

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка приладу для зняття вольт-амперної характеристики фотовольтаїчних панелей побутової сонячної електростанції

Назва теми

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр, назва

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр, назва

Освітня програма «Електропобутова техніка»

Шифр МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група ЕТм-23-1


Підпис

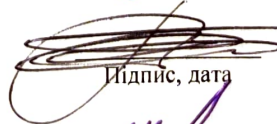
Ткачук В. В.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

проф. Скиба М. Є
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

доц. Тимошук О.Т.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:


Підпис, дата

доц. Неймак В.С.
Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС

17 12 2024 р.

Хмельницький 2024

АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Ткачук Володимир Володимирович
-
2. Тема магістерської роботи Розробка приладу для зняття вольт-амперної характеристики фотовольтаїчних панелей побутової сонячної електростанції.
-
3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____
-
4. Об'єм магістерської роботи: креслень 7 арк., сторінок записки 70


5. Україна є державою з обмеженими паливно-енергетичними ресурсами. Проаналізовано темпи зростання кількості СЕС. Обґрунтовано необхідність проведення діагностики ФЕМ. В магістерській роботі розроблено прилад для зняття вольт-амперної характеристики фотовольтаїчних панелей. В першому розділі зроблено огляд загальної будови СЕС, проведено аналіз можливих відмов. В другому розділі зроблено огляд існуючих методів зняття вольт-амперної характеристики, дано теоретичні відомості роботи ФЕМ. У третьому розділі розроблено експериментальний зразок приладу, знято та проаналізовано ВАХ ФЕМ. Зроблено висновок про працездатність приладу.

Підпис студента 

" 17 " 12 2024 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 6 від " 31 " 12 2024 р.

Оцінка проекту ЕК 
Рекомендації ЕК _____


Особливі відмітки _____

Технічний секретар 

" 31 " 12 2024 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту і архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень магістр
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
Шифр і назва
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Шифр і назва
Освітня програма «Електропобутова техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри МАЕЕС
к.т.н., доц. Неймак В.С.
 12 .2024р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Ткачук Володимир Володимирович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка приладу для зняття вольт-амперної характеристики фотовольтаїчних панелей побутової сонячної електростанції.

керівник роботи проф. Скиба М. Є.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 26 08 2024 р. № 60

2. Строк подання студентом роботи на кафедру _____

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики сонячних панелей.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Загальна будова СЕС, аналіз причин відмов. 2.Огляд методів діагностики ФЕМ, теоретичні відомості про принцип роботи. 3.Розробка експериментального приладу. Висновки. Перелік джерел посилання.Додаток

1.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуш 1. Пристрій зняття ВАХ. Пошкодження ФЕМ (А1). Аркуш 2. Пристрій зняття ВАХ. Основні методи вимірювань (А1). Аркуш 3. Пристрій зняття ВАХ. Модуль МК. Схема принципова. (А1). Аркуш 4 Пристрій зняття ВАХ. Схема принципова ключів та резисторів навантаження. (А1). Аркуш 5. Пристрій зняття ВАХ. Блок схеми (А1). Аркуш 6. Пристрій зняття ВАХ. Приклади ВАХ. (А1). Аркуш 7. Пристрій зняття ВАХ. Загальний вигляд (А1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Загальна будова СЕС, аналіз причин відмов.	до 28.10.24р.	
2. Огляд методів діагностики ФЕМ, теоретичні відомості про принцип роботи.	до 15.11.24р.	
3. Розробка експериментального приладу. Проведення розрахунків та тестових випробувань.	до 17.11.24р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 12.12.24р.	

Студент


Підпис

В. В. Ткачук
Ініціали, прізвище

Керівник роботи






Підпис

М. Є. Скиба
Ініціали, прізвище

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. ЗАГАЛЬНА БУДОВА СЕС, АНАЛІЗ ПРИЧИН ВІДМОВ	8
1.1 Загальна будова СЕС.....	8
1.2 Експлуатація СЕС, їх надійність. Виявлення відмов	12
1.3 Висновки до першого розділу.....	16
2. ОГЛЯД МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ФЕМ. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПРИНЦИП РОБОТИ	17
2.1 Огляд методів виявлення пошкоджень ФЕМ.....	17
2.2 Математична модель ФЕМ.....	25
2.2.3 Висновки до другого розділу	27
3. РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПРИЛАДУ	28
3.1 Існуючі методи зняття ВАХ ФЕМ.....	28
3.2 Структурна схема приладу.....	33
3.3 Вибір елементної бази та схемних рішень.....	34
3.4 Висновки до третього розділу.....	58
Висновки.....	60
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	62
Додаток 1	66

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата				
Виконав		Ткачук			Розробка приладу для зняття вольтамперної характеристики фотовольтаїчних панелей побутової сонячної електростанції Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Скиба					4	74
Н.контр.					ХНУ гр. ЕТМ-23-1			
Затвер.		Неймак						

ВСТУП

Екологічні проблеми, та проблеми, що виникають в енергетичній галузі останнім часом, спонукають до більш ощадливого використання традиційних (викопних) джерел енергії.

Не є таємницею, що викопні ресурси використовуються людством зі значно більшою швидкістю, ніж їхнє природне відтворення. Це означає, що такі ресурси в недалекому майбутньому вичерпаються, що може призвести до глобальної енергетичної кризи.

Також використання традиційних видів енергії призводить до викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище. Це в свою чергу призводить до погіршення екологічної обстановки, зміну клімату в світі.

Тому Україна, як більшість країн світу, приєдналась до Кіотського протоколу, ратифікувавши його 4 лютого 2004 року [1]. Цей протокол зобов'язує зменшити викиди парникових газів до рівня 1990 року.

Україна має великий потенціал для розвитку сфери альтернативних джерел енергії, оскільки географічне розташування один з важливих аспектів для розвитку цієї галузі. На території нашої держави достатньо сонячного ресурсу, щоб забезпечувати частину енергетичних потреб. В цілому, Україну можна розділити на 4 регіони за рівнем інтенсивності сонячної радіації – Південний схід, Південь, Захід та Центр.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

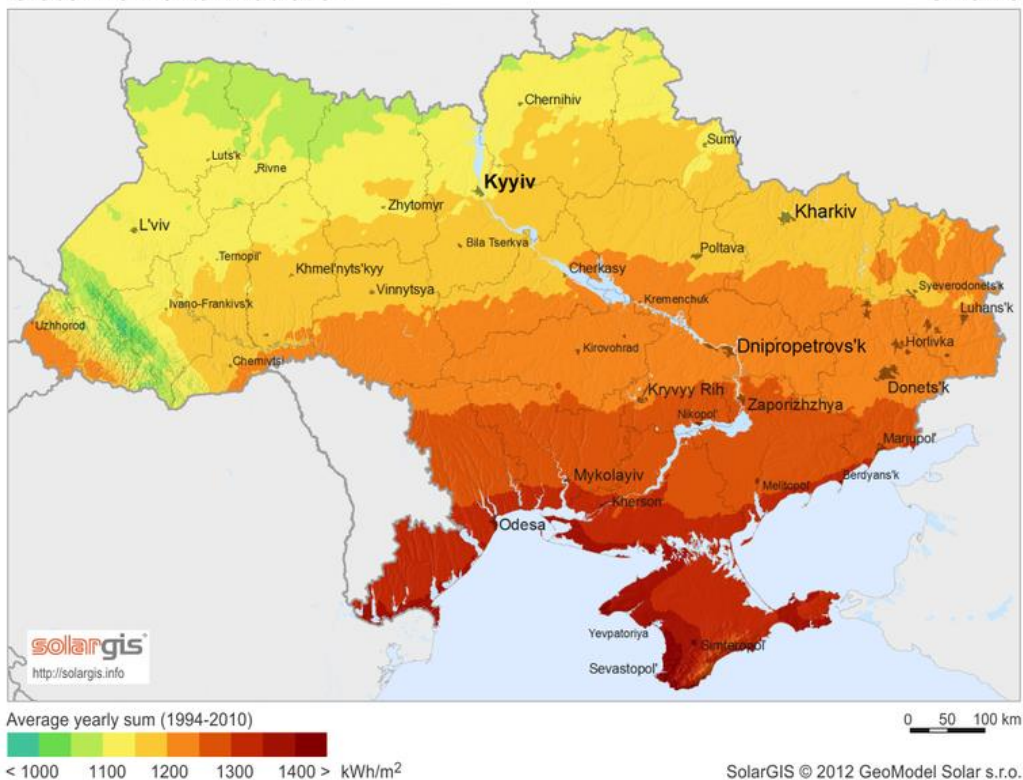


Рисунок 1 – Розподіл сонячних днів на рік по регіонах України.

На рисунку 1 можемо чітко бачити інформацію щодо кількості сонячних днів в рік по кожному з регіонів. Тобто, Україна має досить великий потенціал альтернативної енергії у вигляді сонячного випромінювання.

Варто також зазначити, що альтернативні джерела енергії набирають популярності й серед власників приватних будинків та підприємств, оскільки вони усвідомлюють цінність та переваги використання таких технологій. Для прикладу, в 2020 році 15 тисяч українців встановили сонячні установки, а станом на кінець 2021 року це число вже становило ~ 45 тис.

В останній період через агресію з боку РФ, яка супроводжується, зокрема, руйнуванням об'єктів енергетичної інфраструктури, зменшилась загальна потужність генерації, що встановлена на території України. Це призвело до дефіциту електро енергії (далі е/е). Як наслідок, ПАТ «Укренерго», як оператор системи передачі е/е, змушене доводити ліміти споживання, відповідно оператори системи розподілу (обленерго) застосовують погодинні графіки

відключень. Тому споживачі е/е змушені шукати вихід із ситуації, що склалась, часто звертаючи свою увагу на альтернативні джерела енергії.

Також, зі зростанням ціни на е/е (зокрема на ринку на добу наперед) стає економічно вигідно використовувати установки, що використовують альтернативні джерела енергії для власного споживання на підприємствах. Часто перевага надається СЕС як таким, що мають невелику вартість експлуатації.

Хмельниччина не є винятком. Так, зокрема, як повідомляється у [2], Хмельницька обласна інфекційна лікарня встановила сонячну електростанцію для власного споживання потужністю 30 кВт. Загалом, міського голови Олександра Симчишина, Хмельницька інфекційна лікарня - це шостий медичний заклад, де встановлені сонячні панелі.

Таким чином, кількість СЕС невпинно зростає. Зростає й потреба у вчасному виявленні несправностей, відмов, відповідно – діагностиці обладнання, локалізації місць пошкоджень та їх усунення.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1. ЗАГАЛЬНА БУДОВА СЕС, АНАЛІЗ ПРИЧИН ВІДМОВ

1.1 Загальна будова СЕС

Сонячні електростанції існують різних потужностей – від одиниць ват до великих промислових, потужністю десятки мегават.

Проте, усі вони мають приблизно однакову структурну схему. До складу СЕС входять такі основні компоненти:

- фотоелектричні модулі (ФЕМ);
- інвертор(и).

ФЕМ – це необхідний електричний модуль в складі СЕС, який служить для перетворення сонячного випромінювання в електричний струм за допомогою фотоелектричного ефекту [3]. На виході ФЕМ отримують постійний струм певної напруги.

ФЕМ складаються з окремих комірок (рисунок 1.1), які є основою усього модуля. Кількість комірок та схема їх з'єднання у модулі залежить величини потужності ФЕМ.

ФЕМ можуть бути полікристалічними, монокристалічними та аморфними. Останні можуть бути плівковими та гнучкими [4].

Напруга на виході ФЕМ залежить від кількості комірок, схеми їх з'єднання та навантаження, що під'єднане до модуля. Частково напруга залежить від інтенсивності сонячної радіації, що падає на ФЕМ: при більшій інтенсивності напруга зростає.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

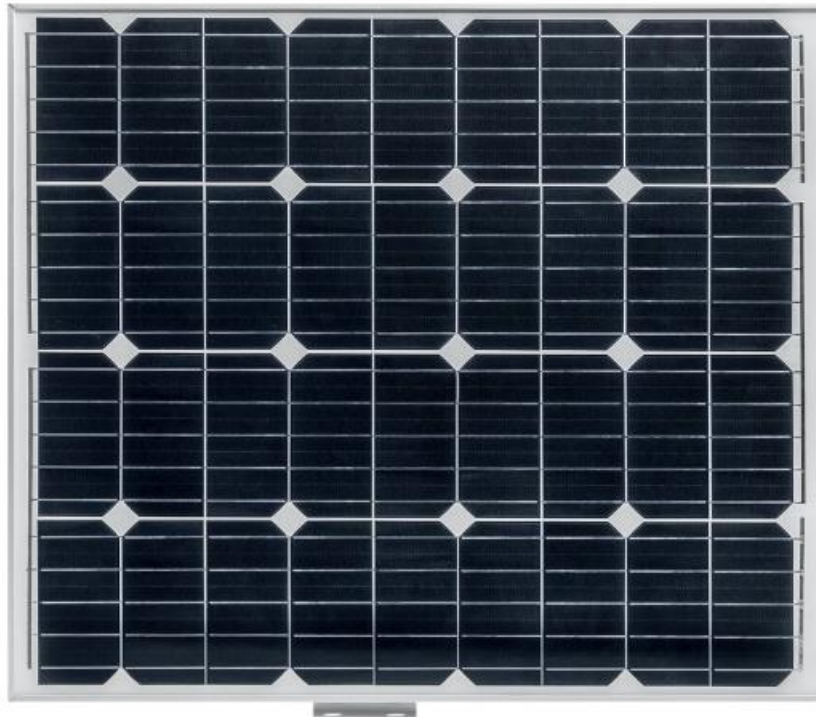


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд сонячної панелі. Видно окремі комірки.

