1 Радіаційний і світовий режим	11
1.1.1 Тривалість сонячного сяяння	13
1.2 Актуальність сонячної енергетики	16
1.3 Сонячні енергостанції	23
1.3.1 Мережеві сонячні електростанції	23
1.3.2 Автономні сонячні електростанції	25
1.3.3 Гібридні сонячні електростанції	27
1.4 Акумулятори для сонячних електростанцій	29
2 АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ОСВІТЛЕНІСТЬ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ	35
2.1 Сонячне саяво. Основні поняття.	35
2.1.1 Основні і додаткові фактори та їх вплив на прихід сонячного випромінення на довільно-орієнтовану приймальною майданчик в точці A (ϕ , ψ) на Землі і в космосі.	43
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ АКБ	53
3.1 Сонячна станція - як основне джерело енергії	53
3.2 Постановка задачі дослідження	54

3.2.1 Структурна схема і результати досліджень	57
3.2.2 Моделювання з метою оптимізації параметрів накопичувачів за напругою розряду і заряду	66
3.2.3 Запропонований алгоритм програми визначення оптимального розряду АКБ	70
ВИСНОВКИ	72
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	73
ДОДАТОК А	77
ДОДАТОК Б	86

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

СЕС – сонячна енергостанція

СС – сонячне сьйво

ТСС – тривалість сонячного сьйва

ВДЕ – відновлювані джерела енергетики

АКБ – акумуляторні батареї

СК – свинцево-кислотні

ТЕС – теплова енергостанція

АЕС – атомна енергостанція

ПМ – приймальний майданчик

СЕУ – сонячна енергоустановка

ШІМ – широтно-імпульсний модулятор

СБ – сонячна батарея

ВСТУП

Альтернативна енергетика на даний момент не є чимось унікальним, а навпаки, досить популярна і розвивається метод отримання енергії із зовні.

Одним з напрямків альтернативної енергетики є сонячна енергетика. Вона заснована на безпосередньому використанні сонячного випромінювання для отримання енергії в будь-якому вигляді. Сонячна енергетика є «екологічно чистою», під цим терміном мають на увазі, що не виробляється шкідливих відходів під час активної фази використання.

Переваги сонячної енергетики:

- Перспективність, доступність і невичерпність джерела енергії в умовах постійного зростання цін на традиційні види енергоносіїв;
- Теоретично, повна безпека для навколишнього середовища, хоча існує ймовірність того, що повсюдне впровадження сонячної енергетики може змінити альbedo (характеристику відбивної (розсіює) здатності) земної поверхні і привести до зміни клімату (однак при сучасному рівні споживання енергії це вкрай мало ймовірно).

Недоліки:

- Залежність від погоди і часу доби.
- Сезонність в середніх широтах і розбіжність періодів вироблення енергії і потреби в енергії. Нерентабельність в високих широтах, необхідність акумуляції енергії.
- При промисловому виробництві - необхідність дублювання сонячних енергетичних установок традиційними порівнянної потужності.
- Висока вартість конструкції, пов'язана із застосуванням рідкісних елементів (наприклад, індій і телур).
- Необхідність періодичної очистки відбиває / поглинаючої поверхні від забруднення.
- Нагрівання атмосфери над електростанцією.

- Необхідність використання великих площ.
- Складність виробництва та утилізації самих фотоелементів в зв'язку з вмістом в них отруйних речовин, наприклад, свинець, кадмій, галій, миш'як і т. д.

Метою даної магістерської роботи є дослідження можливостей роботи накопичувачів енергії, які знаходяться у критичному стані, без видалення їх з енергосистеми.

В зв'язку з цим в магістерській роботі вирішувались наступні завдання:

- Провести аналіз даних які отримуються при роботі СЕС;
- Побудувати моделі для визначення оптимального режиму роботи сонячних накопичувачів.

1 ОСОБЛИВОСТІ РОЗБУДОВИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

1.1 Радіаційний і світовий режим

Серед утворюючих факторів сонячна радіація відіграє чи не першорядну роль. За останнім часом відомості про сонячну радіацію, так звана, актинометрична інформація, все ширше використовується в народному господарстві. Радіаційні умови враховуються при будівельному проектуванні і плануванні виробництва, при розподілі різного виду ресурсів і матеріалів, витрати палива і електроенергії; радіаційні умови враховуються також численними народно-господарськими організаціями в їх повсякденній діяльності [1].

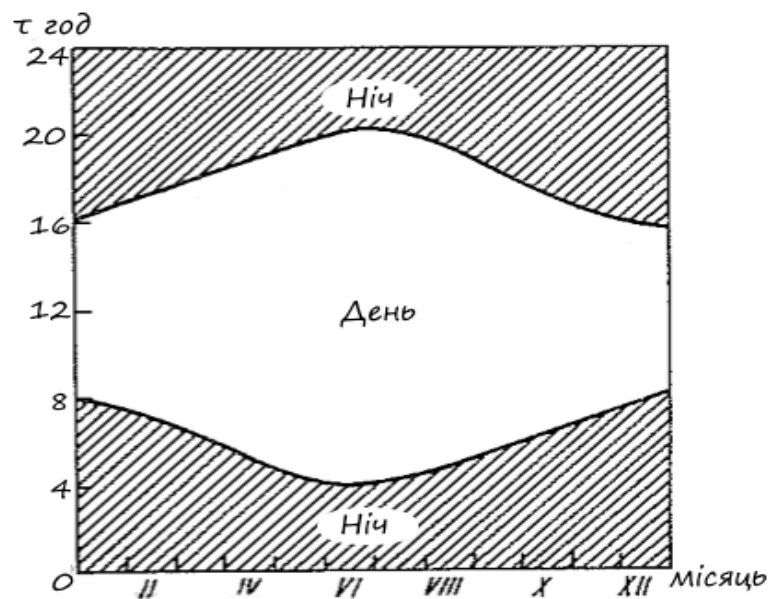
Прихід сонячної радіації до земної поверхні обумовлюється в основному астрономічними факторами – висотою сонця і тривалістю дня. Влітку в районі Харкова сонце піднімається високо над горизонтом і день досить довгий, взимку - навпаки (табл. 1.1, рис. 1.1). Тому в різні сезони існує велика різниця в припливі сонячної радіації [2].

Таблиця 1.1 – Висота (h_{\odot}) та азимут (A_{\odot}) сонця на 15-те число кожного місяця

Місяць	6 год. 30 хв.		9 год. 30 хв.		12 год. 30 хв.		15 год. 30 хв.		18 год. 30 хв.	
	h_{\odot}	A_{\odot}	h_{\odot}	A_{\odot}	h_{\odot}	A_{\odot}	h_{\odot}	A_{\odot}	h_{\odot}	A_{\odot}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>l</i>	—	72	11,0	38	18,5	8	6,0	47	—	81

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
II	—	78	17,5	42	27,2	9	14,0	50	—	85
III	2,3	84	27,7	46	36,8	10	22,2	55	—	92
IV	12,5	90	39,5	51	49,0	12	31,2	65	2,5	102
V	19,5	96	46,8	56	56,5	14	37,5	73	10,5	108
VI	22,2	100	50,2	61	61,5	15	40,5	76	13,0	110
VII	20,0	94	48,0	60	60,0	13	40,0	74	12,2	108
VIII	15,0	93	42,0	55	53,5	12	35,0	68	6,7	103
IX	8,2	87	34,5	46	43,0	10	25,7	62	—	98
X	1,2	76	24,7	38	31,0	9	14,7	57	—	93
XI	—	69	16,0	33	21,7	8	6,2	52	—	86
XII	—	68	10,2	31	16,0	8	2,4	47	—	80

Рисунок 1.1 – Тривалість τ (год) дня та ночі

Освітлення приміщень, вулиць, дворів прямими сонячним опроміненням залежить від висоти і азимута сонця. Висота сонця, тобто кут між напрямком на сонце і горизонтальною площиною, визначає кут падіння на неї сонячних променів. Азимут - кут між площиною меридіана і вертикальною площиною, що проходить через сонце, - визначає, з якого боку падають сонячні промені. Азимут сонця зазвичай відраховують від напрямку на південь. У табл. 1.1 поміщені значення висоти (h_{\odot}) і азимута сонця (A_{\odot}), отримані для основних актинометричних термінів на 15-е число кожного місяця.

1.1.1 Тривалість сонячного сяяння

Важливою характеристикою режиму сонячної радіації є тривалість сонячного саява (ТСС). Для її визначення служить геліограф. В якості характеристик ТСС використовуються наступні показники: можлива ТСС, рівна проміжку часу від сходу до заходу сонця в даному пункті при безхмарному небі з урахуванням закритості горизонту; фактична і відносна ТСС. На ТСС сильно впливає хмарність, через яку фактична тривалість сонячного саява виявляється в середньому набагато менше можливої.

У Харкові найменші значення (28 год) місячної суми ТСС, або 11% від можливої, спостерігаються у грудні, що викликано як найменшою тривалістю дня, так і найбільшою ймовірністю похмурого стану неба в цьому місяці (табл. 1.2). У зимові місяці мінливість ТСС найбільша, про що свідчать найбільші в річному ході коефіцієнти варіації ($C_v = 0,50 \dots 0,54$).

Навесні у зв'язку із збільшенням тривалості дня і зменшенням хмарності ПСС фактична і відносна значно збільшується. У березні вона становить 116 ч (32% можливої), в квітні 177 ч (43% можливої), в травні 247 ч (52% можливої).

Найбільша сума годин (295 год) з сонячним саявом і найбільший відсоток (60%) від можливої припадають на липень.

Влітку максимум ТСС спостерігається в 9-12 год, а безперервна тривалість її може зберігатися протягом 10-12 год. Восени ТСС значно скорочується.

У вересні число годин сонячного сяйва зменшується до 204 ч, але ставлення спостерігалось сонячного сяйва до можливого ще велике (54%). У жовтні та листопаді внаслідок скорочення дня і збільшення хмарності ТСС зменшується відповідно до 126 і 53 год.

Характеристикою відносної стійкості радіаційного режиму може служити відношення між найбільшими і найменшими значеннями ТСС (табл. 1.2). Найбільша відносна стійкість ТСС відзначається з травня по вересень, коли вказане відношення становить 1,6-2,1.

Таблиця 1.2 – Тривалість τ (год) сонячного сяйва

Міс яць	$\tau_{i_{\text{MOV}}}$	$\tau_{\text{спост}}$							$\frac{\tau_{\text{спост}}}{\tau_{i_{\text{MOV}}}}$, %	$\frac{\tau_{\text{макс}}}{\tau_{i_{\text{MOV}}}}$, %
		$\tau_{\text{мін}}$	рік	τ	σ	C_v	$\tau_{\text{макс}}$	рік		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I	265	13	1952	52	28,1	0,54	105	1972	20	8,1
II	280	10	1973	70	34,8	0,50	179	1976	25	17,9
III	366	45	1978	116	40,0	0,34	215	1972	32	4,8
IV	410	91	1958	177	42,3	0,24	272	1952	43	3,0
V	475	158	1978	247	43,0	0,17	324	1958	52	2,0
VI	486	188	1958	280	45,9	0,16	369	1975	58	2,0
VII	460	224	1976	295	38,3	0,13	367	1953	60	1,6
VIII	447	195	1960	262	38,2	0,15	321	1975	58	1,6
IX	378	127	1978	204	37,4	0,18	264	1964	54	2,1
X	332	52	1970	126	32,2	0,26	199	1958	38	3,8

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
XI	272	18	1977	53	26,8	0,50	132	1958	19	7,3
XII	251	8	1974	28	15,0	0,54	56	1953	11	7,0
Рік	4452	1526	1978	1910	169,5	0,09	2176	1975	43	1,4

Також треба враховувати і характеристику сонячного сяйва, яка визначається, як число днів без сонця, тобто коли сонячне сяйво не спостерігається протягом всього дня. У Харкові найбільше число днів без сонця (13-22) відзначається взимку з максимумом у грудні (22 дні). У табл. 1.3 наведено кількість днів без сонця. З цієї таблиці видно, що навесні число днів без сонця значно зменшується [2].

Таблиця 1.3 – Кількість днів n без сонця

Місяць	$n_{\text{найм}}$	Рік	n	σ	$n_{\text{найб}}$	Рік
1	2	3	4	5	6	7
I	4	1972	16,4	4,7	23	1966
II	2	1976	12,7	5,3	22	1973
III	2	1960	9,6	4,1	16	1978
IV	0	1968	4,2	2,9	12	1958
V	0	1975	1,8	1,1	6	1978
VI	0	1976	0,8	0,9	4	1977
VII	0	1976	0,6	0,7	3	1978
VIII	0	1974	1,3	1,3	5	1973

Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4	5	6	7
IX	0	1967	2,3	1,9	7	1976
X	2	1971	6,8	3,1	13	1952
XI	6	1958	16,0	4,7	24	1977
XII	14	1953	21,6	3,3	27	1976
Рік	72	1954	94,1	12,6	117	1960

1.2 Актуальність сонячної енергетики

Останнім часом попит на альтернативну енергетику зростає.

Відновлювані джерела енергетики (ВДЕ) досить стрімко розвиваються. Частка ВДЕ у виробництві електроенергії в Європейському Союзі збільшилася в 2018 році, досягнувши 32,3%. Це відповідає зростанню більш ніж на два відсоткових пункти в порівнянні з попереднім 2017 роком [3].

Нові вітряні, сонячні електростанції і об'єкти генерації на біомасі потіснили вугілля в структурі генерації, особливо в Німеччині, Великобританії і Франції. У той же час використання гідроенергії повернулося до свого нормального рівня, що дозволило знизити вироблення на основі природного газу. В результаті вироблення електроенергії на основі вугілля в ЄС в 2018 році впала на шість відсотків, а в порівнянні з 2012 роком вона знизилася на 30 відсотків (рис. 1.2) [3].

Міжнародне агентство відновлюваної енергетики (IRENA) опублікувало доповідь «Майбутнє сонячної фотоелектричної енергетики: розвиток, інвестиції, технології, інтеграція в енергосистеми і соціально-економічні аспекти».

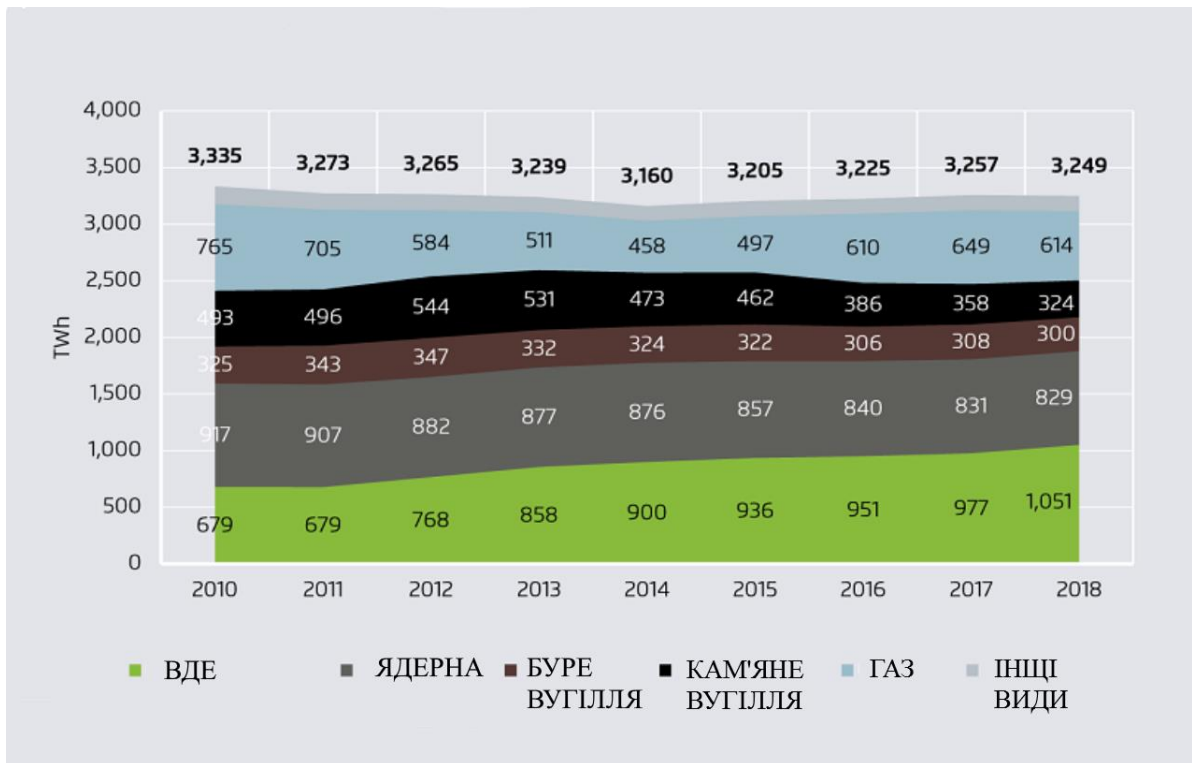


Рисунок 1.2 – Динаміка структури виробництва електроенергії в Європі

У доповіді розглядаються два варіанти подальшого розвитку енергетичного сектора. Перший ґрунтується на поточній політичній кон'юнктурі (Reference Case), а другий на цілеспрямованій політиці утримання глобального потепління на рівні нижче 2 градусів до 2050 року (REmap Case) [4].

Сонячна енергетика буде грати центральну роль в перетворенні енергетичної системи в обох сценаріях, проте в сценарії REmap для реалізації кліматичних цілей, встановлених в Паризькому угоді, значне зростання фотоелектричної генерації до 2050 року особливо необхідний [4].

Розширення сонячної енергетики за сценарієм REmap може привести до скорочення викидів на 4,9 гігатонн CO₂ до 2050 року, що складе близько 21% від усіх запобігли викидів. IRENA також очікує, що сонячна енергетика на той час стане другим за величиною джерелом електроенергії в світі після вітроенергетики і буде виробляти близько 25% електроенергії (рис. 1.3) [4].

