

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
АВТОНОМНОГО РИБНОГО ГОСПОДАРСТВА
ВІД ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ БАТАРЕЙ**

Виконав студент VI курсу, групи ЕМм-61
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

_____ Стецюк А.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник _____ Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____ Вакуленко О.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри _____ Тарасенко М.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2021

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 78 сторінок, 21 аркушів презентації, 36 ілюстрацій, 7 таблиць та 34 використаних першоджерел.

Об'єкт дослідження – процес накопичення електричної енергії фотоелектричною установкою з накопичувачем енергії у склад якого входять іоністори.

Предмет дослідження – режими роботи фотоелектричної установки з накопичувачем енергії у склад якого входять іоністори від графіків електричного навантаження рибного господарства та надходження променевої енергії.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення енергоефективності та надійності фотоелектричної установки шляхом використання іоністорів для електропостачання автономного рибного господарства.

У роботі приведено аналітичний опис параметрів фотоелектричної установки з гібридним накопичувачем енергії, розроблено методику розрахунку оптимальних параметрів фотоелектричних установок з гібридним накопичувачем енергії та розроблено імітаційну модель для отримання характеристик фотоелектричних перетворювачів.

Ключові слова: СОНЦЕ, НАКОПИЧУВАЧ ЕНЕРГІЇ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНА УСТАНОВКА

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1 Особливості електропостачання рибних господарств	9
1.2 Живлення електроприймачів фермерських господарств рибоводів з використанням сонячних фотоелектричних установок	13
1.3 Наукові дослідження щодо підвищення ефективності та обґрунтування оптимальних параметрів фотоелектричних установок для сільськогосподарських споживачів.....	21
1.4 Висновки до розділу	23
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	25
2.1 Побудова і аналіз графіків електричних навантажень фермерських господарств для вирощування риби	25
2.2. Розробка структурно-схемних рішень фотоелектричних установок.....	31
2.3. Характеристики та параметри іоністорів в складі гібридного накопичувача енергії фотоелектричної установки	37
2.4 Висновки до розділу	42
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	43
3.1 Математичний опис фотоелектричної установки з гібридним накопичувачем	43
3.2 Розробка експериментальної фотоелектричної установки з гібридним накопичувачем	52
3.3 Експериментальне дослідження характеристик фотоелектричної установки з гібридним накопичувачем.....	57
3.3.1 Програма і методика експериментальних досліджень.....	57
3.3.2 Дослідження процесу заряду-розряду іоністорів в складі автономної фотоелектричної установки	58

3.3.3 Дослідження стану заряду АКБ і режимів роботи контролера заряду-розряду в автономній СФЕУ	59
3.3.4 Спільна робота АКБ і іоністорів в автономній СФЕУ	60
3.4 Розрахунок фотоелектричної установки.....	62
3.5 Висновки до розділу	64
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	
4.1 Блискавкозахист енергетичної установки	66
4.2 Фізичні основи електробезпеки.....	68
4.3 Планування заходів цивільного захисту.....	69
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	71
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	73

ВСТУП

Актуальність теми. Сонячна енергія - це корисна енергія, вироблена від Сонця у вигляді електричної або теплової енергії. Сонячна енергія використовується різними способами, найпоширеніший з них - це фотоелектрична система сонячних батарей, яка перетворює сонячні промені в корисну електроенергію. Окрім використання фотоелектрики для виробництва електроенергії, сонячна енергія зазвичай використовується для обігріву приміщень або рідин. Власники житлової та комерційної нерухомості можуть встановити сонячні системи гарячого водопостачання та спроектувати свої будівлі з урахуванням пасивного сонячного опалення, щоб повністю використати сонячну енергію за допомогою сонячних технологій.

Сонячні панелі встановлюються в трьох основних масштабах: житловому, комерційному та комунальному. Сонячні батареї житлового типу зазвичай встановлюються на дахах будинків або у відкритій місцевості (наземні) і зазвичай становлять від 5 до 20 кіловат (кВт), залежно від розміру об'єкта нерухомості. Комерційні проекти сонячної енергії, як правило, встановлюються в більшому масштабі, ніж житлова сонячна. Сонячні проекти загального користування - це, як правило, великі установки з кілька мегават (МВт), які живлять електроенергією велику кількість споживачів комунальних послуг.

Більше 90 % сонячних панелей, які пропонуються сьогодні на ринку, працюють на кремнієвих напівпровідниках, які мають ККД у межах 15 - 25% [1]. Так ККД сонячних панелей на основі перовскита становить 12% [2], а тонких плівок на основі телуриду кадмію ККД досягає 22% [3]. На практиці на їх ефективність істотно впливає правильне позиціонування. Важливими чинниками є рівень інсоляції, азимут і кут нахилу сонячних батарей [4].

Отже, є необхідність в дослідженні і визначенні умов роботи сонячних електростанцій. Цим і обумовлено тема і напрямок досліджень у даній роботі.

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є: підвищення енергоефективності та надійності фотоелектричної установки шляхом

використання іоністорів для електропостачання автономного рибного господарства.

На підставі поставленої мети сформульовані **завдання** дослідження:

- проаналізувати живлення електроприймачів фермерських господарств рибоводів з використанням сонячних фотоелектричних установок;
- побудувати та проаналізувати графіки електричних навантажень фермерських господарств для вирощування риби;
- запропонувати структурно-схемні рішення фотоелектричних установок;
- запропонувати методику розрахунку параметрів фотоелектричних установок з із накопичувачем енергії на основі іоністорів;
- розробити експериментальну фотоелектричну установку з накопичувачем енергії на основі іоністорів та провести експерименти;

Об'єкт дослідження – процес накопичення електричної енергії фотоелектричною установкою з накопичувачем енергії у склад якого входять іоністори.

Предмет дослідження – режими роботи фотоелектричної установки з накопичувачем енергії у склад якого входять іоністори від графіків електричного навантаження рибного господарства та надходження променевої енергії.

Наукова новизна отриманих результатів.

Запропоновано аналітичні вирази, які дозволяють визначити основні параметри фотоелектричної установки із накопичувачем енергії на основі іоністорів.

Удосконалена методика розрахунку електричних параметрів фотоелектричної установки з із накопичувачем енергії на основі іоністорів.

Практичне значення отриманих результатів.

Запропоновано схеми електропостачання, які можна впровадити при проектуванні і розрахунку фотоелектричних установок із гібридним накопичувачем енергії.

Апробація. Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були

представлені на ІХ Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25-26 листопада 2021 року. ТНТУ [1]

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (34 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 78 сторінок, 7 таблиць, 36 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Особливості електропостачання рибних господарств

Товарне рибництво має розвиватися на інтенсивній основі при реконструкції і технічному переозброєнні господарств з впровадженням енергозберігаючих технологій.

Електропостачання рибних господарств (РГ) та підприємств проводиться в основному від існуючих електричних мереж. Для автономного та резервного електропостачання невеликих фермерських господарств, які знаходяться, як правило, на околиці сільських поселень, сьогодні використовуються дизель- і бензоелектричні станції. Для одночасного вироблення електричної і теплової енергії (когенерацію) застосовуються газопоршневі електростанції.

Унаслідок високого ступеня зносу сільських розподільних мереж, прилеглих до РГ, відбуваються часті відключення електроенергії. Аналіз статистичних даних показує, що в сільській місцевості в даний час відзначається зниження показників надійності електропостачання: на ПЛ 0,38 кВ за рік в середньому відбувається 100 відключень на 100 км. Середня тривалість відключення - 90 год на рік. При цьому, найбільша кількість відключень доводиться на період з травня по серпень, в той час як в господарствах рибоводів технологічний процес досягає свого піку.

Сільські електричні мережі - важливий елемент інженерної інфраструктури сільської місцевості. У сільській місцевості споживається близько 13 % від усього обсягу електроспоживання країни. Як відомо, електропостачання навантажень сільськогосподарських споживачів має свої особливості [5]:

- знижена надійність сільських електричних мереж (часті короткі замикання на землю, міжфазні короткі замикання і обриви проводів);
- часті перерви в електропостачанні з причин перевантажень і зношеності обладнання мереж;

- сільські споживачі забезпечуються електроенергією більш низької якості через багаторазові трансформації напруги, відсутності механізмів регулювання напруги;

- сільські споживачі електроенергії обслуговуються менш кваліфікованим персоналом, а черговий електротехнічний персонал, на якого покладено включення в разі необхідності резервного джерела електропостачання, розташовується, як правило, на досить великій відстані від резервних об'єктів електропостачання.

Головною особливістю електропостачання виробничих підприємств і населених пунктів в сільській місцевості є необхідність підводити енергію до невеликого числа порівняно малогабаритних об'єктів, розосереджених по території.

Почастішання природних катаклізмів показали, що в районах централізованого енергопостачання назріла необхідність розвитку малої розподіленої генерації, вирішальною проблемою підвищення надійності енергопостачання споживачів в невеликих населених пунктах, електропостачання яких сьогодні здійснюється через ЛЕП [6].

Виходячи з цього, необхідно поряд з реконструкцією і технічним переозброєнням традиційної енергетики розвивати малу розподілену енергетику, в тому числі з широким використанням ВДЕ [7, 8].

Одним з напрямків, що сприяють підвищенню надійності електропостачання та зростання енергоефективності об'єктів сільськогосподарського виробництва, є розробка і впровадження систем електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема, сонячних фотоелектричних установок (СФЕУ).

У ставковому рибництві добові графіки навантажень мають нерівномірний характер з чітко вираженими періодами підвищеного споживання електроенергії і характеризуються такими параметрами: коефіцієнт заповнення - 0,72; коефіцієнт форми - 1,03; середня потужність - 4,4 кВт [9]. Більшість віддалених рибоводних ділянок характеризуються рівнем електричного

навантаження в пікові періоди не більше 1,5 кВт. У ставкових та садкових господарствах слід зазначити відносно низькі витрати палива і електроенергії [10].

У господарствах інтенсивного рибництва необхідна постійна аерація і підживлення ставків і басейнів свіжою водою, тобто перебої в електропостачанні можуть привести до значних відходів вирощуваних гідробіонтів. Економічні збитки в таких випадках бувають надзвичайно високі. Фермерські РГ можна класифікувати як споживачів зі змішаним виробничо-побутовим навантаженням.

Рибні ферми з установками із замкнутим водопостачанням (УЗВ), відносяться до споживачів другої категорії, що не допускають перерви в електропостачанні більше 0,5 год. Неприпустимо тривале відключення таких відповідальних навантажень, як: аератори, оксигенатори, циркуляційні насоси.

Інкубаційні цехи рибоводів і ферм відносяться до споживачів другої категорії електропостачання [11]. Нормами проектування електричних мереж напругою 0,38 кВ для найбільш відповідальних споживачів другої категорії встановлено перерви в електропостачанні не більше 3,5 год. При цьому повинно бути передбачене автономне джерело резервного живлення з автоматичним запуском.

Основні витрати при вирощуванні риби в УЗВ йдуть при підготовці води, що поступає і підтримці оптимальної її температури. Суттєвою проблемою товарного рибництва є перехід від екстенсивного до інтенсивного ведення господарства. При інтенсифікації процеси перекачування і аерації води тягнуть за собою підвищену витрату електроенергії.

Основна частка витрат на електроенергію в господарствах інтенсивного рибництва припадає на забезпечення роботи насосних і аераційних установок, а також на підігрів води. У багатьох УЗВ питоме споживання електроенергії становить $1,8 \div 3,2$ кВт·год/кг рибної продукції. При встановленій потужності 5 кВт орієнтовна потреба в електроенергії становитиме близько 40 тис.

кВт·год/рік. Згідно з даними датської компанії «VorlAqua a/s» щомісячні витрати на енергопостачання рибоводів індустріального типу можуть становити до 15 % від сукупних витрат (рис. 1.1).

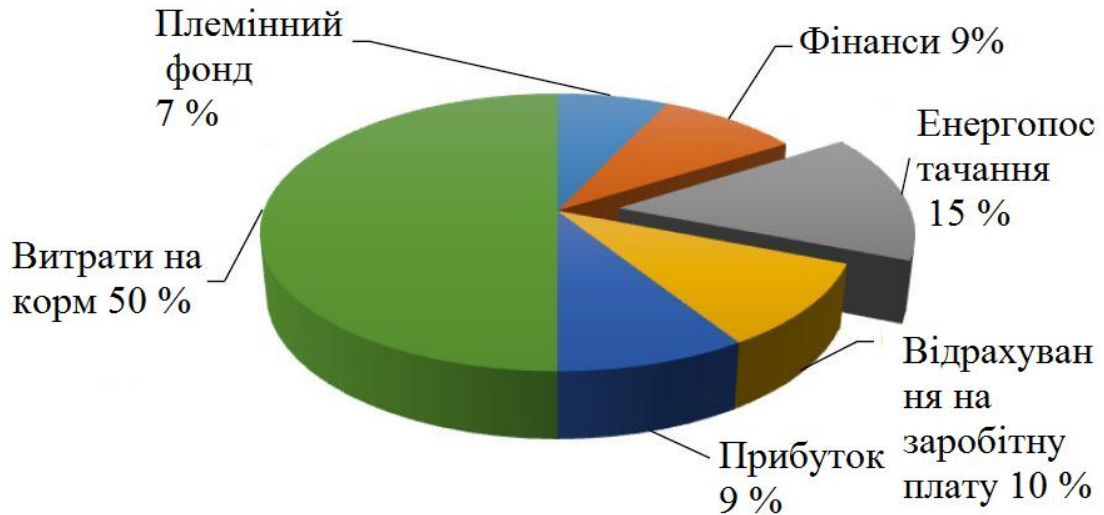


Рисунок 1.1 - Структура виробничих витрат рибоводів

Витрати на електропостачання виробничого циклу (250 доб.) сімейної рибної ферми з вирощування осетрових при середньому добовому споживанні електроенергії - 37, 5 кВт · год/добу склали 9% (рис. 1.1).



Рисунок 1.2 - Витрати на виробничий цикл осетрової ферми

З рис. 1.1 і 1.2 слідує, що витрати на електропостачання становлять 7-15 % від усіх витрат. Випереджаюче зростання цін на енергоресурси в порівнянні з

динамікою цін реалізації рибної продукції призводить до зниження рентабельності виробництва.

Тим самим, необхідно знижувати собівартість продукції за рахунок:

- оптимізації технологічних режимів;
- енергозбереженні в електроприводі;
- використання потенціалу ВДЕ для забезпечення резервного електропостачання та зниження витрат на електроенергію, яка споживається від централізованих мереж.

1.2 Живлення електроприймачів фермерських господарств рибоводів з використанням сонячних фотоелектричних установок

В результаті аналізу типів СФЕУ запропонована класифікація СФЕУ критерієм наявності/відсутності накопичувачів електроенергії (рис. 1.3).

Автономна фотоелектрична система (рис.1.4) повністю незалежна від мереж централізованого електропостачання та живить навантаження від акумуляторних батарей через автономний інвертор напруги [7].

Акумуляторна фотоелектрична система резервного типу з підключенням до мережі (автономномережева) (рис.1.5) крім підключення до мережі містить також акумулятори. У разі нестачі енергії від акумуляторних батарей, гібридний інвертор (або двонаправлений, батарейний інвертор) додає в навантаження енергію від мережі. Такі системи схожі з резервними системами електропостачання (системи безперебійного живлення), оснащеними накопичувачами і живлять навантаження під час перебоїв в подачі електроенергії. Резервні акумуляторні СФЕУ на основі двонапрямлених інверторів детально розглядаються в роботах [13].

Мережева фотоелектрична система (рис.1.6) має мережевий інвертор, який перетворює енергію постійного струму в енергію змінного струму і віддає її в централізовану мережу електропостачання.

Мережева СФЕУ призначена для економії споживаної електроенергії, а також для продажу електроенергії в централізовану мережу електропостачання за «зеленим тарифом»



Рисунок 1.3 - Класифікація СФЕУ

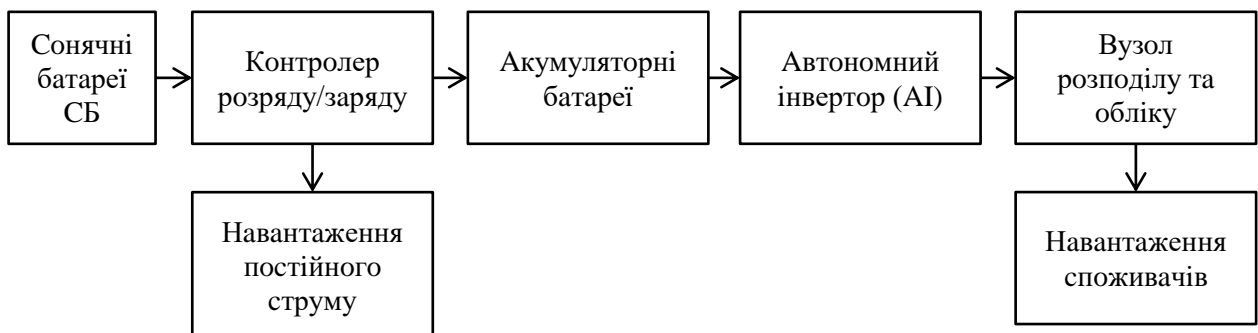


Рисунок 1.4 - Структурна схема автономної СФЕУ

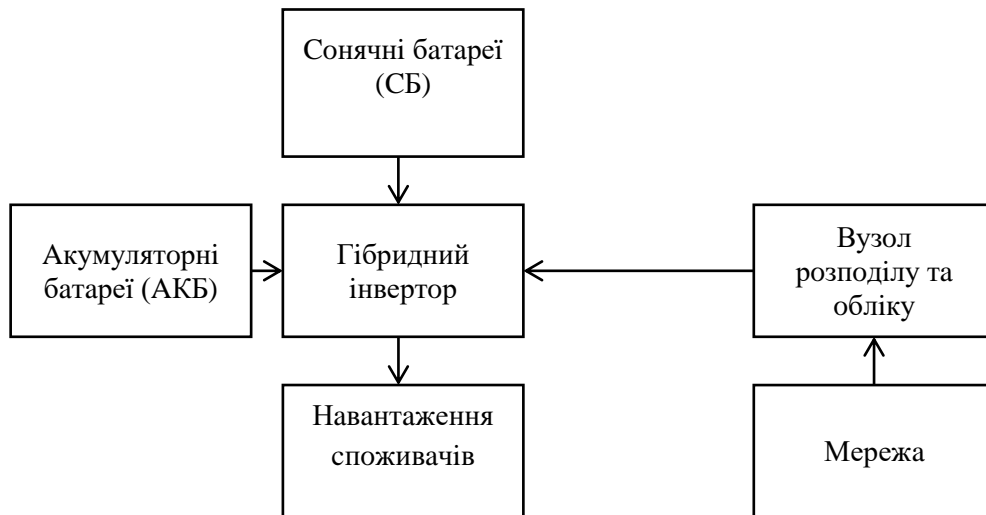


Рисунок 1.5 - Структурна схема гібридної СФЕУ

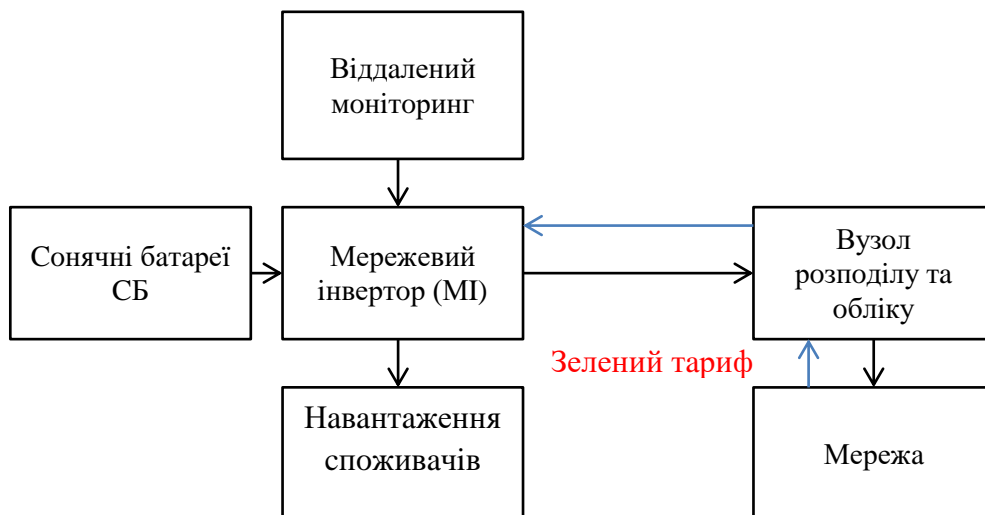


Рисунок 1.6 - Структурна схема мережевий СФЕУ

Для надійного електропостачання споживачів за допомогою СФЕУ необхідний грамотний розрахунок і раціональний вибір обладнання, що відповідає потребам споживачів, а також кліматичних умов експлуатації. До обладнання СФЕУ відносяться: сонячні модулі, інвертори, контролери заряду/розряду, акумулятори, провідникова продукція, комутаційні і захисні апарати і ін.