Інвертор – тип електричного перетворювача, який перетворює вихідний постійний струм фотоелектричної сонячної панелі на змінний струм певної частоти та напруги, який може подаватися в комунальну електричну мережу або використовується місцевою електромережею. Це дуже важлива складова сонячної електростанції, яка дозволяє використовувати звичайне обладнання, що працює від змінного струму, у поєднанні із сонячними панелями та (або) акумуляторами — на постійному струмі [5].

Інвертори та СЕС, які побудовані на цих інверторах умовно можна розділити на три типи [5]:

- мережеві інвертори (інвертори керовані мережею);
- автономні інвертори;
- гібридні інвертори.

Мережеві інвертори, так як це пристрої, що керуються самою мережею, працюють лише при наявності підключеної мережі (рисунок 1.2). Уся вироблена е/е надсилається в загальну мережу, споживання е/е може відбуватись як

власником мережевої СЕС, так і іншими споживачами. Такий тип інверторів є найпоширенішим при будівництві СЕС відносно великої потужності (зазвичай більше 10-20 кВт).

З переваг такого типу інверторів можна віднести відсутність апаратури синхронізації із зовнішньою мережею, що спрощує та здешевлює виріб.

Генерація е/е таким типом інверторів можлива лише за наявності достатнього сонячного випромінювання. Тобто, вночі генерація неможлива. Також при наявності снігового покриву на панелях, щільній хмарності генерація теж може припинитися або сильно знизитися. Таким чином, недоліком такого типу інверторів є те, що за відсутності електропостачання навіть при достатньому рівні сонячної радіації виробництво е/е припиняється. В результаті, використання такого типу інверторів для створення автономної (резервної) системи живлення є неможливим або складним, що передбачає встановлення додаткового обладнання (систем накопичення е/е, додаткових генераторів та ін.).

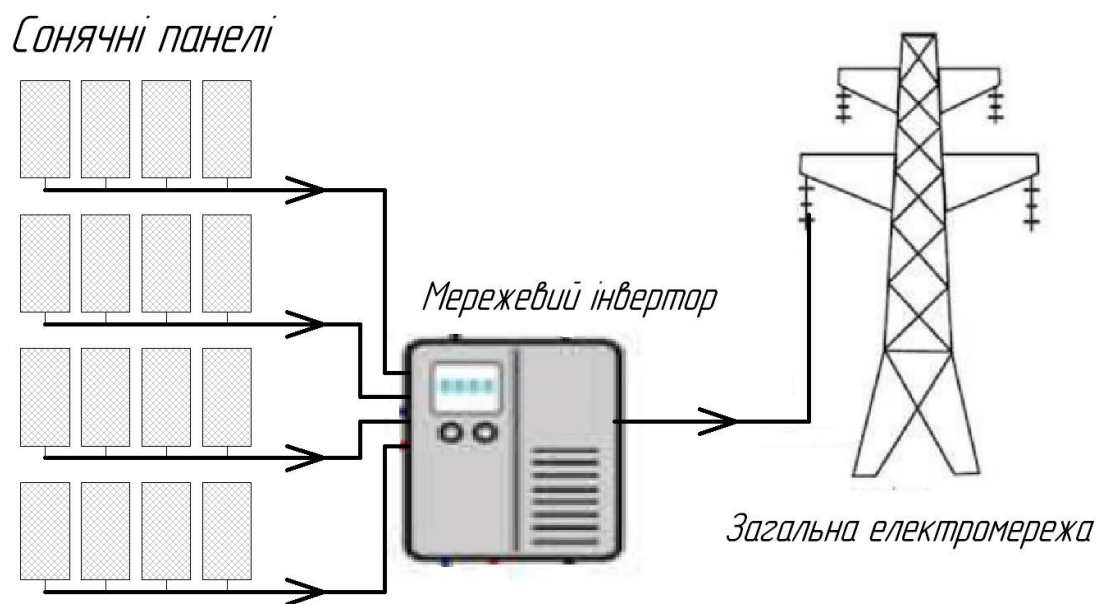


Рисунок 1.2 – Схема підключення мережевого інвертора.

Автономні інвертори відрізняються від мережевих тим, що вони (як зрозуміло з назви) працюють автономно, без підключення до електромережі (рисунок 1.3). Споживання е/е відбувається лише власником СЕС. Такі інвертори повинні мати у своєму складі систему накопичення е/е (акумулятори), що

дозволяє використання е/е в будь-яку пору доби при достатньому рівні накопиченої енергії. Це можна віднести до переваг цього типу інверторів.

Недоліками є те, що в порівнянні з мережевими інверторами, їх вартість більша через більш складну будову обладнання. Крім того, габаритні розміри такого обладнання більші через наявність акумуляторів, з'являються певні додаткові вимоги до місця встановлення.

Використовуються автономні інвертори переважно у районах, де відсутня можливість під'єднання до електромережі (наприклад, у гірській місцевості).

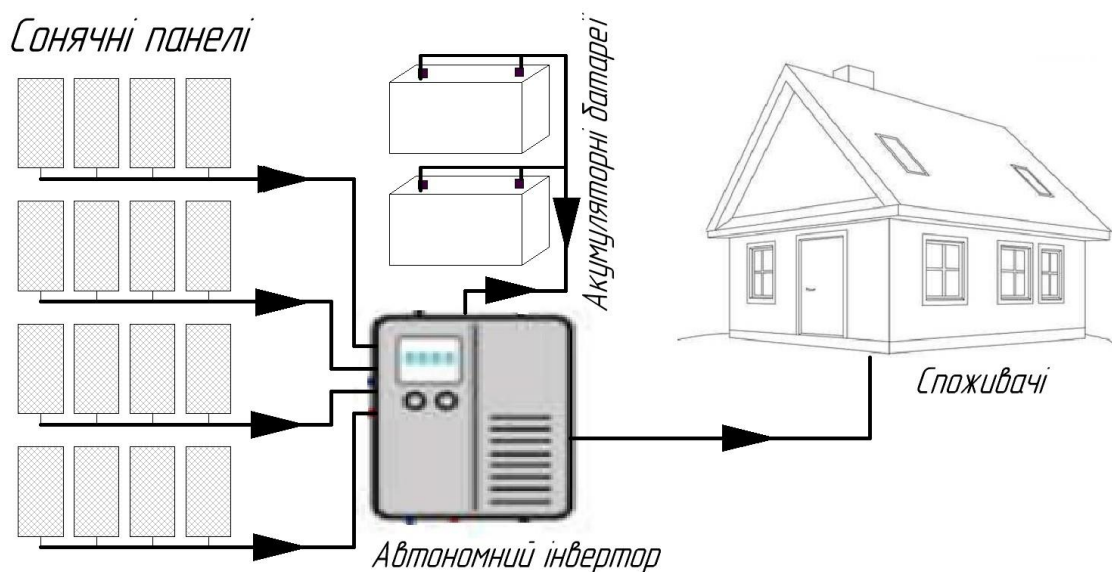


Рисунок 1.3 – Схема підключення автономного інвертора.

Гібридні інвертори поєднують переваги та недоліки як мережових, так і автономних типів. Вони можуть робити відпуск е/е в мережу, живлячи енергією інших споживачів, що під'єднані до загальної електромережі (рисунок 1.4). Інвертори такого типу також можуть працювати в будь-яку пору доби завдяки вбудованій системі накопичення е/е, віддаючи споживачеві накопичену енергію.

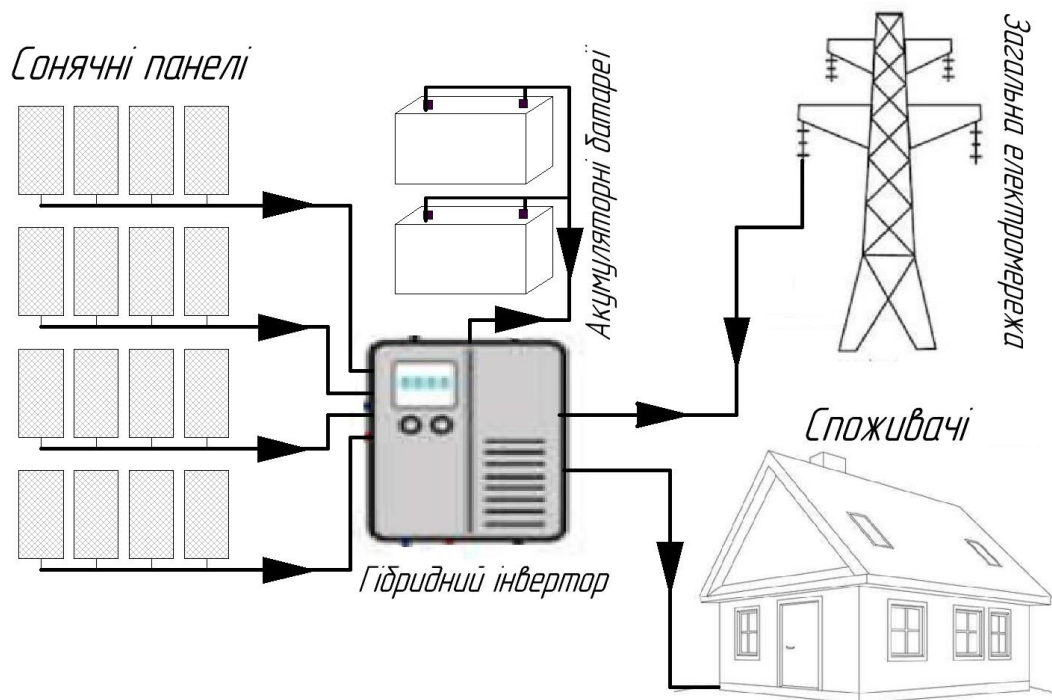


Рисунок 1.4 – Схема підключення гібридного інвертора.

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що СЕС – це установка або комплекс обладнання для перетворення сонячного випромінювання в е/е певних параметрів. Це не є установкою, що виробляє е/е з нічого. Фундаментальний закон фізики збереження енергії ніяким чином не порушується.

В процесі експлуатації СЕС, точно так само як з іншим обладнанням, з часом виникають відмови у працездатності та функціонування.

1.2 Експлуатація СЕС, їх надійність. Виявлення відмов

Відповідно до [8] надійність – комплексна властивість, що містить в собі безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збережездатність.

Надійність електроенергетичних систем – також комплексна властивість, що включає в себе безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, збережездатність, стійкоздатність, режимну керуваність, живучість і безпеку.

Сучасна нормативна база України з питань надійності ґрунтується на [8]. Основні положення цього документу відповідають ГОСТ [7] прийнятим за часів Радянського Союзу.

Причинами відмов обладнання та устаткування є ушкодження або (та) несправності.

Під ушкодженнями в енергетиці звичайно розуміють руйнування устаткування, поломку деталей, порушення цілості електричних і магнітних ланцюгів, псування ізоляції.

Під несправностями – розрегулювання механізмів без руйнування і псування та ін. Ушкодження і несправності, в свою чергу, можуть виникнути через дефекти устаткування, тобто через:

- невідповідність його встановленим вимогам при випуску з заводу – виготовлювача (брак продукції);
- аварійні (нерозраховані) впливи навколишнього середовища;
- неправильне транспортування, монтаж, обслуговування і ремонт [8].

Для своєчасного виявлення відмов та ушкоджень на СЕС використовуються різні системи та методи.

На СЕС потужністю більше сотні кіловат (які генерують у мережу середньої напруги) використовують систему релейного захисту (РЗ) та телеметрії. РЗ здійснює безперервне стеження за станом складових електроенергетичної системи і відповідає на виникнення пошкоджень та незадовільних режимів роботи на стороні змінного струму.

У разі виникнення пошкоджень, РЗ повинен виявити несправну ділянку і відокремити її від електричної мережі, шляхом впливу на первинне комутаційне обладнання, призначене для розмикання струмів аварійного режиму [8]. При спрацюванні РЗ на обладнанні генерується помилка (засвічується відповідний світлодіод).

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 13
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 1.5 зображено пристрій МРЗС-05Л. На лицьовій панелі винесено індикаторні світлодіоди, що сигналізують про тип помилки (позначені цифрами 1 – 6). По типу помилки можна орієнтовно визначити причину відмови.

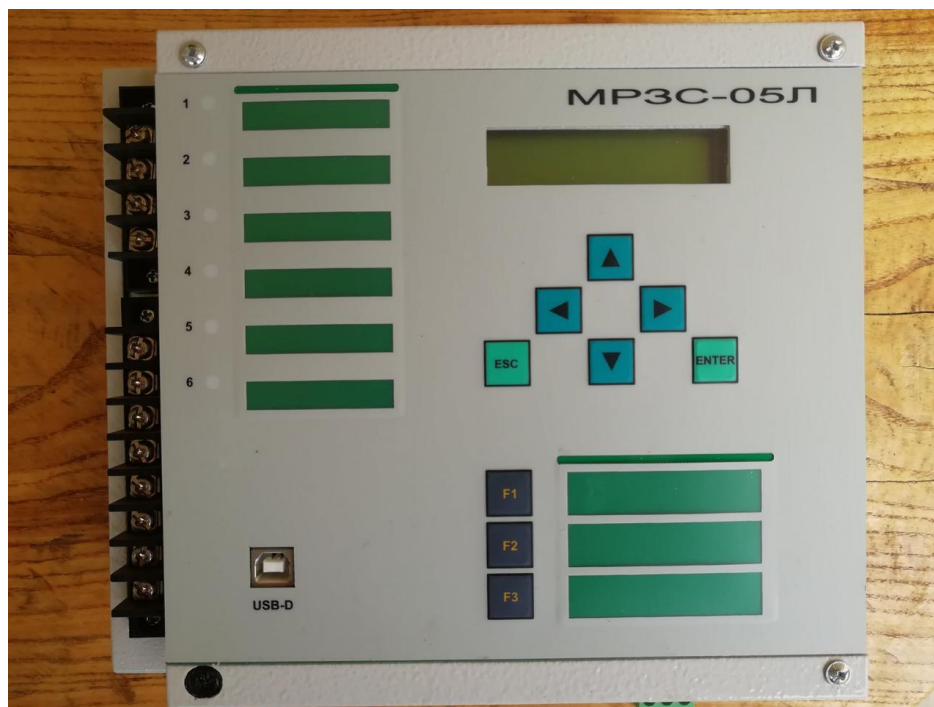


Рисунок 1.5 – Мікропроцесорний пристрій системи РЗ МРЗС-05Л.