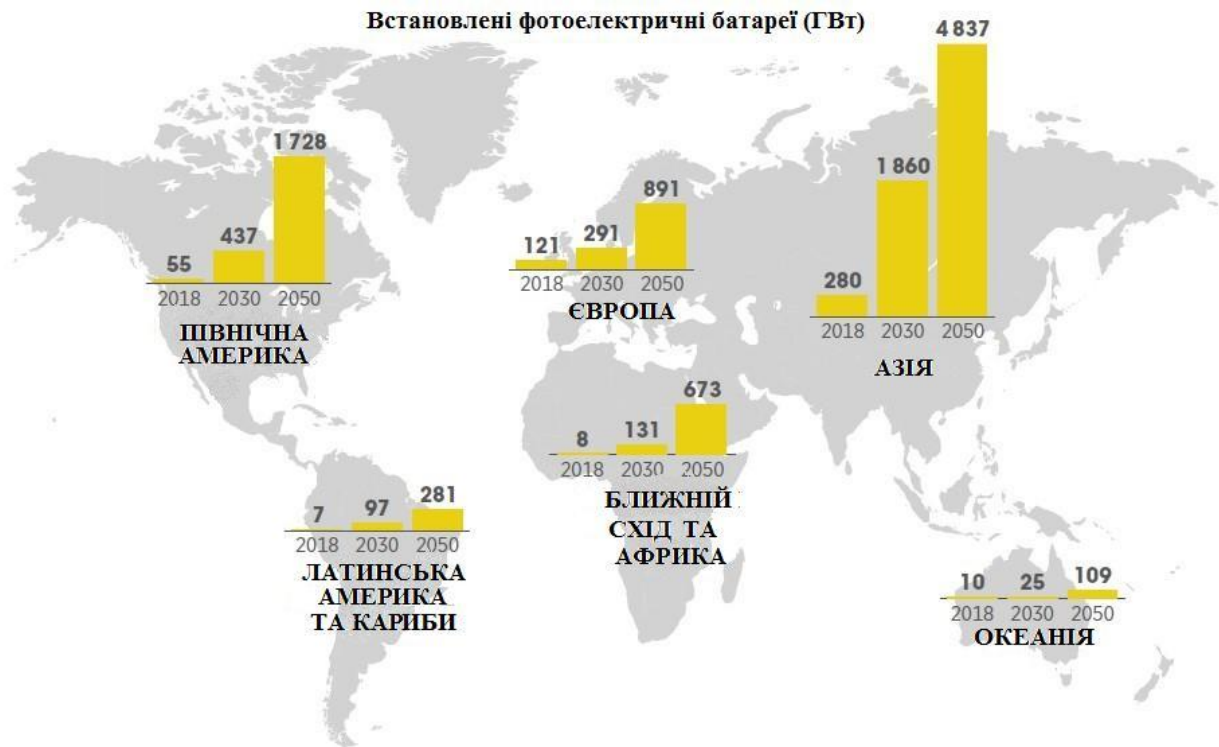


Рисунок 1.3 – Ємність встановлених СЕС (ГВт)

Дейв Джонс, автор досліджень енергетики в ЄС і аналітик Sandbag, висловився: «Європа доводить, що заміна вугільної генерації поновлюваними джерелами енергії є найшвидшим способом скорочення викидів парникових газів. Всього за шість років, між 2012 і 2018 роками, щорічні викиди CO₂ європейських вугільних електростанцій скоротилися на 250 мільйонів тонн без збільшення викидів від газових електростанцій» [3].

У 2018 році сонячна енергетика в Європейському Союзі зросла приблизно ще на 10 ГВт (найпотужніший зростання за останні роки), її частка у виробленні склала 3,9%. У ряді країн частка сонця була набагато вище - в Італії (трохи менше дев'яти відсотків), Греції (трохи менше восьми відсотків) і Німеччині (близько семи відсотків) [3].

За оптимістичним прогнозом провідних енергетичних компаній ринок сонячної енергетики (річне введення нових потужностей) може зрости приблизно ще до 30 ГВт за період до 2022 року. Основною причиною фахівці вважають зниження вартості сонячних модулів. У 2018 році вони були на 29

відсотків дешевше, ніж в 2017 р. Також однією з причин зниження вартості є появлення нових технологій їх виготовлення [3].

Виробництво сонячної енергії досягла свого піку в країнах Північної Європи через наявність дуже спекотного і сухого літа 2018 року. Це допомогло заповнити прогалини у виробництві, викликані відмовою ГЕС, вітряних і атомних електростанцій в спекотне літо [3].

Асоціація сонячної енергетики SolarPower Europe опублікувала статистичні дані про розвиток цієї галузі у 2018 році.

Так наприклад, Європейський ринок («в широкому сенсі», включаючи Туреччину, Росію, Україну, Норвегію, Швейцарію, Сербію, Білорусь) значно виріс. Обсяг нових потужностей відновлювальних сонячних джерел, встановлених в 2018 р, склав 11 ГВт, це на 20% більше, ніж в 2017 р. (рис.1.4) [5].

Ринок «справжньої Європи» (EU-28) продемонстрував ще більш значні темпи зростання. Тут було введено в експлуатацію 8 ГВт - на 36% більше сонячних електростанцій, ніж в попередньому році [5].

Найбільшим ринком сонячної енергетики на європейському континенті стала Німеччина, де було введено в експлуатацію майже 3 ГВт. Туреччина стала другою, саме в останні два роки ринок в цій країні став рости дуже високими темпами, хоча, за розрахунками SolarPower Europe, в 2018 р. було побудовано на 37% менше, ніж в 2017 (1,64 ГВт). На третьому місці виявилось Голландія, яка продемонструвала рекордне зростання і вступила в «клуб 1 гігават». У 2018 р. Голандії встановили 1,4 ГВт [5].

Данна тенденція зростання використання ВДЕ, зокрема і сонячної енергетики поширюється і на нашу країну. Так само варто враховувати, що сонячні електростанції (СЕС) це не тільки масштабне виробництво енергії, а також і, так звані, «домашні станції».

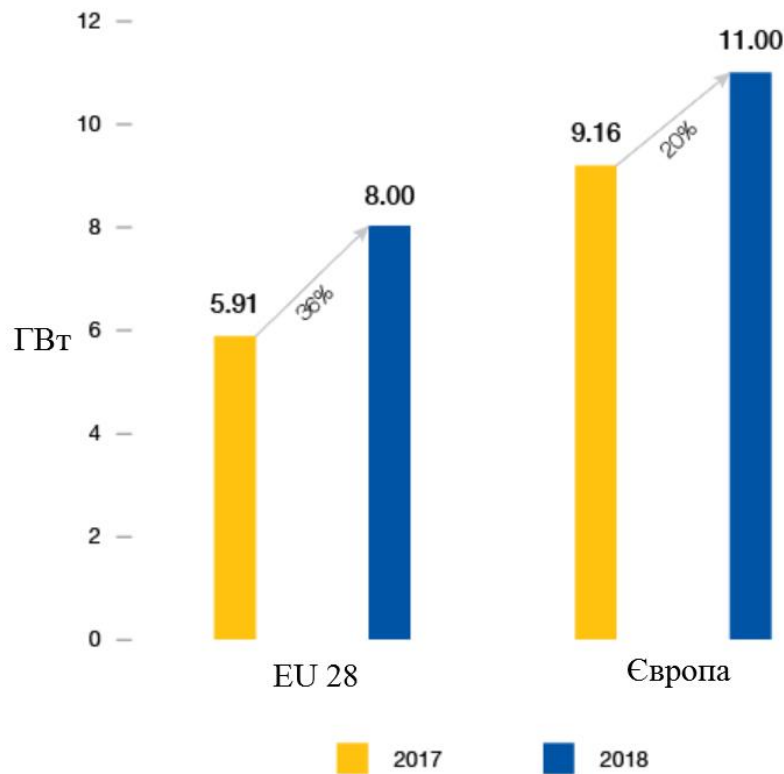


Рисунок 1.4 – Статистичні дані про розвиток сонячної енергетики за 2017-2018 роки

За I квартал 2019 року в Україні встановили сонячні електростанції і тепер заробляють на «зелені» тарифи ще близько 1400 домогосподарств. Цей показник в 2,5 рази більше, ніж за аналогічний період 2018 (543 нових приватних СЕС [6]).

Всього в Україні, за станом на 01.04.2019, налічується майже 8850 сімей, що використовують сонячні панелі загальною потужністю 190 МВт. Для порівняння: на кінець 3-го кварталу 2015 таких сімей було близько 130.

Обсяг інвестицій домогосподарств в 190 МВт СЕС склав близько 180 млн євро, повідомляє агентство Держенергоефективності [6].

Майже 3 тисяч домогосподарств встановили сонячні панелі загальною потужністю близько 70 МВт за III квартал 2019 року (рис. 1.5) [7].



Рисунок 1.5 – Динаміка збільшення кількості сонячних енергоустановок приватних домогосподарств

Станом на 01.10.2019 ТОП-3 області з найбільшою кількістю домогосподарств з СЕС (рис. 1.6):

- майже 2000 - Дніпропетровська;
- близько 1370 - Тернопільська;
- майже 1350 - Київська.

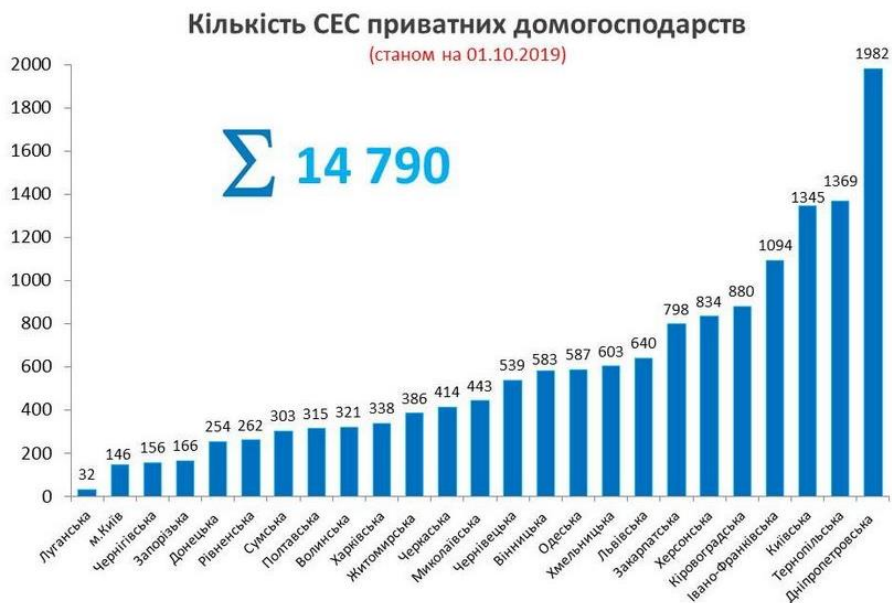


Рисунок 1.6 – Кількість СЕС приватних домогосподарств на 31.03.2019

Що до потужності, то можемо побачити, що станом на 01.10.2019 можливо виділити 5 областей, які перейшли рубіж 20 МВт (рис.1.7):

- Дніпропетровська - \approx 50 МВт;
- Тернопільська - \approx 37 МВт;
- Івано-Франківська - \approx 27 МВт;
- Київська - \approx 25.4 МВт;
- Кіровоградська - \approx 24.4 МВт.



Рисунок 1.7 – Потужність СЕС приватних домогосподарств

Таким чином, можна побачити, що попит на сонячні панелі для електростанцій серед домогосподарств продовжує зростати. Це пов'язано з тим, що перехід на «чисту» електроенергію, крім вигоди «зеленого тарифу», також має такі переваги:

- дозволяє економити кошти на рахунках за електроенергію;
- стимулює використовувати енергоефективну побутову техніку;
- змінює поведінку на енергозберігання.

1.3 Сонячні енергостанції

Сонячні електростанції для домашнього господарства можна розподілити на три типи систем: мережеві, автономні і гібридні електростанції.

Кожна система того, чи іншого типу має свої переваги та недоліки. Вибір типу базується на умовах того, яку мету ми хочемо досягти, в яких умовах будується система, а також досить вагомою умовою є фінанси, які розраховані на будівництво станції.

1.3.1 Мережеві сонячні електростанції

Однією з різновидів електростанцій є мережеві сонячні електростанції, до складу яких не входять акумуляторні батареї, що значно здешевлює їх вартість (рис.1.8) [8].

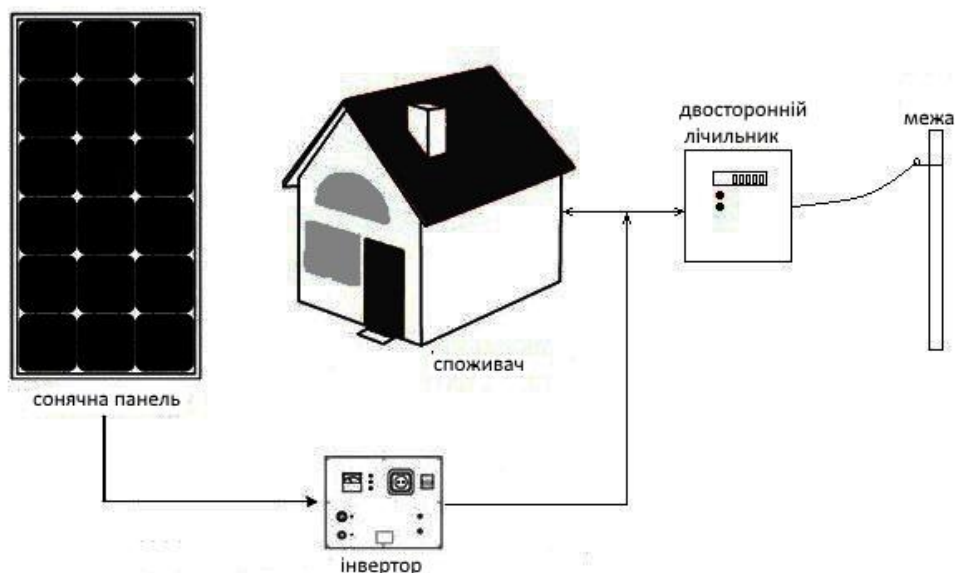


Рисунок 1.8 - Спрощена схема мережевий сонячної електростанції

У таких станціях вироблення йде безпосередньо на внутрішньо-будинкові навантаження, а надлишки (або ж взагалі вся вироблена енергія) відправляються

в мережу, для чого укладається договір «зеленого» тарифу. Хоч в такий електростанції відсутні акумулятори, залежність від мережі зберігається, адже нею доведеться скористатися при похмурій погоді, та й віддавати електроенергію можна, тільки коли зовнішня мережа під напругою.

Схема роботи (рис.1.9) полягає в наступному: сонячні панелі виробляють постійний струм, який за допомогою інвертора перетворюється на змінний струм і передається споживачеві і в мережу через двосторонній лічильник.

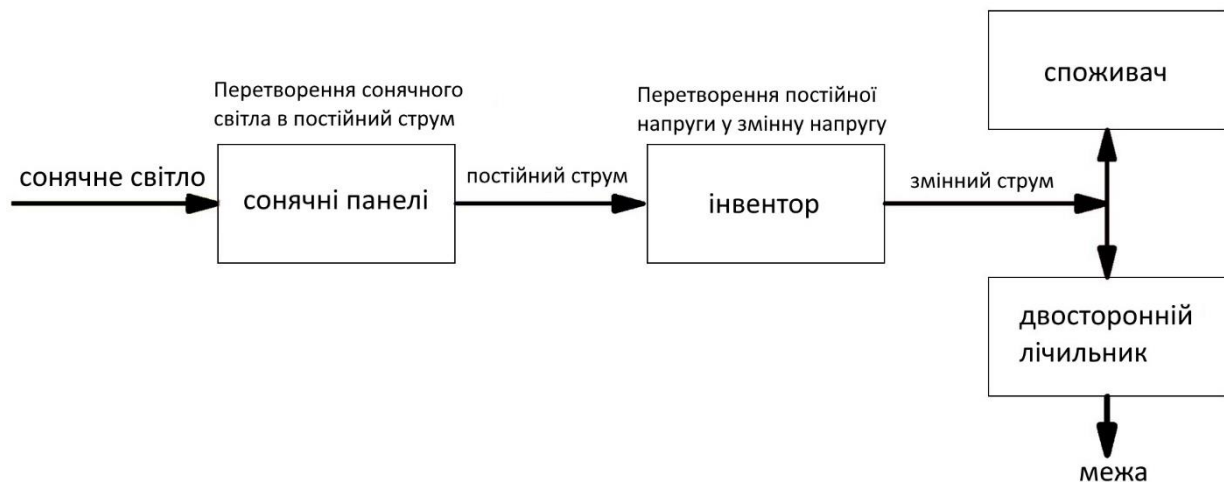


Рисунок 1.9 – Схема роботи мережевої сонячної електростанції

Підключення інвертора з боку змінного струму умовно зводиться до включення його в мережу за допомогою «вилки», ну а в практичному випадку - через автоматичний вимикач в головній розподільчій шафі будинку або будівлі.

Режим роботи:

Вдень, коли сонячні промені падають на сонячну батарею, генерується постійний струм, який перетворюється за допомогою інвертора в змінний і передається споживачеві і в мережу. При передачі електроенергії в мережу лічильник рахує різницю отриманої і відданої енергії.

Вночі, коли сонячні панелі не працюють споживач отримує електроенергію з мережі. Це також враховує лічильник.

Оплата за електроенергію відбувається наступним чином: якщо споживач віддав в мережу більше електроенергії ніж отримав - то цю різницю оплачує Обленерго, і навпаки.

Такий вид електростанції найвигідніше використовувати на будівлях з великою площею дахів, таких як: склади, цехи, ферми і т.п.

До переваг таких електростанцій можна віднести відсутність дорогих акумуляторів, що в свою чергу зменшує термін окупності електростанції. Також плюсом є можливість продавати електроенергію за «зеленим» тарифом. Однак отримати всі необхідні дозволи в Україні важко, з огляду на невиконаність даної системи для Обленерго[8].

1.3.2 Автономні сонячні електростанції

Другий варіант - це автономна система (рис.1.10), коли у нас взагалі немає мережі: віддалене або, як то кажуть, «острівне» розташування, а також проблеми з підключенням мережі або нестача потужності через квотування постачальником електроенергії. Під автономними станціями також можна мати на увазі і такі, які забезпечені нормальним підключенням до мережі, але віддача виробленої СБ електроенергії в неї не проводиться (off-grid). В автономній сонячній станції акумулятори грають найвідповідальнішу роль, і тут потрібно особливо ретельно думати, і зважувати, які акумуляторні батареї (АКБ) вибирати [9].

Основними елементами такої сонячної системи є: фотопанелі – 1, контролер заряду – 2, акумуляторні батареї – 3 і інвертор – 4 (рис. 1.10).

Сонячне випромінювання не постійно в часі, тому вироблена фотопанелями енергія не завжди відповідає споживанню. Для накопичення надлишкової електроенергії і використання її в випадках, коли споживання перевищує вироблення, використовують акумуляторні батареї (АКБ).

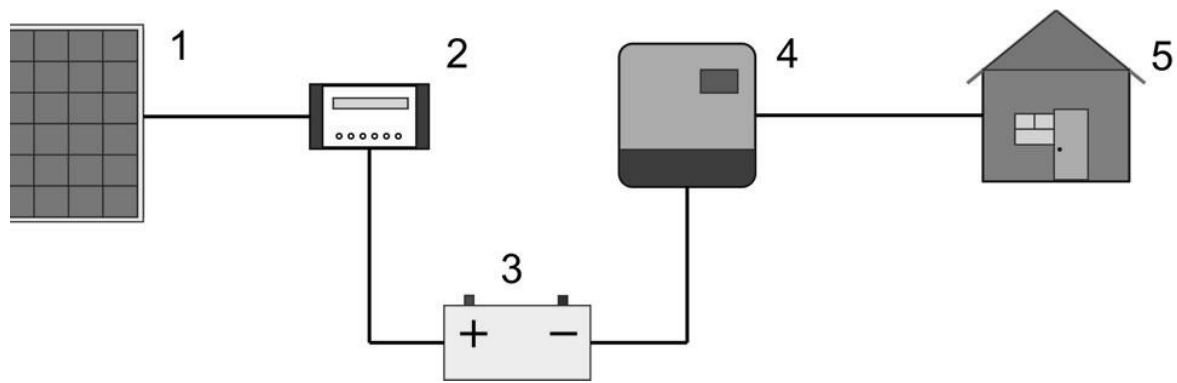


Рисунок 1.10 – Схема автономної СЭС

Підключення фотопанелей безпосередньо до акумуляторних батарей для їх заряду неприпустимо, оскільки це може привести до пошкоджень накопичувача, які спричинять вихід останніх з ладу. Саме для захисту акумуляторних батарей від перезарядження і для підтримки оптимальної роботи АКБ використовують контролер заряду.

Оскільки більшість споживачів електроенергії використовують змінний струм, а фотопанелі і акумуляторні батареї видають постійний, виникає необхідність в перетворенні струму з змінного в постійний. Цю функцію виконує інвертор.

У разі необхідності підключення навантаження постійного струму - її можна безпосередньо підключити до вихідних клем контролера заряду.