Пряме перетворення сонячного випромінювання в електроенергію здійснюють фотоелектричні сонячні модулі (ФСМ). У промисловому

виробництві знаходяться кремнієві ФСМ з наступним ККД: монокристалічний - до 24 %; полікристалічний - до 16 %; аморфний – 8-10%. В даний час досліджуються двох і тришарові фотоелементи з ККД 30-40% на дослідних зразках.

Контролери заряду-розряду (КЗР) акумуляторних батарей (АКБ) в СФЕУ контролюють рівні заряду і розряду та комутують сонячну батарею на навантаження. Найбільшого поширення набули такі КЗР: з широтно-імпульсною модуляцією; з алгоритмом пошуку точки максимальної потужності.

Аналітичний огляд пропонованого силового електронного обладнання для СФЕУ дозволив скласти класифікацію інверторів, представлену на рис. 1.7.



Рисунок 1.7 - Класифікація інверторів СФЕУ

Автономний інвертор перетворює постійний струм від фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) і АКБ в змінний струм.

Мережевий інвертор (ведений мережею, залежний) перетворює енергію постійного струму від сонячних батарей (СБ) в енергію змінного струму і віддає її в мережу. Для зменшення втрат на перетворення мережеві інвертори працюють при високих вхідних напругах (до 1000 В). Алгоритмом роботи перетворення управляє мікроконтролер, інтегрований захист вхідних і вихідних кіл по постійному і змінному струму, пристрої моніторингу та контролю. Мережа задає потрібну частоту і величину напруги на виході інвертора, який синхронізується з мережею і переходить на паралельну роботу з нею.

Гібридний інвертор для живлення навантаження може використовувати як основну мережу, так і енергію акумуляторів, що заряджаються від сонячних модулів або вітрогенератора.

У резервних акумуляторних СФЕУ центральним елементом є *двонаправлені інвертори* (оборотні) інвертори. Це інвертори з функцією зарядного пристрою АКБ. Потужність двонаправленого інвертора визначається за сумарною потужністю виділених навантажень, яким необхідно забезпечити електроживлення під час відсутності напруги в основній мережі.

Виробництво рибної продукції високоінтенсивними методами вимагає значних енерговитрат, в зв'язку з чим пропонується ширше використовувати потенціал ВДЕ. Відзначимо області застосування фотоелектричних установок в аквакультури: рибні стани з побутовими електроприймачами; СФЕУ потужністю до 10 кВт для живлення технологічного електрообладнання в господарствах інтенсивного рибництва (насосів, аераційних установок, систем освітлення, обладнання для приготування кормів). Відомі конструктивні рішення аераторів на сонячних батареях для насичення води киснем [14].

Відома плавуча аераційна установка з живленням від ФЕП, що має блок управління, який забезпечує необхідний рівень аерації, здійснюючи комутацію компресора в інтервальному режимі (5 хв роботи, 10 хв простою) [15].

У зарубіжній публікації [16] розглядається варіант побудови СФЕУ малої потужності (13 кВт) для перекачування і аерації води при змінній роботі компресора і осьового насоса (рис.1.8).

Аератор укомплектовується сонячними панелями на 180 Вт і розрахований на роботу в водоймах площею до 1 га [17].

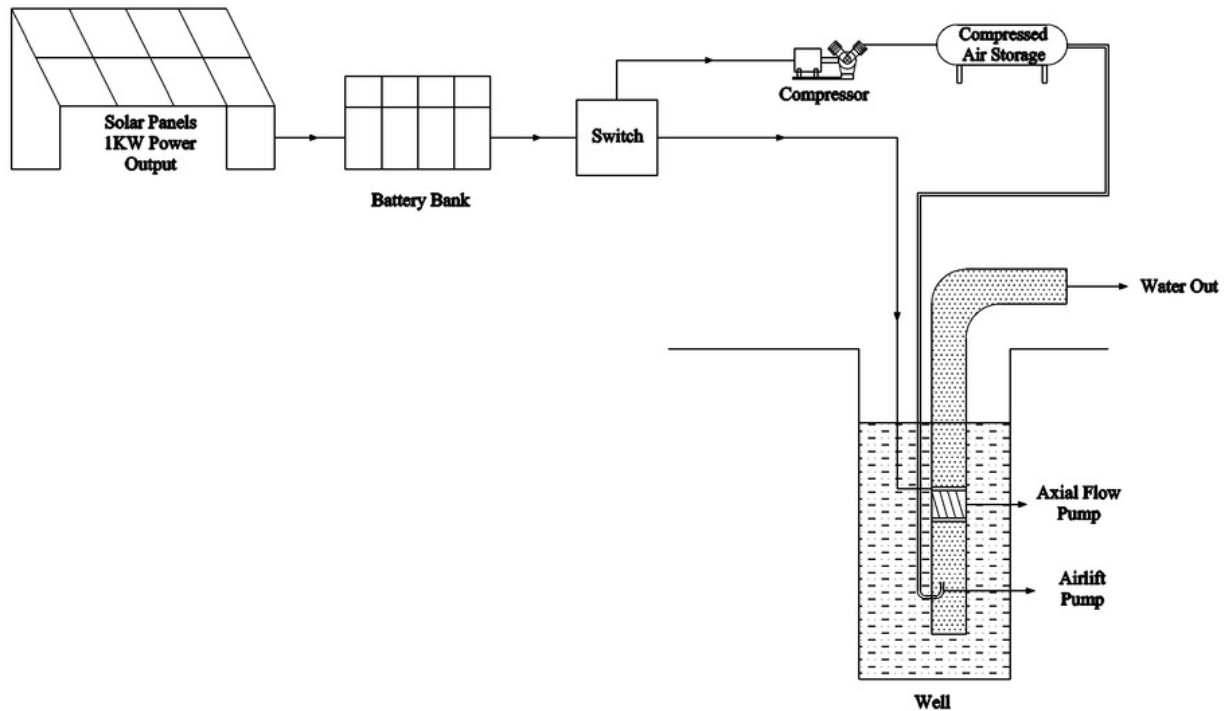
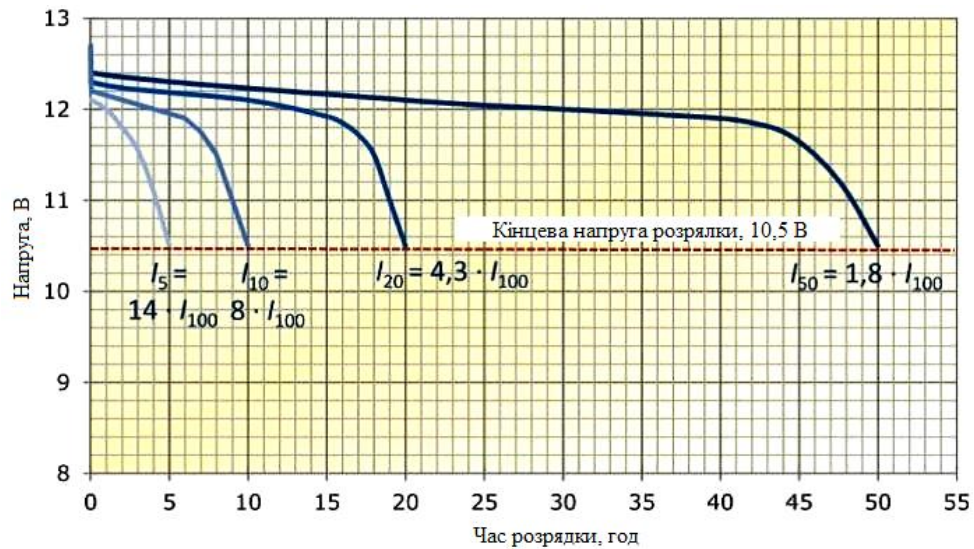


Рисунок 1.8 - Фотоелектрична установка для підйому води і аерації

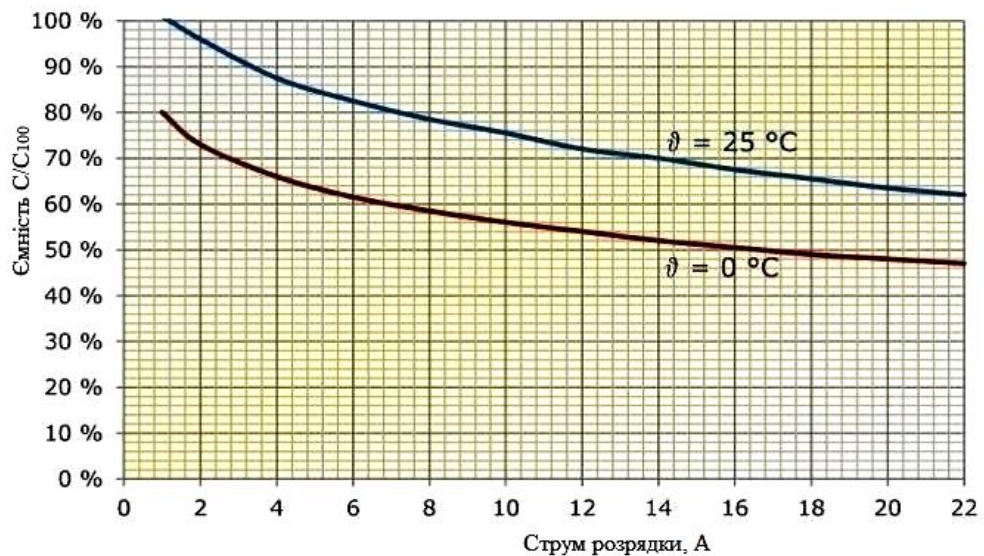
Аналіз характеристик накопичувачів електроенергії для СФЕУ. Як відомо, ємність АКБ залежить від струму розряду (рис. 1.9, а). Для можливості порівняння різних АКБ ємність часто наводиться в порівнянні з часом розряду [18].

На рис. 1.9, б показано зміна напруги в залежності від часу розряду. Видно, що навіть при незначному початковому струмі розряду може спостерігатися досить істотне падіння напруги. Термін служби безпосередньо залежить від кількості циклів «заряд-розряд» і зменшується з глибиною розряду і зростанням температури (табл.1.1).

АКБ повинен бути захищений від перезарядження і глибокого розряду (нижче 30 %). Якщо АКБ повністю розряджений, то утворюється сульфат в кристалічній формі.



а)



б)

Рисунок 1.9 -. Розрядні характеристики АКБ

Серед накопичувачів для ВДЕ окремий інтерес представляють іоністори, здатні швидко заряджатися і розряджатися, віддаючи при цьому високу потужність в навантаження. Недоліками і обмежувальними факторами застосування іоністорів є відносно низька щільність енергії і високий саморозряд. Однак іоністори мають велику вихідну потужність, що дозволяє

використовувати їх разом з АКБ, об'єднуючи їх переваги і компенсуючи недоліки.

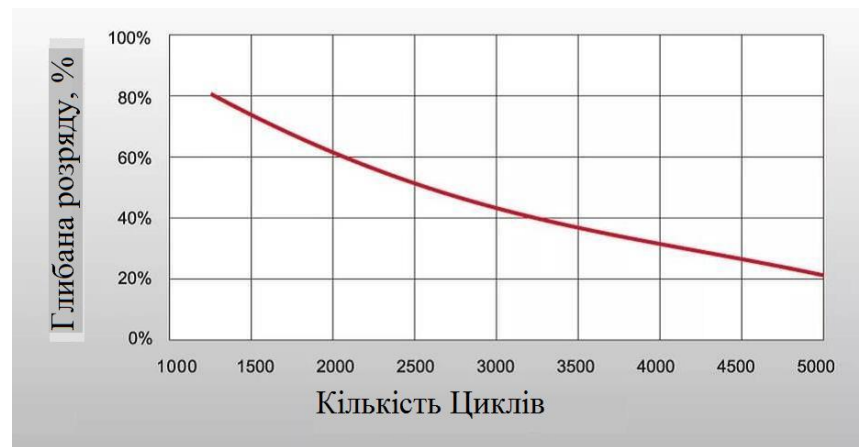


Рисунок 1.10 - Залежність ресурсу АКБ від глибини розряду

Таблиця 1.1

Порівняння типів АКБ по ресурсу

Тип акумулятора	Ресурс, кількість циклів «заряд-розряд»
Стартерні свинцево - кислотні АКБ	до 200
Акумулятори AGM	250 - 400
гелеві АКБ	350
панцирні АКБ	від 900 до 1500

Перспективним є застосування іоністорів у системах на основі СФЕУ для стабілізації напруги і згладжування пікових навантажень. Передбачається, що ефективним буде застосування іоністорів в системах з яскраво вираженим імпульсним навантаженням - в фотоелектричних водопідйомних установках, де запуск двигуна насоса супроводжується короткочасним кидком пускового струму.

Таким чином, перспективним є напрямок використання іоністорів для запуску електроприймачів. На рис. 1.10 представлені основні аспекти їх використання і оцінки їх ефективності в енергоустановках на основі ВДЕ.

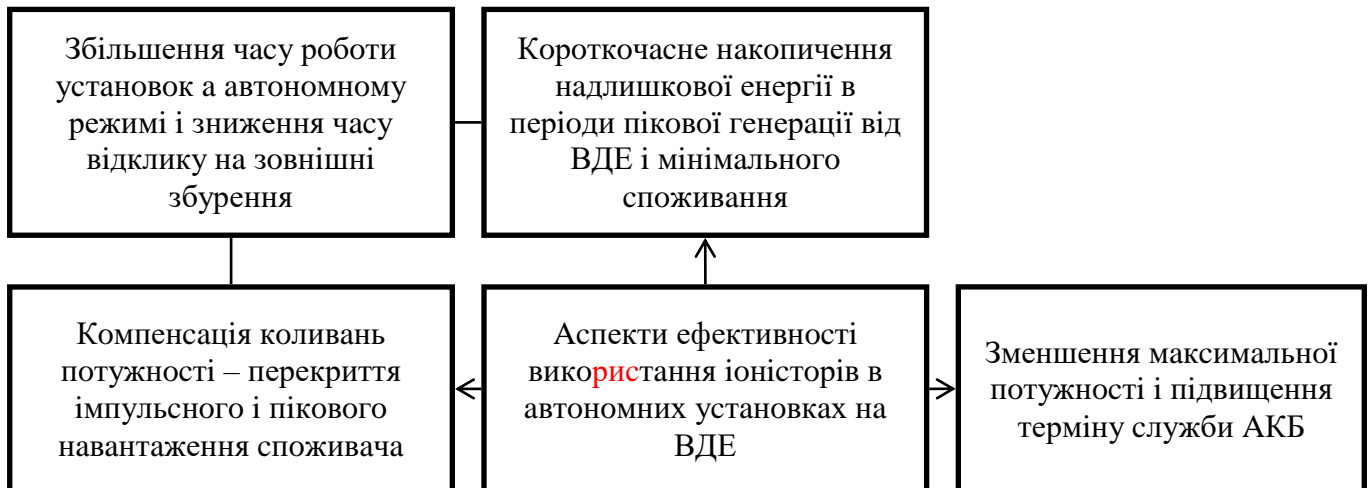


Рисунок 1.10 - Аспекти використання іоністорів в СФЕУ

1.3 Наукові дослідження щодо підвищення ефективності та обґрунтування оптимальних параметрів фотоелектричних установок для сільськогосподарських споживачів

Теоретичні і практичні положення розробки автономних енергоустановок на основі ВДЕ і дослідження їх параметрів і режимів роботи відображені в роботах Д.С. Стребкова, П.П. Безруких, В.В. Бутузова, В.І. Віссаріонова, Попель, Б.В. Лукутина, С.К. Шерязова, С.М. Вороніна, С.В. Оська, В.С.Газалова, Г.В. Нікітенко, М.А. Таранова і ін.

Основними способами підвищення ефективності СФЕУ є: реалізація режиму відбору максимальної потужності від СБ; реалізація безперервно-дискретного автоматичного спостереження СБ за Сонцем. Одночасна реалізація зазначених способів дозволяє підвищити ефективність автономних СФЕУ порядку на 30 %.

В роботі [19] розглядаються питання орієнтації фотоелектричних модулів в просторі і оптимізації їх положення відносно один одного з метою зниження

сумарних втрат, що виникають внаслідок взаємного затінення. За критерій оптимальності приймається максимальна ефективність роботи (вироблення) СФЕУ при мінімальній займаній нею площі.

Дослідження Вороніна С.М. [20] присвячені розробці методів формування автономних систем електропостачання сільськогосподарських об'єктів на основі використання енергії сонячного випромінювання і вітру. Представлені методи обґрунтування і оптимізації параметрів установок на ВДЕ, що забезпечують задану споживачем надійність електропостачання.

Розглядаються питання підвищення ефективності СФЕУ шляхом оптимізації їх параметрів, а також за рахунок застосування концентраторів і систем стеження.

Публікації Шерязова С.К. присвячені розробці методології раціонального поєднання традиційних та поновлюваних енергоресурсів.

Питанням побудови акумуляторної резервної сонячної електростанції потужністю 4 кВт для сільських споживачів присвячена робота [21], в якій пропонується структура установки з гібридним інвертором, підключеним як до мережі, так і до акумуляторів, які, в свою чергу, заряджаються від ФЕП через контролер заряду.

Досить повний виклад фізичних проблем фотоперетворення представлено в книзі [22]. В роботі [23] представлені результати багаторічних вітчизняних і зарубіжних досліджень в області конструювання фотоелектричних водопідійомників. Зокрема, наведені приклади схем з використанням конденсаторів в якості НЕ. Запропоновано пристрій на основі силового конденсатора, що працює в режимі «заряд-розряд». Для живлення вібраційного водяного насоса від сонячних модулів запропоновано оригінальні схемні рішення інвертора з конденсатором накопичувачем на вході. До того ж розглядається спосіб проміжного акумуляування енергії сонячної батареї в конденсаторному НЕ з подальшою імпульсною передачею накопиченої енергії в електронасос.

В роботі [24] наводиться розрахунок установки для підгодівлі риб живими кормами з живленням від фотоелектричних перетворювачів і акумуляторної батареї.

У дисертаційній роботі [25] розглядається автономна сонячна електростанція з енергоємними конденсаторами (ємністю близько 100 Ф і номінальною напругою 12 В) для імпульсного живлення навантаження без використання акумуляторної батареї. Встановлено позитивний вплив конденсаторів на характеристики сонячних модулів, зокрема, на підвищення рівня відданої потужності в навантаження в режимі імпульсного живлення. За критерій оптимальності прийнято мінімум експлуатаційних витрат за робочий період.

Однак в зазначених вище роботах не розглядається варіант спільного використання сучасних електрохімічних суперконденсаторів (іоністорів) спільно з акумуляторними батареями в складі СФЕУ для електропостачання фермерських господарств.

1.4 Висновки до розділу

1. В результаті аналізу встановлено, що є необхідність в ефективному накопиченні електроенергії під час пікової генерації і видачу її споживачеві для покриття графіка навантаження. Специфіка СФЕУ як джерела (залежність від метеоумов, часу доби) накладає на режим електроспоживання ряд обмежень.

2. Термін служби акумуляторів в складі систем автономного електроживлення залежить від кількості циклів «заряд - розряд» під час експлуатації. Акумулятори працюють в циклічному режимі, при цьому в певні періоди можливі глибокий розряд і недозаряд. При переході з режиму заряду в режим розряду знижується напруга на АКБ. Відповідно у фотоелектричних установках «ефект пам'яті» і сульфатація пластин є серйозними проблемами.

4. Огляд комплектних СФЕУ показав, сумарна ємність АКБ часто необгрунтовано завищена і при цьому не пропонуються технічні рішення для

споживачів з різко змінним навантаженням. Тобто автономні установки комплектуються акумуляторними батареями із значним запасом по ємності.

5. Необхідно зауважити, що найбільш поширеними в експлуатації є СФЕУ потужністю 2-5 кВт, що дозволяють окремому споживачу покрити основні потреби в електроенергії.

6. Зважаючи на високу вартість ФЕП і АКБ необхідно запропонувати найбільш раціональні структурно-схемні рішення СФЕУ з обґрунтуванням оптимальних параметрів і режимів роботи. Для запобігання перевантаження автономного СФЕУ в періоди пікового навантаження необхідно оптимізувати режими роботи технологічних електроприймачів (насосів, компресорів) фермерського рибного господарства в порядку їх пріоритетності.

7. Є потреба забезпечення більш м'який режим експлуатації АКБ для збереження енергоємності та ресурсу АКБ. Як підхід до вирішення зазначеної проблематики пропонується використання СФЕУ з гібридним накопичувачем енергії (ГНЕ), що складається з АКБ і електричних суперконденсаторів (іоністорів). Однак відсутня методика інженерного розрахунку оптимальних параметрів і обґрунтування режимів роботи СФЕУ з блоком іоністорів

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Побудова і аналіз графіків електричних навантажень фермерських господарств для вирощування риби

Електроенергія, споживана рибоводами, витрачається на виробничі та побутові потреби. При розрахунку установок автономного та резервного електропостачання необхідно, згідно з технологічним процесом, побудувати і проаналізувати за основними характеристиками добові графіки електричного навантаження (ГЕН) для літнього та зимового періодів. Від правильної оцінки очікуваних навантажень залежать капітальні витрати і експлуатаційні витрати на розроблювану установку.