Система телеметрії безперервно вимірює певні параметри мережі, наприклад, напругу по кожній фазі, силу струму, частоту тощо. Вимірні дані можуть відображатися в режимі реального часу на робочому місці оператора, архівуються, можуть надсилатись до оператора системи передачі, розподілу. Обслуговуючий персонал, аналізуючи дані телеметрії, при виникненні відмови обладнання може встановити імовірну причину такої відмови.

Сучасні інвертори – досить складне устаткування, яке у своєму складі має систему діагностики. При відхиленні параметрів роботи інверторів за встановлені межі, генерується помилка. В залежності від типу помилки, інвертор або взагалі припиняє генерацію, або переходить в аварійний режим роботи.

На рисунку 1.6 наведено приклад помилок інверторів фірми HUAWEI. З наведеного прикладу видно, що інвертори ktp6.87 та ktp6.88 не працювали через спрацювання автоматичного вимикача на стороні змінного струму.

Alarm Severity	Alarm Name	Device Type	Device Name	PV Plant	Generated On	Cleared On	Clear Type
▲ Major	Grid Loss	SUN2000	ktp6.88	SPP Ivashkivska	2024-06-11 16:08:06	2024-06-11 16:20:23	Automatic clear
▲ Major	Grid Loss	SUN2000	ktp6.87	SPP Ivashkivska	2024-06-11 16:08:06	2024-06-11 16:20:22	Automatic clear
▲ Major	Grid Undervoltage	SUN2000	ktp6.87	SPP Ivashkivska	2024-06-11 13:03:33	2024-06-11 16:08:05	Automatic clear
▲ Major	Grid Undervoltage	SUN2000	ktp6.88	SPP Ivashkivska	2024-06-11 13:03:32	2024-06-11 16:08:05	Automatic clear
▲ Major	Grid Overvoltage	SUN2000	ktp6.88	SPP Ivashkivska	2024-06-11 13:03:32	2024-06-11 13:03:36	Automatic clear
▲ Major	Grid Overvoltage	SUN2000	ktp6.87	SPP Ivashkivska	2024-06-11 13:03:32	2024-06-11 13:03:37	Automatic clear

Рисунок 1.6 – Приклад помилок системи моніторингу інверторів HUAWEI.

Також існує можливість контролювати параметри на стороні постійного струму, тобто роботу масиву ФЕМ (рисунок 1.7). На рисунку параметри роботи стрінгів виведено в окреме поле (таблиця з параметрами PV), де зазначено параметри напруги та сили струму по кожному стрінгу.

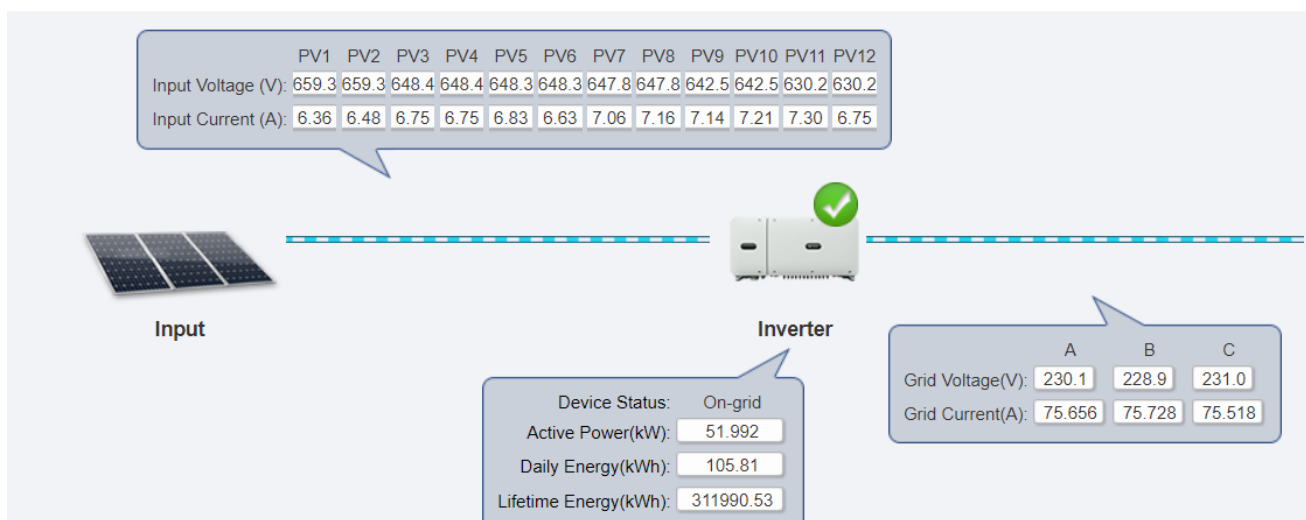


Рисунок 1.7 – Параметри роботи інвертора HUAWEI.

Оскільки тип інвертора стрінговий, то ФЕМ, що підключені до інвертора, поділені на стрінги (групи). ФЕМ у стрінгу включені послідовно. В одному стрінгу 22 ФЕМ. Таких стрінгів є 12, які позначені як PV1..PV12. Для кожного стрінга відображається напруга та сила струму. В силу конструктивних особливостей інверторів, значення напруги вимірюється для пари стрінгів. Тому значення, наприклад, для PV5 та PV6 є ідентичними. Сила струму для кожного стрінга вимірюється окремо.

Як можна бачити з рисунка 1.7, напруга та сила струму для кожного стрінга відрізняється, але не рівна 0. Тому можна зробити висновок, що усі стрінги працюють, явних відмов немає. Проте, дати відповідь чи усі ФЕМ працюють в оптимальному режимі - неможливо. Більше того, засоби діагностики, які є в інверторі не дозволяють контролювати окремий ФЕМ. Тому проблема діагностики ФЕМ на СЕС є актуальною.

1.3 Висновки до першого розділу

У першому розділі розглянуто в загальному будову СЕС. Коротко розглянуто можливі несправності, що можуть виникати в процесі експлуатації. Показано, що відмови можуть траплятись як на стороні змінного, так і на стороні постійного струму. Дано обґрунтування щодо необхідності виявлення таких відхилень в роботі СЕС та якнайшвидшого їх усунення.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2. ОГЛЯД МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ФЕМ. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПРИНЦИП РОБОТИ

2.1 Огляд методів виявлення пошкоджень ФЕМ

Як було сказано вище, ФЕМ – це модуль, який перетворює сонячне випромінювання в електричний струм. Модулі, що входять до складу СЕС, у переважній більшості включені послідовно, у так звані стрінги. Кількість стрінгів, які підключені до інвертора визначається технічними характеристиками конкретної моделі інвертора.

Наприклад, для СЕС, що використовується у домогосподарстві потужністю 30 кВт (інвертор HUAWEI 30-KTL-M3), таких стрінгів є 8. Якщо використовуються ФЕМ TALESUN TP660P-275, то в кожному стрінгу буде використано 22 ФЕМ. В сумі, при використанні цієї моделі інвертора та обраних панелей, буде $22 \times 8 = 176$ ФЕМ.

Практично всі стрінгові інвертори дозволяють знімати вольт-амперну характеристику (ВАХ) стрінгів, дозволяючи перевіряти їх роботу та робити висновки про відхилення параметрів від номінальних. Разом з тим, без спеціального додаткового обладнання виявити відхилення параметрів кожної окремої ФЕМ, що входять у склад стрінгу, є неможливим.

При виході з ладу ФЕМ, відхиленні параметрів від номінальних, потужність генерації СЕС буде менша, ніж очікується. Відповідно – дохід від продажу е/е буде меншим. Через особливість схеми послідовного з'єднання локалізація місця пошкодження при значній кількості ФЕМ становить складну задачу і потребує тривалого часу для виявлення місця пошкодження навіть у випадку СЕС, що встановлена у домогосподарстві.

Якщо розглядати дахову СЕС, то при виході з ладу одного або кількох ФЕМ крім зменшення потужності генерації існує ризик виникнення пожежі (рисунок 2.1).

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 17
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.1. – Пожежа на фабриці в Нордерней, Німеччина [10].

Пожежа, звісно, завдасть значно більших збитків, ніж зниження рівня генерації. Таким чином – контроль за станом ФЕМ на СЕС має велике значення, що впливає на кількість виробленої е/е та безпеку.

Існує багато методів контролю стану ФЕМ [12], [13]. Найпоширенішими є такі:

- візуальне обстеження;
- обстеження за допомогою тепловізора;
- вимірювання напруги холостого ходу та струму короткого замикання;
- електролюмініцентне обстеження;
- метод аналізу вольт-амперної характеристики ФЕМ та інші.

Візуальне обстеження це досить швидкий метод, який дозволяє виявити тріщини, сколи захисного скла, деформацію рам ФЕМ, відшарування підкладки, перегорання з'єднувальних провідників між комірками ФЕМ та ін. Приклад пошкодження представлено на рисунку 2.2.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

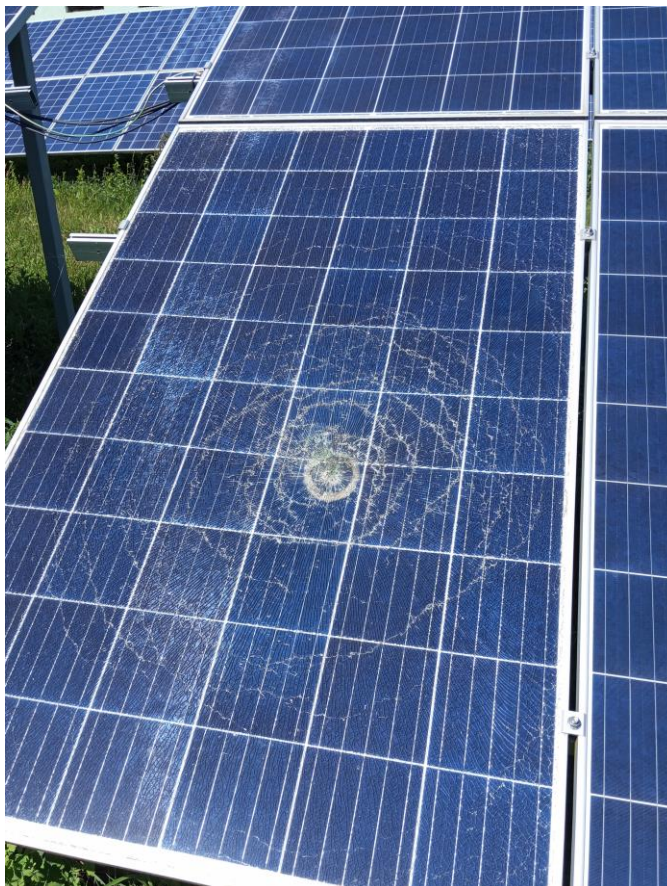


Рисунок 2.2. – Пошкодження захисного скла ФЕМ (удар каменем).

Таке обстеження не потребує допоміжних приладів та устаткувань, але не дозволяє виявити пошкодження ФЕМ без явних візуальних ознак.

Обстеження за допомогою тепловізора більш досконале, порівняно з візуальним обстеженням. Дозволяє виявити погані контакти, коротко замкнені байпасні діоди, комірки ФЕМ (рисунок 2.3). В місцях перелічених дефектів спостерігається підвищена чи понижена температура, що фіксується тепловізором.

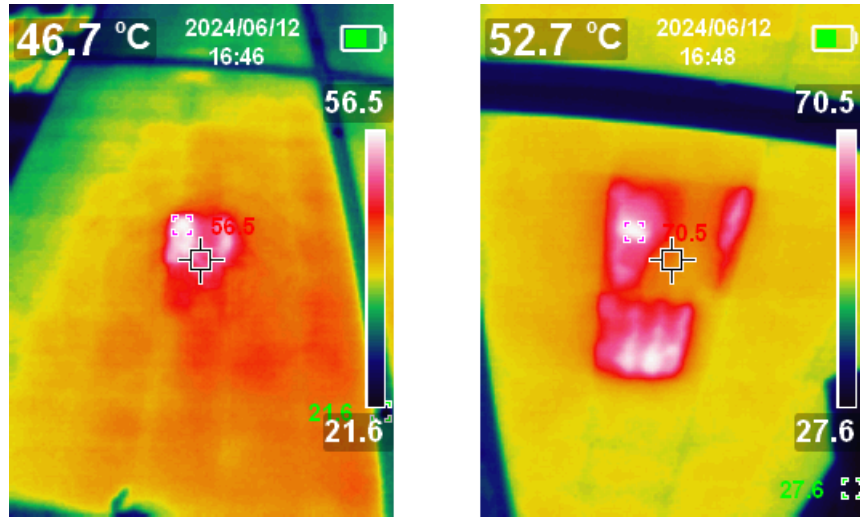


Рисунок 2.3. – Тепловізійне зображення пошкодженої ФЕМ, що зображена на рисунку 2.2 (зліва - лицьова, справа - зворотня сторона ФЕМ).

Метод вимірювання напруги ХХ та струму КЗ полягає в тому, що за допомогою вольтметра та амперметра вимірюються напруга та струм відповідно. Виміряні значення порівнюються зі значеннями, які надає виробник ФЕМ у технічних характеристиках та робиться висновок про наявність чи відсутність відхилень від номінальних значень.