1.3.3 Гібридні сонячні електростанції

Третім варіантом є гібридні електростанції (рис. 1.11). У такій системі присутні і мережа, і акумулятори. Такі станції роблять споживача незалежним: з'являється автономія, певний запас енергії в акумуляторах, також є можливість використовувати енергію сонячних батарей, але при цьому можна користуватися і мережею, брати з неї, скільки потрібно, і можна продавати енергію в ту ж мережу. Як правило, акумулятори ставляться на гібридні об'єкти потужністю до 30 кВт [9].

Принцип роботи гібридної СЕС полягає в наступному: сонячні батареї підключені до сонячного мережевого інвертору. Мережа змінного струму підключається на вхід гібридного інвертора, також до гібридного інвертору підключені акумуляторні батареї. Вихід сонячного мережевого інвертора і гібридного інвертора об'єднані через розподільну шафу і забезпечують електроживленням споживача змінного струму [10].

Гібридні мережеві електростанції змінного струму можуть працювати в трьох режимах:

Режим 1. Режим автономної електростанції

Режим 2. Змішане електропостачання. В даному випадку допускається незначний або повний розряд акумуляторів. Після чого електроживлення перемикається на мережу змінного струму. Сонячний інвертор продовжує роботу в будь-якому випадку і доповнює потужність системи, а також продовжує заряджати акумулятори. Надлишок енергії передається в мережу за умовами «зеленого» тарифу.

Режим 3. Резервне електропостачання. Система в такому випадку налаштовується таким чином, що акумулятори починають віддавати електроенергію лише за відсутності змінного струму від мережі (аварія, планове відключення, віялові відключення і т. п.). Сонячний інвертор виробляє електроенергію і забезпечує споживачів, заряджає акумулятори (в разі необхідності). Надлишок енергії передається в мережу за умовами «зеленого» тарифу.

Перевагою даного типу СЕС є:

- Електростанція працює при відсутності напруги в мережі змінного струму;
- Електростанція працює за умов нестабільної мережі;
- Користувач має доступ до кількох режимам роботи, які можна налаштовувати відповідно до пори року;

- Користувач може отримати автономію, але у випадках негоди або виходу з ладу будь-якого фрагмента СЕС може перейти на мережу, не ущемляючи свої зручності;
- Можливість використання «зеленого» тарифу.

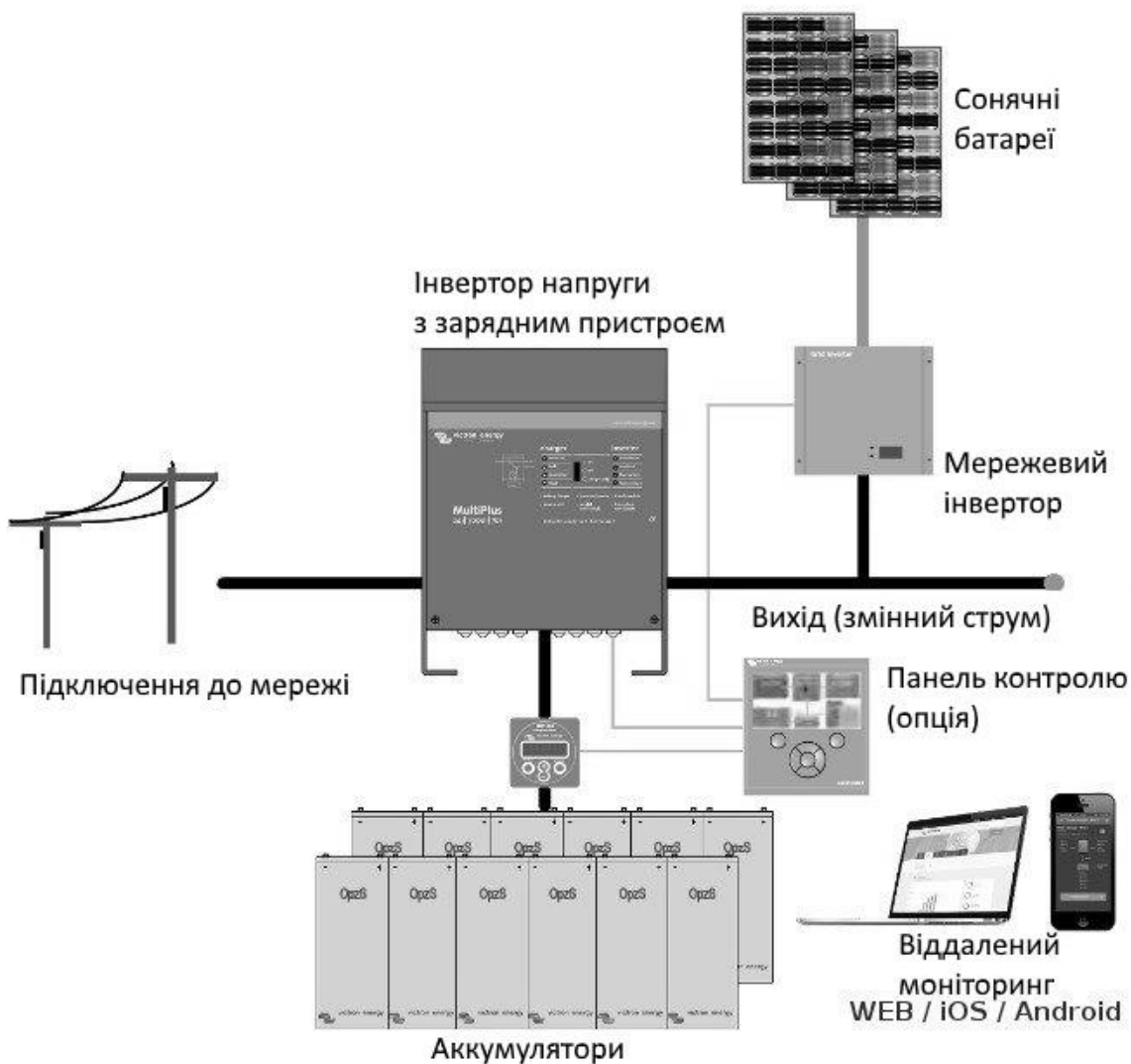


Рисунок 1.11– Схема гібридної СЕС

Як бачимо з наведеного вище акумуляторні батареї потрібні в двох з трьох випадках. Якщо розглядати Харківську область, то автономну систему, в домашньому господарстві, розглядати не доцільно, оскільки в нашій області не так багато сонячних днів. Також з огляду на сучасні реалії, якщо брати приватні

будинки (за межею міста), то можливість автономії не зашкодить. На це є ряд причин:

1. Періодичне підвищення тарифів на електроенергію;
2. Випадки, коли через негоду відбувається обрив дротів і будинок, а іноді й цілі населені пункти залишаються без електрики на невизначений час.

Так можна зробити висновок, що в більшості випадків вигідніше за все використовувати гібридні електростанції.

1.4 Акумулятори для сонячних електростанцій

Як можна було помітити з вищесказаного крім фотоелектричних модулів СЕС можуть включати в себе і акумулятори для сонячних електростанцій.

Бажано, щоб АКБ могли повністю забезпечити потреби домогосподарства в електроенергії. Тому повинен бути достатній запас по місткості, а що найважливіше - акумулятори повинні володіти хорошим циклічним ресурсом. Для сонячної енергетики найбільш привабливими є акумулятори з великим ресурсом - від 1500 циклів при повній розрядці. В економічному плані це великі інвестиції, і, з огляду на лише знос акумуляторів, можна зрозуміти, що ці гроші ми навряд чи «відіб'ємо». Зате набуваємо комфорт і незалежність, а при відсутності альтернатив «торг і поготів недоречний» [9].

Звісно, що при проектуванні СЕС ми хочемо звести витрати на мінімум. Варто враховувати, що навіть при мінімальному бюджеті будь-яка деталь, яка не відповідає загальному принципу роботи всієї системи може звести до нуля всі очікування.

Звичайно, на ринку представлений великий вибір АКБ, але далеко не всі акумулятори підходять для СЕС. АКБ для автомобілів автоматично виключаються, оскільки вони не розраховані на велику кількість заряду і розряду.

Лужні АКБ, також, вкрай рідко застосовують в сонячній енергетиці. Причина криється в тому, що прилади несприйнятливі до малого струму, потребують повного циклу зарядки від максимального ступеня розрядженого. Ще один недолік в їх експлуатації - великі габаритні розміри, маса і небезпека при розгерметизації [9].

За технічними характеристиками найпривабливішими типами АКБ для фотоелектричних станцій фахівці вважають гелеві і літій-феро-фосфатні моделі. Обидві категорії пристроїв відносяться до необслуговуваних, герметичних і відрізняються високою безпекою експлуатації. Однак в ціновому рейтингу вони найбільш дорогі.

На даний момент найпопулярнішими на ринку сонячних електростанцій залишаються свинцево-кислотні (СК) акумулятори через свою порівняно низьку ціну.

Основні вимоги для АКБ

Акумулятор для сонячних електростанцій, задіяний в схему фотоелектричних панелей, повинен мати певні характеристики [11]:

- Заряджатися високим зарядним струмом.
- Відрізнятися великою циклічною стійкістю до зарядів і розрядів.
- Володіти працездатністю в широких діапазонах температурного режиму.
- Характеризуватися мінімальним саморазрядом.
- Відрізнятися простотою обслуговування.

Одна АКБ рідко здатна забезпечити споживача накопиченою енергією, її потужності, зазвичай, недостатньо для живлення електроприладів житлового будинку, не кажучи про виробничі об'єкти. Тому розрахунково-проектне число акумуляторів для сонячних електростанцій формують в масив для зберігання електричної енергії. Причому підключення пристроїв виконують різними способами: паралельно, послідовно або комбінованим методом. При виборі приладів беруть до уваги необхідні показники вихідної потужності і напруги.

Об'єднання у групи АКБ передбачає використання виробів однієї моделі. Велика кількість акумуляторів розміщують на спеціальних стелажах [11].

Розглянемо свинцево-кислотні акумулятори.

На ринку в цій групі існують кілька типів батарей. Одним з них є стартерні (автомобільні) акумулятори. Звичайно, їх також можливо застосовувати в СЕС, але цього робити не рекомендується. Як вже було заявлено вище вони не розраховані на належну кількість циклів, тому протриматися в робочому режимі такі батареї зможуть лише короткий проміжок часу. Крім того, такі батареї при роботі виділяють гази та вимагають вентиляції. Все ж якщо ми хочемо щоб використання СЕС було комфортним і не «висмоктувала» у нас гроші, то стартерні батареї явно не для нас [9].

Найкращий вибір для «сонця» з герметизованих необслуговуваних СК-акумуляторів - AGM або GEL (гелеві). Краще, звичайно, гелеві: у них при інших рівних умовах більш високий технічний ресурс, і вони менш вибагливі до глибоких розрядів [9].

Гелеві накопичувачі для сонячної електростанції наділені позитивними характеристиками. Їх резервуари наповнені гелевим електролітом, що знаходяться в желеподібному стані. При пошкодженні корпусу електролітної речовина не витікає. Під час зарядки накопичувачі не виділяють отруйних парів.

Акумулятор для сонячних батарей AGM оснащений абсорбуючими склопакетами, в яких знаходиться в зв'язаному стані електролітна речовина. Його можна встановлювати в будь-якому положенні. Глибина розряду пристрою становить близько 80% [12].

Вони здатні витримати до 500 циклів. Відрізняються високим рівнем заряду. Температурний діапазон використання варіюється від 15 до 25 ° С. На зарядку апаратів не потрібно багато часу [13].

Термін їх експлуатації не перевищує 5 років. При транспортуванні вони не втрачають накопиченого заряду. Добре працюють при недостатній вентиляції

приміщень. Високий рівень зарядового струму призводить до виходу з ладу джерел AGM. Низький рівень - не призводить до негативного впливу [13].

Обидва варіанти (AGM і GEL) широко використовуються в проектуванні систем. При виборі типу акумулятора варто враховувати особливості роботи системи.

Таким чином, перший - це повна заміна централізованої системи індивідуальної, сонячної. Другий - часткова заміна. До централізованій системі залишається підключеною частина електроприладів, наприклад, найпотужніші. Решта підключаються до автономної системи. Третій варіант - використання системи автономного електропостачання в якості резервної, аварійною [14].

Перший варіант можливий при невеликій споживаній потужності приладів або при наявності акумуляторів великої потужності і з великим допустимою кількістю циклів заряду. Якщо потужність споживання планується невелика, то можна з однаковим успіхом використовувати GEL і AGM батареї.

При рівних умовах GEL забезпечать більшу тривалість роботи, не треба буде побоюватися повного розряду акумуляторів. Перевага AGM - стійкість до нетривалих коротких замикань, велика навантажувальна здатність і короткий час заряду, що особливо важливо в зимовий час або при сильній хмарності.

Якщо потужність споживання буде велика (бойлер, електроплита і т.п.), то краще використовувати батареї AGM, незважаючи на меншу кількість циклів до втрати ємності. Обов'язково доведеться передбачити захист від перезарядження (може привести до кипіння і здуття).

Для другого варіанту краще використовувати батарею GEL. Її потужності цілком вистачить, а ресурс буде істотно більше.

Третій варіант (резервне, аварійне живлення) вимагає великої потужності на короткий час, тому в даному випадку краще використовувати для створення системи акумулятор для сонячних батарей AGM типу. Його ресурсу вистачить надовго.

Коли використовуються літєві LiFePO_4 АКБ для сонячних панелей (батарей, електростанцій), знаємо, що отримаєм максимум.

Замість звичайних свинцево-кислотних АКБ, літій-залізо-фосфатний акумулятор (LiFePO_4) пропонує більш ефективну технологію [15].

LiFePO_4 акумулятори мають певні переваги [15]:

- глибина розряду може досягати 80% від ємності протягом всього терміну експлуатації, без негативних наслідків (у свинцево-кислотних акумуляторів цей показник становить 20%);
- більш високий струм заряду дозволяє набагато швидше заряджати виряджені акумулятори. Наприклад, акумулятори розрядилися за ніч, і можуть бути заряджені від сонячних батарей протягом коротшого часу (у свинцево-кислотних акумуляторів максимальний струму заряду 0,1-0,3С, тобто з силою струму 10-30% від номінальної ємності). LiFePO_4 -акумулятори можна заряджати за струмом до 0,5-1С (з силою струму 50-100% від номінальної ємності, тобто за 1-2 години).
- Менше вага. Свинцево-кислотний акумулятор на 200 Ач важить більше 60 кг, LiFePO_4 - всього 20. Можна економити на масивних стелажах.

Але є і недоліки:

- не всі зарядні пристрої (в тому числі вбудовані в інвертори) вміють заряджати ці акумулятори;
- складність з побудовою акумулятора великої ємності. Наприклад, зібрати банк акумуляторів на 400 Ач / 48 вольт з 8 свинцево-кислотних акумуляторів ніяких проблем не складе, а з LiFePO_4 потрібно підбирати сумісні з таким режимом акумулятори, а ще краще - замовляти заздалегідь на заводі.

Є ще одна особливість LiFePO_4 -акумуляторів - їх ціна, яка спочатку може налякати. Вони майже втричі дорожче свинцево-кислотних акумуляторів [15].

Висновки по розділу.

У даному розділі був приведений аналіз станів систем альтернативної енергетики, було розглянуто різновиди СЕС, також розглянута роль накопичувачів у СЕС, та їх види.

З розглянутого матеріалу можна зробити наступні висновки:

- Сонячна енергетика є пріоритетним напрямком розвитку енергетики як в усьому світі, так і на Україні;
- В більшості видів СЕС використовуються АКБ які обираються в залежності від поставленої задачі;
- Аналіз характеристик АКБ виявляє: свинцево-кислотні акумулятори добре підходять для СЕС, але стартерні акумулятори використовувати не рекомендовано; літій-залізо-фосфатні акумулятори більш ефективні, але і ціна на них значно вище.

2 АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ОСВІТЛЕНІСТЬ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

Сонячне сяйво – це освітленість земної поверхні прямими сонячними променями, в момент, коли диск сонця не закритий щільними хмарами.

2.1 Сонячне сяйво. Основні поняття.

Дійсно, якщо роздивитися детально природній механізм перетворення сонячного сяйва в електричну енергію де джерелом СС є Сонце, яке протягом року випромінює в космічний простір близько $1,3 \cdot 10^{24}$ Кал. Земля рухається навколо Сонця по еліптичній орбіті з ексцентриситетом. При цьому її вісь обертання постійно нахилена до площини її обертання навколо Сонця на $66^{\circ}33'$ або $66^{\circ}55'$ [16]. Відстань від Землі до Сонця змінюється в межах від 147 до 152 млн. км (в середньому – 149,6 млн. км). При цьому, коли Земля знаходиться на ділянці еліпса, розташованому ближче до Сонця, то вона рухається швидше (близько 30,3 км / с). В протилежному випадку – повільніше (близько 29,3 км / с). Через це тривалість істинної сонячної доби на Землі постійно змінюється. Найдовший день – 23 грудня, коли вона, наприклад на 51 секунду довше, ніж 16 вересня, коли він най коротший. При цьому прийнято називати справжньою сонячною добою проміжок часу між двома верхніми положеннями-ми центру сонячного диска в суміжні земну добу. Це означає, що якби на Землі враховували зазначені особливості руху Землі відносно Сонця, то довелося б щодня міняти налаштування годин, які повинні йти то повільніше, то швидше [16].

Тому зараз на Землі поняття середньої сонячної доби завжди однакова та її тривалість рівна 24-м годинам. Час, що вимірюється по так званому середньому Сонцю, називається середнім сонячним часом, а – по справжньому Сонця –

істинним сонячним часом. Наближений графік зміни рівняння часу представлений на рис. 2.1. Представлена на ньому крива показує середній час в істинний полудень (максимум висоти центру Сонця над горизонтом).

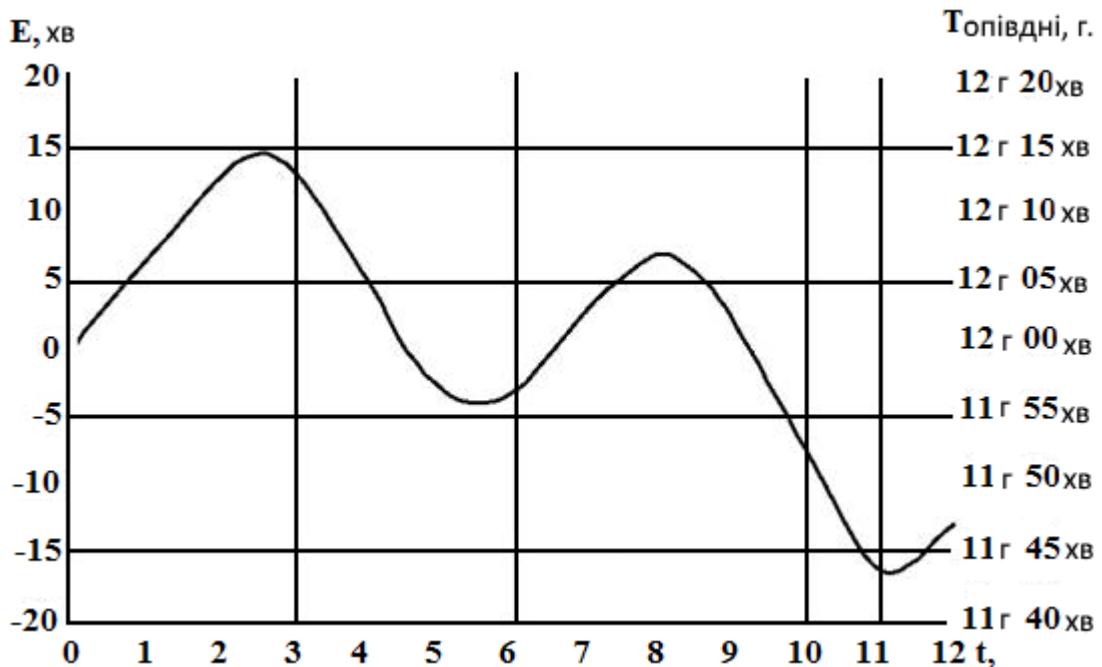


Рисунок 2.1 – Графік рівняння часу. Крива показує середній час в істинний південь.