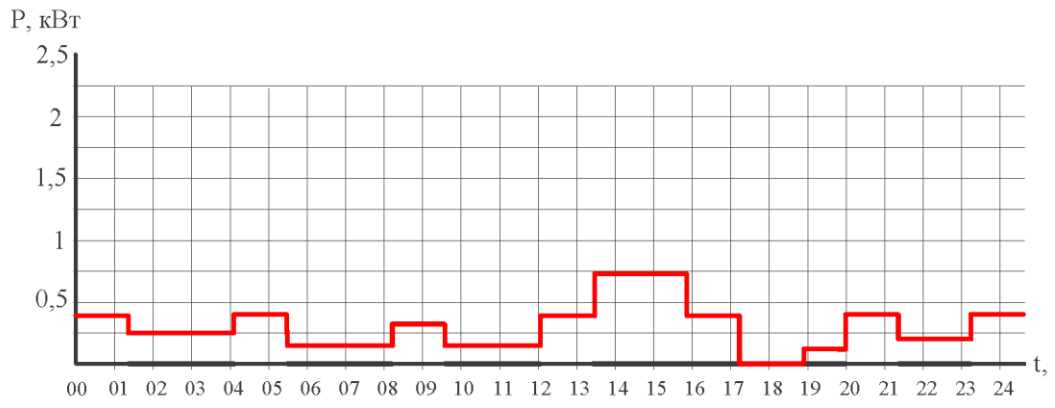
Розглядається три об'єкти електропостачання: а) бригадний будинок нерестово-виростного господарства (НВГ); б) рибна ферма із закритою УЗВ з вирощування кларієвого сома; в) фермерське господарство інтенсивного рибництва (відкриті басейнові ділянки і вирощувальні ставки). Складемо відомості електроприймачів (таблиці 2.1- 2.3) і добові ГЕН зазначених об'єктів (рис. 2.1-2.3). Фактично отримані в ході вимірювань при обстеженні енергогосподарства споживачів.

Збільшення електроспоживання в осінньо-зимовий період пояснюється тим, що для тепловодних риб (кларієвий сом) необхідно підігрівати воду за допомогою електронагрівачів (заглибних, проточних). Згідно з даними з таблиці 2.2, середня споживана потужність міні УЗВ – 15 кВт, середньомісячне електроспоживання -10000 кВт·год; потрібно резервний генератор потужністю 8 кВт.

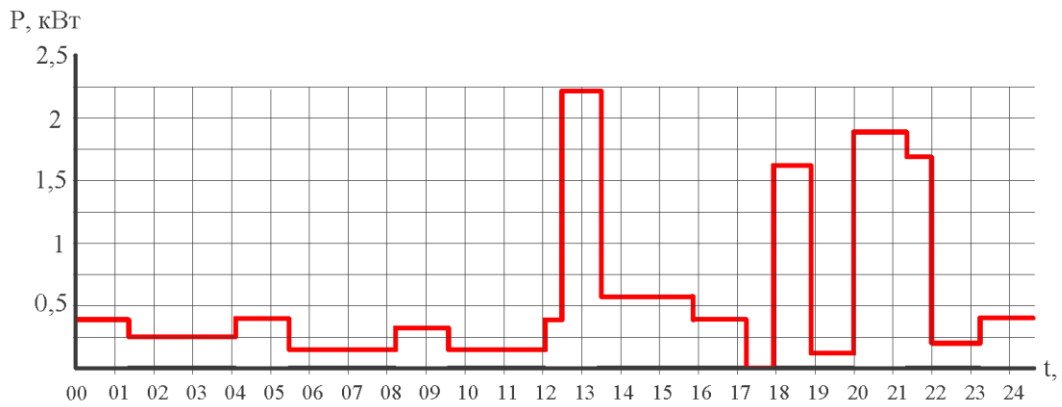
Таблиця 2.1

Відомість електроприймачів бригадного будинку НВГ

№ п/п	Найменування електроприймача	Кількість	Номінальна потужність, кВт	Режим/час роботи, година	Сумарна потужність одночасної роботи, кВт	Добове споживання електроенергії, кВт·год
<i>Побутові навантаження</i>						
1.	Холодильник Атлант KSH- 355	1	0,12	7	0,12	0,86
2.	Освітлення приміщення. Лампи енергозберігаючі	3	0,045	10	0,1	1
3.	Освітлення приміщення. Лампи світлодіодні NLL -А 65- 13-230	3	0,013	12	0,04	0,46
4.	Кондиціонер віконний Samsung	1	1,5	червень вересень / 4	1,5	6
<i>Технологічні навантаження</i>						
5.	Освітлення території. Прожектор світлодіодний	2	0,05	11	0,1	1,1
6.	Зарядний пристрій АКБ для човна з електродвигуном Min – CottaEndura 43	1	0,25	4	0,25	1
7.	Насос свердловинний	1	0,3	днем / 1,5	0,3	0,45
Разом						
Максимум для літнього періоду					2,41	10,87
Максимум для зимового періоду					0,91	4,87

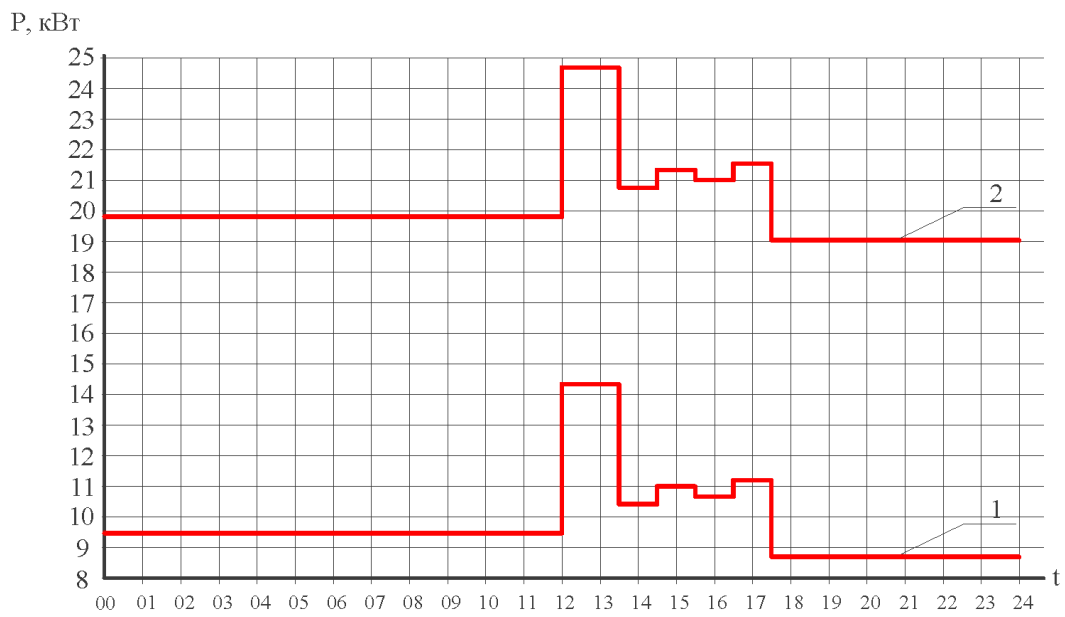


а) для зимового періоду



б) для літнього періоду

Рисунок 2.1. Добові графіки електричного навантаження бригадного будинку



1 в весняно-літній період; 2 – в осінньо-зимовий період

Рисунок 2.2. Добовий графік електричного навантаження УЗВ на 150м

Таблиця 2.2

Відомість електроприймачів рибної ферми з УЗВ по вирощуванню
кларієвого сома (*Clarias gariepinus*)

№ п/п	Найменування електроприймача	Кількість	Номинальна потужність, кВт	Режим/час роботи, година	Сумарна потужність одночасної роботи, кВт	Добове споживання електроенергії, кВт·год
<i>Рибоводний корпус (опалювальний) з УЗВ об'ємом 150 м³</i>						
1.	Помпи занурені	9	0,7	Не одночасно	2,8	67,2
2.	Дренажний насос	1	0,7	24	0,7	2,8
3.	Компресори аераційної установки	2	0,3	24	0,6	14,4
4.	Тени	2	4	Листопад-квітень / 24	8	192
5.	Фільтр барабанний	1	0,8	24	0,8	19,2
6.	Освітлення інкубаційного апарату	2	0,4	12	0,8	9,6
7.	Освітлення приміщення (200 м ²)	20	0,1	24	1,5-2	48
8.	Циркуляційний насос	1	1,6	24	1,6	38,4
9.	Фільтр піщаний	2	0,7	24	1,4	33,6
10.	Насос свердловинний	1	5,5	Днем / 1,5	5,5	8,25
11.	УФ-опромінювач	1	0,1	24	0,1	2,4
12.	Інкубаційні апарати	8	0,3	Зимовий час / 24	2,4	57,6
			За основного обладнання		23,9	493,45
<i>Ділянка кормо-приготування</i>						
13.	Дробарка	1	1,8	Днем / 1	1,8	1,8
14.	М'ясорубка МІМ -600	1	2,2	Днем / 1	2,2	2,2
15.	Змішувач	1	2	Днем / 1	2	2
16.	Гранулятор комбікорми	1	2,5	Днем / 1	2,5	2,5
По ділянці кормо-приготування					8,5	8,5
Разом					32,4	501,95

Таблиця 2.3

Відомість електроприймачів фермерського господарства інтенсивного
рибництва

№ п/п	Найменування електроприймача	Кількість	Номинальна потужність, кВт	Режим/час роботи, година	Сумарна потужність одночасної роботи, кВт	Добове споживання електроенергії, кВт-год
1.	Насоси для подачі і циркуляції води у вирощувальних ставках і рибоводних басейнах	до 10	0,6	Неодночасно	1,2 ... 4,8	30 ... 70
2.	Компресори (аератори) для подачі кисню у виростні ставки і рибоводні басейни	4	0,5	Неодночасно / 12	1,5	18
3.	Освітлювальні прилади	10	0,1	Нічний час / 12	1	12
4.	Побутові електроприймачі й інструмент		5		1,5	30
5.	Кормоприготування	-	2,5	Денний час	2,5	7,5
Разом мінімум					4,5	72
Разом середнє					6	95
Разом максимум					11,3	137,5

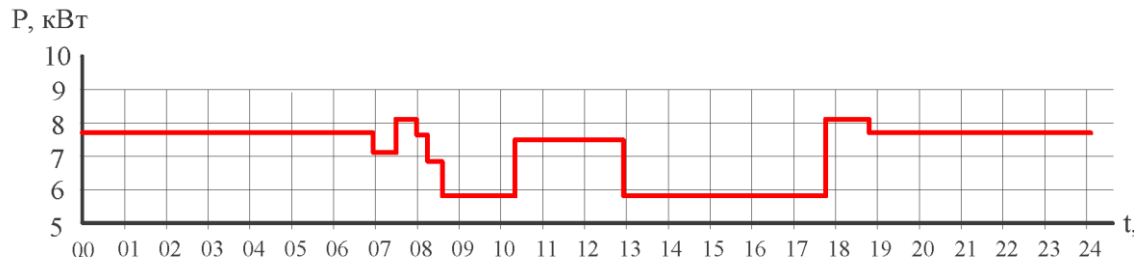


Рисунок 2.3. Добовий графік електричного навантаження фермерського господарства інтенсивного рибництва (березень-листопад)

Таблиця 2.4

Характеристики графіків електричного навантаження рибоводів

Характеристики графіків електричного навантаження	Рибні господарства				
	Бригадний будинок НВГ		Фермерське господарство з УЗВ		Фермерське господарство інтенсивного рибництва
	Літній період	Зимовий період	Весняно-літній період	Весняно-зимовий період	Період березень-листопад
1. Коефіцієнт нерівномірності, a	0,1	0,25	0,63	0,76	0,71
2. Коефіцієнт заповнення, b	0,18	0,21	0,69	0,86	0,81
3. Максимальний діапазон регулювання навантаження, DP_{\max} , кВт	2,4	1	5,5	5,5	3
4. Напівпіковий діапазон регулювання навантаження, $DP_{\text{пп}}$, кВт	0,75	1,55	3	3	1,6
5. Піковий діапазон регулювання навантаження, $DP_{\text{п}}$, кВт	1	0,75	3,5	3,5	1,7
6. Час використання максимального навантаження, T_{\max} , год	3504		5475		4574
7. Рівень максимальної резервованої потужності для відповідальних електроприймачів, кВт	0,5		8		6,3

На побудованих ГЕН (рис. 2.1 – 2.3) відслідковуються періоди нерівномірного і підвищеного споживання електроенергії. Таким чином, добові графіки навантаження фермерських господарств інтенсивного рибництва мають наступні характеристики:

- коефіцієнт заповнення знаходиться в межах 0,69 ... 0,86;
- коефіцієнт нерівномірності – 0,63 ... 0,76;
- максимальний діапазон регулювання навантаження – 3 ... 5,5 кВт
- – час використання максимального навантаження – 4574 год і 5475 год – для УЗВ.

Зазначені коефіцієнти заповнення і коефіцієнти нерівномірності свідчать про відносну рівномірності добових ГЕН ферм інтенсивного рибництва. Отримані дані використовуються далі в роботі при розрахунку параметрів автономної СФЕУ.

2.2. Розробка структурно-схемних рішень фотоелектричних установок

Акумуляторні СФЕУ резервного електропостачання. З метою забезпечення автономного та резервного електропостачання споживачів використовуються акумуляторні СФЕУ, класифікація яких представлена на рисунку 2.4.

В ході аналітичного огляду схемних рішень акумуляторних СФЕУ резервного типу, з'єднаних з мережею, виявлено три основні варіанти їх побудови.

1. *Акумуляторна СФЕУ резервного типу з мережевим інвертором в колі нерезервованих навантажень* (рис. 2.5). Така система дозволяє підтримувати роботу електроприймачів при перервах в подачі електроенергії від централізованої мережі. Резервоване навантаження (РН) в разі відключення

централізованої мережі електропостачання (С) підтримується тільки за допомогою акумуляторних батарей (АКБ) через оборотний інвертор (ОІ).

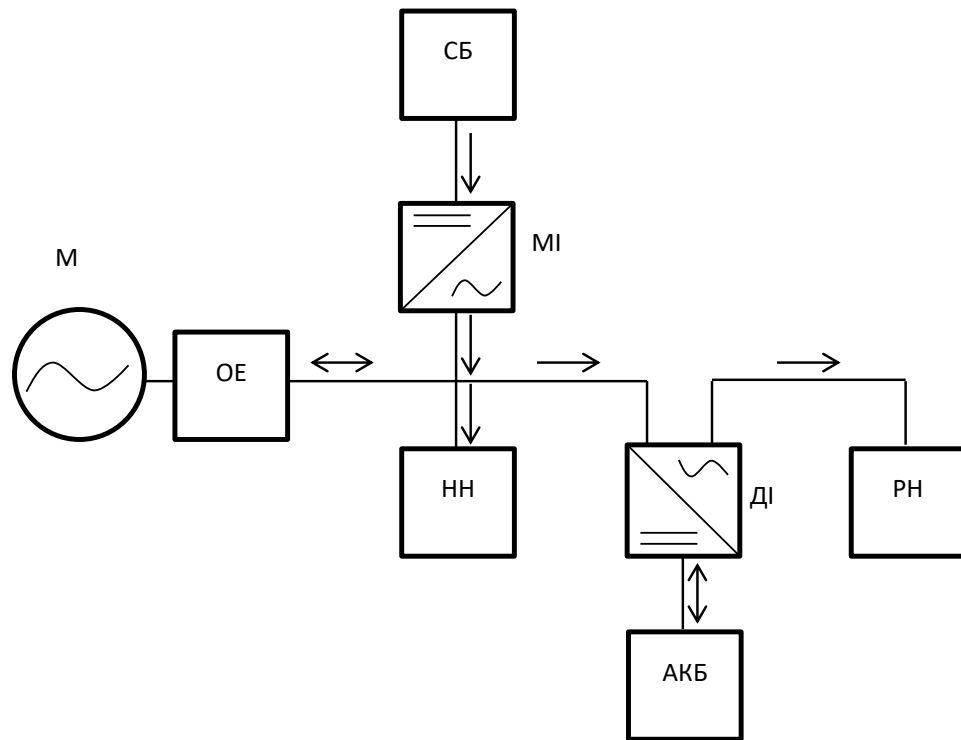


Рисунок 2.4. Класифікація акумуляторних СФЕУ

Дана схема дозволяє знизити споживання електроенергії від зовнішньої електромережі та додати потужність від сонячних батарей (СБ) до мережі споживача через мережевий інвертор (СІ). Надлишки виробленої СБ електроенергії (за умови, що АКБ заряджені повністю) віддаються в централізовану мережу або в локальну мікромережу. Якщо основне споживання електроенергії відбувається в денний час, а відключення мережі трапляються рідко і ненадовго, то така схема є найбільш ефективною як з технічної, так і економічної сторін.

2. *Акумуляторна СФЕУ резервного типу з контролером заряду* (рис. 2.6, а). У разі відключення мережі РН підтримується за допомогою АКБ через ОІ; СБ в денний час через контролер заряду-разряду (КЗР) заряджають АКБ.

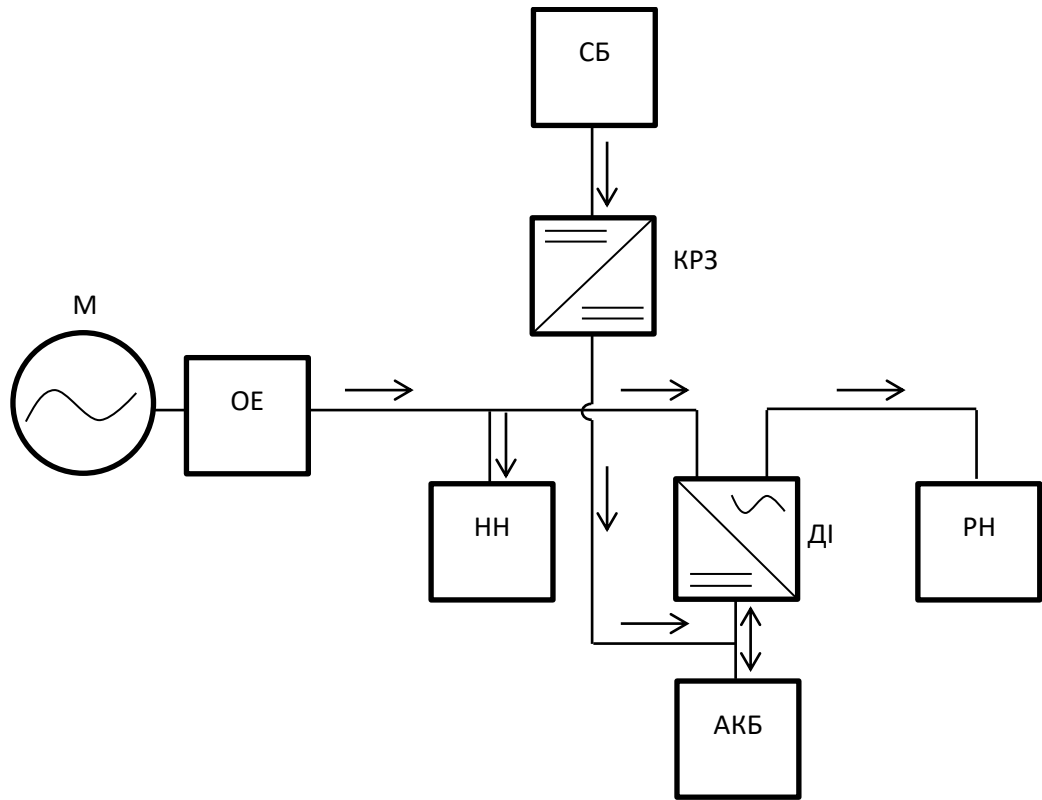
3. *Акумуляторна СФЕУ резервного типу з мережевим інвертором в колі резервованого навантаження підвищеної потужності* (рис. 2.6, б). При відключенні мережі РН отримує основне живлення від АКБ через ОІ та додаткову потужність від СБ через СІ (в денний час).