Цей метод дозволяє виявити обриви, короткі замикання всередині ФЕМ. Метод досить простий в реалізації, не потребує якогось специфічного обладнання. Недоліки – залежність виміряних значень від величини інтенсивності сонячного освітлення та значний час для отримання результатів.

При електролюмінісцентному дослідженні [12], [15] на ФЕМ подається постійна напруга від зовнішнього блоку живлення.

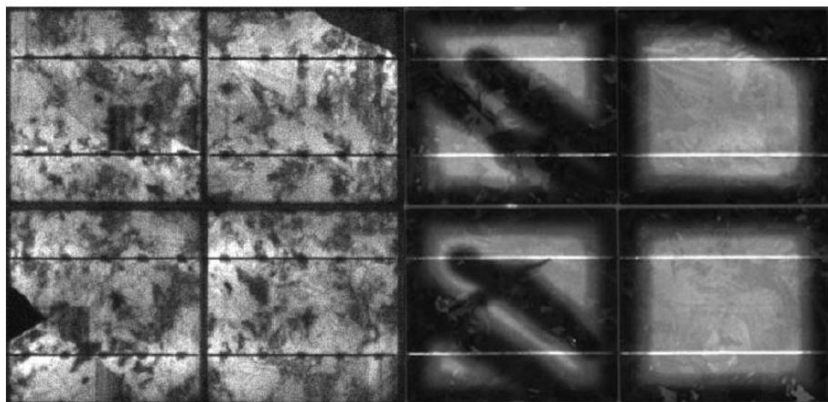


Рисунок 2.4. – Зображення пошкоджень ФЕМ при електролюмінісцентному дослідженні.

В результаті у ФЕМ виникає випромінювальна рекомбінація електронів і дірок. Випромінювання ФЕМ можна фіксувати за допомогою спеціального обладнання (рисунок 2.4). Розглянувши загальний вигляд панелі у світлі, яке випромінюється, робиться висновок про наявність чи відсутність пошкоджень панелі, яка досліджується.

Оскільки випромінювання має досить низьку інтенсивність, то таке тестування потрібно проводити в затемненому середовищі. Тому цей метод більше підходить для лабораторних досліджень і вимагає тривалого часу досліджень. Проте, метод дає досить велику точність результатів досліджень, дозволяє виявити пошкодження, які іншими методами виявити або неможливо, або вкрай важко. В переважній більшості цей метод використовується на виробництві для вихідного контролю ФЕМ. На практиці цей метод застосувати досить складно через необхідність демонтажу ФЕМ.

Метод дослідження ВАХ полягає в знятті значень напруги та струму при зміні величини навантаження (рисунок 2.5), що під'єднане до ФЕМ та аналізу отриманих значень.

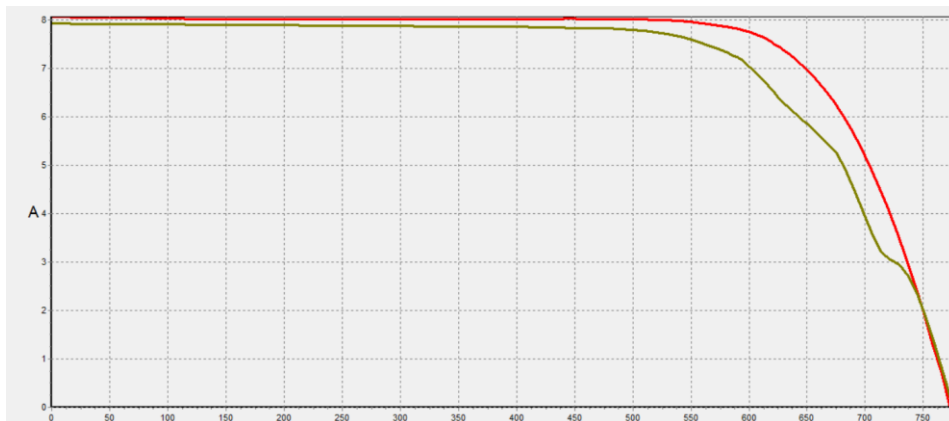


Рисунок 2.5. – Приклад ВАХ стрінгів. Червона крива – у стрінгу відсутні пошкоджені ФЕМ, оливкова – у стрінгу присутня пошкоджена ФЕМ, яка зображена на рисунку 2.2.

Метод зняття ВАХ [14] дозволяє виявити пошкодження в стрінгах такі, як пошкодження ФЕМ, поганий контакт, КЗ в комірках ФЕМ, затінення, має достатньо велику точність та дозволяє з досить великою швидкістю отримати результати.

ВАХ, що зображені на рисунку 2.5, побудовані по отриманих значеннях напруги та струму за допомогою інверторів HUAWEI (вбудована функція інвертора).

Як було вказано вище, інвертор не має фізичної змоги знімати показники напруги та сили струму кожної окремої ФЕМ без встановлення додаткового обладнання. Тому, використовуючи отримані значення з інвертора, можемо виявити лише стрінг з підозрою на пошкодження. Для виявлення конкретного ФЕМ, що має пошкодження чи відхилення, потрібно проводити тести усіх модулів, що включені у стрінг кожного окремо.

З огляду на те, що пристрій, який буде розроблятися, буде призначено для зняття ВАХ, зупинюсь на цьому методі більш детально.

Як вказано у [14], по вигляду ВАХ можна визначити такі пошкодження (відхилення) ФЕМ:

- часткове затінення;

- пошкодження електричного з'єднання між окремими комірками;
- КЗ однієї чи кількох комірок ФЕМ;
- пошкодження байпасного діода ФЕМ та інші.

У [14] подано приклади ВАХ ФЕМ, в яких можливі відхилення та пошкодження. Розгляну їх.

На рисунку 2.6 зображено ВАХ ФЕМ. В цьому випадку відхилень від ідеальної форми графік не має. Проте, струм КЗ ФЕМ менший, ніж заявлений виробником. Можливими причинами такого може бути:

- деградація ФЕМ;
- забруднене захисне скло ФЕМ;
- недостатня освітленість при знятті ВАХ.

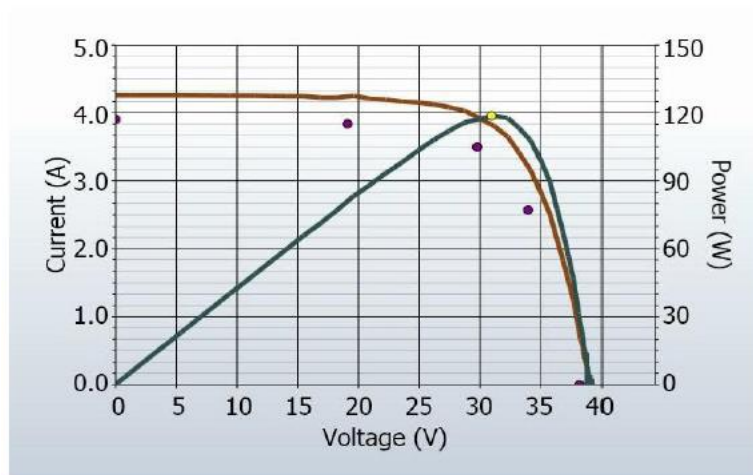


Рисунок 2.6 Приклад ВАХ. Струм КЗ ФЕМ менший, ніж очікуваний.

На рисунку 2.7 зображено графік ВАХ на якому нахил в районі, близькому до режиму КЗ більший, ніж в ідеальному випадку (діапазон 0-30 В).

Можливі причини:

- існують короткозамкнені комірки, які шунтують ФЕМ.

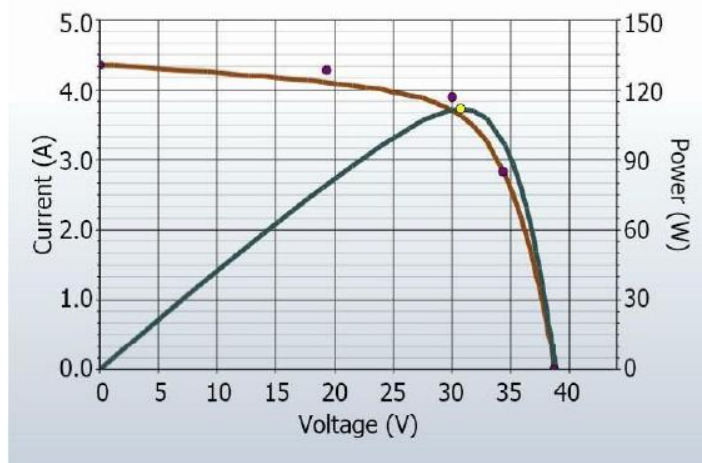


Рисунок 2.7 Крива ВАХ має більший нахил, ніж очікується.

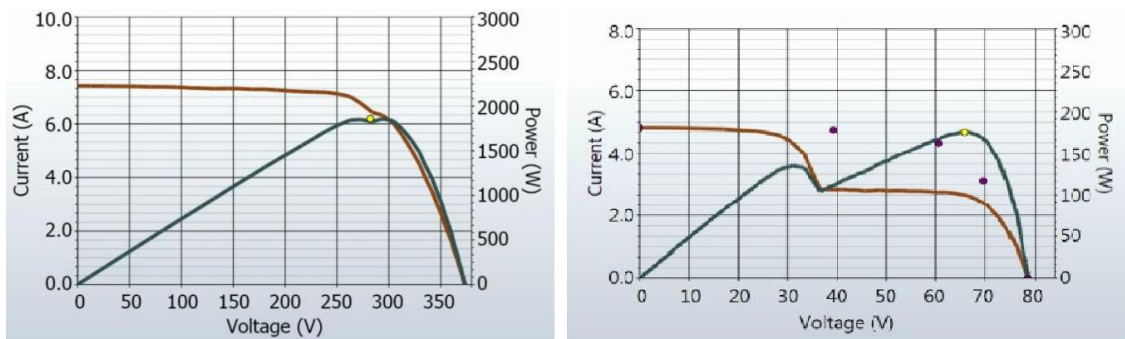


Рисунок 2.8 Приклади ВАХ зі «сходинкою».

На рисунку 2.8 зображено ВАХ, на якій спостерігається «сходинка». Цей випадок показує явне відхилення графіка від ідеального. Причинами такого випадку може бути наступне:

- ФЕМ частково затінена;
- у ФЕМ присутні пошкоджені комірки;
- пробитий один з байпасних діодів.

Як можна бачити, метод зняття ВАХ ФЕМ та аналіз отриманих результатів дає можливість визначити характер пошкоджень ФЕМ або імовірну причину відхилень.

Визначивши ФЕМ, в якому спостерігається відхилення від норми, можна перевірити байпасні діоди, які розміщені в розподільній коробці на тильній стороні, цілісність з'єднувальних провідників та конекторів, дає змогу

прийняти рішення про можливість та доцільність ремонту (заміни) пошкоджених елементів та експлуатацію після ремонту в подальшому. В іншому разі приймається рішення про заміну ФЕМ на нову.

2.2 Математична модель ФЕМ.

Кожна ФЕМ складається з сукупності елементарних фотоелектричних перетворювачів (комірок), які з'єднуються певним чином (паралельні та послідовні електричні ланцюги). Кожна елементарна комірка – це напівпровідниковий фотоелектричний пристрій, який перетворює енергію сонячного світла в електричну. Тобто, комірку, як складову ФЕМ, можна назвати фотоелектричним перетворювачем.

Фотоелектричний перетворювач можна представити еквівалентною схемою заміщення [15]

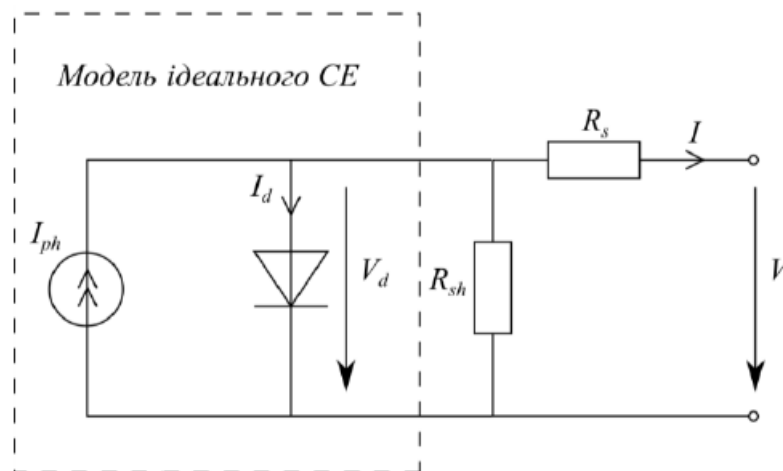


Рисунок 2.9 Еквівалентна схема заміщення фотоелектричного перетворювача.

Джерело фотоструму створює на виході перетворювача струм I_{ph} напругою V . Згідно [15], залежність струму I описується виразом

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{kTA} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

де $q = 1,602 \times 10^{-19}$ – заряд електрона;

$k=1,381 \times 10^{-23}$ – постійна Больцмана;

A – діодний коефіцієнт ідеальності;

T – температура фотоелектричного перетворювача;

I_{ph} – струм насичення.

Графік залежності струму, що описується (1) зображено на рисунку

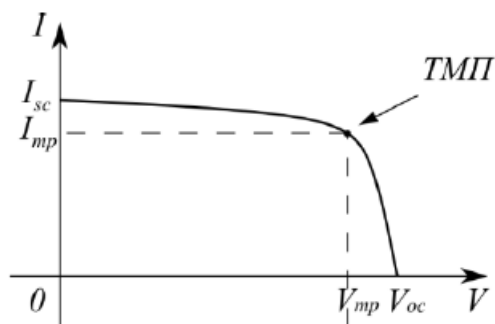


Рисунок 2.10 Залежність струму фотоелектричного перетворювача від напруги. Показана точка максимальної потужності (ТМП).

Аналізуючи графік, що зображено на рисунку 2.10, робимо висновок, що існує точка максимальної потужності перетворювача (ТМП).