Сонце випромінює в кожен момент часу в космосі близько $4 \cdot 10^{23}$ кВт, з яких на Землю приходить всього близько $0,25 \cdot 10^{-9}$ всього обсягу випромінювання Сонця. Тривалість життя Сонця - кілька мільярдів років, що дозволяє сьогодні вважати його вічним найпотужнішим джерелом енергії на Землі.

На всю поверхню Землі припадає близько $(0,85 - 1,2) \cdot 10^{14}$ кВт або $(7,5 - 10) \cdot 10^{17}$ кВт·ч / рік при середньому питомій надходженні СС 200 - 250 Вт / м² або 1752-2190 кВт·ч / м² ·год. При цьому діапазон питомої приходу СС на Землю міняється досить значно, як в часі, так і по її території: (170-1000) Вт / м² або $(17 - 100) \cdot 10^4$ кВт / км². Прихід всіх інших видів енергії становить всього 19 кВт / км², що говорить про величезні можливості СС на Землю.

Якщо прийняти, що потужність всіх видів енергоустановок на Землі становить сьогодні близько 10 ТВт або $10 \cdot 10^9$ кВт, то потужність СС перевищує сучасні потреби людства в тисячі разів.

У середині Сонця постійно відбуваються реакції ядерного синтезу. У активному ядрі Сонця температура сягає до 10^7 градусів Кельвіна. Спектральне випромінювання потоку випромінювання з ядра - нерівномірно. Зазначене випромінювання ядра Сонця поглинається зовнішніми відносно неактивними шарами, нагрітими до 5800°K . У результаті цього, спектральний розподіл випромінювання Сонця стає майже безперервним. Кожну секунду Сонце викидає в середньому $4 \cdot 10^9$ кг матерії, яка перетворюється в енергію, через променя в космосі у вигляді електромагнітних хвиль. Таким чином, фізичною основою СС на Землі є процес перенесення енергії при поширенні електромагнітних хвиль в прозорому середовищі. За квантової теорії електромагнітні хвилі - це потік фотонів або елементарних частинок з нульовою масою спокою і поширюються зі швидкістю світла у вакуумі [16].

У космосі через один квадратний метр за 1 з проходить $4 \cdot 10^{21}$ фотонів, енергію яких можна визначити за формулою:

$$E = h \cdot \nu, \quad (2.1)$$

де h – постійна Планка ($h=6,26176 \cdot 10^{-34}$ Дж/с); ν – частота електромагнітних хвиль обернено пропорційна їх довжині в мікрометрах.

На рис. 2.2 представлений спектр СС за межами атмосфери в космосі, що припадає на 1 м^2 приймального майданчика, перпендикулярної СС, а в табл. 2.1 числові значення зазначеної кривої. Там же представлено і аналогічне вказаній кривій спектральний розподіл енергії або теоретичний розподіл випромінювання чорного тіла при температурі $5630,70^\circ\text{K}$ і в 60000°K , які майже повністю відповідають там же представленому спектральному розподілу СС - $e_\lambda(\lambda)$.

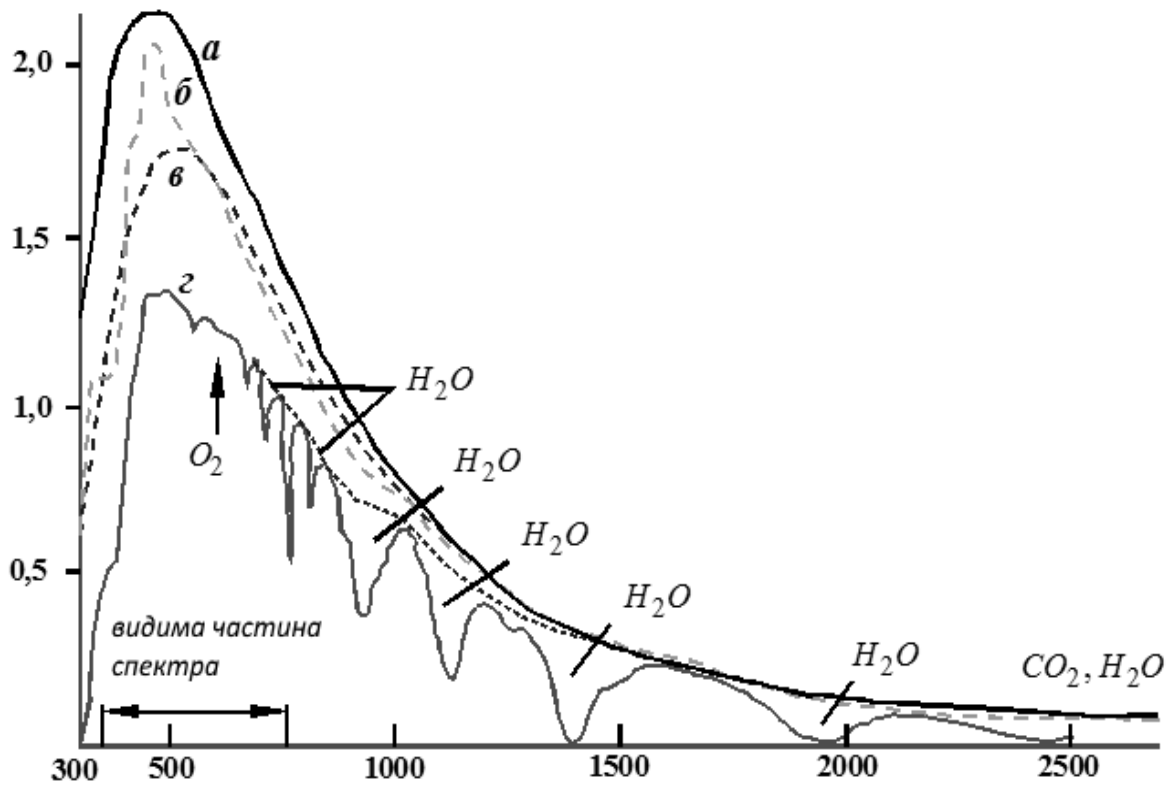


Рисунок 2.2 - Криві спектрального розподілу: а) - чорне тіло при 6000°K; б) - спектр позаземного сонячного випромінювання Текерара (1971 г); в) - чорне тіло при 5630,7°K; г) - пряма сонячна радіація при відносно чистій атмосфері.

Площа всієї фігури під графіком $e_{\lambda}(\lambda)$ називається сонячною постійною e_0 ($\text{Вт}/\text{м}^2$) і визначається за формулою [16]:

$$e_0 = \int_0^{\infty} e_{\lambda}(\lambda) d\lambda = \text{const} \quad (2.2)$$

Таблиця 2.1 Спектральна щільність СС в космосі на кордоні атмосфери $e_{\lambda}(\lambda)$ [16]

λ , мкм	0,115	0,2	0,4	0,48	0,6	0,8	1,0	1,4	2,8	4,0
e_0 Вт/(мкм·м ²)	0,007	10,7	1429	2074	1666	1109	748	337	39	9,5

За міжнародною угодою 1981 р в якості ео в розрахунках рекомендовано приймати $e_0 = 1370 \text{ Вт} / \text{м}^2 = 1,96 \text{ кал} / (\text{мин} \cdot \text{см}^2)$.

Практично постійний прихід СС в космосі на приймальний майданчик грає величезну роль для космічної сонячної енергетики. Космічний апарат, запущений в космос, буде мати постійний, практично не змінний прихід СС в разі орієнтації приймальної площадки перпендикулярно до напрямку на Сонце [16].

Спектр сонячного випромінювання на поверхні Землі дуже істотно відрізняється від представленого на рис.2.2 (в меншу сторону) і залежить від багатьох чинників числа, факторів, що впливають, що детально буде розглянуто нижче.

Значення ео в дійсності змінюється протягом року: на $\pm 1,5\%$ через зміни потоку СС в часі; на $\pm 4\%$ через зміну відстані між Землею і Сонцем протягом року. Орієнтовний характер зміни ео (t) протягом року показаний на рис.2.3 [16].

Крім того, СС змінюється і по роках через зміни інтенсивності СС по так званім багаторічним річним циклам сонячної активності. З них найбільш відомий цикл Вольфа, рівний 11 років [16]. Зі сказаного випливає, що для отримання досить довірчих результатів геліоенергетичних розрахунків потрібна наявність тривалих періодів спостережень за СС - не менше 25-50 років в залежності від виду самих розрахунків.

Спектр СС можна розділити по довжині електромагнітних хвиль на три основні області або зони, що є дуже важливим при оцінці ефективності конкретних СФЕУ [16]:

- область ультрафіолетового СС при $0 < \lambda < 0,4 \text{ мкм}$, що займає близько 9% всієї e_0 ;
- область видимого СС при $0,4 < \lambda < 0,7 \text{ мкм}$, що займає близько 45% всієї e_0 ;
- область інфрачервоного теплового випромінювання при $\lambda > 0,7 \text{ мкм}$, яка займає близько 46% всієї e_0 .

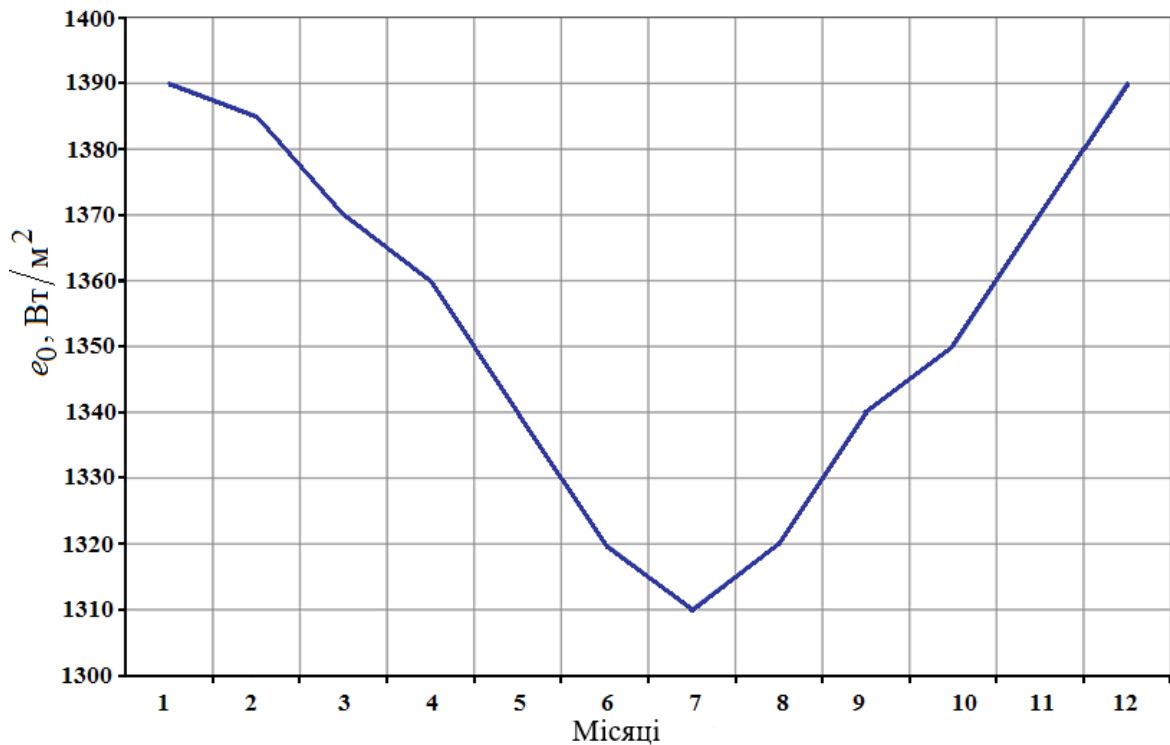


Рисунок 2.3 – Змінення e_0 на протязі року

При цьому частка СС для $\lambda > 2,5$ мкм практично дуже мала. Вважається, що зазвичай використовується в сонячній енергетиці зона e_0 обмежується довжиною хвиль λ до 2,4 мкм (95% e_0) [16].

У сонячній енергетиці прийнято виділяти три основних поняття або показника, наведених нижче в табл. 2.2 [16]:

- потік або енергія СС за заданий інтервал часу;
- потужність або інтенсивність потоку СС;
- тривалість сонячного сьйва (СС) за заданий інтервал часу.

У табл. 2.2 також наведені і позначення, які використовуються в сонячній енергетиці різними авторами.

Величина T_{ss} , ч в табл. 2.2 характеризує собою той час, протягом якого середина сонячного дня знаходиться над горизонтом у даній точці поверхні землі [16].

Таблиця 2.2 – Основні поняття чи показники СС

Показники	Позначення		Одиниця виміру		Взаємозв'язок одиниць вимірювання
	МЕІ	Інші	В електроенергетиці	В теплоенергетиці	
Енергія або потік СС за заданий інтервал часу (T або Δt)	$\mathcal{E}(T)$ або $\mathcal{E}(\Delta t)$	$H(T)$ $Q(T)$ або $H(\Delta t)$ $Q(\Delta t)$	$\frac{\text{кВт}\cdot\text{год}}{\text{м}^2}$, $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^2}$	$\frac{\text{кал}}{\text{см}^2}$	$1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 3,6 \text{ МДж}$ $1 \text{ МДж} = 0,278 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ $1 \frac{\text{кал}}{\text{см}^2} = 0,0419 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^2} = 0,011639 \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2}$
Потужність або інтенсивність потоку СС в момент часу t	$R(T)$	$N(t)$ $G(t)$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$\frac{\text{кал}}{\text{хв}\cdot\text{см}^2}$	$1 \frac{\text{кал}}{\text{хв}\cdot\text{см}^2} = 698 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$
Тривалість сонячного сьйва за даний інтервал часу (T або Δt)	$T_{\text{с.с.}}$	SS	год	год	-

Примітка $1 \text{ кг у.п.} = 7000 \text{ Ккал} = 7 \text{ Мкал} = 29330 \text{ кДж} = 29,33 \text{ МДж} = 8,147 \text{ кВт}\cdot\text{год}$.

При проходженні СС через земну атмосферу одночасно відбуваються три процеси [16]:

- відображення СС назад в космос (близько 34%), яке не залежить від довжини хвилі СС. (Велика частина СС відбивається хмарами і самою атмосферою землі);

- поглинання СС атмосферою (близько 19%), коли енергія переходить в тепло (інфрачервоне випромінювання), що випромінюється назад в космос;
- пропускання СС на поверхню землі (близько 47%); близько 20% його відбивається від поверхні землі і у вигляді інфрачервоного випромінювання йде назад в космос; тільки 27% всього СС, що надходить на землю з космосу, перетворюється в енергію, яка йде на випаровування і нагрівання води, нагрів атмосфери, освіту вітрів, хвиль, течій і т. п.

В цілому, коли в процесі приходу і відходу перетвореного сі на землі існує баланс, клімат землі не змінюється. У разі його порушення відбувається зміна клімату на землі [16].

СС на Землі має цілу низку особливостей.

- СС - це практично невичерпне джерело відновлюваної енергії на Землі, у багато разів перевершує ресурси всіх інших джерел енергії на Землі. В сучасних умовах, при зростанні вартості невідновлюваної викопного палива, росте і значимість соціально-екологічних факторів, що в свою чергу веде до зростання частки розвивається сонячної енергетики;
- СС на Землі досить добре вивчено для кліматологічних розрахунків, але недостатньо - для ряду енергетичних розрахунків. Особливо це відноситься до розрахунків по створенню систем енергопостачання на базі СЕУ для автономних споживачів, а також невеликих локальних енергосистем;
- СС відносно безпечно перетворюється в інші види енергії;
- В процесі зміни СС на землі в часі і просторі є закономірні і випадкові складові, що значно ускладнює отримання достовірних даних по СС на землі для енергетичних розрахунків через відносно коротких рядів спостережень за СС на землі, а також обмеженості стаціонарних точок спостереження за сі в Україні;

- СС на поверхні Землі - розсіяна енергія, яка на багато разів менша, ніж подібна питома енергія на 1 м^2 корисної площі в традиційних теплових енергостанцій (ТЕС) і, тим більше у атомних енергостанцій (АЕС). Для створення потужних системних СЕС, у зв'язку з цим, потрібні площі більше, ніж для ТЕС і АЕС аналогічної потужності. З іншого боку на СС на Землі впливає величезна кількість різноманітних факторів, що ускладнює отримання достовірної інформації для енергетичних розрахунків в сонячній енергетиці. У числі цих факторів: температура навколишнього середовища в розглянутій точка А з координатами і, хмари, аерозолі, озон, пари, турбулентність атмосфери, а також розміщення приймальні майданчики (ПМ) СС на Землі, її орієнтація на Сонці, вид технічної схеми СЕУ і т.п.

Із усього сказаного вище, а також ряду інших положень можна зробити висновки про те, що для енергетичних розрахунків необхідні довгі ряди спостережень за Сонцем, з одного боку, і необхідно знати будову і особливості земної атмосфери, яку вивчає метеорологія зі своїм інформаційним і методичним забезпеченням в кожній з країн світу.

2.1.1 Основні і додаткові фактори та їх вплив на прихід сонячного випромінювання на довільно-орієнтовану приймальню майданчик в точці А (ϕ , ψ) на Землі і в космосі.

Сонячна енергія поширюється в космосі у вигляді прямого направленого потоку сонячного випромінювання, представленого прямою лінією, що зв'язує собою сонце (джерело СС) і приймальню майданчик сонячного випромінювання. Внаслідок наявності атмосфери і підстильної поверхні Землі на довільно-орієнтований приймальний майданчик сонячне випромінювання надходить вже у вигляді трьох потоків сонячної енергії: пряма $R_{\text{пр}}(t)$, дифузна або розсіяна $R_{\text{д}}(t)$ і відбита $R_{\text{отр}}(t)$ від поверхні Землі (рис.2.4), тобто сумарний потік СС на

приймальний майданчик $R_{\Sigma}(t)$ на поверхні Землі буде в кожен момент часу t складатися з наступних складових:

$$R_{\Sigma}(t) = R_{\text{пр}}(t) + R_{\text{д}}(t) + R_{\text{отр}}(t) \quad (2.3),$$

де $R_{\text{пр}}(t)$ - пряме СС, що реалізується у вигляді спрямованого потоку СС уздовж прямої лінії зв'язує собою Сонце і приймальний майданчик СС на Землі; $R_{\text{д}}(t)$ - дифузне СС, що реалізується за рахунок спрямованого СС, розсіяного в атмосфері Землі хмарами, аерозолями, пилом і т. п. ; $R_{\text{отр}}(t)$ - відбита від поверхні Землі частина спрямованого СС.