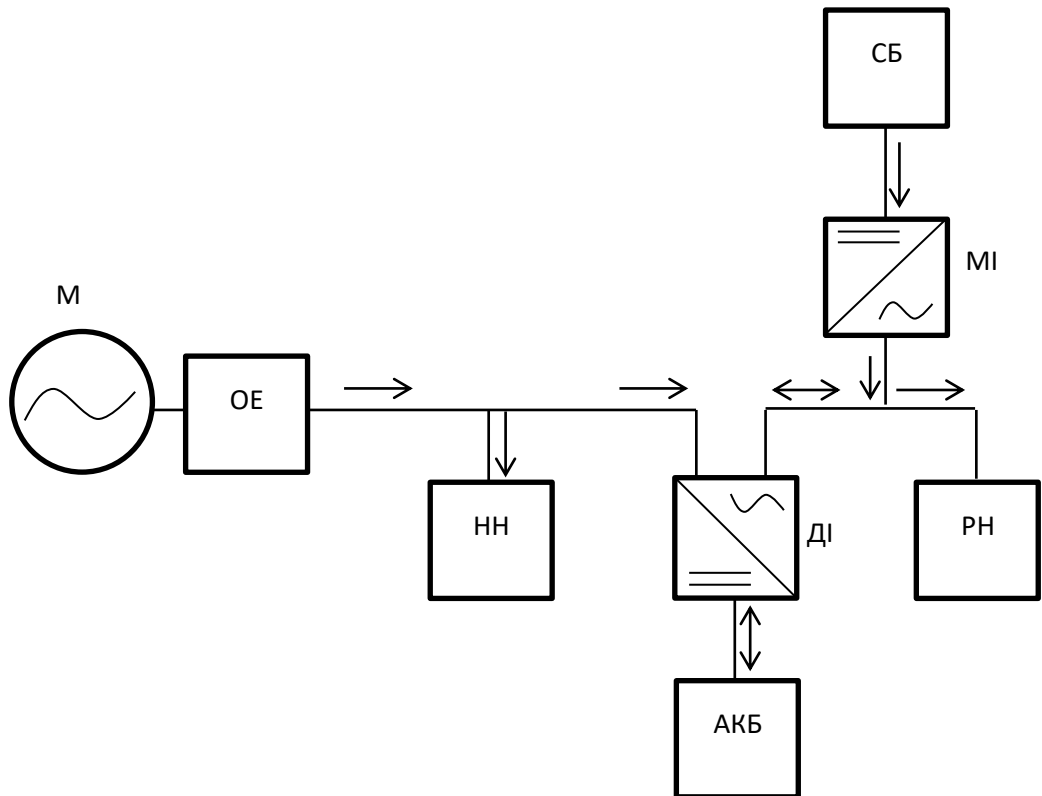
М – мережа; ОЕ – вузол обліку електроенергії; СБ – сонячна батарея; МІ- мережевий інвертор; ДІ- оборотний (двонаправлений) інвертор; АКБ – акумуляторні батареї; КЗР – контролер заряду-розряду АКБ; НН і РН – нерезероване і резервоване навантаження

Рисунок 2.5. Структурна схема акумуляторної СФЕУ резервного типу з мережевим інвертором в колі нерезерованих навантажень

У наведених системах заряд АКБ здійснюється переважно від СБ (при достатньому рівні інсоляції). У періоди слабкої інсоляції або в нічний час заряд АКБ здійснюється безпосередньо від мережі, яка виступає в ролі основного джерела електроенергії.



а) акумуляторна СФЕУ резервного типу з контролером заряду



б) акумуляторна СФЕУ резервного типу з мережевим інвертором в колі резервованого навантаження підвищеної потужності

Рисунок 2.6. Структурні схеми акумуляторних СФЕУ резервного типу

СФЕУ можуть ефективно доповнювати традиційну генерацію, формуючи, наприклад, дизель-сонячні гібридні установки. Один з варіантів структурно функціональної схеми автономної дизель-сонячної електростанції представлений на рис. 2.7.

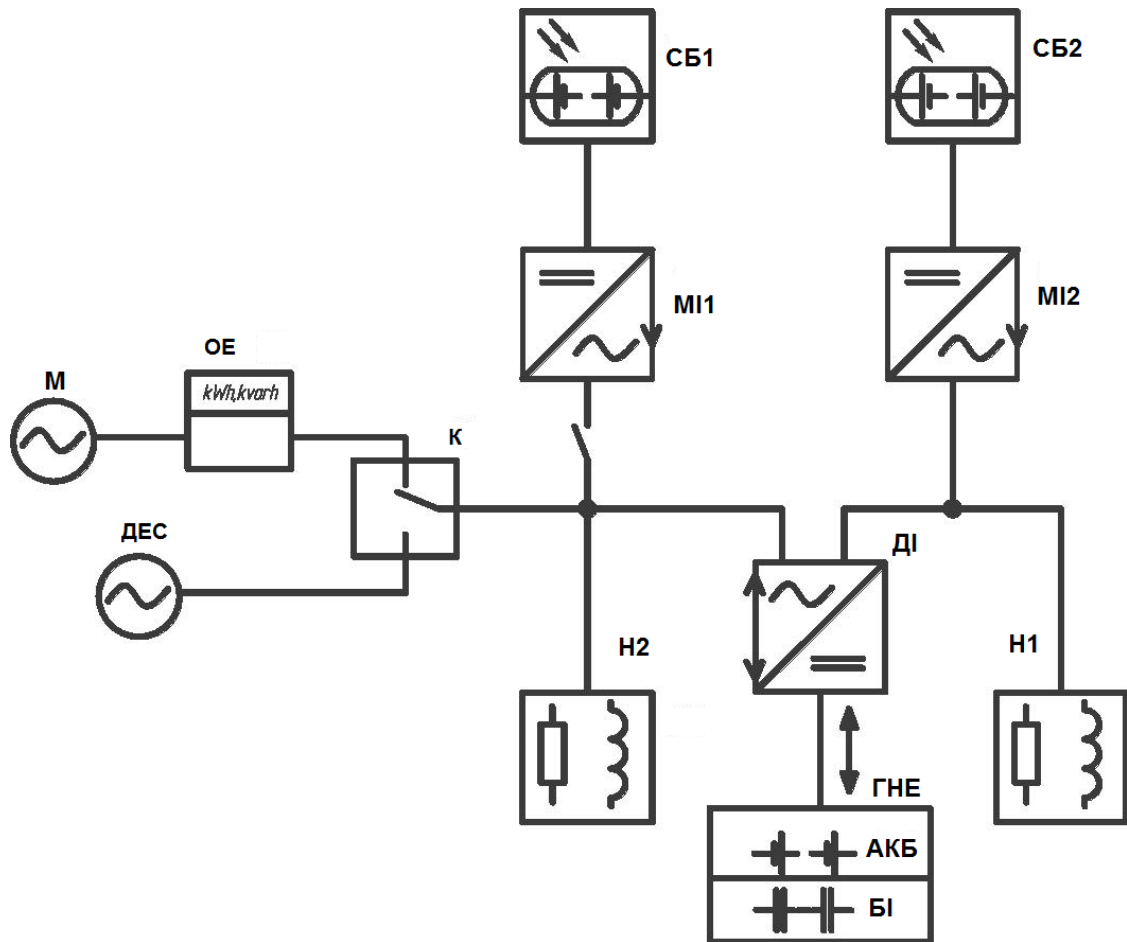
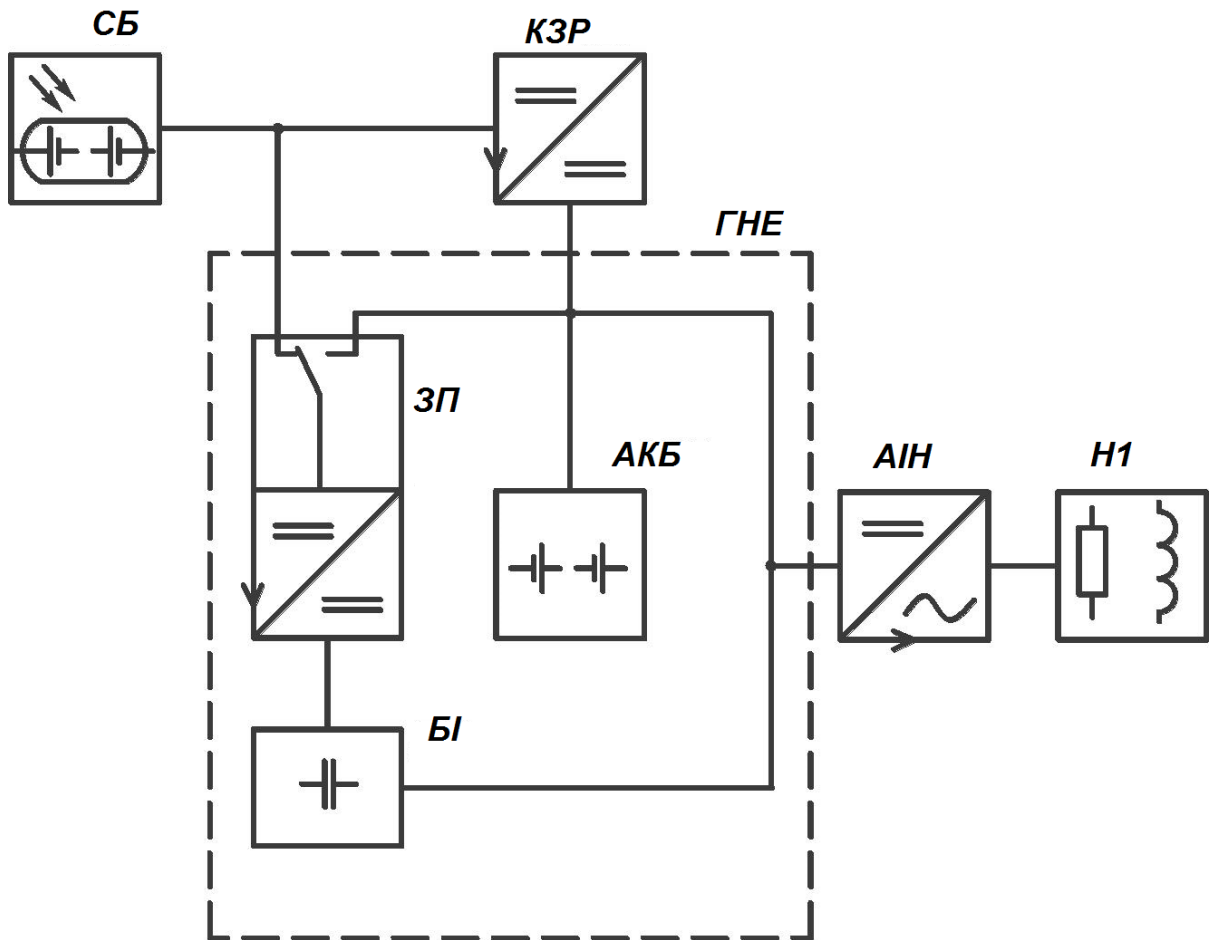


Рисунок 2.7. Структурно-функціональна схема автономної гібридної дизель-сонячної електростанції

При відключенні генератора (ДЕС) електроприймачі першої категорії (Н1) отримують основне живлення від АКБ через оборотний інвертор (ОІ) і додаткову потужність від сонячних батарей (СБ) в денний час через мережеві інвертори (СІ). Наявність АКБ дозволяє підвищити надійність електропостачання, а також знизити витрату палива.

Автономна СФЕУ з гібридним накопичувачем енергії. Для вирішення завдання автономного електропостачання фермерських господарств пропонується структурно-схемне рішення СФЕУ з використанням іоністорів (рис. 2.8).



СБ – сонячна батарея; АКБ – акумуляторні батареї; КЗР – контролер заряду-розряду АКБ; БІ – батарея іоністорів (суперконденсаторів); ЗП – зарядний пристрій БІ; АІН – автономний інвертор напруги; Н1 навантаження змінного струму

Рисунок 2.8. Структурна схема автономної СФЕУ з гібридним накопичувачем електроенергії (ГНЕ)

У даному рішенні пропонується спільне використання *батареї іоністорів (БІ)* і АКБ, які формують собою *гібридний накопичувач електроенергії (ГНЕ)*.

У періоди сонячної активності електроенергія, що виробляється сонячною батареєю, надходить на АКБ через контролер заряду-розряду (КЗР). У разі повної зарядки акумуляторів надлишкова енергія надходить в навантаження безпосередньо або через автономний інвертор напруги. До СБ через зарядний пристрій (ЗП) підключена батарея іоністорів. В ЗП передбачена функція комутації і захисту вхідного кола і система балансування напруги на комірках БІ.

Введення іоністорів до складу СФЕУ дозволить отримати ефект, що виражається в наступному:

- часткове покриття основного навантаження;
- покриття пікових навантажень;
- стабілізація напруги на ділянці постійного струму;
- зниження часу відгуку системи на навантаження імпульсного характеру, на короткі піки генерації або споживання;
- збільшення ресурсу і продовження терміну служби АКБ.

Живлення електроприймачів від установок з ГНЕ дозволить знизити пікові навантаження на акумулятори або на резервний генератор, ніж підвищується ефективність роботи установки в перехідних режимах роботи.

2.3. Характеристики та параметри іоністорів в складі гібридного накопичувача енергії фотоелектричної установки

При розрахунку параметрів сонячних електростанцій важливим є обґрунтування застосування накопичувачів електроенергії (НЕЕ) [26]. Слід враховувати енергоємність, разрядну потужність, тривалість розряду і ККД НЕЕ [27].

Особливістю СФЕУ є нестабільність видаваних ними рівнів потужності. Звідси виникає необхідність в акумуляторах, які здатні ефективно накопичувати електроенергію від ФЕП і покривати поточний рівень навантаження споживача.

Для СФЕУ пропонуються спеціальні свинцево-кислотні акумулятори з гелевим електролітом і пластинчастими або тубулярними електродами, які мають підвищені експлуатаційні показники.

Серед НЕЕ, що пропонуються на сьогоднішній день для використання в галузі відновлюваної енергетики, особливий інтерес представляють суперконденсатори (іоністори), що забезпечують віддачу високої потужності за короткий час і згладжують нерівномірності генерації від ФЕП. Іоністор – надвисокоємнісний конденсатор з органічним або неорганічним електролітом, з подвійним електричним шаром («обкладками») на межі розділу електродів і електроліту (міжнародне позначення: EDLC – Electric doublelayer capacitor).

Відмінні риси іоністорів: здатність заряджатися від декількох секунд до декількох хвилин (завдяки невеликій постійній часу); здатність розряджатися, віддаючи високі потужності; тривалий термін служби; широкий діапазон робочих температур ($40^{\circ}\text{C} \dots +70^{\circ}\text{C}$); ККД 95 – 97 %; досить низький внутрішній опір (0,35..100 мОм).

До основних експлуатаційних і енергетичних показників іоністорів відносяться: постійна часу розряду RC; питома енергія, кДж кг; питома потужність кВт/кг.

Двошаровий суперконденсатор складається з двох пористих електропровідних електродів, в просторі між якими знаходиться електроліт (рис. 2.9) [28].

Енергія у вигляді статичного електричного заряду накопичується між двома обкладками на межах розділу «анод-електроліт» і «катод-електроліт».

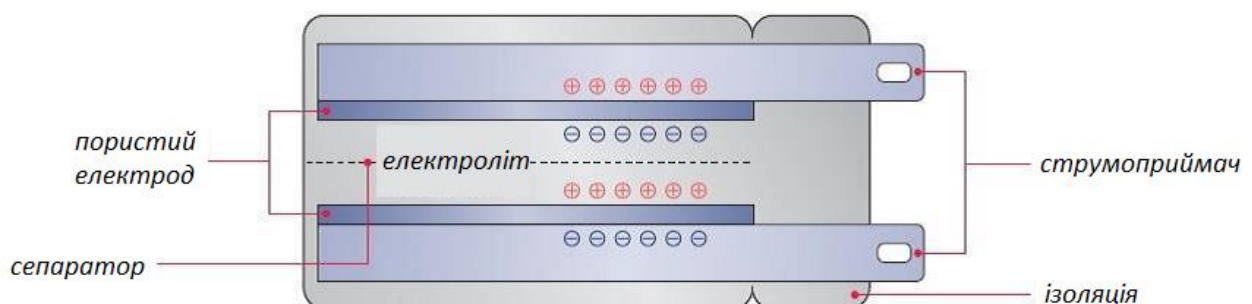
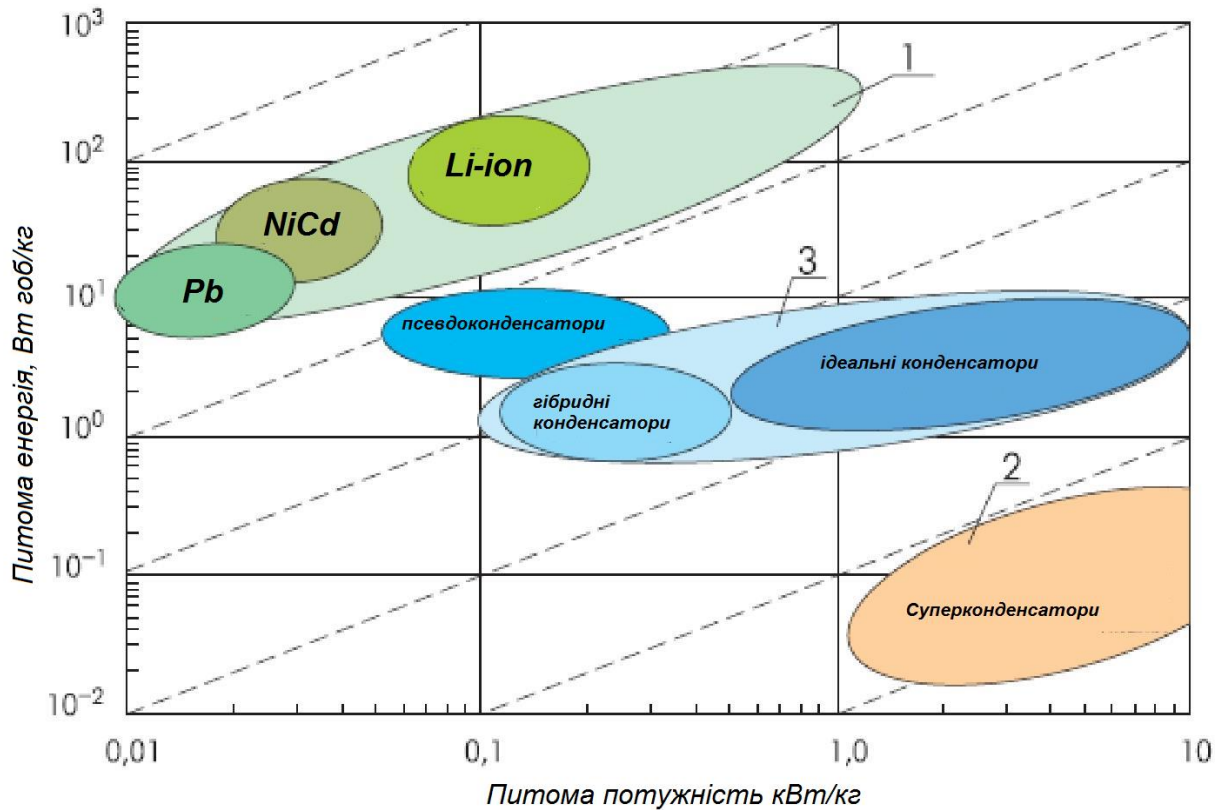


Рисунок 2.9. Конструкція суперконденсатора з подвійним електричним шаром

Напруга іоністорів становить 1,8 ... 3 В, номінальна ємність – до 5000 Ф, вага – до 1 кг; питома потужність – до 20 кВт/кг. За порівняльними характеристиками іоністори займають проміжне положення між окисно-електролітичними конденсаторами і АКБ (рис. 2.10).



1 – область АКБ;

2 – область суперконденсаторів;

3 – область конденсаторів з діелектриками

Рисунок 2.10. Порівняльні характеристики акумуляторів

Від акумуляторів іоністори відрізняються істотно меншою енергоємністю і підвищеною питомою потужністю. Недоліком є підвищений струм саморозряду.

Виразимо максимальний струм іоністора I_{max} , А:

$$I_{max} = \frac{0,5U_H}{\frac{\Delta t}{C} + R}, \quad (2.1)$$

де Δt – час розряду, с;

C – ємність, Ф;

R – опір, Ом; U_H – номінальна напруга, В.

Максимально запасасться енергія в іоністорів W_{max} , Вт · год:

$$W_{max} = \frac{0,5CU_H^2}{3600}. \quad (2.2)$$

Заряд іоністорів. При включенні джерела ЕРС при $i_{зар.} = const$ через іоністори починає протікати зарядний струм:

$$I_{зар.іон}(t) = \frac{U_{зар.}}{R} e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (2.3)$$

де $U_{зар.}$ – напруга при заряді.

Проінтегрувавши за часом, отримаємо залежність напруги на i -му іоністорів батареї за часом:

$$U(t) = U_H \frac{C}{C_i} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right). \quad (2.4)$$

Час заряду іоністори:

$$t_{зар.} = \frac{Q}{i_0} = RC. \quad (2.5)$$

Заряд Q зростає з постійною швидкістю, пропорційно струму $I_{зар.іон}(t)$. Так, постійна часу $RC = 24$ (при струмі заряду 25 А і ємності іоністора 24 Ф).

При розрядці іоністора на навантаження спочатку напруга падає на деяку величину, після чого розрядна крива набуває вигляду експоненти. На рис. 2.11 наведемо зарядно-розрядну характеристику і характеристику саме розрядки іоністорів К 58-15 (10 Ф, 5,5 В).