Математична модель (1) містить певну кількість невідомих параметрів. До таких можна віднести R_s та R_{sh} . Усі параметри визначити відразу досить складно, в багатьох випадках - неможливо. Тому в інженерних розрахунках спочатку роблять припущення, що $R_s=0$ та $R_{sh}=\infty$. У цьому випадку спрощується вираз залежності струму (1) фотоелектричного перетворювача:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{mV_T}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

У вираз (2) введено параметр m , який для полікристалічного перетворювача рівний 1,3. Інші невідомі параметри, такі як I_{ph} та I_s можуть визначатися в режимі холостого ходу, короткого замикання та у точці максимальної потужності.

Виробники ФЕМ зазначають для своїх виробів значення струму КЗ I_{sc0} , напруги ХХ V_{sc0} , а також значення напруги та струму у ТМП. Ці параметри

визначаються при лабораторних вимірах за стандартних умов (температура ФЕМ 25 °С, потужність світлового потоку 1 кВт/кв.м.

В режимі КЗ напруга на виході ФЕМ буде рівною 0, а струм I_{sc0} . Підставивши в (2) $V=0$ та $I=I_{sc0}$, отримаємо

$$I_{ph0} \approx I_{sc0} \quad (3)$$

Тому, у першому наближенні, можна вважати, що фотострум ФЕМ дорівнює струму короткого замикання при стандартних (тестових) умовах.

Як правило, при будівництві СЕС використовуються ФЕМ одного виробника. Значить, визначивши невідомі параметри, що входять у (1) та (2), можна отримати теоретичну ВАХ ФЕМ, яка тестується.

Порівнявши теоретичні результати та результати експериментальних вимірів, можна зробити висновок про те, чи ФЕМ має якісь внутрішні пошкодження чи ні.

2.2.3 Висновки до другого розділу

В другому розділі проведено короткий аналіз статистичних даних та показано, що альтернативні джерела енергії, зокрема сонячні електростанції, набувають все більшого розповсюдження. Зростання кількості СЕС відбувається як у промисловості, так і в приватному секторі.

Розглянуто в загальному можливі пошкодження ФЕМ та наслідки цих пошкоджень.

Обґрунтовано необхідність вчасного виявлення відхилень в роботі складових частин СЕС та розглянуто існуючі методи діагностики ФЕМ, їх переваги та недоліки.

На прикладах показано які саме відхилення в роботі ФЕМ існують та можливість їх виявлення за допомогою методу зняття ВАХ.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

3. РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПРИЛАДУ

3.1 Існуючі методи зняття ВАХ ФЕМ

Перед початком розробки приладу необхідно визначитись з методом, за яким працюватиме пристрій. Для цього розглянемо які існують методи зняття ВАХ ФЕМ, і визначимось який з цих методів для нас є найкращим.

Існує кілька методів зняття ВАХ ФЕМ [13], [17].

1) Метод резистивного навантаження

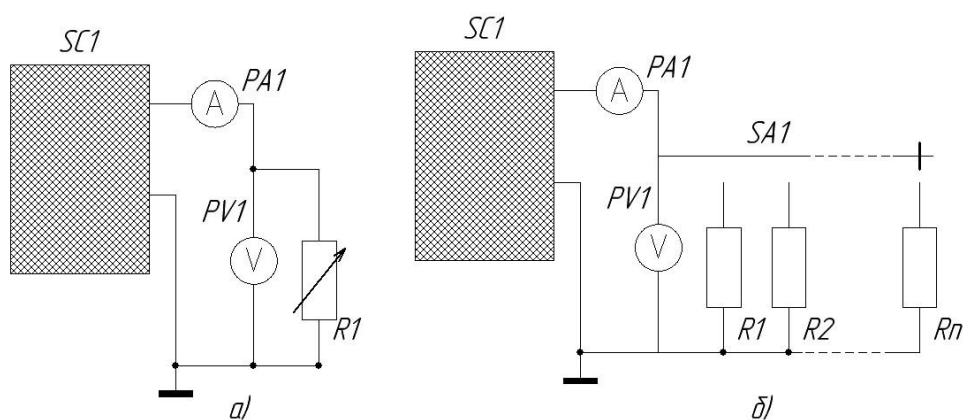


Рисунок 3.1 – Схема резистивного навантаження ФЕМ.

В цьому методі, змінюючи положення повзунка резистора R1 (рисунок 3.1 а)) або положення перемикача SA1 (рисунок 3.1 б)), змінюється величина опору, що під'єднаний в якості навантаження до ФЕМ. Це призводить до зміни споживаної потужності від ФЕМ: при зменшенні опору навантаження збільшується сила струму в електричному колі. Одночасно зі зміною потужності споживання зчитуються значення напруги з вольтметра PV1 та сили струму PA1, що під'єднані до ФЕМ, яка тестується. На основі вимірних значень будується ВАХ.

2) Електронне навантаження ФЕМ.

За допомогою блоку керування електронним ключем (рисунок 3.2) імітується робота змінного резистора (навантаження) за допомогою широтно-імпульсної модуляції.

Подібно до методу зі змінним резистором, зі зміною опору ключа VT1 змінюється величина навантаження, що під'єднане до ФЕМ. Одночасно зі зміною навантаження знімаються дані з амперметра PA1 та вольтметра PV1. На основі знятих даних будується ВАХ ФЕМ.

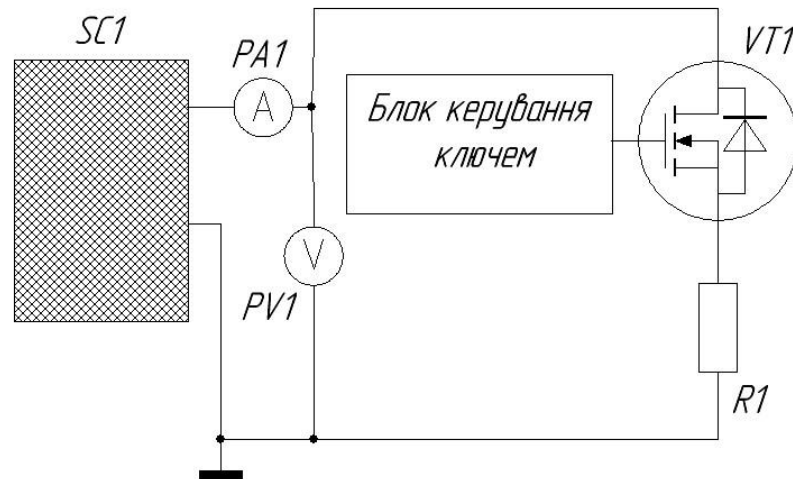


Рисунок 3.2. – Електронне навантаження ФЕМ.

3) Навантаження за допомогою DC/DC перетворювача.

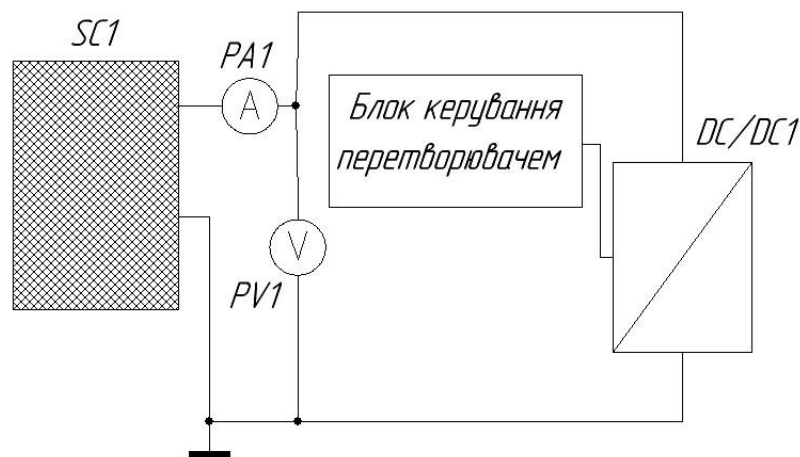


Рисунок 3.3. Використання DC/DC перетворювача в якості змінного навантаження.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

В цій схемі керування DC/DC перетворювачем відбувається за допомогою широтно-імпульсної модуляції сигналу, що імітує змінний резистор. Так само, як в попередніх методах, при зміні навантаження знімаються показники напруги та сили струму, що протікає по електричному колі. На основі цих значень будується ВАХ модуля.

4) Використання ємності в якості навантаження.

У цьому методі (рисунок 3.4) навантаженням ФЕМ виступає конденсатор достатньо великої ємності. Працює це наступним чином. В початковий момент конденсатор $C1$ розряджений, вимикачі $SA1$ та $SA2$ в розімкненому стані. Спочатку вимірюється напруга XX . Після цього замикається $SA1$, починається заряд конденсатора. Під час заряду конденсатора $C1$ з достатньо великою частотою робляться виміри напруги та сили струму.

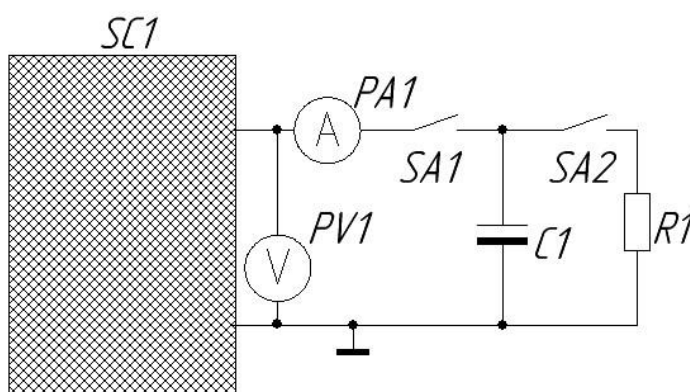


Рисунок 3.4 Ємність в якості навантаження ФЕМ.

По завершенні заряду конденсатора, $SA1$ розмикається. Після цього замикається $SA2$, підключаючи резистор $R1$, який служить для розряду конденсатора $C1$. Після завершення процесу розряду, ключ $SA2$ розмикається. Схема готова до наступних вимірів.

Усі методи мають свої переваги та недоліки. Проте, усі вони використовуються на практиці.

З перелічених методів, на мою думку, заслуговують уваги два – це методи з резистивним та ємнісним навантаженням.

Розгляну більш детально метод навантаження ФЕМ конденсатором.

У [18] подано вираз, за яким можна оцінити час заряду конденсатора:

$$T_{scan} = 1,1 \times \left[\frac{V_{oc}}{I_{sc}} \right] C \quad (4)$$

Звідси можна визначити ємність конденсатора, який необхідно використати для ємнісного методу зняття ВАХ, приймаючи час зняття ВАХ (сканування) близько однієї секунди:

$$C = \frac{T I_{sc}}{1,1 V_{oc}} \quad (5)$$

У технічних характеристиках ФЕМ TALESUN TP660P [23] вказано, що $I_{sc} = 7,42$ А, $V_{oc} = 38,7$ В. В такому разі ємність конденсатора, який необхідно використати, становитиме

$$C = \frac{T I_{sc}}{1,1 V_{oc}} = \frac{1 * 7,42}{1,1 * 38,7} \approx 0,174 \text{ Ф} = 174 \text{ 000 мкФ} \quad (6)$$

Це досить велика ємність конденсатора. Для отримання такої ємності потрібно використати батарею паралельно з'єднаних окремих конденсаторів меншої ємності.

Для зменшення величини ємності можна піти на компромісне рішення: зменшити час зняття ВАХ. В такому разі потрібно буде враховувати швидкодію вузла приладу, який здійснює виміри напруги та струму. При значному зниженні часу сканування, щоб досягти прийнятних значень ємності, вимоги до швидкодії вимірів чисельних значень напруги та струму стрімко зростають.

Аналіз (4) показує, що час сканування сильно залежить від струму короткого замикання ФЕМ (I_{sc}): при дослідженнях ФЕМ з більшою потужністю, які мають більше значення струму КЗ, час сканування зменшується.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 31
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

В такому разі можемо зробити висновки, що метод з ємнісним навантаженням має такі переваги над іншими методами:

- дозволяє здійснювати вимірювання I_{sc} (струм КЗ ФЕМ) з малою похибкою;
- для ФЕМ досить великої потужності потребує використання конденсаторів великої ємності та швидкодіючі вимірювачі.

Слід зауважити, що в цьому методі присутні елементи, на яких на яких розсіюється енергія: це ключі SA1, SA2 та резистор R1. Проте, час заряду досить малий, який становитиме одиниці або долі секунди. В такому випадку не буде значного виділення тепла на елементах схеми, примусове охолодження елементів схеми, як правило, непотрібне.

До недоліків методу також можна віднести те, що необхідно використовувати конденсатори з малим еквівалентним послідовним опором (ESR). Через необхідність використання певної кількості конденсаторів для досягнення потрібної ємності, вартість кінцевого виробу може суттєво зрости.

Перші експерименти, які були проведено для перевірки висунутих вимог для цього методу, підтвердили викладені вище недоліки.

В експериментах було також виявлено, що важко відслідкувати програмним методом кінець процесу тестування ФЕМ через суттєву залежність часу заряду ємності від значення струму I_{sc} , який генерується модулем.

Розглянувши переваги та недоліки методу з ємнісним навантаженням, зупинюся на методі з резистивним навантаженням через простоту схеми та зниження вимоги до швидкодії АЦП, який буде використовуватись.

Переваги методу резистивного навантаження ФЕМ: простий, дає досить точні результати вимірів, відсутня залежність точності вимірювань від частоти зняття результатів вимірювань.

Недоліки: для ФЕМ відносно великої потужності стає громіздким. Може виникнути потреба для примусового охолодження резисторів навантаження.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 32
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

3.2 Структурна схема приладу

Прилад, що розробляється, буде будуватись на основі мікроконтролера (МК). Це обумовлено технічними вимогами, зокрема вимогами зберігати виміряні дані та можливістю зміни (оновлення програмного забезпечення).