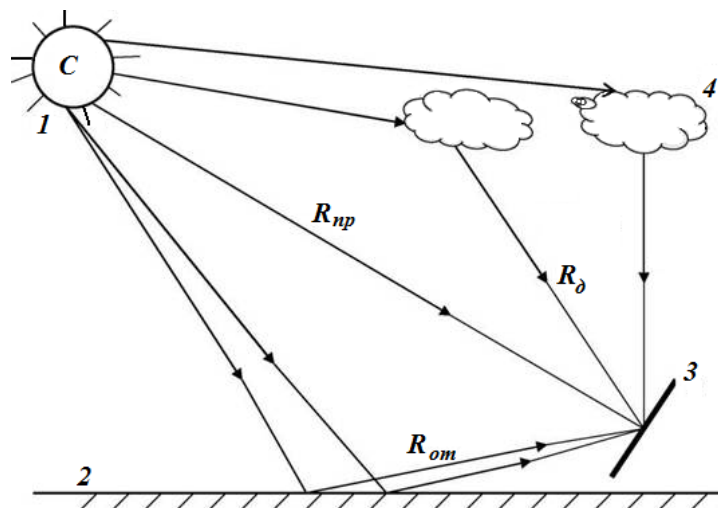


Рисунок 2.4 - Основні складові сонячного випромінювання на поверхні Землі: 1 - Сонце, 2 - поверхня Землі, 3 - приймальня майданчик, 4 - хмари, аерозолі, пил, тощо.

Якщо для приймального майданчика в космосі $R_{\Sigma}(t)$ визначаються тільки за рахунок спрямованого СС (тобто $R_{\text{пр}}(t)$), то на поверхні Землі $R_{\Sigma}(t)$ залежить від багатьох факторів, і, в першу чергу, від геометричного розташування приймального майданчика щодо Сонця. Для пояснення сказаного на рис.2.5 представлений довільно-орієнтований нахилений на південь плоский прийомний майданчик, розташований на поверхні землі в точці A з координатами φ , град. півн. широти; ψ , град. східної довготи. Основні позначення на рис. 2.5: S - горизонтальна площадка на землі з точкою $A(\varphi, \psi)$, де розташований довільно-

орієнтований плоский приймальний майданчик F , нахилений на південь під кутом β , OO - лінія перетину площин F і S ; $AD \in S$ та $AD \perp OO$; $AC \in F$ та $AC \perp OO$; $AE \perp F$; $AB \in S$; G - сонце; $AH \in S$ і AH є проекцією AG на S .

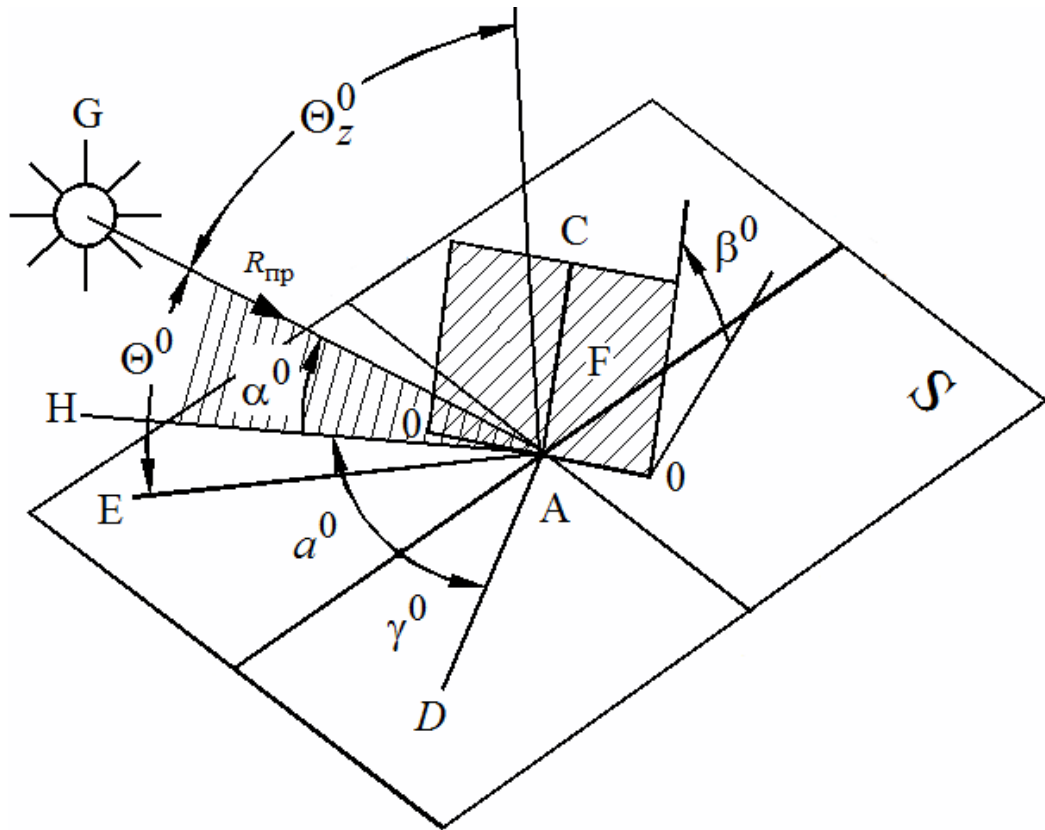


Рисунок 2.5 – Геометрія приймального майданчика на Землі і Сонця

Відповідно визначаються такі характерні кути для приймального майданчика F по відношенню до $R_{пр}(t)$: Θ - кут падіння сонця, рівний куту між GA і перпендикуляром до F , тобто, кут між напрямком на південь і перпендикуляром AD до OO ($\gamma = 0$ для майданчика, орієнтованої строго на південь; $\gamma < 0$, тобто $-90^\circ < \gamma^0 < 0$) для майданчика, орієнтованої на захід; α - висота сонця над горизонтом або кут між напрямком GA і його проекцією на площину (тобто HA); a^0 - азимут сонця або кут між напрямком на південь і проекцією GA і площиною F (тобто HA); знаки a^0 і γ^0 збігаються між собою.

Співвідношення між Θ^0 і Θ_z^0 для горизонтального ($\beta = 0$) і нахилого приймального майданчика ($\beta > 0$) показано на рис.2.6. Для випадку, коли $\beta^0 = 0$ кути Θ^0 і Θ_z^0 збігаються між собою, тобто $\Theta^0 \equiv \Theta_z^0$. На рис.2.6 прийнято, що висота Сонця в разі а) і б) однакові, тобто $\alpha_1 = \alpha_2$.

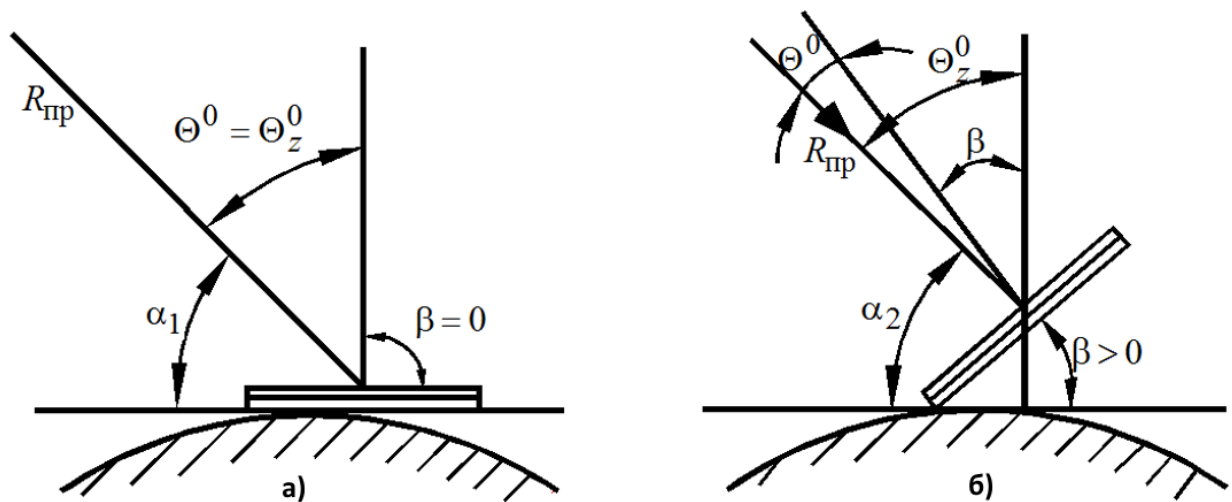


Рисунок 2.6 – Співвідношення Θ^0 і Θ_z^0 для а) горизонтального, і б)похилого приймального майданчика

Однак, кількість сонячної енергії, яка поступає на прийомний майданчик $R(t)$ і визначається співвідношенням (2.4) буде різним.

$$R(t) = R_{\text{пр}}(t) \cdot \cos\Theta(t) \quad (2.4)$$

Що до випадку зображеного на рис 2.6 (б) значення $R(t)$ буде більше, ніж для випадку зображеного на рис 2.6 (а). В цілому можна констатувати те, що прихід прямого СС на приймальний майданчик багато в чому визначається значенням $\Theta(t)$. Значення Θ для будь-якого моменту часу t теоретично можна визначити за умови рівномірного руху Землі по орбіті навколо Сонця і навколо земної осі приймального майданчика в точці $A(\varphi, \psi)$, що має $\beta \neq 0^\circ$ і $\gamma \neq 0^\circ$ та постійними в даний момент часу і за розрахунковий період $T = t_K - t_0$ (тобто $(\beta(t) = \beta; \gamma(t) \neq \gamma)$):

$$\begin{aligned} \cos \Theta(t) = \sin \beta [\cos \delta(t) \{ \sin \varphi \cos \gamma \cos \omega(t) + \sin \gamma \sin \omega(t) \} \\ - \sin \delta(t) \cos \varphi \cos \gamma] \\ + \cos \beta [\cos \delta(t) \cos \varphi \cos \omega(t) + \sin \delta(t) \sin \varphi]. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Рівняння (2.5) за допомогою деяких тригонометричних перетворень можна представити в наступному вигляді [16]:

$$\cos \Theta(t) = (A - B) \cos \delta(t) + [C \sin \omega(t) + (D - E) \cos \omega(t)], \quad (2.6)$$

де $A = \sin \varphi \cos \beta$; $B = \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma$; $C = \sin \beta \sin \gamma$; $D = \cos \varphi \cos \beta$; $E = \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma$.

Для деяких характерних випадків розташування приймального майданчика відносно Сонця рівняння (2.5) і (2.6) можна перетворити до наступного більш простому виду [16]:

- горизонтальний прийомний майданчик, тобто $\beta = 0$:

$$\begin{aligned} \cos \Theta(t) = \cos \Theta_Z^0(t) - \cos \omega(t) \cos \varphi \cos \delta(t) + \\ + \sin \varphi \sin \gamma(t); \end{aligned} \quad (2.7)$$

- перпендикулярний до поверхні Землі приймальний майданчик, тобто $\beta = 90^\circ$:

$$\begin{aligned} \cos \Theta(t) = \cos \delta(t) \{ \sin \varphi \cos \gamma \cos \omega(t) + \sin \gamma \sin \omega(t) \} - \\ - \sin \delta(t) \cos \varphi \cos \gamma; \end{aligned} \quad (2.8)$$

- нахилений строго на південь приймальний майданчик, тобто $\beta > 0$ та $\gamma = 0$:

$$\cos \Theta(t) = \sin(\varphi - \beta) \sin \delta(t) + \cos(\varphi - \beta) \cos \delta(t) \cos \omega(t). \quad (2.9)$$

Розглянемо особливості методів розрахунку цих параметрів, які також сильно впливають на прихід СС на приймальний майданчик на Землі і визначаються взаємним розташуванням Землі по відношенню до Сонця в кожен поточний момент часу t або інтервал часу Δt знаходження Землі на небесній орбіті.

На рис. 2.7 представлена схема обертання Землі навколо Сонця протягом року, а на рис.2.8 схема освітленості поверхні Землі Сонцем в різну характерну добу року. Відомо, що Земля обертається навколо Сонця по еліптичній орбіті з ексцентриситетом $a = 0,033$. При цьому напрямок нахилу умовної земної осі

обертання залишається фіксованим в просторі під кутом $23027' = 23,450$ до нормалі до площини обертання Землі навколо Сонця (рис.2.8).

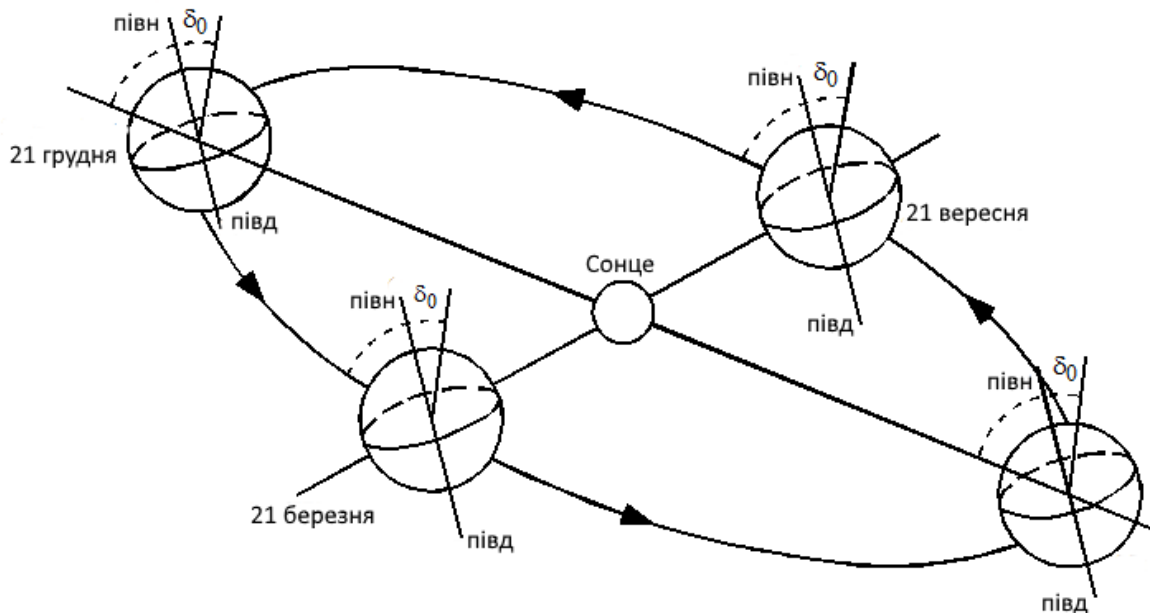


Рисунок 2.7 – Схема обертання Землі навколо Сонця. Середня лінія на поверхні Землі – екватор

В цьому випадку, кут між прямим напрямком до Сонця і площиною екватора Землі (або екваторіальною площиною) називається нахилом Сонця. Чисельно він дорівнює куту між нормаллю до площини обертання Землі навколо Сонця і напрямком осі обертанням Землі (рис. 2.8).

Відомо, що Земля обертається навколо Сонця по еліптичній орбіті з ексцентриситетом $a = 0,033$. При цьому напрямок нахилу умовної земної осі обертання залишається фіксованим в просторі під кутом $23027' = 23,450$ до нормалі до площини обертання Землі навколо Сонця (рис.2.8). В цьому випадку, кут між прямим напрямком до Сонця і площиною екватора Землі (або екваторіальній площиною) називається нахилом Сонця. На рис. 2.8 стрілками позначений потік сонячного випромінювання відзначені широти $00; \pm 23,450; \pm 66,550$. Видно, як змінюється нахил δ .

В (2.5) для розрахунку $\Theta(t)$ присутні також так званий часовий кут Сонця - ω , який характеризує собою кут, на який повертається Земля з моменту сонячного півдня в даній точці $A(\varphi, \psi)$, яка розраховується за формулою (2.11) [16].

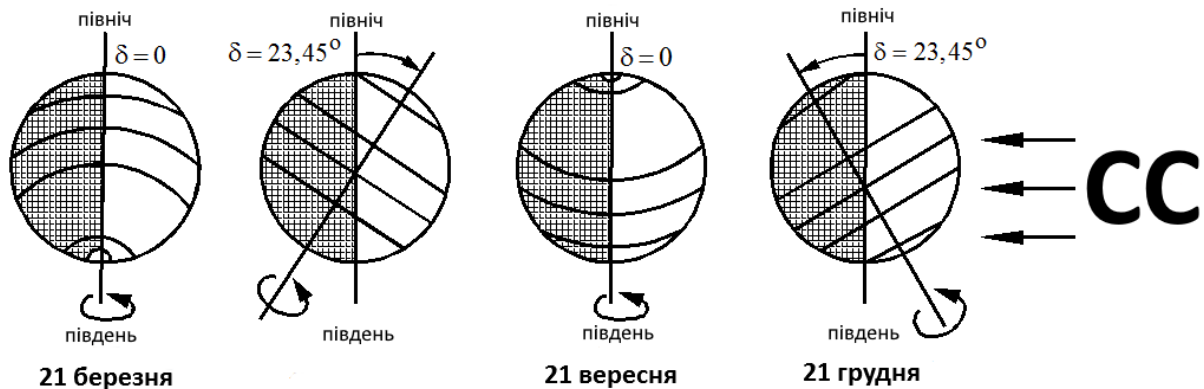


Рисунок 2.8 – Схема освітлення поверхні Землі сонячним випромінюванням в різні пори року.

$$\omega(t) = \frac{15^\circ}{\text{год}(t - t_{\text{опівдні}}) + E(t) + (\psi - \psi_{\text{зони}})} \quad (2.11)$$

де t – розглянутий момент часу в добі, год; $t_{\text{опівдні}}$ – місцевий час сонячного полудня в тій часовій зоні, в яку потрапляє точка $A(\omega, \psi)$, год; $E(t)$ – поправка з графіка рівняння часу (див. рис.2.1), хв; ψ – географічна довгота в точці A ; $\psi_{\text{зони}}$ – географічна довгота тієї меридіональної площини, в якій місцевий полудень збігається з істинним сонячним полуднем; $15^\circ/\text{год}$ – кут, на який за 1 годину повертається Земля навколо своєї осі.

Теоретично вся Земля розділена на 24 так званих часових пояси або часових зони, відлік яких починається з нульового (Гринвічського) меридіана в Великобританії. "Ширина" кожного часового поясу дорівнює 15° (по довготі). У кожній часовій зоні теоретично є деякий середній меридіан з координатою $\psi_{\text{зони}}$, де місцевий сонячний полудень збігається з істинним сонячним полуднем. Дійсно, всередині цієї зони є відмінності від середнього меридіана в часі, що і спостерігається у вигляді третього члена в (2.11), а саме $(\psi - \psi_{\text{зони}})$. При цьому

вказана фактична відмінність в часі може суттєво перевищувати теоретично можливе, тобто $\pm 7,50^\circ$, що пояснюється досить складним характером конфігурації часових поясів на Землі. Для України протяжність часових поясів не так вже й велика (наприклад по з рівнянню з Росією яка має велику протяжність по довготі (9 часових) поясів вельми складної конфігурації, що істотно відрізняється від теоретично прийнятих в світі кордонів часових поясів).

Відповідно до (2.11) $\omega < 0$ для ранкових годин (тобто $t < t_{\text{опівдні}}$), та $\omega > 0$ - для періоду часу, коли $t > t_{\text{опівдні}}$; $\omega \equiv 0^\circ$ у момент $t \equiv t_{\text{опівдні}}$.

Із приведених на початку трьох основних показників СС з метою енергетики ($R(f), E(T), T_{CC}$) найлегше та точніше розраховується теоретичне значення тривалості СС впродовж доби, тобто T_{CC} (год).