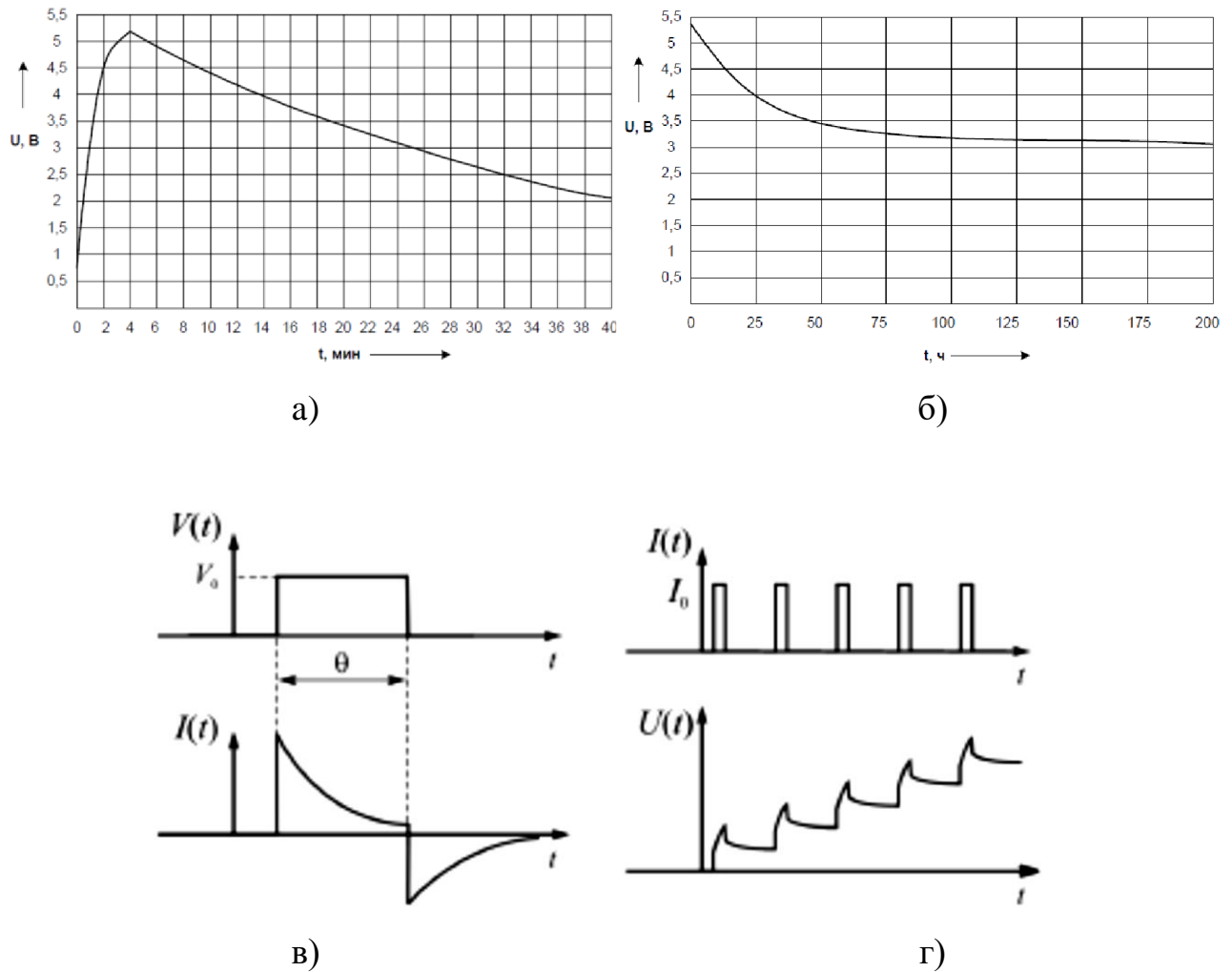


Рисунок 2.11. Характеристики іоністора К 58-15: а) зарядно-розрядна характеристика; б) характеристика саморозряду; в, г) тимчасові залежності струмів і напруг

Встановлено, що після зниження напруги на іоністорах до 70 % від номінального через саморозряду, термін зберігання заряду різко збільшується.

Для іоністорів питома енергія пов'язана з питомою потужністю наступним рівнянням [29]:

$$e_{\text{іон}} = \frac{CU_H^2}{2M_{\text{іон}}} \left[a(1) + \frac{3}{4} - \frac{1}{4}a(4) \right] + \frac{p_{\text{іон}}U_H^2}{2M_{\text{іон}}} \ln \left[\frac{2(1-a(1))}{1-a(4)} \right] + \frac{aU_H^3}{3M_{\text{іон}}} \left[\frac{7}{8} + \left(a(1)^{3/2} \right) - \frac{1}{8}a(4)^{3/2} \right] \quad (2.6)$$

де $e_{\text{іон}}$ – питома енергія іоністора;
 $p_{\text{іон}}$ – питома потужність іоністора,
 $M_{\text{іон}}$ – маса іоністора;
 $a(1) = \sqrt{1 - p_{\text{іон}}}$;
 $a(4) = \sqrt{1 - 4p_{\text{іон}}}$.

Ефективним представляється застосування іоністорів в системах з різко змінними і піковими навантаженнями, наприклад, в автономних фотоелектричних водопідйомних установках, застосовуваних на віддалених фермерських господарствах, де запуск двигуна насоса супроводжується швидкочасовим кидком пускового струму.

При використанні акумуляторних батарей спільно з іоністорами продовжується термін служби АКБ з огляду на те, що конденсатори беруть на себе частину навантаження, обмежуючи максимальний струм, і до того ж підтримують рівень напруги на АКБ.

2.4 Висновки до розділу

1. Системи автономного електропостачання на основі сонячної фотоелектричної установки для рибного господарства номінальною потужністю навантаження до 5-7 кВт повинна забезпечувати середньодобове електропостачання до 15 кВт·год.

2. Запропоновано структурно-схемні рішення сонячних фотоелектричних установок, на основі гібридного накопичувача енергії з використанням іоністорів, для забезпечення резервного і надійного електропостачання рибного господарства.

3. Проведено аналіз характеристик та параметрів іоністорів в складі гібридного накопичувача енергії фотоелектричної установки.

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Математичний опис фотоелектричної установки з гібридним накопичувачем

Найбільш широко поширені кремнієві монокристалічні ФСМ з ККД до 25 % (в лабораторних умовах) і полікристалічні ФСМ з ККД 14-15 %. Максимальний досягнутий в лабораторії ККД сонячних елементів (СЕ) на основі каскадних гетероструктур становить 42 %, для СЕ з кремнію 24 %.

Дія фотоелемента ґрунтується на внутрішньому фотоелекті, а точніше процесі поділу, генерованих квантами світла, електронно-діркових пар на р-п переході.

СЕ представлений у вигляді функціонального блоку. Він має зовнішні, внутрішні і вихідні параметри (рис. 3.1): освітленість (G), температура (T), напруга холостого ходу (U_{xx}), струм короткого замикання, вихідна напруга (U), струм навантаження (I) і вихідна потужність (P).

На рис 3.2 представлена принципова схема зняття ВАХ сонячного елемента (ФЕП).

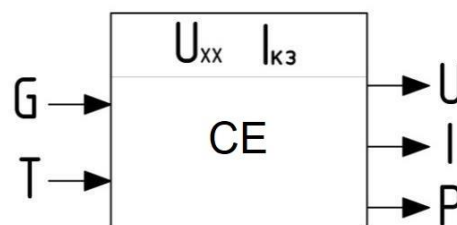


Рисунок 3.1 - Функціональний блок сонячного елемента

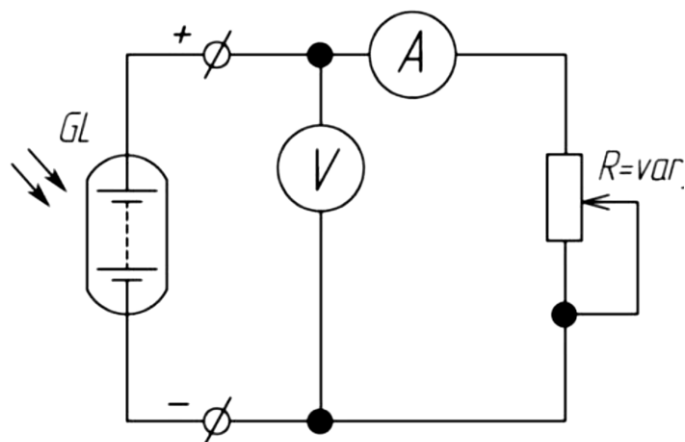


Рисунок 3.2 - Принципова електрична схема для вимірювання ВАХ

На рис. 3.3 зображено типові ВАХ і ВВХ СЕ.

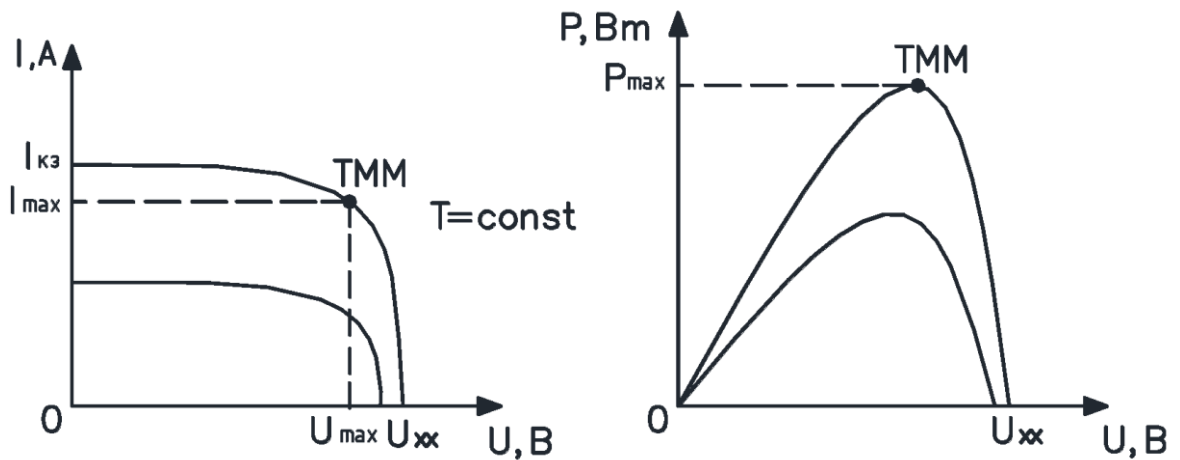


Рисунок 3.3 -ВАХ і ВВХ СЕ

Математична модель сонячного (фотоелектричного) елемента будується на основі схеми заміщення, зображеної на рис 3.4. Вона складається із генератора фотоструму I_ϕ , шунтуючого ($R_{ш}$) і послідовного (R_n) опору, діоду [30].

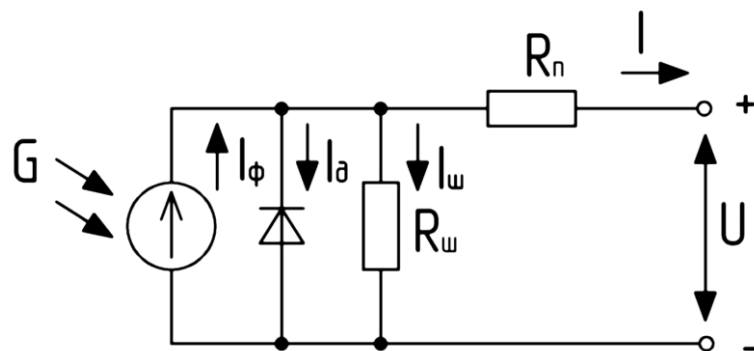


Рисунок 3.4 - Схема заміщення сонячного (фотоелектричного) елемента

Із еквівалентної схеми заміщення СЕ впливає наступний вираз:

$$I = I_\phi - I_d - I_{ш}. \quad (2.7)$$

де $I = I_n$ - струм навантаження;

I_ϕ - фотострум;

I_d - струм, який протікає через діод;

$I_{ш}$ - струм, який протікає через шунтуючий опір $R_{ш}$.

Підставивши замість деяких струмів вирази, які включають фізичні параметри СЕ, отримаємо вираз, що відображає хід ВАХ:

$$I_n = I_\phi - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(U + IR_n)}{AkT}\right) - 1 \right] - \frac{U + IR_n}{R_{ш}}, \quad (2.8)$$

де I_0 - зворотний струм насичення;

U - вихідна напруга;

$R_{ш}$ - шунтуючий опір ФЕП;

R_n - послідовний опір ФЕП;

q - заряд електрона;

k - постійна Больцмана;

A - параметр ВАХ ФЕП, що називається доданими фактором;

T - абсолютна температура СЕ, К.

Зміна величини фотоструму пропорційна зміні освітленості елемента E :

$$I_\phi = \frac{E}{\alpha}, \quad (2.9)$$

де α - коефіцієнт пропорційності, що залежить від типу елемента.

В силу того, що ККД СЕ залежить від форми його ВАХ (рис. 3.3), параметри СЕ, що входять в рівняння ВАХ (2.8), визначають ефективність СЕ. Вираз (2.8) являє собою п'яти-параметричну модель ВАХ ФЕП, що представляє особливий інтерес лише для розробників сонячних елементів і модулів.

Ефективність фотоелектричного перетворення визначається світловою вольт-амперною характеристикою СЕ, форма якої залежить від ряду параметрів: послідовного і паралельного (шунтуючого) опорів СЕ, густини струму насичення діода, діодного коефіцієнта і деяких інших величин.

Зміна напруги холостого ходу в залежності від зміни рівня освітленості описується емпіричним виразом:

$$U_{xx} = \frac{1}{2} \left(L_g - \frac{3kT}{2} \right) \cdot \left(2 - e^{-\frac{E_1}{k_0 E_0}} \right), \quad (2.10)$$

де L_g - ширина забороненої зони напівпровідника;

k - постійна Больцмана;

T - температура ФЕП;

E_0, E_1 - стандартна і задана потужність світлового потоку;

k_0 - поправочний коефіцієнт ФЕП (зазвичай приймається $k_0 = 6$).

На основі формули Лагранжа інтерполяція ВАХ (рис. 3.3) дає аналітичний вираз:

$$U = A_1 I_H^2 - (1 + A_1) I_H + 1, \quad (2.11)$$

$$\text{де } A_1 = \frac{U_{TMM}}{I_{TMM} (U_{TMM} - 1)} + \frac{1}{I_{TMM}}$$

При

$$A_1 = 0; U_{TMM} + I_{TMM} = 1; U_{TMM} = 1 - I_H. \quad (2.12)$$

Зазначене рівняння дає можливість побудувати лінійну ВАХ ФЕП.

Максимально відібрану потужність ФЕП можна знайти, досліджуючи функцію $P(U)$ на максимум:

$$\frac{dP}{dU} = I \left(e^{\frac{qU_p}{kT}} \cdot \left(\frac{qU_p}{kT} + 1 \right) - 1 \right) - \frac{E}{\alpha} = 0, \quad (2.13)$$

де U_p - робоча напруга модуля ФЕП при максимальній вихідній потужності

З формули (2.13) виразимо залежності, що дозволяють визначити положення робочої точки СБ на ВВХ щодо ТММ:

$$\frac{dI}{dU} > -\frac{1}{U} \left(\frac{dP}{dU} > 0 \right), \quad \text{- робоча точка лівіше ТММ} \quad (2.14)$$

$$\frac{dI}{dU} < -\frac{1}{U} \left(\frac{dP}{dU} > 0 \right), \quad \text{- робоча точка правіше ТММ} \quad (2.15)$$

Згідно з методикою крокового пошуку екстремуму потужності, регулятор контролера порівнює виміряну вихідну потужність СБ $P_{(n)}$ зі значенням потужності $P_{(n-1)}$, виміряним до введення керуючого впливу. На підставі цього приймається рішення про направлення переміщення робочої точки по ВВХ. Якщо $P_{(n)} - P_{(n-1)} > 0$, то напрямок кроку не змінюється. Якщо ж відбувається зміна потужності $P_{(n)} - P_{(n-1)} < 0$, то знак кроку змінюється на протилежний.

Зміну потужності і ККД ФЕП при підвищенні температури можна оцінити за допомогою наступних емпіричних виразів:

$$P = P_0 \cdot (1 - 0,005 \cdot \Delta T), \quad (2.16)$$

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 - 0,0045 \cdot (T - 25)), \quad (2.17)$$

де P, η - шукані значення потужності і ККД;

P_0 - потужність ФЕП при 25°C ;

η_0 - ККД при 25°C (для кремнієвих ФЕП $\eta_0 = 0,16$);

T - температура ФЕП.

Складемо еквівалентну електричну схему заміщення автономної СФЕУ з ГНЕ (рис. 3.5). Розглянемо спільну роботу ФЕП, АКБ і БІ на навантаження. Схема включає в себе наступні блоки і елементи: АКБ, що представляє джерело ЕРС E_a з еквівалентної ємністю C_E ; $R_{e.m}$ і $L_{e.m}$ - опір і індуктивність електродів з струмовідводами; внутрішній опір електроліту R_{en} . КЗР на схемі умовно позначений у вигляді комутуючого ключа.

Еквівалентна електрична схема заміщення БІ (рис. 3.6) включає в себе: C - ємність; R_p - паралельний активний опір; R_s - послідовний активний опір; I_{um} - струм утрат; I_C - прямиий струм суперконденсатора (іоністора); I_{BI} - струм блоку іоністорів; U_{BI} - напруга БІ.

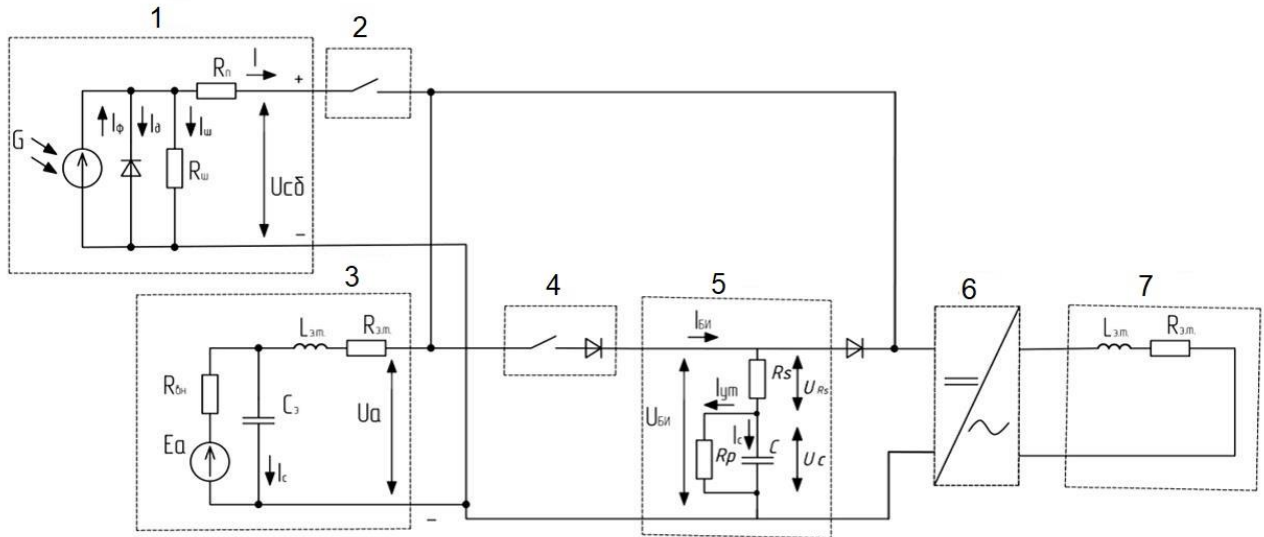


Рисунок 3.5 - Еквівалентна електрична схема заміщення СФЕУ з ГНЕ
 1 – фотоелектричний перетворювач; 2 – контролер заряду-розряду; 3 – АКБ, 4 – зарядний пристрій; 5 – батарея іоністорів 6 – інвертор; 7 - навантаження

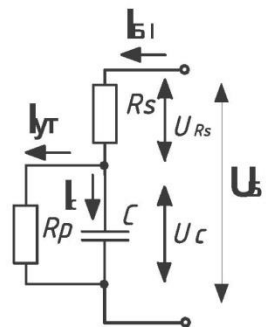


Рисунок 3.6 - Еквівалентна схема заміщення батареї іоністорів

Оцінимо енергію, що віддається в навантаження:

$$W = W_0 \eta_1 \eta_2 \eta_3 (1 - \alpha_{\text{он}}) + \alpha_{\text{он}} W_0 \eta_1 \eta_2, \quad (2.18)$$

де W_0 - енергія, вироблена ФЕП;

η_1, η_2, η_3 - ККД елементів (АКБ - 75 - 80%, АІН - 90%, КЗР - 95%);

$\alpha_{\text{он}}$ - частка електроенергії, що споживається в денний час [31].

Аналітичний опис процесу заряду АКБ можна представити таким виразом:

$$U_3 = U_0 + I_3 R + \left(1 - e^{\frac{I_3 C}{\vartheta - C}}\right) + A \left(e^{\frac{BC}{\vartheta}} - 1 \right), \quad (2.19)$$

де R - опір АКБ, Ом;

I_3 - струм заряду АКБ;

C - ємність на АКБ в момент часу t ;

A, B, k, ϑ - параметри форми зарядної кривої.