До складу приладу (крім МК) будуть входити такі вузли (рисунок 3.5):

- датчик напруги;
- датчик струму;
- електронні ключі;
- матриця резисторів для навантаження ФЕМ.

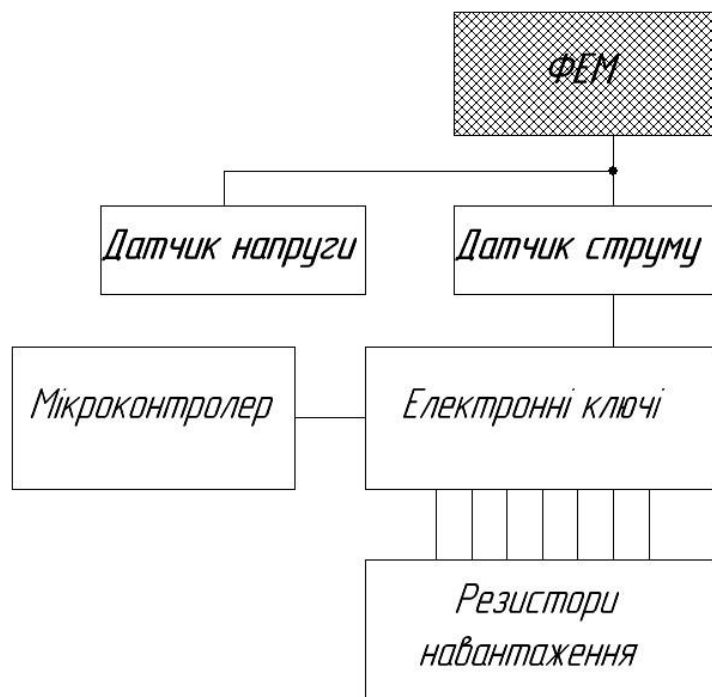


Рисунок 3.5. Структурна схема приладу, що розробляється.

Розгляну кожну складову більш детально.

Датчик напруги – це вузол, який дозволяє виміряти напругу на виході ФЕМ в необхідний момент часу. Датчик напруги, як і вольтметри, підключаються до лінії, на якій здійснюється вимірювання, паралельно.

Датчик струму – необхідна складова, що дозволяє робити вимірювання сили струму. Датчик сили струму, як і амперметр, вмикається у схему послідовно.

Використання реостату для нашої задачі є недоцільним. Для зміни опору реостату необхідні механічні вузли, які матимуть обмежений ресурс роботи, споживатимуть досить велику кількість енергії. Тому в якості навантаження плануємо використати дискретні резистори, що будуть підключатись до ФЕМ за допомогою електронних ключів (рисунок 3.1 б).

Для зміни навантаження слід під'єднати в потрібний момент вимірювань певний резистор або комбінацію підключених резисторів, що ввімкнені паралельно. Це можна легко робити, керуючи електронними ключами (вимикачами). Електронні ключі, в свою чергу, керуватимуться мікроконтролером за певним алгоритмом. Алгоритм задається програмним забезпеченням (ПЗ), що знаходиться в пам'яті МК.

3.3 Вибір елементної бази та схемних рішень

Оскільки керування силовими ключами передбачається покласти на МК, вимірювання напруги та сили струму на АЦП, передача отриманих значень вимірів у персональний комп'ютер (ПК) теж покладається на МК, то основним компонентом приладу буде контролер, який керуватиме периферійними вузлами.

До МК висуваються такі технічні вимоги:

- наявність інтерфейсу для зв'язку з ПК;
- бажана наявність АЦП у складі МК;
- достатня кількість виводів (інтерфейсів) для зв'язку з периферією (ключами, датчиками);
- оперативна пам'ять та пам'ять програм повинна бути достатньою, щоб вмістити ПЗ керування та дані, якими буде ПЗ оперувати.

На першому етапі буду розглядати можливість застосування модуля Arduino Nano зі встановленим МК ATmega328. Використання цього модуля позбавляє необхідності використання додаткових елементів таких, як кварцовий резонатор, стабілізатори напруги та ін. Ці елементи уже встановлені на платі модуля. Також на платі Arduino Nano уже встановлено чип інтерфейсного перетворювача UART-USB. Таким чином, зв'язок з ПК буде відбуватись через USB порт. Нам потрібно буде лише встановити потрібну програму-драйвер, щоб операційна система отримала доступ до вказаного порту.

Головною проблемою на цьому етапі, яку потрібно вирішити - це вибір резисторів навантаження.

Для отримання даних ділянки ВАХ, при яких протікають струми, що близькі до струмів КЗ ФЕМ (це близько 10-15 А, в залежності від конкретної моделі ФЕМ), на навантаженні буде виділятися значна потужність. Тому, щоб робочі параметри резисторів навантаження не виходили за межі номінальних значень, потрібно вибрати резистори достатньої (досить великої) потужності. Для прикладу, якщо ФЕМ, що буде тестуватися, має потужність 300 Вт, то, відповідно, потужність резистора навантаження повинна складати не менше цього значення.



Рисунок 3.6 Зовнішній вигляд резистора потужністю 100 Вт.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 35
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 3.6 показано зовнішній вигляд резисторів номінальною потужністю 100 Вт. Такі резистори мають значні габарити. Більше того, асортимент номіналів таких елементів дуже обмежений на ринку.

Через обмежений асортимент потужних резисторів постає проблема, яку потрібно вирішити, використовуючи нетривіальні схемні рішення.

Як відомо з курсу фізики, потужність електричного струму виражається формулою:

$$P=IU, \quad (7)$$

де P – потужність,

I – сила струму,

U – напруга.

За законом Ома,

$$I=U/R, \quad (8)$$

де R – опір.

З (8) маємо

$$U=IR \quad (9)$$

Вставивши (9) в (8), отримуємо

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (10)$$

При паралельному з'єднанні резисторів однакового опору, загальний опір ланки визначається формулою:

$$R_{\text{заг}} = \frac{R}{n}, \quad (11)$$

де n – кількість паралельно з'єднаних резисторів, $R_{\text{заг}}$ - загальний опір ланцюга з n паралельних резисторів.

Розглянемо випадок, коли напруга джерела струму є незмінною величиною ($U=\text{const}$). До цього джерела підключають спочатку один резистор опором R . При цьому на резисторі виділиться потужність у вигляді тепла

$$P_1 = \frac{U^2}{R} \quad (12)$$

При підключенні до цього ж джерела живлення ланцюга, що складається з n паралельно з'єднаних резисторів, потужність складе

$$P_n = \frac{U^2}{R_n} = \frac{U^2}{\frac{R}{n}} = \frac{nU^2}{R} = nP_1 \quad (13)$$

Номінальна потужність резистора – це потужність, яку він здатен розсіяти без пошкоджень або зміни своїх характеристик. З (13) видно, що на ланцюгу паралельних резисторів виділяється в n разів більше потужності, ніж у випадку одного резистора. Але ж і резисторів у випадку паралельного з'єднання також n . Тому на один резистор припадає така ж потужність P_1 .

Таким чином, для вирішення проблеми обмеженого асортименту резисторів великої потужності, пропонуємо використати матриці з паралельно з'єднаних резисторів достатньої потужності та кількості. Змінюючи кількість резисторів у паралельному з'єднанні ми можемо змінити результуючий опір. При цьому потужність, що припадає на один резистор, залишається незмінною.

Згідно технічного завдання, у нас повинно бути не менше 100 точок вимірів ВАХ. Для зменшення кількості резисторів, а також ключів, які будуть

вмикати резистори, виберу схему, яка базується на двійковій системі числення [19]. У такій схемі резистори мають опір $R/2^n$, де n – порядковий номер резистора в схемі (рисунок 3.7).

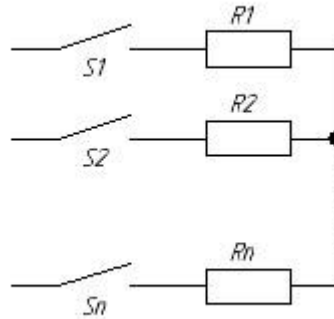


Рисунок 3.7 Схема включення резисторів.

Вмикаючи ключі в різних комбінаціях, отримаємо певну кількість можливих значень загального опору навантаження, яке буде залежати від n .

Кількість комбінацій визначається виразом

$$N = 2^n - 1 \quad (14)$$

Для забезпечення комбінацій, не менше 100 потрібно вибрати $n=7$. В такому разі отримаємо 127 різних можливих комбінацій.

Визначимо номінальний опір резистора. Виберу потужність резистора матриці рівним 3 Вт, так як резистори такої потужності мають широкий асортимент опорів. Розрахуємо мінімальний опір резистора матриці, використовуючи (10).

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{45 \text{ В}^2}{3 \text{ Вт}} = 675 \text{ Ом}$$

З номінального ряду E24 опорів обираємо найближчий більший номінал, який складе 680 Ом.



Рисунок 3.8 Матриця резисторів навантаження (з'єднувальні провідники відсутні).

Після обрахунків, придбання резисторів необхідного номіналу та кількості, були виготовлені матриці резисторів навантаження (рисунок 3.8). Резистори змонтовані на макетних платах та з'єднані паралельно, відповідно до принципової схеми. Плати закріплені між собою за допомогою різьбових шпильок М3. Плати на шпильках закріплено за допомогою гайок.

Для вимірювань сили струму потрібно використати датчик на максимальний робочий струм не менше 20 А. З наявних на ринку датчиків струму по характеристиках повністю задовольняє аналоговий датчик струму на ефекті Холла ACS712ELCTR-20A-T [21], який має такі параметри:

- максимальний струм ± 20 А;
- напруга живлення 5 В;
- максимальна частота вимірів 80 кГц;
- нелінійність характеристики 1,5%;
- загальна похибка вимірювань $\pm 1,5\%$
- діапазон робочих температур $-40 \dots 85^\circ\text{C}$.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Характеристики, що заявлені виробником датчика, повністю задовільняють потреби.

Вимірювання напруги передбачається робити за допомогою резисторного подільника напруги (рисунок 3.9).

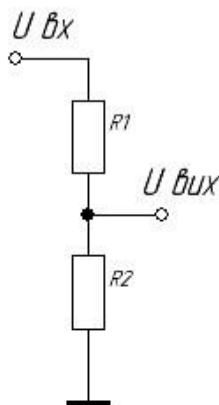


Рисунок 3.9 Резистивний подільник напруги.

Розрахую параметри резисторів, що входять у подільник напруги.

Оскільки для МК максимальна вхідна напруга АЦП складає 5 В, а максимальна вхідна напруга приладу 45 В, то коефіцієнт передачі подільника повинен бути $5 \text{ В} / 45 \text{ В} = 1/9 \approx 0,111$.

Коефіцієнт передачі подільника визначається виразом [20]

$$K = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вих}}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (15)$$

Згідно опису (datasheet) АТМega328р не рекомендується вибирати подільник напруги, якщо сума $R_1 + R_2$ буде більшою 10 кОм.

В якості R_1 виберу резистор опором 9,1 кОм. Тоді з (15) опір резистора R_2 складе

$$R2 = \frac{kR1}{1-k} = \frac{1/9 \times 9,1}{1-1/9} \approx \frac{1}{8/9} = \frac{9}{8} = 1,125 \text{ (кОм)} \quad (16)$$

В номінальному ряді E24 номінал 1,125 відсутній. В такому разі обираю найближчий номінал 1,1 (кОм).

Повторно порахуємо коефіцієнт передачі подільника напруги при номіналах, які вибрано.

Значення опору резисторів, підставимо в (15). Коефіцієнт передачі подільника напруги при обраних номіналах складе $\approx 0,108$, що є близьким до розрахункового.

При максимальній напрузі 45 В на подільнику буде розсіюватись потужність, яку можемо обчислити, користуючись виразом (12).

Після обрахунків з новими значеннями параметрів отримуємо величину 0,245 Вт. Обираємо найближчу, не меншу розрахункової, потужність резисторів зі стандартного ряду. Такою буде 0,250 Вт. Якщо розрахунки вірні, то ризику пошкодження чи виходу елементів схеми за допустимі номінальні робочі режими не відбудеться.

Проектування приладу відбувається з врахуванням можливих майбутніх модернізацій, наприклад, використання датчика температури, освітленості тощо.

Передбачається, що мінімальна кількість точок, по якій будується ВАХ, рівна 100. Я використовую матрицю резисторів, опір яких базується на двійковій системі.

Щоб визначити кількість ключів потрібно визначитись з кількістю розрядів у двійковій системі, щоб кількість комбінацій була не меншою 100. Для знаходження кількості розрядів скористаємось формулою

$$N = \log_2 100 \approx 6,644 \quad (16)$$

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Звісно, що дробове число розрядів неможливе. Необхідно обрати найближче ціле число, яке не менше, розрахованого. Таким числом буде 7. Отже, кількість ключів та матриць резисторів навантаження повинно бути 7. Відповідно, в МК буде задіяно 7 пінів для керування ключами.

Розрахую кількість елементів, яку необхідно застосувати для виготовлення матриць резисторів навантаження.

Так, як у нас використана двійкова система числення, в кожен резистор створений матрицею з певної кількості. Кількість паралельних резисторів матриці для певного ключа визначається номером розряду і складає $2^0, 2^1, 2^3 \dots$. Тобто, маємо геометричну прогресію [20] зі знаменником 2. Потрібно знайти суму перших семи членів такої прогресії. В нашому випадку, використовуючи вирази з [24], маємо

$$S_n = \frac{b_1(q^n - 1)}{q - 1} = \frac{1(2^7 - 1)}{2 - 1} = 127 \quad (17)$$

В результаті обчислень – нам потрібно застосувати 127 резисторів опором 675 Ом, потужністю розсіювання 0,250 Вт.