Можливо розрахувати $\cos \Theta_Z(t)$ для горизонтального приймального майданчика по формулі (2.5) для моменту сходу і заходу Сонця (відлік йде по середині сонячного диска). В моменти сходу - заходу Сонця $\Theta_Z(t) = 90^\circ$ або по (2.12) [16]:

$$\cos \Theta_Z(t) = \cos 90^\circ = 0^\circ = \cos \varpi \cos \varphi \cos \delta + \sin \varphi \sin \delta, \quad (2.12)$$

або, позначивши годинний кут заходу-сходу через $\varpi_{3/c}$, отримаємо [1]:

$$\cos \Theta_{3/c} = \frac{\sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta} = \text{tg } \varphi \text{ tg } \delta, \quad (2.13)$$

тобто,

$$\varpi_{3/c} = \arccos(-\text{tg } \varphi \text{ tg } \delta). \quad (2.14)$$

За світловий день T_{CC} , год, Сонце проходить два часових кута, кожен з яких дорівнює 90° , тобто. $2 \varpi_{3/c}$, враховуючи, що за одну годину Сонце «переміщається» по своїй орбіті на 15° , отримуємо, що [16]:

$$T_{CC} \cdot 15^\circ / \text{год} = 2 \arccos(-\text{tg } \varphi \text{ tg } \delta), \quad (2.15)$$

або остаточно для n_i - доби року

$$T_{CC} = \frac{2}{15^\circ \arccos(-\text{tg } \varphi \text{ tg } \delta)}, \quad (2.16)$$

де $\delta(n_i)$ розраховується за формулою (1.10)

Режим сонячної радіації впливає на тривалість сонячного сьйва (ТСС).

Якщо розглянути порівняльні дані по самим геофізичних розрахунками за різними років, які приведені в таблиці 1.2, бачимо, що відмінність в T_{CC} становить не більше 1 хв. З цього можна зробити висновок, що розрахунок T_{CC} по формулі (1.15) можливо використовувати для φ що знаходиться в діапазоні від 0° до $66,55^\circ$ північної широти для будь-якого n_i від 1 до 365. Для більш північних широт вираз $-\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta$ може виявитися більше одиниці для деяких періодів року. Практично це означає, що в ці періоди року в даній точці $A(\varphi, \psi)$, де $\varphi > 66,55^\circ$ буде або полярна ніч $T_{CC} = 0$, або полярний день $T_{CC} = 24$ год. Для визначення цих періодів можна також використовувати (1.15) для ідентифікації доби, коли $T_{CC} = 0$ або 24 год. З цією метою слід порівняти $-\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta (n_i)$ значенню ± 1 , що співвідноситься $\arccos 0^\circ$ або 180° , що реалізується для умов полярної ночі і полярного дня.

На підставі того, що було описано вище можна також розрахувати досить точно прихід СС на кордоні атмосфери в космосі на горизонтальний приймальний майданчик E_0^Γ , що знаходиться над точкою $A(\varphi, \psi)$ на поверхні землі з урахуванням еліптичності її орбіти з ексцентриситетом (тобто зміщенням від центру) $a = 0,033$ за одну добу по наступних співвідношеннях:

$$E_0^\Gamma(n_i) = \int_0^T R_0^\Gamma(t) dt, \quad (2.17)$$

Де n_i – порядковий номер доби за рік;

$$R_0^\Gamma(t) = R_{\text{пр}}(t) \cos \Theta(t), \quad (2.18)$$

При $\cos \Theta(t)$, що визначається за формулою (1.15), а $R_{\text{пр}}$ розраховується по формулі:

$$R_{\text{пр}}(t) = e_0(n_i)k(n_i), \quad (2.19)$$

де $e_0(n_i)$ - сонячна константа, а k коефіцієнт (n_i) визначається по формулі

[16]:

$$k(n_i) = 1 + a \cos((360^\circ + n_i)/365) = 1 + a \cos A(n_i). \quad (2.20)$$

З даного розділу можна зробити висновки, що:

1. Проведені дослідження виявляють суттєву залежність ефективності сонячної енергетики від погодних факторів.
2. Сонячне сьйво величина непостійна і складно передбачувана

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ АКБ

Метою даної магістерської роботи є дослідження роботи АКБ на реальну навантаження і розробка методики запобігання швидкому виходу з ладу АКБ при нестандартних умовах експлуатації. Перш за все маємо на увазі нестандартні випадки, які обумовлені природними факторами, такими як: зниження тривалості сонячного сяйва у осінньо-зимовий період, що може призвести до недозаряду АКБ за світловий період і його розряду, який може бути значно нижче того відсотку, який вказаний в його технічних характеристиках. Друге – у весінне-літній період, коли сонячне сяйво (СС) досягає свого найбільшого максимуму можливе збільшення зарядового струму, що буде призводити до розігріву АКБ і як наслідок створенню окисної плівки (сульфатація) що зменшує ємність і тривалість безперервної роботи АКБ.

3.1 Сонячна станція - як основне джерело енергії

Сонячна радіація має величезне значення для найрізноманітніших процесів і явищ, що відбуваються на землі і в її атмосфері. Питання пов'язані з акумулюванням енергії досить широко і детально розглядається в різних джерелах. Але найбільш прийнятним для різного роду сонячних станцій ще довго будуть залишатись акумуляторні батареї.

Так вже вийшло, що (СК) акумулятори через свою ціни залишаються поки найпопулярнішими на ринку сонячних електростанцій. А між тим більш активно впроваджуються в технології фотоелектричних станцій літій-іонні батареї, що перевершують СК практично за всіма параметрами [9]. Також вважається, що найпривабливішими на сьогоднішній день є гелеві і літій-феро-фосфатні моделі. Однак в ціновому рейтингу вони найбільш дорогі [17].

3.2 Постановка задачі дослідження

Важко сказати якому джерелу енергії слід надати більшу перевагу. Нас цікавило питання наскільки ефективно можна використовувати енергію сонця, щоб забезпечити автономність, не бути зав'язаним на гарантоване енергопостачання. Адже для використання СЕС в якості джерела енергії потрібно забезпечити наявність енергії і в темний час доби. І тут без акумуляторів не обійтися. Ми прекрасно розуміли, що найбільш прийнятними акумуляторами є лужні, але вони досить дорогі. Тому ми використовували кислотні необслуговувані АГМ акумулятори.

Одним з інформаційних складових був рівень сонячного сяйва. Саме від нього залежить продуктивність сонячних панелей в конкретний час року. На рис.3.1 показаний рівень розподілу СС за весь час роботи з акумуляторами в спробі їх «реанімації» без виймання їх із системи енергопостачання.

Слід відзначити, що в процесі роботи було помічено - саме в липні, коли рівень СС максимальний (рис. 3.1) процес відновлення носив досить незадовільний характер. І це при тому, що в це літо липень був не надто дощовим, з чого можливо зробити висновки, що атмосфера була досить прозорою. На рис. 3.5 цьому відповідає інтервал часу від 30 до 50 дня роботи.

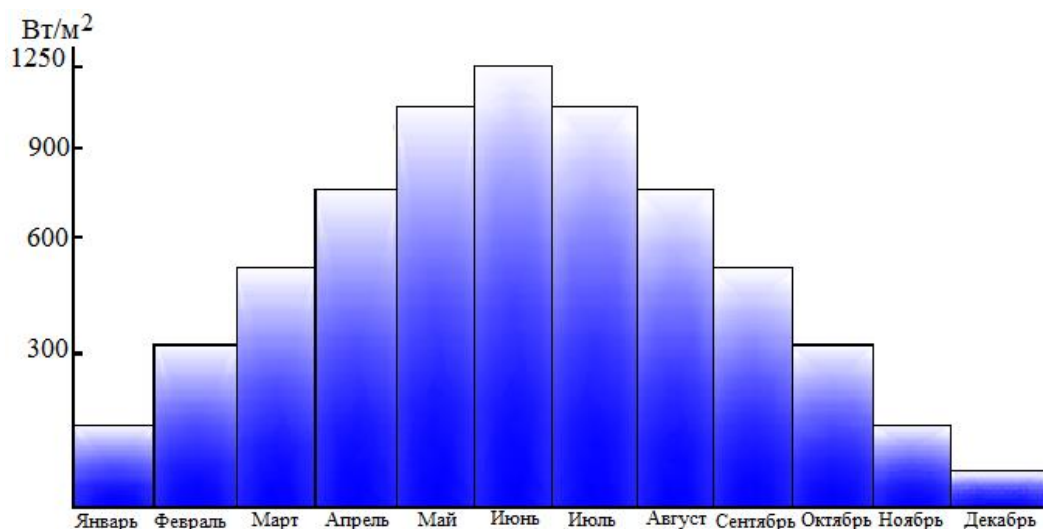


Рисунок 3.1 – Рівень сонячного сяйва

На рис.3.2 приведені сонячні панелі з яких складається СЕС.



Рисунок 3.2 – Збирання сонячної батареї

У нашому випадку були придбані полікристалічні модулі типу АХ-10Р розвиваючі, згідно того, що на них написано 10 Вт. Однак насправді виявилось, що максимальна потужність яку вони можуть розвинути реально це - 7 ... 8 Вт. Саме ця обставина змусила нас придбати їх досить багато.

На рис. 3.3 показані використані нами перетворювачі. Один з перетворювачів це DC-DC - перетворювач з ШІМ для зарядки малопотужного акумулятора який використовувався в якості накопичувача для освітлення службового приміщення у вечірній час (рис.3.3 (а)).

Другий перетворювач (рис. 3.3 (б)), потужністю 150 Вт, використовувався для освітлення житлового приміщення і прилеглої до нього території.

Як пристрій для заряду батареї акумуляторів (12 В, 42·А · год) використовувалось стабілізоване джерело живлення, яке приведене на рис. 3.4.



а)



б)

Рисунок 3.3 – Використані перетворювачі

Кілька слів про те, чому ми стали використовувати в якості пристрою зарядки акумуляторів не контролер, а звичайний джерело зі стабілізацією по струму і напрузі.

Річ у тому, що на конференціях, виставках та на інтернет ресурсах зустрічалися заяви від людей, що на станціях, які вони встановили на своїх подвір'ях, порівняно нові кислотні акумулятори досить швидко вийшли з ладу і в усьому вони звинувачували контролери для акумуляторів.

У нашому випадку сталося те ж саме буквально за місяць наш контролер теж «вбив» акумулятори. Для того щоб, реанімувати їх нам при-йшлося заряджати кожен акумулятор від стандартного зарядного пристрою. Але і після цього контролер «відмовлявся» від роботи. Причину ми з'ясувати не стали, а поставили звичайне, п'яти амперне стабілізований по струму і напрузі джерело.



Рисунок 3.4 - Джерело живлення для зарядки акумуляторної батареї

3.2.1 Структурна схема і результати досліджень

На рис. 3.5 показана структурна схема нашої СЕС, де СБ - сонячна батарея; ШІМ - контролер заряду акумуляторів малої потужності; АКБ1 - акумулятори Li-ion 18650; СТИП – стабілізоване джерело живлення; ПН – перетворювач напруги 12/220; АКБ2 - батарея з кислотних акумуляторів GD 1270, 12 В 7А · год, бшт.

Використання акумуляторів в складі СЕС є питанням окупності всієї системи. У нашому випадку окупність не має значення.

Провести ряд заходів по відновленню акумуляторів, як уже зазначалося, змусив контролер заряду акумуляторів сонячної батареї. Після того, як кожен акумулятор був заряджений окремо, вони знову були включені як єдиний елемент енергозабезпечення.

Надалі процес підтримки працездатності акумуляторів і їх тренування проходили в складі станції. Весь процес полягав в наступному. У вечірні пори акумулятори віддавали енергію в навантаження тобто для освітлення житлового приміщення і роботи ПК. Однак на першому етапі цей час було невелике і склало трохи більше години, потім доводилося переходити на гарантоване живлення.

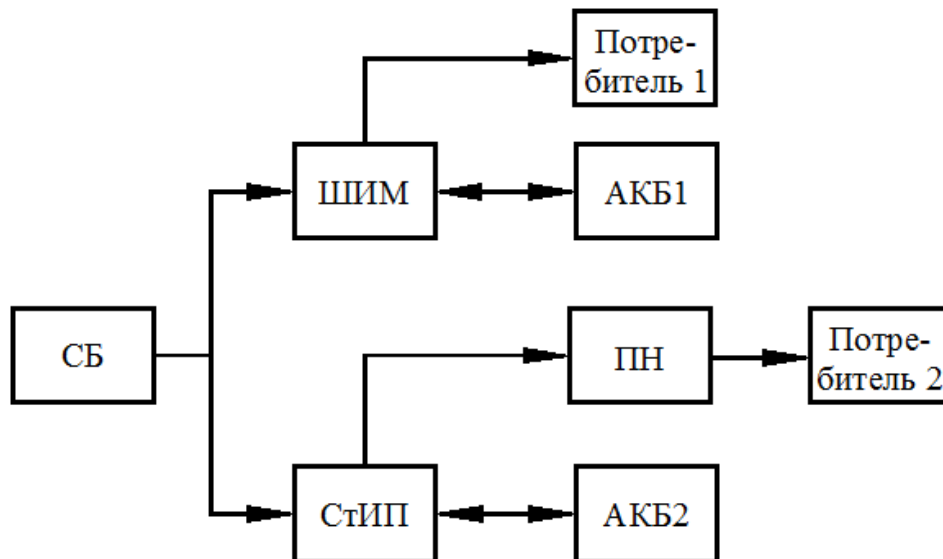


Рисунок 3.5 – Структурна схема СЕС

Надалі, в ранкові години, коли напруга на СБ досягала напруги, якої було достатнього для здійснення заряду, підключалися акумулятори. Заряд тривав до тих пір поки напруга на акумуляторах не досягала 13,9 В. Після досягнення цієї напруги акумулятори відключалися від СБ і підключалися на навантаження, що перевищувало рекомендовану напругу в 10 разів, тобто 20 А. При цьому постійно контролювалася напруга на акумуляторах. Після того, як напруга на акумуляторах під навантаженням в 20 А падала до 11,5 В розряд припинявся і батарея знову підключалася до СБ. Кількість циклів тренування багато в чому визначалася погодними умовами, але в будь-якому випадку, коли інтенсивність сонячного сяйва наближалася до максимуму, тренування припинялось і акумуляторна батарея переводилась в режим безперервного заряду. Часу, що залишився цілком вистачало для заряду батареї. А у вечірній час батарея, скільки могла, працювала на звичайне навантаження. На рис. 3.6 показаний процес відновлення ємності акумуляторів (штрихована область II). З графіка видно, що даний процес зайняв досить тривалий період (практично 20 днів).

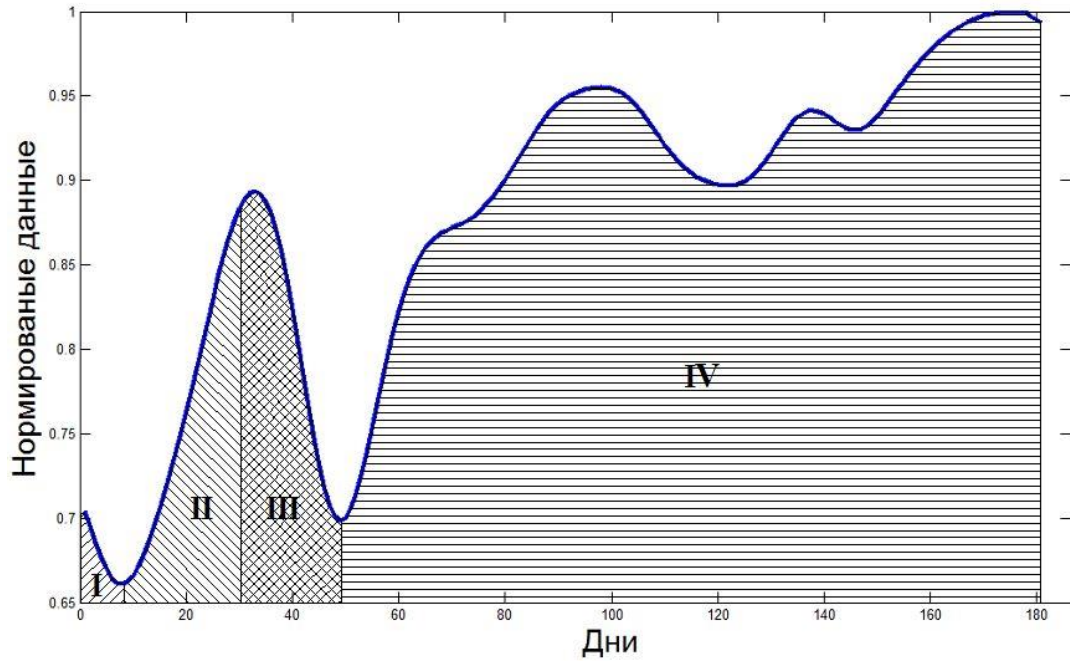


Рисунок 3.6 – Зміна ємності АКБ

Обробка отриманих значень проводилася методом складного згладжування 5-ти змінних значень [18].

$$y_1 = (3y_1 + 2y_2 + y_3 - y_5)/5 \quad (3.1)$$

$$y_2 = (4y_1 + 3y_2 + 2y_3 + y_4)/10$$

$$y_i = (y_{i-2} + y_{i-1} + y_i + y_{i+1} + y_{i+2})/5, \quad (3.2)$$

де $2 < i < N-2$

$$y_{N-1} = (y_{N-3} + 2y_{N-2} + 3y_{N-1} - 4y_N)/10 \quad (3.3)$$

$$y_N = (3y_N + 2y_{N-1} + y_{N-2} - y_{N-4})/5$$

Після досягнення певного максимуму акумулятори працювали вже без тренування. На рис. 3.6, область 3, видно що деякий час акумулятори працювали кілька днів нормально і навіть трохи додали в часі. Однак потім все повторилось, акумулятори знову почали втрачати ємність. Доводити до стану, в якому вони опинилися в перший раз (перша заштрихована область) вже не стали і почали процес тренування значно раніше.

Наступна частина графіка (рис. 3.6 заштрихована область 4) триває і на момент написання цього диплома. При настільки тривалому тренуванні, близько

30 днів, результати вже говорять самі за себе. На рис.3.7, на графіках 1, 2, 3 і 4 показано як збільшувався час роботи акумуляторів в процесі тренування.