Залежність струму від часу змінюється за експоненціальним законом.

Енергоємність АКБ: $E_{АКБ} = U_0 Q$, де Q - максимальний заряд. Зміна в часі заряду АКБ $Q(t)$ описується диференціальним рівнянням «стану» [32]:

$$\frac{dQ}{dt} = \begin{cases} \Delta P(t), & \text{якщо } Q(t) \in [0, C_{акб.макс}]; \\ 0, & \text{якщо } Q(t) \notin [0, C_{акб.макс}] \end{cases}, \quad (2.20)$$

де $\Delta P(t) = P_{ФЕП}(t) - P_{нотр}(t)$;

$P_{нотр}(t)$ - споживана потужність;

$C_{акб.макс}$ - максимальна ємність АКБ.

Віддача АКБ по ємності виражається через коефіцієнт $\delta_{А-зод}$:

$$\delta_{А-зод} = \frac{\int_0^{t_{розряд}} I \cdot dt}{\int_0^{t_{заряд}} I \cdot dt}, \quad (2.21)$$

Віддача АКБ по енергії виражається через коефіцієнт $\delta_{Вт-зод}$:

$$\delta_{Вт-зод} = \frac{\int_0^{t_{розряд}} I \cdot U \cdot dt}{\int_0^{t_{заряд}} I \cdot U \cdot dt}, \quad (2.22)$$

Оскільки $U_{заряд} > U_{розряд}$, то $\delta_{А-зод} > \delta_{Вт-зод}$.

АКБ повинен бути захищений від перезарядження і глибокого розряду, щоб не допустити виникнення сульфату в кристалічній формі.

Розглянемо режим безперервного розряду АКБ. Час, протягом якого можливо електропостачання споживача, без заряду від СБ і без урахування регулювання навантаження, можна оцінити за наступним виразом:

$$t_{\text{авт}} = \frac{Q_{\text{АКБ}} \cdot U_{\text{АКБ}} \cdot k_{\text{гл.розр}}}{P_{\text{max}}} 10^{-3}, \text{ год}, \quad (2.23)$$

де $Q_{\text{АКБ}}$ - номінальна ємність АКБ, А·год;

$k_{\text{гл.розр}}$ - коефіцієнт глибини розряду АКБ ($k_{\text{гл.розр}} = 0,8$ при розряді АКБ до 20%),

$U_{\text{АКБ}}$ - номінальна напруга АКБ, В;

P_{max} - максимальна потужність електроприймачів першої категорії, кВт.

Таким чином, оптимізувавши рівень P_{max} , стає можливим збільшити час автономного електропостачання споживача.

Внутрішній опір АКБ:

$$R_{\text{вн.АКБ}} = \frac{Q_{\text{АКБ}}^2}{4 \cdot M_{\text{АКБ}} \cdot P_{\text{пит}}} 10^{-3}, \quad (2.24)$$

де $P_{\text{пит}} = az^2 + bz^2 + c$ - питома максимальна потужність, Вт / кг;

z - поточна ступінь зарядженості АКБ;

a, b, c - коефіцієнти апроксимації;

$M_{\text{АКБ}}$ - маса АКБ.

Час розряду: $t_{\text{розр}} = \frac{Q}{i(t)}$ Візьмемо до уваги, що $E = Pt_0$.

Максимальна питома потужність на зовнішнє навантаження:

$$P_{\text{пит.н}} = \frac{U_0^2}{4R_n M_{\text{АКБ}}}, \quad (2.25)$$

де R_n - опір навантаження.

Потужність, що віддається в навантаження можна представити таким виразом:

$$P_{ФЕП} \pm P_{ГНЕ} = P_H, \quad (2.26)$$

де $P_{ГНЕ} = P_{АКБ} + P_{БИ}$ - потужність ГНЕ.

У момент, коли $U = const$, струм спожитий (відданий) в навантаженні:

$$i_{ФЕП} \pm i_{ГНЕ} = i_H, \quad (2.27)$$

де $i_{ГНЕ} = i_{АКБ} \pm i_{БИ}$ - струм спожитий (відданий) вузлом ГНЕ в навантаження.

Потужність, що віддається в навантаження при наявності підключення до мережі (або ДЕС):

$$P_{С(ДЕС)} + P_{ФЕП} \pm P_{ГНЕ} = P_H, \quad (2.28)$$

де $P_{С(ДЕС)} = i_{С(ДЕС)} \cdot U_{ШПТ}$ - потужність мережі (ДЕС);

$P_{ФЕП} = i_{ФЕП} \cdot U_{ШПТ}$ - потужність, що виробляється ФЕП;

$P_{ГНЕ} = i_{ГНЕ} \cdot U_{ШПТ}$ - потужність навантаження;

$U_{ШПТ}$ - миттєве значення напруги на ШПТ;

i - миттєве значення струмів на відповідних елементах;

$P_{ГНЕ} = P_{АКБ} + P_{ЕСК}$ - потужність ГНЕ.

За умови $U_{ШПТ} = const$, струм спожитий (відданий) в навантаження автономно-мережевою СФЕУ з ГНЕ можна записати так:

$$i_{С(ДЕС)} + i_{ФЕП} \pm i_{ГНЕ} = i_H, \quad (2.29)$$

Згідно виразами (2.8), (2.13), (2.27) складемо систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_H = I_\phi - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(U + IR_n)}{AkT}\right) - 1 \right] - \frac{U + IR_n}{R_{ш}}; \\ \frac{dP}{dU} = I_H \left(\exp\left(\frac{qU_p}{kT} + 1\right) - 1 \right) - \frac{E}{a} = 0; \\ I_{\phi EP} \pm I_{GHE} = I_H. \end{array} \right. \quad (2.30)$$

3.2 Розробка експериментальної фотоелектричної установки з гібридним накопичувачем

Приступимо до опису структури і режимів роботи експериментальної СФЕУ з гібридним накопичувачем енергії.

На рис. 3.7, 3.7представлена структурна схема і показаний загальний вигляд досліджуваної експериментальної установки.

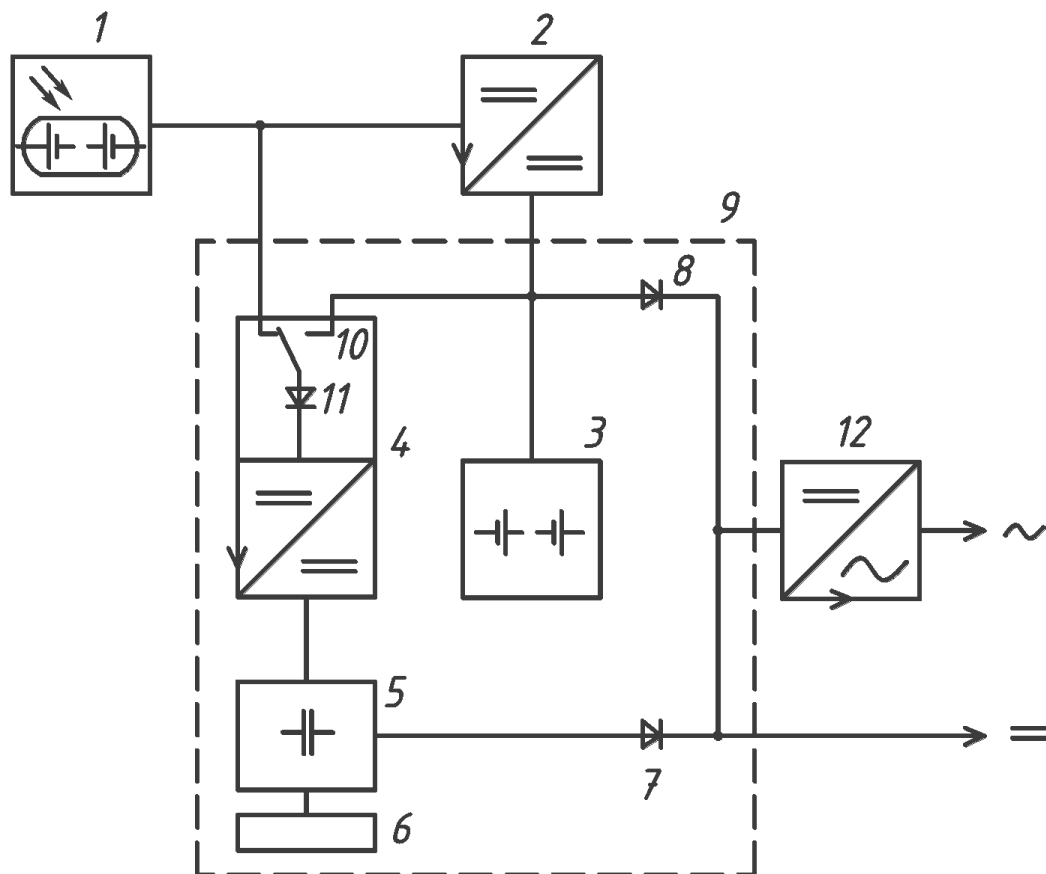


Рисунок 3.7 - Структурна схема експериментальної установки

Опис експериментальної установки. Досліджувана установка містить: сонячну батарею 1, контролер заряду-розряду акумуляторів 2, акумуляторні батареї 3, пристрій заряду 4 іоністорів, батарею іоністорів 5; систему балансування напруг 6 на іоністорів, силові захисні напівпровідникові діоди 7 і 8.

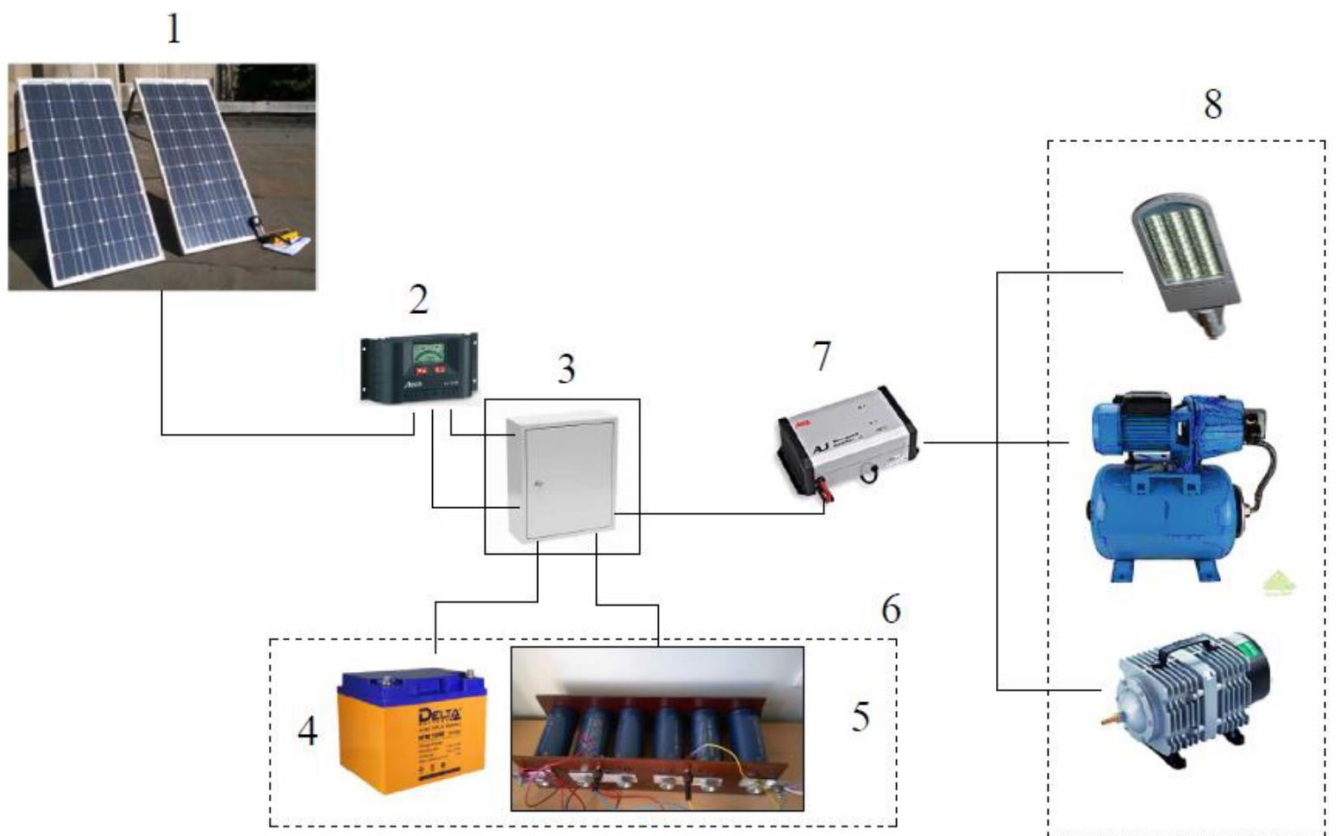


Рисунок 3.8 - Загальний вигляд експериментальної установки

- 1 – сонячні модулі, 2 – контролер заряду-розряду АКБ;
 3 – шафа управління і апарати захисту; 4 – АКБ; 5 – батарея іоністорів;
 6 – гібридний накопичувач енергії; 7 – автономний інвертор напруги;
 8- електроприймачі змінного струму

Установка має гібридний накопичувач енергії (ГНЕ) 9, яка складається з пристрою заряду 4 іоністорів, системи балансування 6 їх напруг, силових захисних напівпровідникових діодів 7 і 8, при цьому пристрій заряду 4 іоністорів має електронно-механічний комутатор 10 із захисним діодом 11 у вхідному колі і пов'язаний з батареєю іоністорів 5, на вихід яких включений один з силових захисних діодів 7, а другий діод 8 підключений до електричного вузла, що з'єднує виходи контролера заряду-розряду, акумуляторної батареї і вхід пристрою заряду іоністора, при цьому другий вхід цього пристрою з'єднаний з виходом сонячної батареї, виходи силових захисних діодів 7 і 8 з'єднані зі входом автономного інвертора напруги 12.

Установка працює в такий спосіб. У періоди сонячної активності електроенергія, що виробляється первинним джерелом електроенергії – сонячною батареєю 1, надходить на акумуляторну батарею 3 через контролер заряду-розряду 2. У разі повної зарядки акумуляторів надлишкова енергія надходить в навантаження безпосередньо або через автономний інвертор напруги 12. До сонячної батареї через відповідний перетворювач постійного струму – пристрій заряду 4 підключена батарея іоністорів 5 з системою балансування напруги 6. У пристрої заряду 4 передбачена функція комутації і захисту вхідного кола. Силові захисні напівпровідникові діоди 7 і 8 включені в розрядні кола акумуляторної батареї і батареї іоністорів відповідно. Діоди 7 і 8 не дозволяють розряджатися батареї іоністорів на акумуляторну батарею і, до того ж, захищають накопичувачі від взаємних зворотних струмів.

Пристрій для зарядки суперконденсаторів 4 у вигляді перетворювача постійного струму виконує функції контролю, комутації та захисту зарядного кола за допомогою електронно-механічного комутатора 10 із захисним діодом 11 у вхідному колі. На рис. 3.8 представлений загальний вигляд експериментальної установки. У рис. 3.9 та табл. 3.1 представлена принципова схема електричних з'єднань і контрольно-вимірювальних кіл, наведена специфікація використовуваного силового, електронного, контрольно-вимірювального обладнання та матеріалів експериментальної установки.

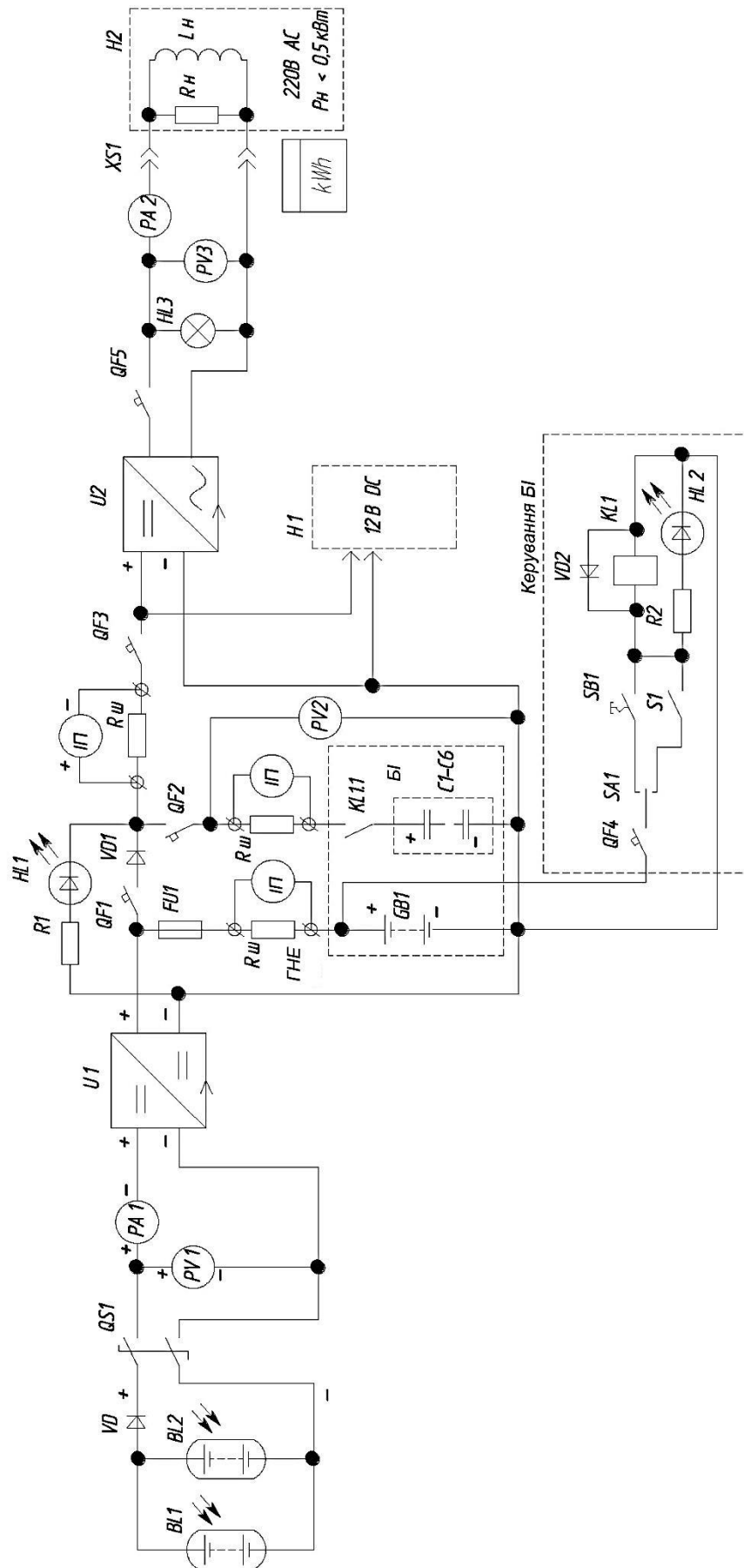


Рисунок 3.9 - Принципова схема та специфікація експериментальної установки

Таблиця 3.1

Перелік елементів схеми

Поз.	Позначення	Найменування	Кол.	Прим.
1	QS1	Вимикач навантаження DC 16А, 2п	1	
2	QF1-3	Автоматичний вимикач 3 63	3	
3	QF5	Автоматичний вимикач 3 16	1	
4	QFA	Автоматичний вимикач 3 2	1	
5	FU1	Запобіжник 70 А	2	
6	BL1.2	Сонячні модулі	2	
7	GB1	Акумуляторна батарея 12В, 4- 0Ач	2	
8	U1	Контролер заряду АКБ, Steca 1515	1	
9	U2	Автономний інвертор, Steca AJ- 500	1	
10	3 1-С 6	Суперконденсатори 2,7В, 3000 Ф	6	
11	KL1	Електромагнітне реле, 50А	1	
12	HL2	Світлодіодні індикатори, 12 В	2	
13	HL3	Лампа сигнальна, 220 В	1	
i	SB1	Кнопка з фіксацією	1	
15	S1	Контакт реле, ПЛК	1	
16	SA1	Перемикач режим.: Ручн ./Авт.	1	
17	VD	Діод захисний, 20А	1	
18	VD1	Діод силовий захисний, 50А	1	
19	VD2	діод захисний	1	
20	R1.R2	Резистори, 130 Ом	2	
<i>Вимірювальні прилади</i>				
21	PV1	Вольтметр стрілочний, = 50 В	1	
22	PV2	Вольтметр цифровий, = 20В	1	
23	PV3	Вольтметр стрілочний, -250 В	1	
2Б	PA 1	Амперметр стрілочний, = 20 А	1	
25	PA 2	Амперметр стрілочний, -10 А	1	
26	ПП	Цифровий запам'ятовуючий осцилограф	1	

3.3 Експериментальне дослідження характеристик фотоелектричної установки з гібридним накопичувачем

3.3.1 Програма і методика експериментальних досліджень

Складемо програму і методику експериментальних досліджень. В експериментальній частині роботи слід провести наступні вимірювання і побудувати відповідні характеристики:

1) дослідити процес заряду-розряду батареї іоністорів в складі автономної фотоелектричної установки при фіксованій освітленості, температури, струмі заряду $U = f(T)$ при $E = \text{const}$, $t = \text{Const}$, $I_{\text{зар}} = \text{const}$;

2) час розряду батареї іоністорів в залежності від навантаження $P = F(T)$, $I = f(T)$ при розряді від 16,2 до 12 В; зняти характеристику саморозрядки батареї іоністорів протягом доби $U = F(T)$;

3) дослідити характеристики спільної роботи АКБ і іоністорів;

4) дослідити вплив БІ на рівень напруги на проміжній шині постійного струму;

Відповідно до встановленої програмою та методикою проведемо випробування наступних підсистем:

1. Підсистема «А» (рис. 3.9):

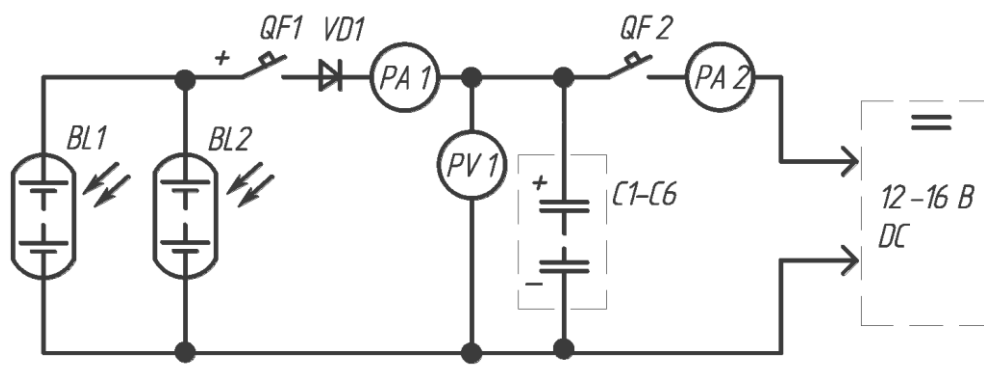


Рисунок 3.9 - Схема підсистеми «А»

2. Підсистема «Б» (рис. 3.10):

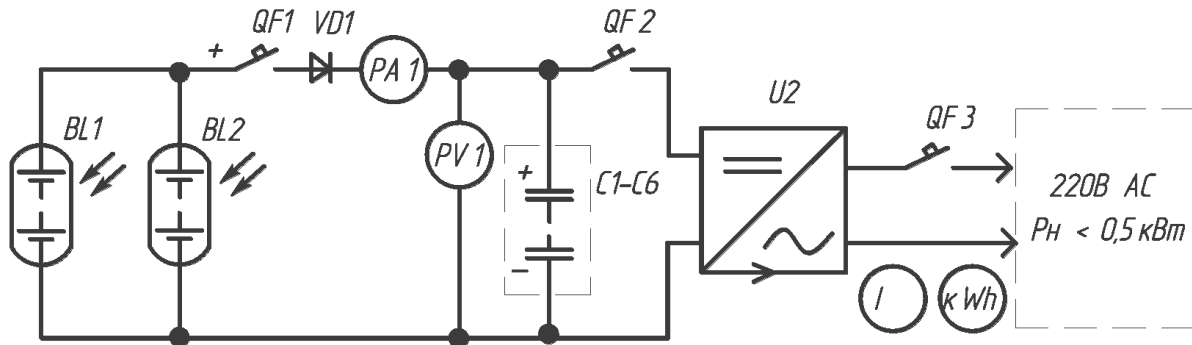


Рисунок 3.10 -Схема підсистеми «Б»

У наведених схемах не використовується АКБ; інвертор включається тільки при заряджених іоністорах. Область застосування системи: електроживлення виділених навантажень в денний час. Тривалість роботи безпосередньо залежить від рівнів енергетичної освітленості і характеристик батареї іоністорів.

3.3.2 Дослідження процесу заряду-розряду іоністорів в складі автономної фотоелектричної установки

Для перевірки працездатності і ефективності пропонованих технічних рішень виконана серія експериментів, що підтверджують стійку роботу фізичної моделі СФЕУ з ГНЕ у всіх запланованих режимах:

- набір і скидання навантаження при постійній інтенсивності сонячного випромінювання, при її збільшенні і зниженні;
- постійне навантаження при зміні рівнів інтенсивності сонячного випромінювання.

На графіку (рис. 3.11) представлені криві заряду батареї іоністора (500 Ф; 16,2 В) від сонячної батареї (100 Вт) при різних рівнях енергетичної освітленості. Інтенсивність сонячного випромінювання вимірюється приладом СЕМ LA -1017, температура на поверхні сонячних модулів – інфрачервоним термометром Mastech MS -6530.

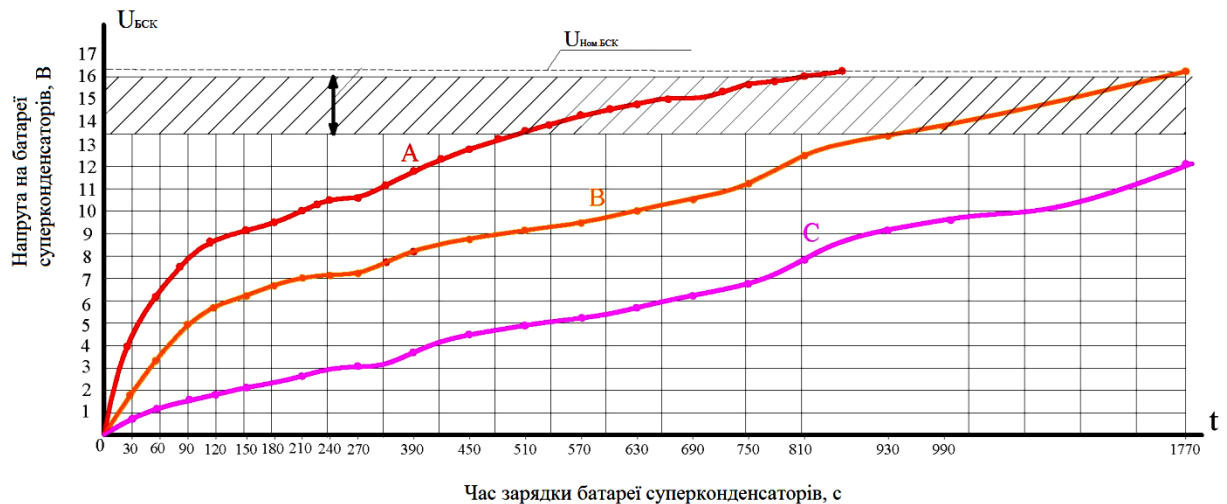


Рисунок 3.11 - Напруга на БІ в функції часу при заряді від сонячної батареї при різній величині інтенсивності енергетичної освітленості: А – 850 Вт/м²; В – 600 Вт/м²; С – 400 Вт/м²

Аналізуючи отримані характеристики, можна зробити висновок, що початкова ділянка зарядної кривої апроксимується законом розтягнутої експоненти.

3.3.3 Дослідження стану заряду АКБ і режимів роботи контролера заряду-розряду в автономній СФЕУ

Сучасні контролери дозволяють генерувати заряд АКБ в кілька стадій.

Проведено експериментальні дослідження режимів заряду-розряду АКБ за допомогою контролера з алгоритмом широтно-імпульсної модуляції. Дано пояснення по режимах роботи контролера заряду.

1. В період активного заряду весь струм від СБ йде на заряд АКБ.
2. При досягненні на АКБ певного рівня напруги настає фаза поглинання (абсорбції): КЗР поступово знижує струм заряду АКБ, щоб не допустити перегріву і процесу активного газоутворення.
3. Вирівнюється напруга і настає фаза підтримки заряду малим струмом (рівновага).

Особливість АКБ з гелевим електролітом в тому, що при від'ємних температурах різко зростає внутрішній опір, що ускладнює їх заряд.

Акумулятор не рекомендується далі експлуатувати, якщо його ємність зменшилася на 20 %, тобто стала 80 % від початкового значення. Відповідно до даних рекомендацій, при проведенні експерименту глибина розряду АКБ була обмежена на рівні 30 % шляхом налаштування і конфігурації параметрів використовуваного контролера заряду.

3.3.4 Спільна робота АКБ і іоністорів в автономній СФЕУ

Досліджено спільну роботу АКБ і іоністорів на навантаження (рис. 3.12). На наведеній осцилограмі відображено вплив батареї іоністорів, підключеної паралельно АКБ, а також показаний характер компенсації сплесків струму ступінчастого навантаження.

З осцилограми видно, що в момент підключення навантаження потужністю 400 Вт, при якій по шині постійного струму (ШПТ) протікає струм 33 А, основний відбір струму йде від БІ і знижується за експоненціальним законом. У той же час, у міру розряду БІ, зростає споживання струму від АКБ.

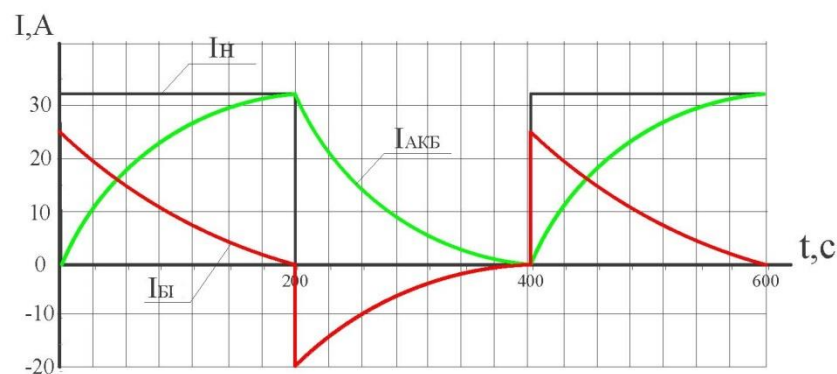


Рисунок 3.12 - Осцилограма струмів на АКБ і БІ при заданій навантажувальній діаграмі

Слід зазначити, що при використанні тільки АКБ спостерігається досить значне падіння напруги на проміжній шині постійного струму. У той же час,

використання БІ спільно з АКБ дозволяє підтримувати напругу на шині на більш тривалий час.

Параметри гібридного накопичувача енергії:

АКБ – 40 А·год, 12 В;

БІ – 500 Ф, 16,2 В.

Тут АКБ використовуються в якості основного накопичувача енергії, в той час як іоністори забезпечують імпульсні режими роботи, компенсуючи нестабільну генерацію ФЕП і швидкі зміни навантаження. Крім цього, батарея іоністорів захищає акумулятори від просадок напруги при високих струмах заряду/розряду.

На рис. 3.13 показано вплив батареї іоністорів на рівень напруги на проміжній ШПТ автономної СФЕУ.

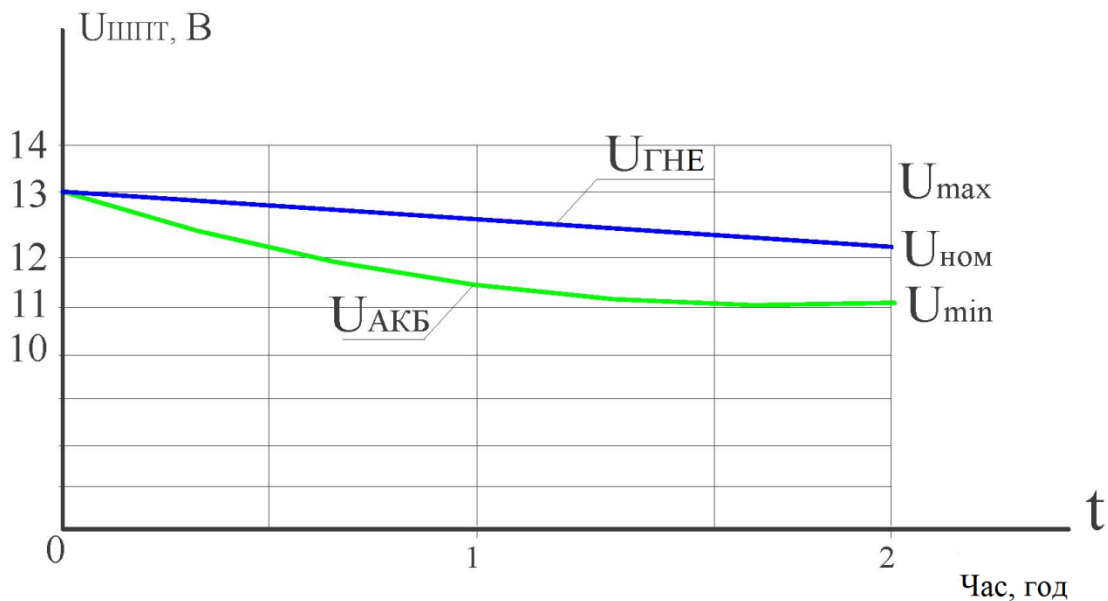


Рисунок 3.13 - Характер зміни напруги на ШПТ

При використанні тільки АКБ при струмі навантаження 9,8 А протягом 2 год падіння напруги на проміжній шині постійного струму склало 1,9 В. У той же час, при використанні БІ спільно з АКБ за рівний проміжок часу, падіння напруги на ШПТ склало 0,8 В.

При підключенні через автономний інвертор напруги потужних споживачів, наприклад, електродвигунів, пускові струми надходять на батарею

іоністорів, а далі основна енергія надходить від акумуляторної батареї. Пікові короточасні навантаження невеликої тривалості покладаються переважно на іоністори.

Згідно табл. 3.2, при використанні іоністорів спільно з АКБ, рівень розряду протягом двох діб зменшився на 13,5 %, разом з цим знизилася кількість повних циклів заряд/розряд.

Таблиця 3.2

Порівняння рівнів розряду АКБ

Тип використовуваного накопичувача	Кількість повних циклів заряд/розряд	Зареєстрована ступінь розряду АКБ, %
тільки АКБ	3	32
АКБ спільно з іоністорами	2	45,5
Зміна рівня розряду		- 13,5 %

Результати випробувань підтверджують робочу гіпотезу і збіжність експериментально отриманих значень з розрахунковими становить 92 %.

Тим самим, застосування іоністорів забезпечує роботу АКБ в більш м'якому режимі з огляду на те, що внутрішній опір іоністорів значно менше внутрішнього опору АКБ.

3.4 Розрахунок фотоелектричної установки

На основі побудованого в п. 2.1 графіка навантаження фермерського господарства інтенсивного рибництва промодельована добова і річна продуктивність СФЕУ потужністю 2,5 кВт для умов Тернопільської обл. (рис. 3.14).

Виконаємо поєднання графіка навантаження і графіка вироблення і виділимо режимні області системи (рис. 3.15).

На рис. 3.15 криву вироблення 2 пропонується апроксимувати прямокутною областю 3, еквівалентною за площею.

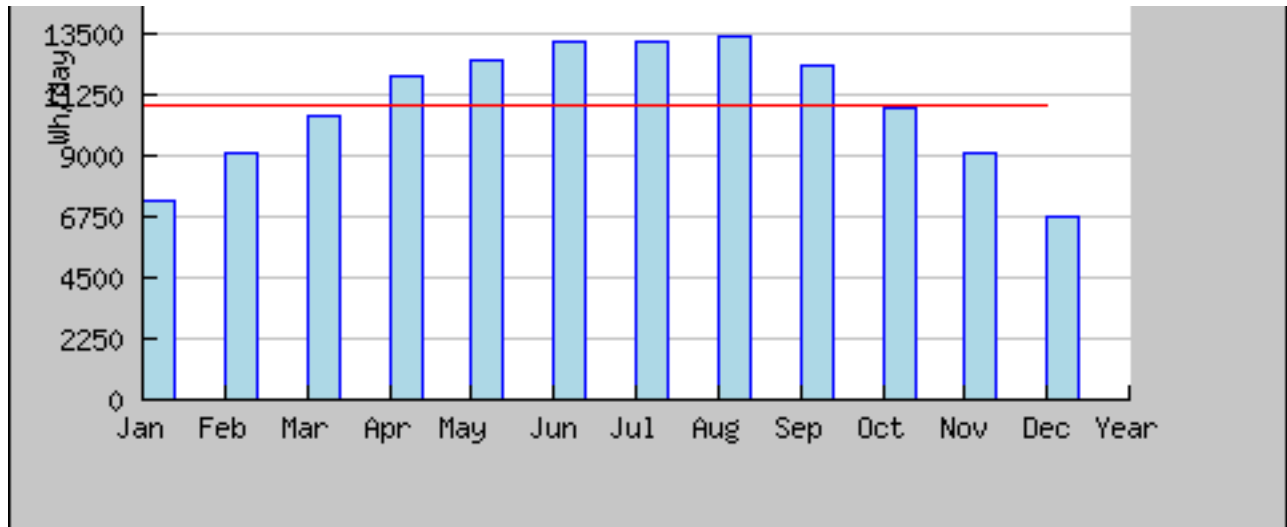


Рисунок 3.14 - Рівні річної генерації СФЕУ потужністю 2,5 кВт

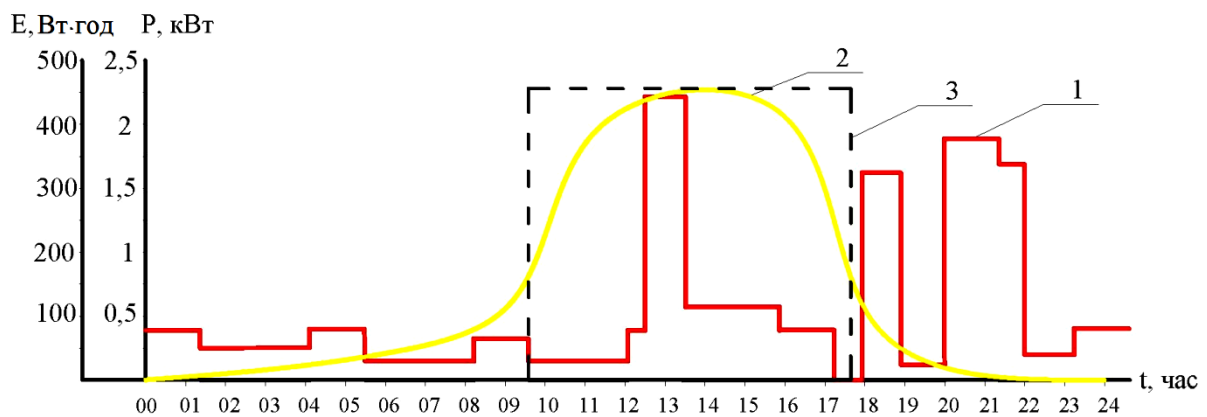


Рисунок 3.15 - Режимні області системи на суміщених графіках

1 – профіль добового ГЕН рибне господарство; 2 – енергія, що виробляється ФЕП; 3 – область заряду ГНЕ; 4 – область розряду ГНЕ

Склад і параметри досліджуваної установки визначені відповідно до методики інженерного розрахунку, викладеної в п. 2.5 даної роботи.

Розрахунок необхідної потужності СБ можливо спростити, використовуючи коефіцієнт K_{OM} .

Стосовно бригадному будинку рибоводів, виконаємо розрахунок основних параметрів автономної СФЕУ, використовуючи значення коефіцієнта K_{OM} .

$$P_{н.мах} = 1,3 \text{ кВт}; P_{AII} = 1,3 \text{ кВт}.$$

Необхідний час роботи системи без підзарядки від СБ – 6,5 год.

Приймаємо $K_{OM} = 3,25$.

Тоді $P_{CB} = 0,4 \text{ кВт}$.

$C_{AKB} = 690 \text{ А}\cdot\text{год}, 12\text{В}$.

Вибираємо 6 АКБ по 115 А·год;

$W_{AKB} = 8300 \text{ Вт}\cdot\text{год}$.

$P_{AII} = 1,3 \text{ кВт}$.

3.5 Висновки до розділу

1. Проведено математичний опис фотоелектричної установки з гібридним накопичувачем.

2. Запропоновано методику розрахунку параметрів фотоелектричної установки на основі гібридного накопичувача енергії з використанням іоністорів.

3. Для дослідження параметрів і режимів роботи автономної сонячної фотоелектричної установки розроблена принципова електрична схема. Складено програму і методику експериментальних досліджень.

4. Для перевірки працездатності і ефективності запропонованих технічних рішень виконана серія експериментів, що підтверджують стійку роботу фізичної моделі СФЕУ з ГНЕ у всіх запланованих режимах.

5. Проведено експериментальні дослідження режимів заряду-розряду АКБ за допомогою контролера з алгоритмом широтно-імпульсної модуляції. В результаті виявлено, що акумулятор не рекомендується експлуатувати далі, якщо його ємність зменшилася на 20 %, тобто стала 80 % від початкового значення. Відповідно до даних рекомендацій, при проведенні експерименту глибина розряду АКБ була обмежена на рівні 30 % шляхом налаштування і конфігурації параметрів використовуваного контролера заряду.