Кількість ключів, які будуть вмикати навантаження, рівна кількості розрядів, тобто 7. Відповідно, буде задіяно 7 пінів МК під управління ключами.

Якщо використовувати виводи ARDUINO NANO з метою керування ключами, то доведеться задіяти не менше 7 виводів. Два виводи Rx та Tx використовуються метою зв'язку з ПК, які немає можливості задіяти. З врахуванням того, що в майбутньому передбачається модернізація пристрою, додавання нових функціональних опцій, може спостерігатись нестача виводів.

Щоб запобігти цьому, використаю регістр зсуву 74НС595, який для роботи використовує не більше п'яти цифрових входів [22]. Кількість виходів може бути практично необмеженою, якщо застосувати послідовне з'єднання (каскадування) 74НС595 (рисунок 3.9):

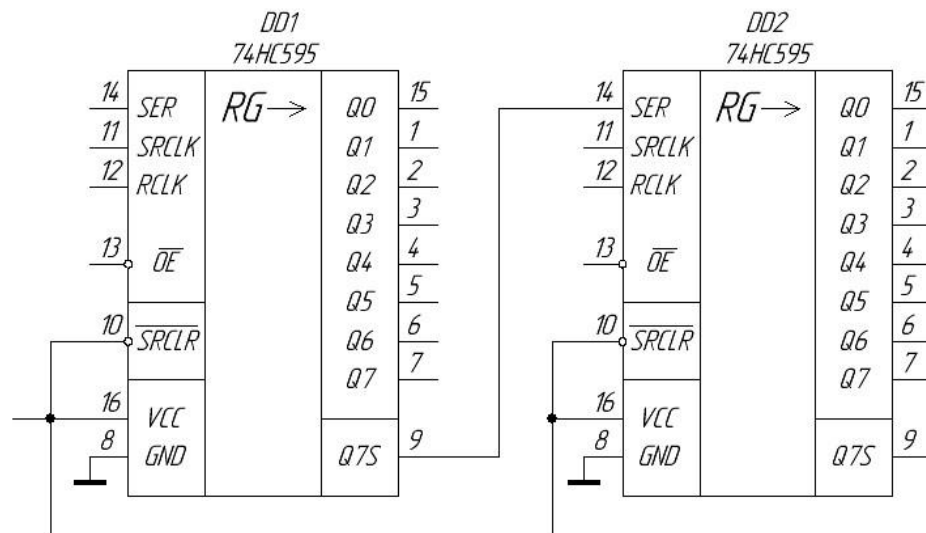


Рисунок 3.10 Фрагмент схеми принципової. Приклад з'єднання чипів 74HC595 з метою збільшення кількості цифрових виходів.

Чип являє собою регістр зсуву, який призначено для перетворення послідовного інтерфейсу в паралельний. Призначення та найменування виводів чипа 74HC595 подано в Таблиці 1.

Принцип роботи чипу такий. Перед початком роботи з чіпом потрібно подати на нього сигнал, що він вибраний для роботи. В цьому випадку на вхід OE подається низький рівень, так як вхід інверсний. При високому рівні на цьому вході усі дані та сигнали, що надходять на чип будуть ігноруватись. Для очистки регістру на вхід SRCLK подається низький рівень (цей вхід інверсний). При цьому усі виходи Q0...Q7 приймають низький рівень.

На цифровий вхід SER подається цифрова послідовність імпульсів у послідовному форматі. На вхід SRCLK подається тактова частота, синхронно з якою вхідні дані поміщаються у внутрішню пам'ять чипу. Синхронно з частотою тактового сигналу вхідні дані з'являються на виходах Q0...Q7, які являють собою паралельний код послідовності, яка надійшла на вхід послідовних даних SER.

Вивід Q7S являє собою виводом переносу. Тобто, усі дані, які перевищують за розрядністю, надходять на цей вивід і можуть бути використані наступним чипом для перетворення.

Таблиця 1 – Найменування та призначення виводів 74НС595.

№ виводу	Найменування	Призначення
1	Q1	Паралельний вихід даних 1 (прямий)
2	Q2	Паралельний вихід даних 2 (прямий)
3	Q3	Паралельний вихід даних 3 (прямий)
4	Q4	Паралельний вихід даних 4 (прямий)
5	Q5	Паралельний вихід даних 5 (прямий)
6	Q6	Паралельний вихід даних 6 (прямий)
7	Q7	Паралельний вихід даних 7 (прямий)
8	GND	Корпус (земля)
9	Q7S	Вивід переносу (прямий)
10	SRCLR	Скидання (інверсний)
11	SRCLK	Вхід тактової частоти (прямий)
12	RCLK	Вхід для збереження даних (прямий)
13	OE	Вивід даних дозволено (інверсний)
14	SER	Вхід послідовних даних (прямий)
15	Q0	Паралельний вихід даних 0 (прямий)
16	VCC	Напруга живлення

В якості ключів використаю транзистори. Параметри, яким повинні відповідати ці транзистори, такі:

- максимальна робоча напруга не менша 50 В (з запасом 10%);
- максимальний робочий струм не менший 20 А;
- керування рівнями TTL (логічні рівні МК АТМega328).

З доступних на ринку компонентів, обираю MOSFET транзистори IRLR2905, які мають такі параметри:

- максимальна робоча напруга витік-стік 55 В;
- максимальний струм 42 А при максимальній температурі корпусу;

- керування логічними сигналами TTL (Logic-Level Gate Drive);
- час включення (Turn-On Delay Time) 11 нс;
- час вимкнення (Turn-Off Delay Time) 26 нс.

У ТЗ задано також похибка вимірювань, яка визначається як похибкою (допуском) номіналів елементів схеми, так і точністю АЦП.

АЦП, який є у складі МК, є 10-бітним, тобто максимальним значенням бути $2^{10} - 1 = 1023$. Це значить, що значення на виході АЦП лежать в інтервалі $0 \div 1023$. Таким чином, крок квантування АЦП, при напрузі живлення 5 В складе $5/1023 \approx 0,005$ В. Відносна похибка перетворення в такому разі буде

$$\Delta = \frac{0,005}{5} 100 \approx 0,1\%$$

З врахуванням шумів, нелінійності перетворення АЦП, похибка не перевищуватиме 0,5%.

Якщо обрати резистори навантаження та резисторного подільника напруги з відносною похибкою 1%, то точність вимірів напруги не перевищить 1,5%, що відповідає технічному завданню.

Датчик струму має похибку перетворення не гіршу 1,5%. З врахуванням розрядності та похибки перетворення АЦП, максимальна похибка вимірювання сили струму не перевищить 2%, що теж відповідає вимогам технічного завдання.

Для зменшення впливу шумів АЦП можна використати метод кількох вимірювань одної і тої ж величини та шукати середнє значення.

Дослідний зразок пристрою, який розробляється, в першу чергу перевірятиметься на коректність вимірів, які проводяться та перевірки температурних режимів силових ключів, резисторів навантаження і т.п.

Збереження вимірянних даних на даному етапі не передбачається. Дані, які отримані, можна буде отримати через послідовний порт, використовуючи будь яку термінальну програму, яких є достатня кількість з freeware ліцензією.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 45
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Після перевірки температурних режимів елементів та усунення виявлених недоліків на цьому етапі, прилад буде доповнено функціоналом збереження даних та побудовою графіків ВАХ.

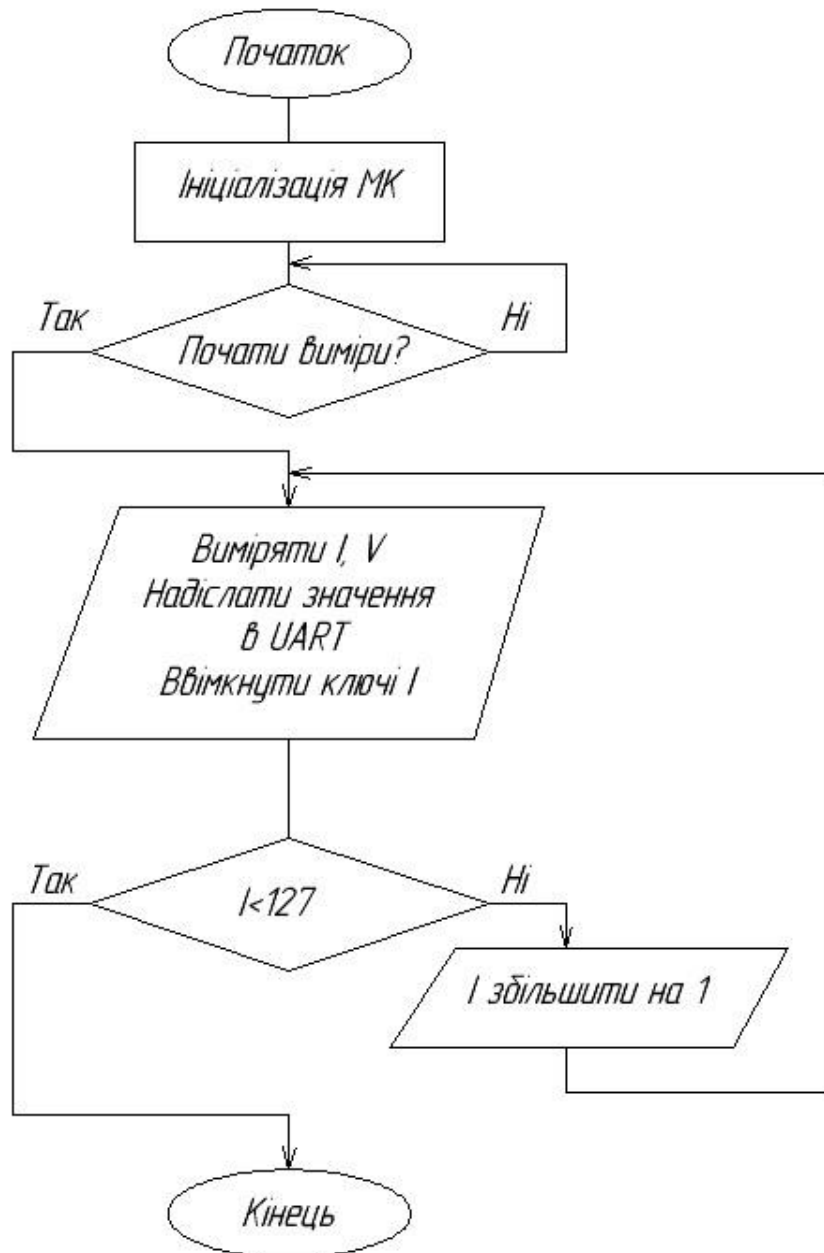


Рисунок 3.11 Блок-схема роботи МК.

Перед розробкою ПЗ для МК необхідно розробити алгоритм для МК.

Першим етапом у алгоритмі буде ініціалізація МК, тобто налаштування портів вводу/виводу, UART, елементів периферії.

З огляду на те, що пристрій, який проектується, буде працювати під керуванням ПК, в алгоритмі потрібно передбачити очікування команди «Старт» зовні.

Блок схема ПЗ, яке буде написано для МК зображена на рисунку 3.9.

Для керування роботою пристрою, використовуючи блок-схему, що зображена на рисунку 3.10, було написано ПЗ (firmware) для ARDUINO NANO в середовищі ARDUINO IDE.

```
//об'явимо змінні
```

```
//біти для керування ключами
```

```
int Bit7 = 2;
```

```
int Bit6 = 3;
```

```
int Bit5 = 4;
```

```
int Bit4 = 5;
```

```
int Bit3 = 6;
```

```
int Bit2 = 7;
```

```
int Bit1 = 8;
```

```
int Bit0 = 9;
```

```
//змінні для роботи програми
```

```
int valCurrent = 0; //змінна для значення струму
```

```
int valVolt = 0; //змінна для напруги
```

```
byte i = 0; //змінна для лічильника
```

```
byte inByte=0; //змінна для прийнятого байта
```

```
//розділ налаштувань плати
```

```
void setup() {
```

```
Serial.begin(9600); // відкриваю послідовний порт зі швидкістю 9600
```

```
pinMode(Bit0, OUTPUT); //біти в режим виходу
```

```
pinMode(Bit1, OUTPUT);
```

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 47
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

```
pinMode(Bit2, OUTPUT);
pinMode(Bit3, OUTPUT);
pinMode(Bit4, OUTPUT);
pinMode(Bit5, OUTPUT);
pinMode(Bit6, OUTPUT);
pinMode(Bit7, OUTPUT);
}
```

```
void loop() {
  if (Serial.available() > 0){
    //очікування прийнятого байта
    inByte = Serial.read();
    if (inByte == 48) {
      //якщо прийняли 0 (нуль) то запускаємо процес вимірів
      //ASCII код символу 0 48(дес)
      Serial.print("I received: ");
      Serial.println(inByte, DEC);
      //вивід у послідовний порт отриманого байта
      //очистка прийнятого байта
      inByte=0;

      for (i = 0; i < 255; i++) {
        //вмикаємо по черговою ключі
        digitalWrite(Bit0, bitRead(i,0));
        digitalWrite(Bit1, bitRead(i,1));
        digitalWrite(Bit2, bitRead(i,2));
        digitalWrite(Bit3, bitRead(i,3));
        digitalWrite(Bit4, bitRead(i,4));
        digitalWrite(Bit5, bitRead(i,5));
      }
    }
  }
}
```

```

digitalWrite(Bit6,bitRead(i,6));
digitalWrite(Bit7,bitRead(i,7));
//чекаємо стабілізації процесу
delay(25);
//для зменшення шумів знімаємо чотири рази значення
for (byte j = 0; j <= 3; j++) {
    valCurrent = valCurrent+analogRead(0);
}
for (byte j = 0; j <= 3; j++) {
    valVolt = valVolt+analogRead(1);
}
//і ділимо на 4
valCurrent = valCurrent>>2;
valVolt = valVolt>>2;
//виводимо значення у порт
Serial.print(i);
Serial.print("\t");
Serial.print("I=");
Serial.print(valCurrent);
Serial.print("\t");
Serial.print("V=");
Serial.println(valVolt);
//скидаємо значення в нуль перед наступними вимірюваннями
valVolt=0;
valCurrent=0;
}
//після вимірювань вимикаємо усі ключі
digitalWrite(Bit0,LOW);
digitalWrite(Bit1,LOW);

```

```

    digitalWrite(Bit2,LOW);
    digitalWrite(Bit3,LOW);
    digitalWrite(Bit4,LOW);
    digitalWrite(Bit5,LOW);
    digitalWrite(Bit6,LOW);
    digitalWrite(Bit7,LOW);
  }
}
}

```

Після процесу компіляції ПЗ отримуємо таке повідомлення компілятора:

Sketch uses 2658 bytes (8%) of program storage space. Maximum is 30720 bytes. Global variables use 718 bytes (35%) of dynamic memory, leaving 1330 bytes for local variables. Maximum is 2048 bytes.