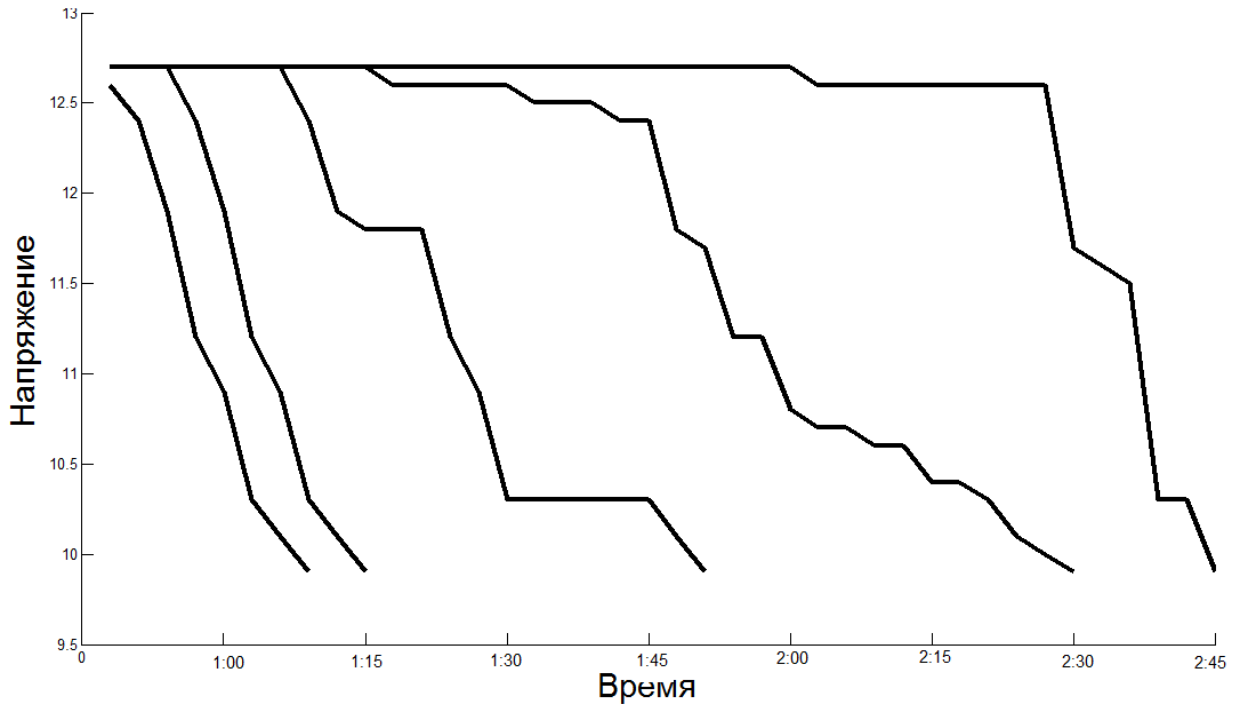


Рисунок 3.7 – Найбільш характерні зміни за часом безперервної роботи

З технічного боку задача реалізувалась наступним чином: з автомобільних ламп було зібране навантаження, яке включало в себе лампи габаритних вогнів автомобіля потужністю 5 та 10 Вт, сумарним струмом навантаження дорівнюється 40 А, зовнішній вид приведено на рис.3.8. Це навантаження час від часу підключається до АКБ протягом початку часу заряду (із сходом сонця) та приблизно до полудня. Частота включення залежала від того, як швидко АКБ досягала рівня 11,5 В. Зрозуміло, що при низьких рівнях СС інколи навантаження включалось лише 1 раз (див. рис. 3.1). Проте ефект від «розкачки» АКБ навіть при 1-му включенні мав місце.

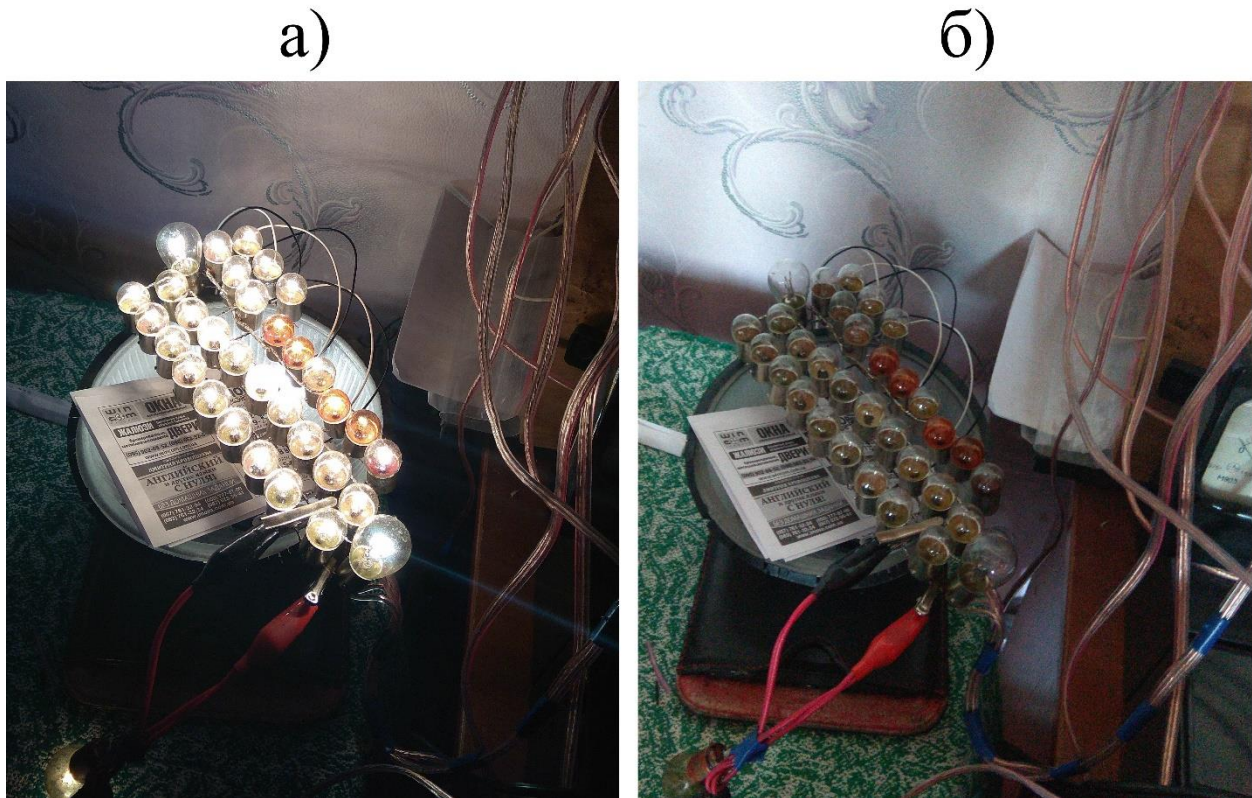


Рисунок 3.8 – Збірне навантаження, а) включене; б) виключене

На рис. 3.9 показано амперметр за допомогою якого реєструється зарядний струм. Треба відмітити, що коли відбувається декілька «тренувань» включається контроль зарядного струму досить наглядно показував як змінювалась ємність АКБ. Паралельно цьому амперметру був підключен аналого-цифровий перетворювач, який реєстрував зміни зарядного струму при кожному включенні цього навантаження з автомобільних лампочок. Сімейство графіків приведено на рис.3.10.

Важливу роль в роботі, яку ми виконували грали погодні умови. По суті, для нас, погодні умови були, якщо так можна висловитися, фактором який складно передбачити. Це в свою чергу дуже сильно впливало на час відновлення акумуляторної батареї. У ряді випадків батарея до кінця дня не встигала набрати необхідний заряд. В деякі дні заряд акумуляторної батареї відрізнявся від номінального на 5% - 10%, що само по собі для кислотних акумуляторів є неприпустимим. Так як призводить до появи і зростання сульфатації. На

рис.3.10 наведені графіки залежності струму заряду і напруги заряду від ступеня СС.



Рисунок 3.9 – Амперметр

При $Q_{CC} = 20000$ лк. і в безхмарну погоду сонячна батарея забезпечувала гранично допустимий струм заряду і за час світлового дня забезпечувала нормальний заряд акумулятора. У такі дні акумуляторна батарея працюючи в «нормальному режимі» забезпечувала безперервно енергією навантаження більше 2,5 годин. Теж саме можна сказати і про графік $Q_{CC} = 18000$ лк. Але починаючи з $Q_{CC} = 16000$ лк картина кілька змінювалася (в даному випадку мова йде про місяць серпень) при всіх інших погодних умовах батарея не «добирала» невелике значення до номіналу, приблизно 100 - 120 мВ. Але як видно з графіка. Це призводило до того, що у вечірній час скорочувалася і час роботи на навантаження. Більш того в серпні місяці світловий день вже значно коротше ніж, скажімо в червні - липні.

Останній графік ми включили для того що б показати на скільки істотним може бути вплив природного чинника на ступінь заряду. Ми вибрали далеко не найгірший варіант (рис. 3.10, графік з сонцем за хмарою). Але навіть у випадку з малою хмарністю, при виконанні умови $Q_{cc} = 20000$ лк. Ступінь заряду акумуляторної батареї була найнижчою, що в свою чергу, призводила до дуже короткому часі роботи на навантаження.

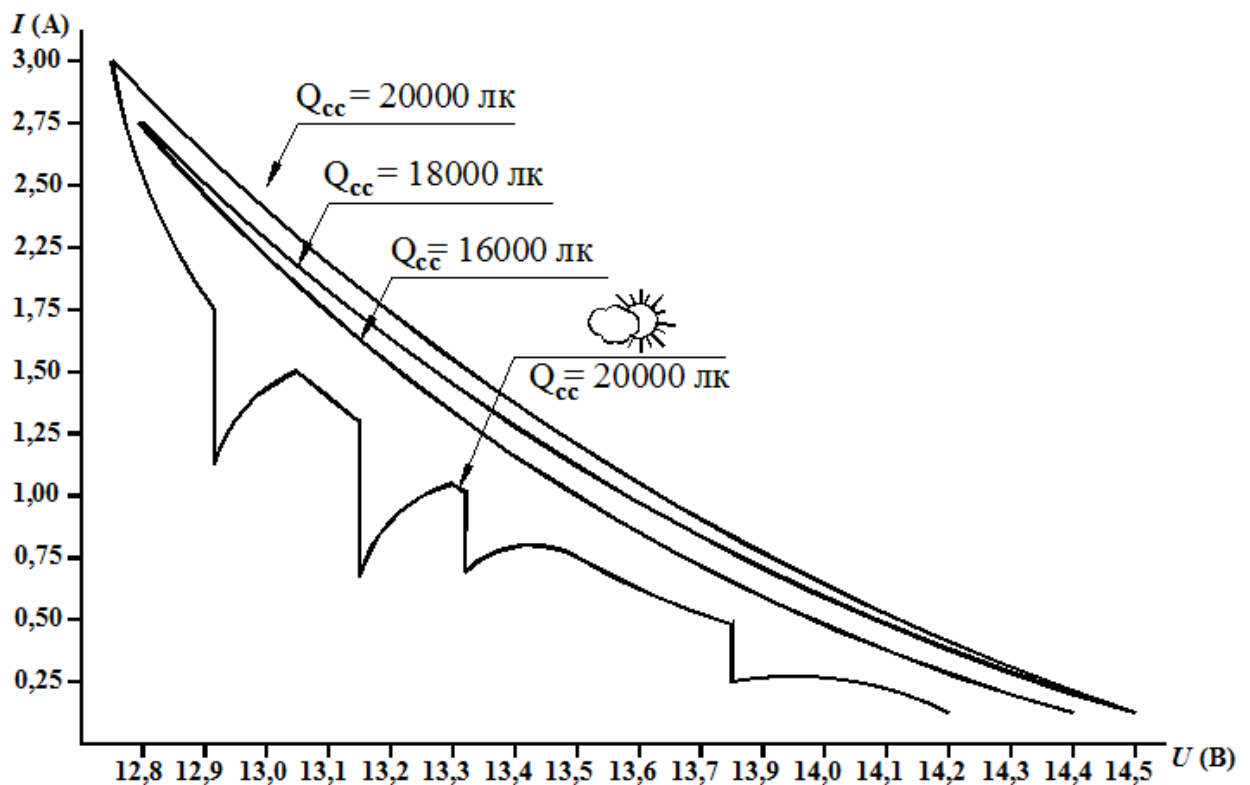


Рисунок 3.10 – Залежність струму заряду і напруги заряду від ступеня СС

На рис.3.11 приведене фото панелі електричних з'єднань які йдуть від СБ до АКБ і з неї здійснюється комутація перетворювача 12 В постійного струму в 220 В змінного струму з частотою 50 Гц. На цій панелі можливо побачити комутаційні колодки з гвинтовим кріпленням. Такий вибір кріплень був не випадковим, а був «продиктований» сумарним струмом, який розвивався в процесі заряду приблизно до 5 А та струмом споживання, який в окремі дні міг

досягати 20 А постійного струму (коли були включені комп'ютер ≈ 100 В; телевізор ≈ 100 В). В усіх інших випадках навантаженням є тільки пристрої освітлення, які сумарно потребляють не більше 20 Вт.

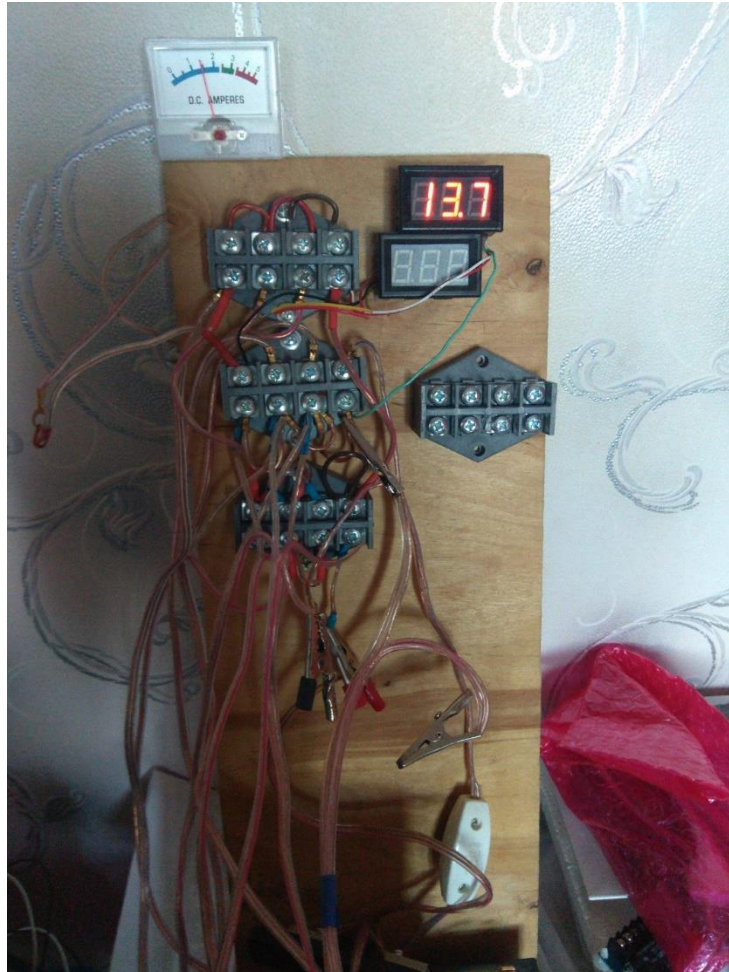


Рисунок 3.11 – Панель електричних з'єднань

На рис. 3.12 показано з чого складається батарея акумуляторів. Це 6 свинцево-кислотних акумуляторів GDLITE GD – 1270 сумарною ємністю 46 А · год. В системі енергопостачання всі АКБ підключені паралельно. Особливих вимог до паралельного підключення кислотних акумуляторів при їх зарядці, як правило не вимагається, так як вирівнювання струму у кислотних АКБ відбувається не на стільки небезпечно як у лужних.

Ось кілька слів про те, як ми отримуємо ці дані.

Справа в тому, що СЕС знаходиться від лабораторії на досить великій відстані. І перебувати там весь час не представляється можливим. Тому було організовано зв'язок з СЕС через інтернет.

Але це тема для окремої роботи. Так як зачіпає не стільки технічну сторону, скільки питання інформаційного характеру і дистанційного керування, а також передачу телеметрії використовуючи нові підходи, з'явилися, в інтернет технологіях останнім часом.



Рисунок 3.12 – Батарея акумуляторів

3.2.2 Моделювання з метою оптимізації параметрів накопичувачів за напругою розряду і заряду

У багатьох випадках метою оптимізації є такий вибір робочих параметрів пристрою або системи, при якому мінімізується ряд показників, який надає негативний вплив здатне викликати ряд небажаних, а часом згубних наслідків на роботу пристрою або системи [19].

У нашому випадку небажаними явищами при роботі накопичувача енергії - кислотного акумулятора, є наступні фактори:

- сульфатація пластин - це процес, в часі якого на поверхні акумуляторних електродів з'являється сірчаноокислий свинець, поступово покривають всю поверхню електродів. Сульфатація призводить до втрати ємності акумуляторів, і відповідно, виходу акумулятора з ладу [20], [22];

- дисипація - процес, при якому відбувається перехід упорядкованого руху електронів в хаотичне, що в свою чергу призводить до нагрівання електричних пластин акумулятора з їх подальшим руйнуванням. Це явище призводить до повного виходу акумулятора з ладу [24];

- ефект пам'яті. Цей ефект пов'язаний з порушенням процесу розряду акумуляторної батареї. Поява цього ефекту пов'язують з недостатньою глибиною розряду акумулятора [20], [22], [24], [27], [28].

З огляду на ці причини, щоб знизити ймовірність передчасного виходу з ладу акумуляторних батарей, ми спробували виконати оптимізацію роботи накопичувачів.

В якості критерію оцінки ми вибрали параметр середньоквадратичного відхилення точки розряду акумулятора.

Грунтуючись на статистичних даних, накопичених за досить великий проміжок часу необхідно було відстежити, як змінюється час заряду і розряду акумуляторної батареї при зміні ступеня СС.

Критерієм оцінки було значення мінімальної дисперсії. Для визначення цього значення ми представили нашу установку наступне структурною схемою показаної на рис 3.13.

Вибір розрахунку оптимального розряду був обумовлений тим, що необхідно було вибрати такий параметр, при якому буде легко визначити критичне значення напруги, при якій вже неможна навантажувати АКБ, бо це може привести до пришвидшеної сульфатації та дисипації кислотного акумулятора.

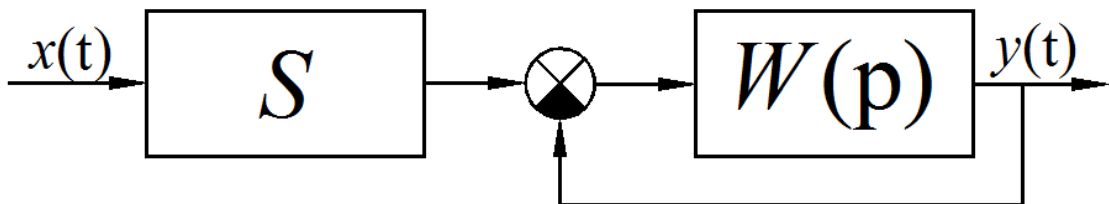


Рисунок 3.13 – Структурна схема системи

де $x(t)$ - вхідна величина якої є інтенсивність СС протягом доби; S - крутизна швидкості наростання струму сонячної батареї (СБ); $W(p)$ - передатна функція накопичувача енергії, яка визначається як [19]:

$$W(p) = \frac{1}{1+Tp}, \quad (3.4)$$

де T - час заряду або розряду накопичувача енергії; p - оператор Лапласа.

Підставивши в цей вираз час заряду і розряду акумуляторів отримаємо:

$$W_3(p) = \frac{1}{1+T_{зар.}p}, \quad (3.5)$$

$$W_p(p) = \frac{1}{1+T_{раз.}p}. \quad (3.6)$$

Тоді середньоквадратичну дисперсію можна уявити як [1]:

$$\sigma = \sqrt{W_3(p)^2 + W_p(p)^2}. \quad (3.7)$$

На рис. 3.14, рис. 3.15, рис. 3.16 і рис. 3.17 показані найбільш характерні зміни дисперсії обрані нами для побудови моделі яка, як ми вважаємо, може

значно знизити виникнення тих небажаних явищ які призводять до виходу акумуляторної батареї з ладу.

На наведених нижче рисунках показані результати моделювання при різних інтенсивностях СС, погодних умов в залежності від сезонних змін. Для зручності перед кожним рисунком стоїть дата коли була зроблена вибірка.

Так, наприклад, на рис. 3.14 розрахована дисперсія для даних отриманих 10.06.2019. З цього рисунку видно, що оптимальне значення при якому необхідно відключити накопичувач від навантаження щоб уникнути сульфатації. Такою напругою є напруга 10,3 В.