6. Досліджено спільну роботу АКБ і іоністорів на навантаження. Встановлено, що у такій схемі АКБ використовуються в якості основного накопичувача енергії, в той час як іоністори забезпечують імпульсні режими роботи, компенсуючи нестабільну генерацію ФЕП і швидкі зміни навантаження.

7. При підключенні через автономний інвертор напруги потужних споживачів, наприклад, електродвигунів, пускові струми надходять на батарею іоністорів, а далі основна енергія надходить від акумуляторної батареї. Пікові короточасні навантаження невеликої тривалості покладаються переважно на іоністори.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Блискавкозахист енергетичної установки

Блискавкозахист — це система захисних пристроїв та заходів, що призначені для забезпечення безпеки людей, збереження будівель та споруд, устаткування та матеріалів від можливих вибухів, займань та руйнувань, спричинених блискавкою. Блискавка — особливий вид проходження електричного струму через величезні повітряні прошарки, джерелом якого є атмосферний заряд, накопичений грозовою хмарою. Умови утворення таких хмар — велика вологість та швидка зміна температури повітря. За таких умов у атмосфері Землі проходять складні фізичні процеси, які призводять до утворення та накопичення електричних зарядів. При підвищенні напруженості електричного поля до критичних значень виникає розряд, який супроводжується яскравим свіченням (блискавкою) та звуком (громом). Довжина каналу блискавки може досягати кількох кілометрів, сила струму — 200 000 А, напруга — 150 000 кВ, а температура — 10000 °С і більше. Час існування блискавки 0,1 — 1 с. Щосекунди земну кулю уражають в середньому більше 100 блискавок. [33]

Розрізняють первинні (прямий удар) і вторинні прояви блискавки.

Як зазначено у [33]: «Прямий удар блискавки (ураження блискавкою) — безпосередній контакт каналу блискавки з будівлею чи спорудою, що супроводжується протіканням через неї струму блискавки. Прямий удар блискавки здійснює на уражений об'єкт наступні дії: електричну, що пов'язана з ураженням людей і тварин електричним струмом та виникненням перенапруг на елементах, по яких струм відводиться в землю; теплову, що зумовлена значним виділенням теплоти на шляхах проходження струму блискавки через об'єкт; механічну, що спричинена ударною хвилею, яка поширюється від каналу блискавки, а також електродинамічними силами, що виникають у

конструкціях, через які проходить струм блискавки. Під вторинними проявами блискавки розуміють явища під час близьких розрядів блискавки, що супроводжуються появою потенціалів на конструкціях, трубопроводах, електропроводах всередині будівель і споруд, які не зазнали прямого удару блискавки. Вони виникають внаслідок електростатичної та електромагнітної індукції.»

Захист об'єктів від прямих ударів блискавки забезпечується шляхом встановлення блискавковідводів. Захист від електростатичної індукції (вторинний прояв блискавки) здійснюється приєднанням устаткування до заземлювача для відведення електростатичних зарядів, індукованих блискавкою, в землю. Захист від електромагнітної індукції полягає у встановленні методом зварювання перемичок між протяжними металоконструкціями в місцях їхнього зближення менше ніж на 10 см.. Інтервал між перемичками повинен становити не більше 20 м. Це дає змогу наведеному струму блискавки переходити з одного контуру в інший без утворення електричних розрядів. Захист від занесення високих потенціалів у будівлю здійснюється шляхом приєднання до заземлювача металоконструкцій перед їх введенням у будівлю.

При виборі пристроїв блискавкозахисту за категоріями враховують важливість об'єкта, його висоту, місце розташування серед сусідніх об'єктів, рельєф місцевості, інтенсивність грозової діяльності. Останній параметр характеризується середньорічною тривалістю гроз у годинах для даної місцевості. Для захисту об'єкта від прямих ударів блискавки застосовують блискавковідвід — пристрій, який височіє над захищуваним об'єктом, сприймає удар блискавки та відводить її струм у землю. Захисна дія блискавковідводу базується на властивості блискавки уражати найбільш високі та добре заземлені металеві конструкції. За конструктивним виконанням блискавковідводи поділяються на стержневі, тросові та сітчасті, а за кількістю та загальною площею захисту — на одинарні, подвійні та багатократні. Окрім того, розрізняють блискавковідводи встановлені окремо та такі, що розташовані на

захищуваному об'єкті. Будь-який блискавковідвід складається з блискавкоприймача (металевий стержень, трос, сітка), який безпосередньо сприймає удар блискавки; несівної опори (спеціальні стовпи, елементи конструкцій будівлі), на якій розташовується блискавкоприймач; струмовідводу (металевий провідник, конструкція), по якому струм блискавки передається в землю; заземлювача, який забезпечує розтікання струму блискавки в землі.[33]

Блискавковідвід характеризується зоною захисту — частиною простору, навколо блискавковідводу, яка захищена від прямих ударів блискавки з відповідним ступенем надійності.

4.2 Фізичні основи електробезпеки

Величина струму, що проходить через тіло людини при її попаданні під напругу, в найбільшій мірі визначає тяжкість ураження. Для розробки технічних і організаційно-технічних заходів і засобів профілактики електротравм важливо знати, від яких конструктивних особливостей електроустановок, їх робочих параметрів і стану залежить можлива величина струму через людину при потраплянні під напругу. Крім того, важливо, щоб весь електротехнічний персонал, усі працівники, робота яких пов'язана з експлуатацією електроустановок, чітко розуміли, чим обумовлена, що є причиною тієї чи іншої вимоги з електробезпеки. Таке знання, розуміння вимог чинних нормативів з електробезпеки сприятиме дотриманню їх працівниками, і якраз розуміння цих вимог відрізняє працівників п'ятої групи з електробезпеки від четвертої, і є обов'язковою складовою їх професійної підготовки з питань безпеки [33].

У реальній електричній мережі (повітряній чи кабельній) опір ізоляції проводів відносно землі розподіляється по всій довжині мережі — опорні, підвісні, натяжні ізолятори, ізоляція кабелю. Чим більша протяжність мережі, тим більше ізоляторів, які працюють паралельно, і менший загальний опір

ізоляції проводів відносно землі. Необхідний опір ізоляції регламентується чинними нормативами. На практиці ізоляція струмопроводів виконується з реальних діелектриків, питомий опір яких не дорівнює нескінченності. Внаслідок старіння ізоляції, її частого зволоження, забруднення, нагріву, дії агресивного середовища тощо, питомий опір ізоляції знижується. Тому кожна ділянка довжини проводу має опір ізоляції певного значення або провідність, яка відрізняється від нуля, а при роботі реальної мережі мають місце постійні втрати струму (виток струму) через ізоляцію і землю. Таким чином, незважаючи на наявність ізоляції, струмопроводи електромережі електрично зв'язані між собою і землею провідниками (ізоляцію) з великим опором.

Відповідно до зазначеного вище, кожна ділянка довжини проводу електромережі, що знаходиться під напругою, крім опору ізоляції має певну ємність відносно землі. Тому при дотиці людини до неізольованої струмовідної частини (проводу тощо) функціонуючої електромережі струм через людину обумовлюється величиною напруги дотику і ємністю зазначеної вище системи. Ємнісна складова струму через людину при потраплянні під напругу в розгалужених мережах може досягати небезпечних для людини значень. Тому навіть при відключенні мережі від джерела живлення для ремонтно-профілактичних робіт тощо, необхідно заземлити кожен провід переносним заземленням і тільки після цього та перевірки відсутності напруги допускати персонал до роботи.

4.3 Планування заходів цивільного захисту

Відповідно до [34]: «Планування цивільного захисту об'єкта — це розроблення сукупності документів, у яких визначені сили і засоби, порядок і послідовність дій з метою забезпечення захисту населення, виробництва, а також виконання завдань вищих органів, пов'язаних із поданням допомоги населенню інших об'єктів і міст. Ці документи, розроблені з урахуванням реальних можливостей і умов об'єкта, є настановою для організованих дій як з

метою підготовки об'єкта до захисту в надзвичайних умовах, так із метою ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (стихійних лих, виробничих аварій і вогнищ воєнних конфліктів). На об'єкті мають бути розроблені два плани: на воєнний та мирний час. План цивільного захисту на воєнний час — це документи, які визначають організацію і порядок переведення об'єкта з мирного на воєнний час і ведення цивільного захисту в початковий період війни. План цивільного захисту на мирний час — це документи, які визначають організацію і порядок виконання заходів цивільного захисту з метою запобігання або зменшення можливих втрат від важких виробничих аварій, катастроф, і стихійних лих, а також ведення рятувальних та інших невідкладних робіт при їх виникненні»

Як вихідні документи, що будуть використані при розробці документів плану цивільного захисту об'єкта, необхідні: директивні документи Президента, Верховної Ради, Уряду України та МНС; витяг із рішення керівника цивільного захисту району про організацію і ведення цивільного захисту на території району, дані про кількість формувань, їх особовий склад, які потрібно створити на даному об'єкті; витяг із плану прийому і розміщення евакуйованого населення; витяг із наряду райвійськкомату на постачання техніки у збройні сили у зв'язку з мобілізацією; окремі розпорядження керівника цивільного захисту району (наряд для виконання спеціальних завдань та ін.); документи, які характеризують господарство і населений пункт.

Об'єкт, що знаходиться на території одного або кількох населених пунктів, є основним об'єктом, який складає єдиний план разом з адміністрацією населеного пункту.

Розробка плану відбувається у три етапи в певній послідовності. Перший етап — підготовчий, протягом якого визначається склад виконавців і затвердження їх, підготовка виконавців до роботи, доведення до них директив, рекомендацій та інших документів, узагальнення й аналіз вихідних даних, необхідних для розробки плану ЦЗ, визначення обсягу робіт і розподіл обов'язків між виконавцями та закріплення відповідальних за розділами плану.

Планування евакуації має передбачати виникнення найбільш несприятливих ситуацій під час підготовки і проведення евакуації: відсутність відповідних керівників, транспорту, електрозабезпечення, погані погодні умови, аварія на дорозі, паніка серед людей та ін. Другий етап — практична розробка, оформлення документів. Заходи, які плануються в документах плану, мають бути спрямовані на виконання завдань ЦЗ в надзвичайних ситуаціях. [18]

У документах плану визначають заходи, які потрібно виконати в мирний час, при загрозі виникнення надзвичайних ситуацій, несподіваному нападі противника, стихійних лихах, виробничих аваріях, катастрофах і при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, проведенні рятувальних та інших невідкладних робіт, а також характер і порядок дій формувань, зміст і обсяг робіт, строки виконання заходів з урахуванням конкретних умов і можливостей даного об'єкта.

Оскільки заходи потребують матеріальних затрат, вони повинні здійснюватися у комплексі з іншими економічними заходами, через що їх необхідно включити в поточний і перспективний план об'єкта, де вони будуть забезпечені коштами.

Третій етап — узгодження розроблених планів із відділом ЦЗ району, з районним агропромисловим управлінням, адміністрацією населеного пункту, службами ЦЗ району, після цього затвердження документів плану ЦЗ. Документи плану ЦЗ підписує керівник — ЦЗ об'єкта, деякі (план евакуації, прийому і розміщення евакуйованого) підписує і начальник ЦЗ голова адміністрації населеного пункту. Зміст плану ЦЗ об'єкту узгоджується з вимогами плану ЦЗ району, що підтверджує начальник відділу з питань цивільного захисту населення району, після чого план ЦЗ затверджує керівник ЦЗ об'єкта.

Після затвердження плану об'єкта організовується вивчення документів усім керівним складом об'єкта.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Побудовано і проаналізовані добові графіки електричного навантаження в періоди виробничих циклів рибних господарств. Встановлено, що навантаження змінюється у межах від 3000 ... 5500 Вт, коефіцієнт нерівномірності навантаження 0,63 ... 0,76.

2. Системи автономного електропостачання на основі сонячної фотоелектричної установки для рибного господарства номінальною потужністю навантаження до 5-7 кВт повинна забезпечувати середньодобове електропостачання до 15 кВт·год.

3. Запропоновано структурно-схемні рішення сонячних фотоелектричних установок, на основі гібридного накопичувача енергії з використанням іоністорів, для забезпечення резервного і надійного електропостачання рибного господарства.

4. Запропоновано методику розрахунку параметрів фотоелектричної установки на основі гібридного накопичувача енергії з використанням іоністорів.

5. Розраховано характеристики фотоелектричної установки для рибного господарства, яке виробляє 7 тон риби на рік. У цьому випадку номінальна вихідна потужність установки становить 3 кВт, потужність сонячних батарей – 1600 ... 1800 Вт, а ємність акумуляторів (12 В) 650 А·год.

6. Для дослідження параметрів і режимів роботи автономної сонячної фотоелектричної установки розроблена принципова електрична схема. Наведено результати експериментальних досліджень роботи гібридного накопичувача енергії у режимах заряду та розряду. Згідно виміряними даними, при використанні блоку іоністорів спільно з акумуляторами, рівень розряду протягом двох діб зменшився на 13,5 %, разом з цим знизилася кількість повних циклів заряд / розряд.

7. Встановлено, що у такій схемі АКБ використовуються в якості основного накопичувача енергії, в той час як іоністори забезпечують імпульсні

режими роботи, компенсуючи нестабільну генерацію ФЕП і швидкі зміни навантаження. При підключенні через автономний інвертор напруги потужних споживачів, наприклад, електродвигунів, пускові струми надходять на батарею іоністорів, а далі основна енергія надходить від акумуляторної батареї. Пікові короткочасні навантаження невеликої тривалості покладаються переважно на іоністори.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Стецюк А.Г. Підвищення ефективності сонячної фотоелектричної енергоустановки// Ю.М.Величко, О.І.Демчук, В.Б.Пусь, А.Г.Стецюк, С.В.Слободян /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей X міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 24–25 листоп. 2021.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: 2021. Т. 2. – 17-18.
2. Silva Wilson. Trendy solar cells hit new world efficiency record. — 2016. — Access mode: <http://newsroom.unsw.edu.au/news/sciencetech/trendy-solar-cells-hit-new-worldefficiency-record>.
3. Wesoff E. First Solar Hits Record 22.1CdTe Solar Cell. — 2016. — Access mode: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/First-Solar-Hits-Record-22.1-ConversionEfficiency-For-CdTe-Solar-Cell>.
4. Wittmer B., Mermoud A. A tool to optimize the layout of ground-based PV installations taking into account the economic boundary conditions // 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. — 2014. — P. 6.
5. Філюк Я.О. Експериментальні вимірювання енергетичного потенціалу сонячного випромінювання / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // XX наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 17 травня 2017 року. — Т.: ТНТУ, 2017. — С. 176-177..
6. Коваль В.П. Збільшення ефективності використання сонячних панелей. / Я.О. Філюк, С.І.Герєга // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202.
7. Григораш, О. В. Возобновляемые источники электроэнергии :

- монография / О. В. Григораш, Ю. В. Степура, Р. А. Сулейманов и др. – Краснодар: КубГАУ, 2012. – 272 с.
8. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасенчко, К. М. Козак // *Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит.* – 2015. – № 3. – С. 2-10
 9. Ильченко, Я. А. Асинхронный генератор с улучшенными эксплуатационными характеристиками для электротехнологических установок при производстве прудовой рыбы : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Ильченко Яков Андреевич. – Краснодар, 2012.
 10. Гришин, В. Н. Современные проблемы пресноводной аквакультуры: Учеб.пособие. – М.: РУДН, 2008. – 138 с.: ил.
 11. Электроснабжение сельского хозяйства [Текст]: Учебники и учеб. пособия для студентов высш. учеб. заведений / И. А. Будзко, Т. Б. Лещинская, В. И. Сукманов. – М.: Колос, 2000. – 536 с.: ил.
 12. Опыт выращивания осетровых рыб в условиях замкнутой системы водообеспечения для фермерских хозяйств [Текст] / Г. Г. Матишов, Д. Г. Матишов, Е. Н. Пономарева и др. – Препринт. – Ростов н/Д: Изд-во: ЮНЦ РАН, 2006. – 72 с.
 13. Козюков, Д. А. Резервирование нагрузок сельскохозяйственных потребителей с использованием аккумуляторных фотоэлектрических систем [Текст] / Д. А. Козюков, Б. К. Цыганков // *Инновации в сельском хозяйстве.* – 2015. – №3 (13).– С.209–213.
 14. Козлов, В. И. Использование альтернативных источников энергии в рыбоводных процессах [Текст] / В.И. Козлов, А.В. Козлов, Ю.С. Иванова // *Рыбное хозяйство.* – 2015. – №2. – С.89–93.
 15. Лазарев-Марченко, С. А. Мобильная аэрационная установка с питанием от солнечных фотоэлектрических батарей [Текст] / С. А. Лазарев-Марченко, В. И. Виссарионов // *Энергоснабжение и водоподготовка.* – 2007. – №3 (47).– С. 64–66.
 16. Airlift Pump plus Axial Flow Pump running on Solar PV for efficient

- waterpumping. – Режим Доступа: [https:// www.jovoto.com/ projects/greenpeacechallenge/ ideas/32580](https://www.jovoto.com/projects/greenpeacechallenge/ideas/32580) (англ.).
17. Філюк Я.О. Енергоощадні освітлювальні установки з автономним живленням/ В.А. Андрійчук, В.П.Коваль// Матеріали науково-практичного семінару «Міжнародний інвестиційний форум – виставка з енергоефективності та енергоощадності 2015». Тернопіль. 8.10.2015 – С. 103-105.
 18. Каушинг Фолькер. Системы возобновляемых источников энергии: учебник / Пер. с немецкого. – Астана: Фолиант, 2013. – 432 с.
 19. Елистратов, В. В. Оптимизация фотоэлектрических модулей при проектировании солнечных электростанций [Текст] / В. В. Елистратов, Е. С. Аронова, М. З. Шварц // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 37. – С.259–263.
 20. Воронин, С. М. Формирование автономных систем электроснабжения сельскохозяйственных объектов на основе возобновляемых источников энергии [Текст] :дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.02 / Воронин Сергей Михайлович. – Зерноград, 2009. – 338 с.
 21. Коваль В.П. Збільшення ефективності використання сонячних панелей. / Я.О. Філюк, С.І.Гергега // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202.
 22. Арбузов, Ю. Д., Евдокимов В. М. Основы фотоэлектричества. – М.: ВИЭСХ, 2007. – 292 с.
 23. Беленов, А. Т. Солнечные фотоэлектрические водоподъемники / А. Т. Беленов, Г. Н. Метлов – Издание второе, дополненное / Под ред. академика РАН Д.С. Стребкова. – М.: ВИЭСХ, 2014. – 136 с.
 24. Газалов, В. С. Солнечные электростанции для удаленных сельскохозяйственных потребителей [Текст] / В. С. Газалов, А. Ю. Евдокимов // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 87 (03)

- [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2013/03/pdf/45.pdf>.
25. Філюк Я.О. Світлотехнічні установки з автономним живленням на основі сонячних батарей з акумулюючими елементами/ В.А. Андрійчук, В.П.Коваль// Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні особливості формування і управління інноваційним потенціалом регіонального розвитку туризму та рекреації із залученням молодіжного ресурсу». Тернопіль. 15-17 жовтня 2015 року – С. 185-186.
 26. Чернецкий, А. М. Оценка экономической эффективности использования накопителей электроэнергии в энергосистеме [Текст] / А. М. Чернецкий // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ - Энергетика: междунар. научно-технич. журнал. – 2013. – №4. –С. 21-28.
 27. Константинов, Н. П. Оценка способов регулирования напряжения на выводах электроприемников [Текст] / Н. П. Константинов, И. М. Валеев // Проблемы энергетики. – 2007. – № 3-4. – С. 38-45.
 28. Тарасов, Б. П. Системы аккумулирования энергии [Текст] / А. А. Володин, П. В. Фурсиков, А. В. Сивак, А. М. Кашин // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – № 22 (162). – С. 30-41.
 29. Фомовский, Ф. В. Моделирование процесса разряда перезаряжаемых источников энергии с постоянной мощностью [Текст] / Ф. В. Фомовский // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2014. – №166. – С.34.
 30. Арбузов, Ю. Д., Евдокимов В. М. Основы фотоэлектричества. – М.: ВИЭСХ, 2007. – 292 с.
 31. Габдерахманова, Т. С. Анализ схем автономного электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии [Текст] / Т. С. Габдерахманова, Л. Б. Директор // Промышленная энергетика. – 2015. – №4. – С. 49.

32. Бобронников, В. Т. Динамическая модель автономной ветроэнергетической системы с учетом ветра как коррелированного случайного процесса [Текст] / В. Т. Бобронников, Т. С. Абрамова, А. Р. Кадочникова // Материалы форума REENFOR 2014. – С. 84–92.
33. Запорожець О. І. Основи охорони праці. Підручник/ О. І. Запорожець, О. С. Протоєрейський, Г.М Франчук., І. М. Боровик – К.: Центр учбової літератури, 2009. – 264 с.
34. Березуцький В.В. Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник / В.В. Березуцький, Л.А.Васьковець Л.А., Н.П.Вершиніна та ін.; За ред. проф. В. В. Березуцько-го. –Х.: Факт, 2005. – 384 с.