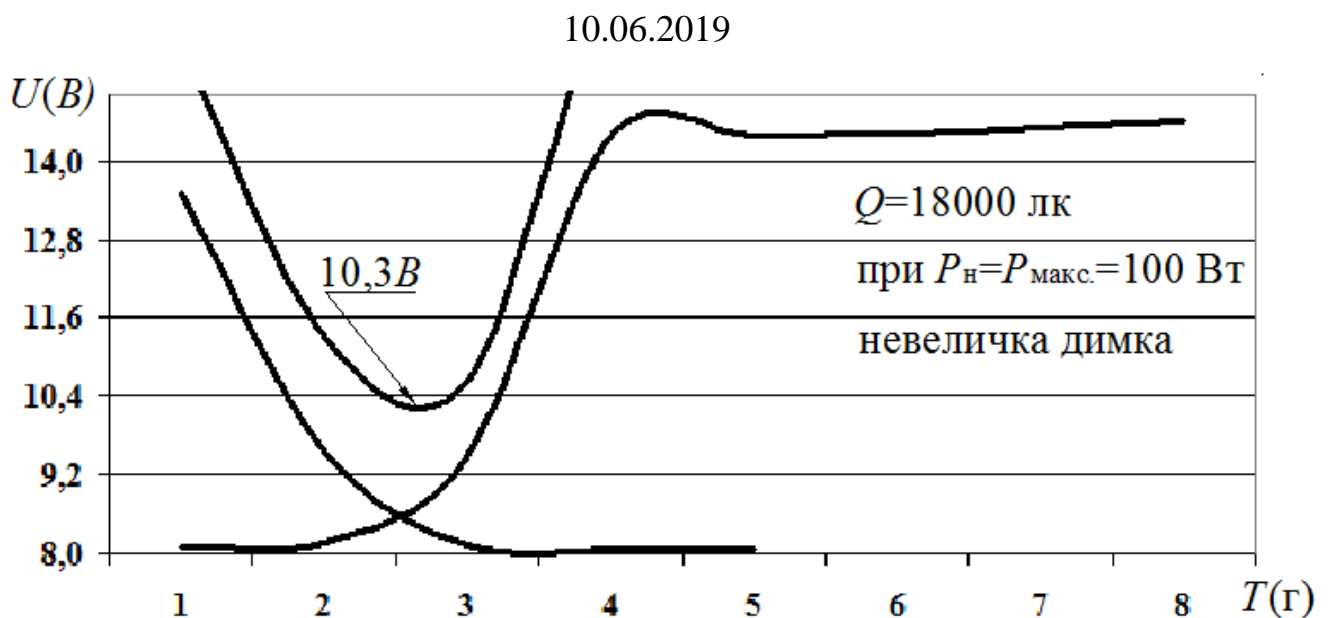
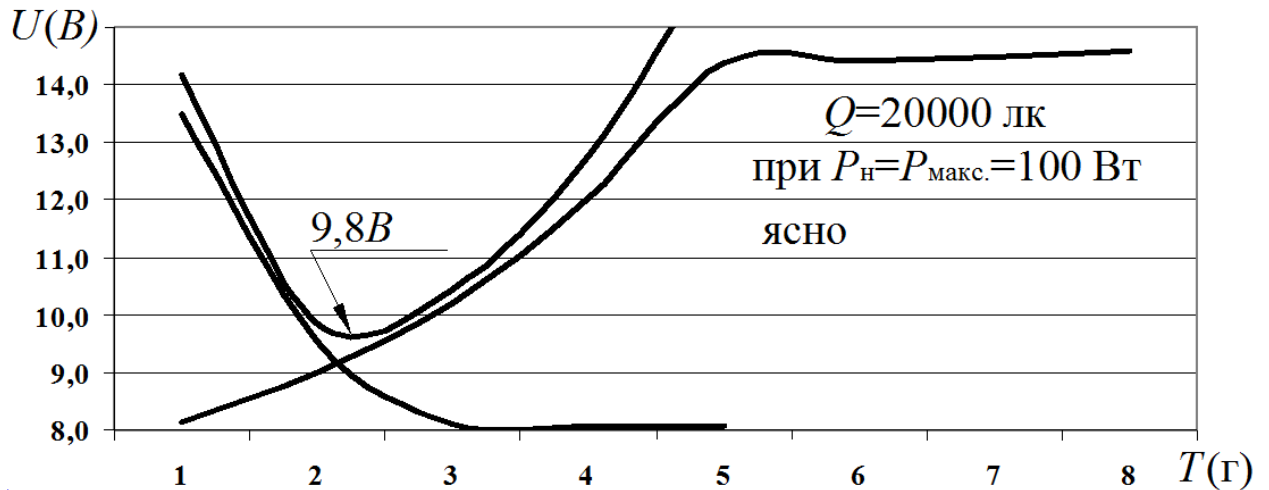


Рисунок 3.14 – Оптимальне значення $U_{\text{раз}}$ для середнього СС

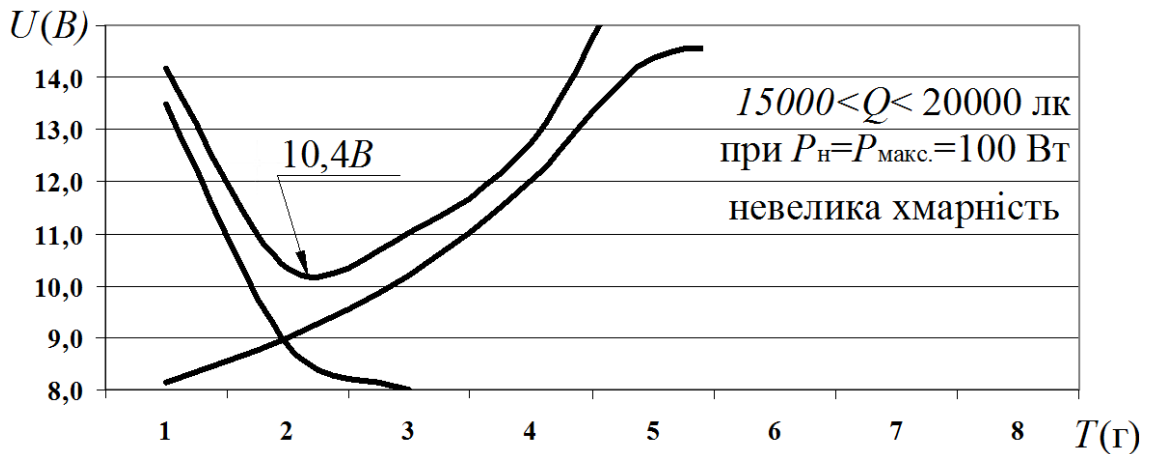
На рис. 3.15 показано мінімальне значення дисперсії при незначному збільшенні інтенсивності СС, але оптимальне значення напруги відключення досягає вже 9,8 В.

З рис. 3.16 видно що вже при невеликій хмарності акумуляторна батарея вже не встигне за світловий день зарядитися до номінального значення і слідчий відключення від навантаження має відбутися при падінні напруги до 10,4 В.

14.06.2019

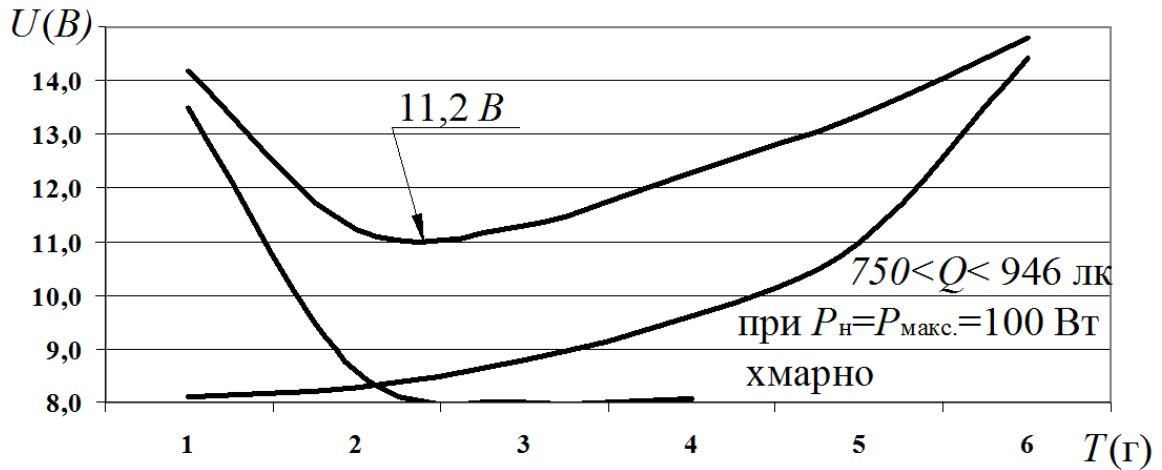
Рисунок 3.15 – Оптимальне значення $U_{раз}$ для яркого СС

07.07.2019

Рисунок 3.16 – Оптимальне значення $U_{раз}$ для СС визначеною невеликою хмарністю

На рис. 3.17 показані результати, отримані на момент написання роботи. З рис. 3.17 видно, що за світлий ділянку часу накопичувач енергії не набрав необхідну ємність і, як наслідок, струм, що віддається в навантаження повинен бути перерваний при падінні напруги на акумуляторах до напруги 11,2 В.

29.11.2019

Рисунок 3.17 – Оптимальне значення $U_{\text{раз}}$ при похмурий погоді

3.2.3 Запропонований алгоритм програми визначення оптимального розряду АКБ приведений на рис. 3.18.

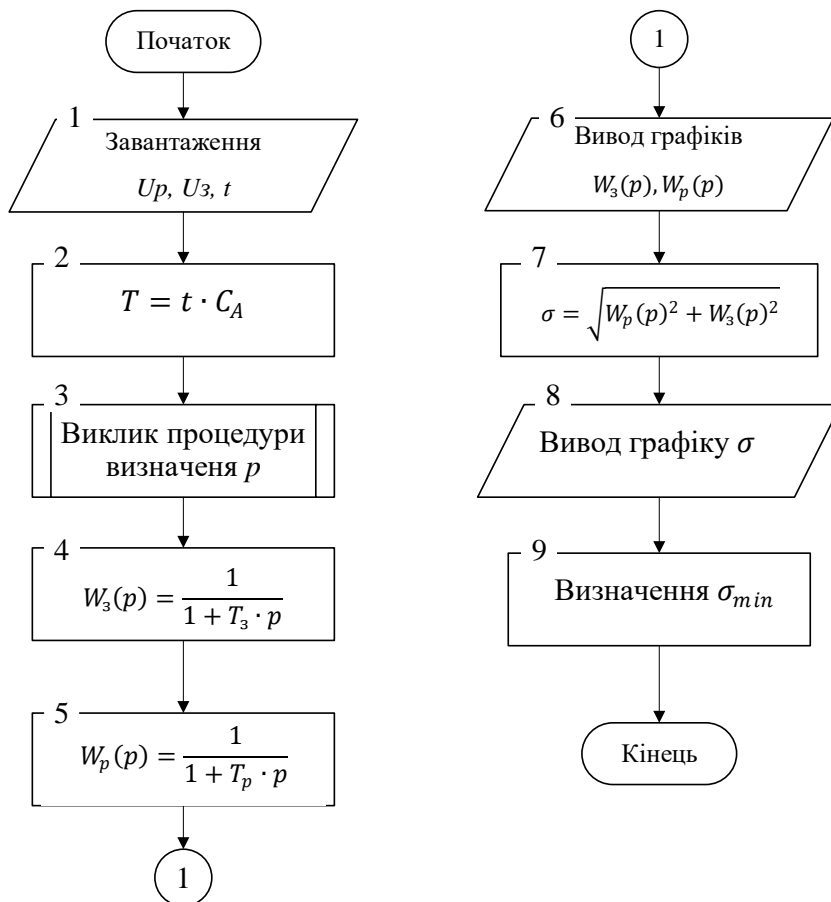


Рисунок 3.18 – Алгоритм програми визначення оптимального розряду АКБ

Робота програми полягає в наступному:

- спочатку завантажуються дані U_p отримані в результаті роботи накопичувача в режимі розряду, U_z завантажується безпосередньо під час роботи в денний час;
- також фіксується час тривалості СС і якщо мало місце хмарність обчислюється частота "мерехтінь", тобто періоді зниження СС за рахунок хмарності. Блок №1;
- потім обчислюється час яке називається часом передачі яке обчислюється як твір часу СС на ємність акумулятора. Блок №2;
- після отримання всіх необхідних даних викликається підпрограма розрахунку оператора Лапласа. У використуваному пакеті MatLab це вбудована функція з ім'ям "S". Блок №3;
- потім безпосередньо обчислюються криві $W_z(p)$ і $W_p(p)$. Блоки 4 і 5;
- вивід графіків здійснюється блоком 6;
- за результатами обчислень $W_z(p)$ і $W_p(p)$ визначається середньоквадратичне відхилення і його мінімальне значення. Блоки 7 і 9;
- крива середньоквадратичного відхилення виводиться в блоці 9.

Виходячи з вище сказаного можна зробити наступні висновки:

1. З накопичених статистичних даних можна визначити ті точки в роботі накопичувача енергії, аналіз яких може значно поліпшити його ефективність та забезпечити більш стабільну роботу протягом усього терміну експлуатації.
2. Моделювання, метою якого було визначення оптимальної напруги розряду, до якого можна віддавати струм в навантаження, очевидно вимагає додаткового експериментального підтвердження.

ВИСНОВКИ

За результатами проведених в атестаційній роботі досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Хімічні джерела живлення, якими є накопичувачі на базі акумуляторів є найменш надійною ланкою СЕС.
2. В залежності від типу АКБ необхідні різні електронні відстежувальні пристрої для контролю заряду і розряду.
3. В залежності від технології виготовлення АКБ мають різні енергетичні та експлуатаційні показники, що робить неможливим використання акумуляторів з однаковими електричними показниками, але різними за хімічним складом.
4. Значну вагу у зменшенні терміну роботи АКБ вносять погодні і сезонні режими роботи СЕС, при цьому тривалість часу їх використання завжди змінюється у менший бік, ніж це обумовлено технічними умовами.
5. За результатами роботи підвищення терміну експлуатації АКБ можливо шляхом оптимізації режимів роботи накопичувачів за запропонованим критерієм та з урахуванням зовнішніх факторів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Погода на Камчатке Чукотке Магадане [Электронний ресурс]: / Глава 2 Радиационный и световой режим – Режим доступу: <https://kamchatkarpogoda.ru/radiatsionnyj-i-svetovoj-rezhim>
2. В. Н. Бабиченко Климат Харькова [Текст]:// Под редакцией канд. геогр. наук В. Н. Бабиченко, Ленинград Гидрометеиздат 1983, 216 ст
3. RenEn [Электронний ресурс] / Владимир Сидорович, Электроэнергетика Европы: основные итоги 2018 года – Режим доступу: <http://renew.ru/european-power-industry-the-main-results-of-2018/> (Дата звернення: 23.10.19)
4. RenEn [Электронний ресурс] / Владимир Сидорович, Будущее солнечной энергетики – Режим доступу: <http://renew.ru/european-power-industry-the-main-results-of-2018/> (Дата звернення: 18.10.19)
5. RenEn [Электронний ресурс] / Владимир Сидорович, Солнечная энергетика ЕС: в 2018 году рынок вырос на 36% – Режим доступу: <http://renew.ru/european-power-industry-the-main-results-of-2018/> (Дата звернення: 23.10.19)
6. ЭкоТехника [Электронний ресурс] / Домашние солнечные станции в Украине: последняя статистика и новый рекорд – Режим доступу: <https://ecotechnica.com.ua/energy/solntse/4110-domashnie-solnechnye-stantsii-v-ukraine-poslednyaya-statistika-i-novyy-rekord.html> (Дата звернення: 18.10.19)
7. ЭкоТехника [Электронний ресурс] / В Украине работает уже 15 тыс домашних СЭС мощностью 350 МВт, люди инвестировали в солнечные панели 300 млн евро – Режим доступу: <https://ecotechnica.com.ua/energy/solntse/4110-domashnie-solnechnye-stantsii-v-ukraine-poslednyaya-statistika-i-novyy-rekord.html> (Дата звернення: 19.10.19)

8. Электрик [Электронный ресурс] / Мельников Сергей, Солнечные электростанции без аккумуляторов, сетевые солнечные электростанции – Режим доступа: <http://ele.kiev.ua/article/view/271> (Дата звернення: 28.10.19)
9. Pulsar [Электронный ресурс] / Аккумуляторные батареи для солнечной электростанции – Режим доступа: https://pulsar.kiev.ua/akkumulyatornye_batarei_dlya_solnechnoy_elektrostancii (Дата звернення: 25.10.19)
10. BestEnergy [Электронный ресурс] / Виды и типы: схемы солнечных электростанций – Режим доступа: <https://best-energy.com.ua/support/alternative-energy/solar-type> (Дата звернення: 25.10.19)
11. Selcom [Электронный ресурс] / аккумуляторы для солнечных электростанций – Режим доступа: https://www.selcom.ua/akkumulyatornye_batarei/123/akkumulyatory-dlya-solnechnyh-elektrostancij (Дата звернення: 2.11.19)
12. Pulsar [Электронный ресурс] / Развенчание мифа о применении стартерных (автомобильных) аккумуляторов в солнечных системах – Режим доступа: https://pulsar.kiev.ua/solnechnaya_sistema_s_avtomobilnymi_starternymi_akkumulyatoram аналогично №9 (Дата звернення: 25.10.19)
13. Vinur [Электронный ресурс] / ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА АККУМУЛЯТОРА ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ – Режим доступа: <https://vinur.com.ua/aboutus/usefull-info/articles/340-osobennosti-vybora-akkumulyatora-dlya-solnechnykh-batarej> (Дата звернення: 3.11.19)
14. Альтернативные энергии [Электронный ресурс] / Aleen, GEL и AGM аккумуляторы для солнечных батарей – Режим доступа: <https://allalternativeenergy.com/content/gel-i-agm-akkumulyatory-dlya-solnechnykh-batarey> (Дата звернення: 15.11.19)
15. Со светом [Электронный ресурс] / Литий-железо-фосфатные аккумуляторы и их преимущества – Режим доступа: <https://www.sosvetom.ru/articles/litij->

- zhelezo-fosfatnye-akkumulyatory-i-ikh-preimuschestva/ (Дата звернення: 23.11.19)
16. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К., СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: Учебное пособие для вузов / Под ред. В.И. Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. - 276с.
17. Pulsar [Электронный ресурс] / Эксплуатация и обслуживание свинцово-кислотных аккумуляторов – Режим доступа: https://pulsar.kiev.ua/ekspluataciya_i_obslyzhivanie_svincovo-kislotnyh_akkumulyatorov (Дата звернення: 7.11.19)
18. Бронштейн І.М., Семендяев К.А. Довідник з математики для інженерів і учнів втузів. - 13-е вид. виправлене. - М.: Наука, Гл. ред. Фіз.-мат. літ., 1986. - 554 с.
19. Первачёв С.В. Радиоавтоматика [Текст]: // учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1982. – 296 с.
20. Дасоян М.А. и Ауф И.А. Современная теория свинцового аккумулятора [Текст]: // Л. – Энергия, 1975. – 312 с.
21. Прошин В.М. Электротехника для не электротехнических профессий [Текст]: // учебник для студ. Учреждений сред. Проф. образования/ В.М. Прошин. – М.: Издательский центр «Академия», 2014. – 464 с.
22. Алиев И. И. Электротехнический справочник. [Текст]: // 5-е изд., стереотип. - М.: ИП РадиоСофт, 2010. — 384 с.
23. Горенштейн М.Д. Справочник электромонтёра. Том 2 [Текст]: // Новосибирск: Западно-Сибирское книжное издательство 1984. – 272 с.
24. Калашников С.Г. Электричество [Текст]: // учебн. пособие. – 6-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003 с. – 624 с.