Тобто, пам'яті програм та динамічної пам'яті для збереження змінних достатньо. Маємо ще досить великий запас на можливі модернізації у майбутньому. З цього повідомлення роблю висновок, що використовувати ARDUINO NANO з МК АТМega328р є можливим.

Струм споживання приладу (експериментально виміряне значення) не перевищує 20 мА. Тому є можливість жити його від USB порту ПК (максимальний струм USB 500 мА).

Перед початком використання та першої перевірки працездатності дослідного зразка приладу його під'єднаємо до USB порту ПК. В диспетчері пристроїв операційної системи Windows з'явиться новий COM порт, через який буде проводитись обмін даними між пристроєм та ПК. В разі, якщо після під'єднання COM порт не з'являється, потрібно перевірити чи встановлено драйвер. В разі необхідності встановити його.

Після підключення пристрою на ПК потрібно відкрити будь-яку термінальну програму, з'єднати з приладом, використовуючи параметри: швидкість обміну 9600 біт/с, формат даних 8-n-1.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Під'єднати до приладу ФЕМ, дотримуючись полярності. У термінальній програмі відправляємо на прилад 0 (нуль). Після цього запускається процес вимірів та вивід результатів у СОМ порт.

Під час випробувань приладу була під'єднана ФЕМ TALESUN TP660P-275W. Ця ФЕМ має такі характеристики:

- напруга ХХ 38,7 В;
- струм КЗ 9,17 А;
- максимальна потужність 275 Вт.

Перше випробування пристрою здійснювалось з метою перевірки теплового режиму елементів. Тим самим проводилась перевірка правильності зроблених розрахунків та висновків, на яких них ми базувались, розробляючи пристрій.

Під час зняття вимірів контролювалась температура силових ключів та резисторів навантаження для виявлення можливого перегріву елементів та виходу їх з ладу. За час десяти вимірювань підряд протягом 30 секунд, температура силових ключів та резисторів навантаження збільшувалась не більше, ніж на 2°C. Контроль температури елементів схеми здійснювався за допомогою тепловізора НТІ НТ-02 (рисунок 3.11).

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.12 Тепловізор НТІ НТ-02, що був використаний для теловізійного контролю елементів пристрою.

Перші тестові випробовування показали, що виходу елементів з ладу не спостерігалось. Розрахунки та припущення були зроблені вірно, елементи електронної схеми приладу не виходили за межі номінальних робочих параметрів. Прилад працював так, як передбачалось.

Результати вимірів виводились як результат перетворення АЦП, без перетворення в одиниці СІ.

Фрагмент результатів вимірів (останні значення):

I113=515

V113=63

I114=511

V114=60

I115=514

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 52
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

V115=60
I116=512
V116=59
I117=511
V117=58
I118=511
V118=58
I119=511
V119=57
I120=515
V120=56
I121=513
V121=56
I122=514
V122=56
I123=511
V123=56
I124=510
V124=54
I125=512
V125=53
I126=514
V126=52

Літера I та число після неї – результат n-го виміру сили струму, V – результат вимірів, відповідно, напруги. Аналізуючи результати вимірів було зроблено висновок, що значення параметрів мають «шум» в останніх розрядах. Для збільшення точності вимірів потрібно збільшити кількість вимірів n-го кроку та усереднювати результат. Це можна зробити програмно, зробивши відповідні зміни до коду ПЗ для МК.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 53
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

В процесі проектування було передбачено, що основний функціонал з обробки результатів, побудови ВАХ, збереження результатів вимірів буде покладено на ПК з відповідним ПЗ. Це пов'язано з тим, що ресурси МК АТМega328 досить обмежені. Зокрема, використання графічного індикатора достатньої роздільної здатності призведе до перевантаження МК.

Після успішних випробувань пристрою наступним етапом буде написання прикладної програми для ПК.

До ПЗ висуваються такі вимоги:

- обмін даними відбувається через СОМ порт ПК;
- користувач повинен дати команду на початок вимірів за допомогою візуальних компонентів ПЗ;
- отримані результати повинні виводитись у головне вікно ПЗ у вигляді, зрозумілому для користувача;
- на основі отриманих результатів потрібно побудувати ВАХ;
- за необхідності ПЗ повинно зберегти результати у зазначене користувачем місце на ПК.

Для написання коду ПЗ буде використано інтегроване середовище Borland Delphi 7.

На головну форму програми розмістимо такі компоненти (рисунок 2.3.7):

TLabel з підписом «СОМ порт»

TComPort для зв'язку ПК по СОМ порту

TComComboBox для вибору необхідного СОМ порту

5 екземплярів кнопок з написами «З'єднати», «Роз'єднати», «Старт», «Очистити», «Графік»

TComLed – індикатор активності СОМ порту

TМето в який будуть виведені результати вимірів з пристрою.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 54
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

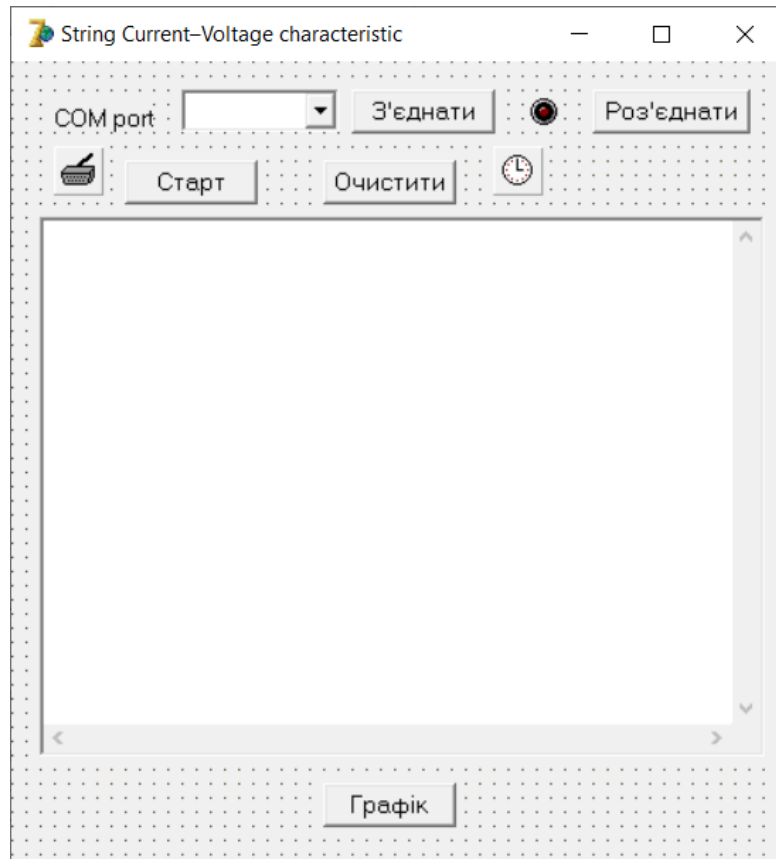


Рисунок 3.13 Головна форма ПЗ.

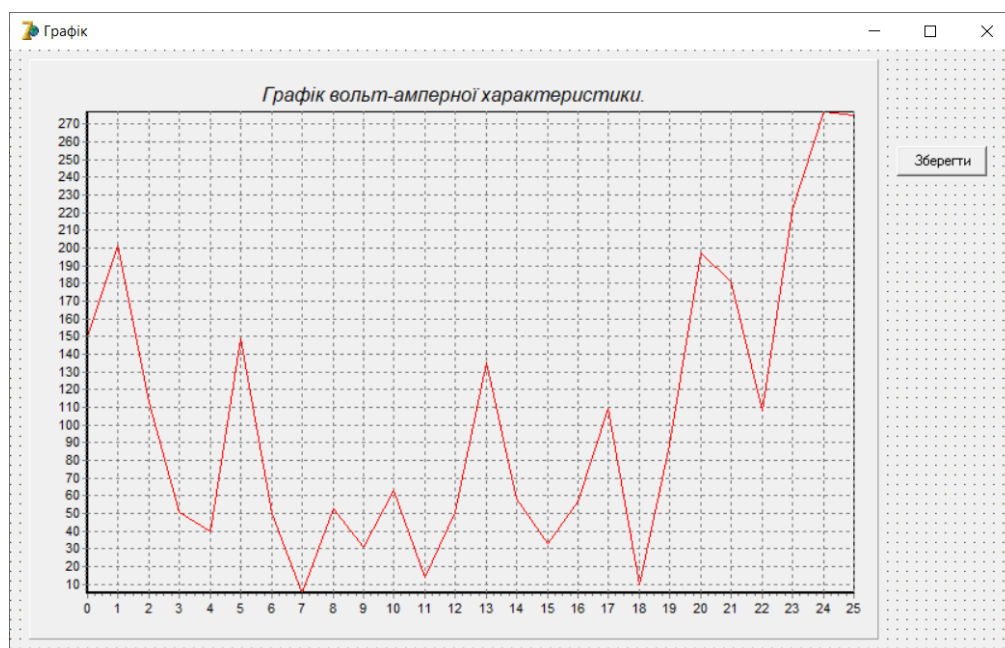


Рисунок 3.14 Фома з компонентом TChart.

Крім головної форми потрібно додати ще одну (рисунок 3.8), на якій розмістимо компонент TChart. У цьому компоненті буде побудовано графік

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

ВАХ. Додамо ще кнопку, по натисканні якої побудований графік буде збережено на ПК.

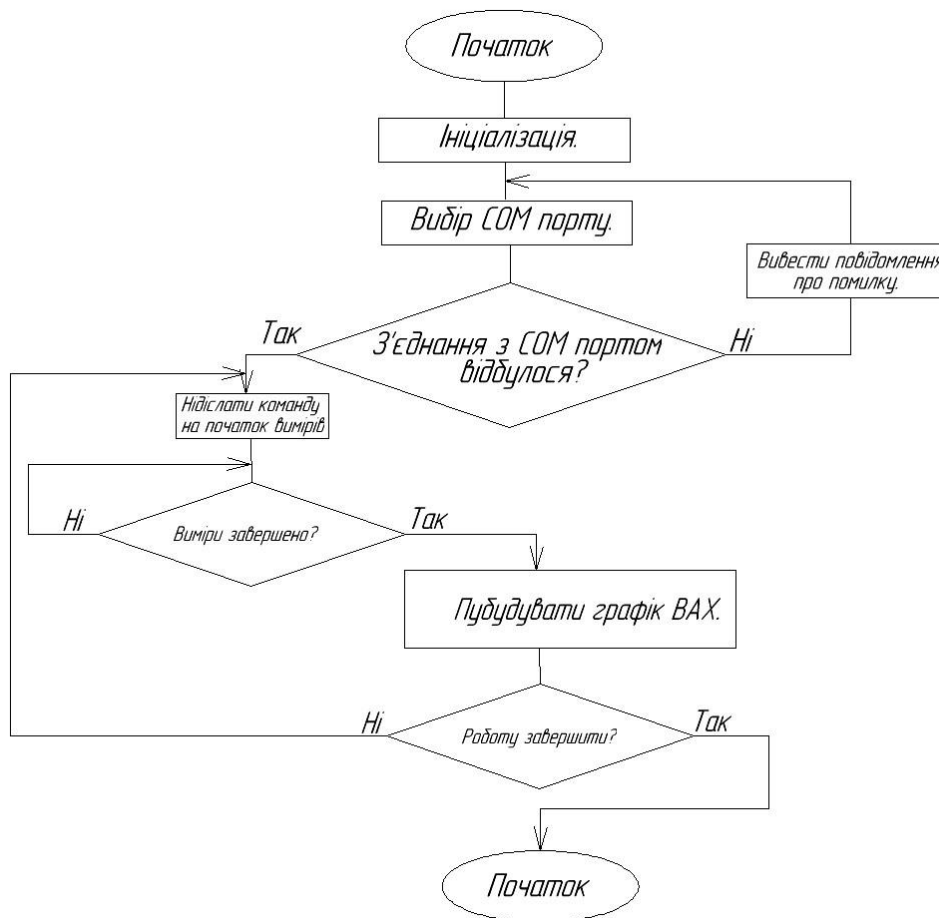


Рисунок 3.15 Блок-схема програми для ПК.

На основі блок-схеми програми, яка зображена на рисунку 3.15, було написано код ПЗ.

Код програми подано у Додатку 1.

Після написання коду, виправлення виявлених помилок та зауважень компілятора, отримуємо виконуваний exe файл робочого додатка, який можна встановити на будь який ПК під керуванням операційної системи Windows.

З готовим ПЗ та пристроєм було проведено тестові випробування та зняття ВАХ ФЕМ на СЕС «Богданівська» ТОВ «Віт Енерджі «Ріпна».

Тестувалась ФЕМ TALESUN TP660P 275W. Результати тестувань (графіки ВАХ) зображено на рисунках 3.16 та 3.17.

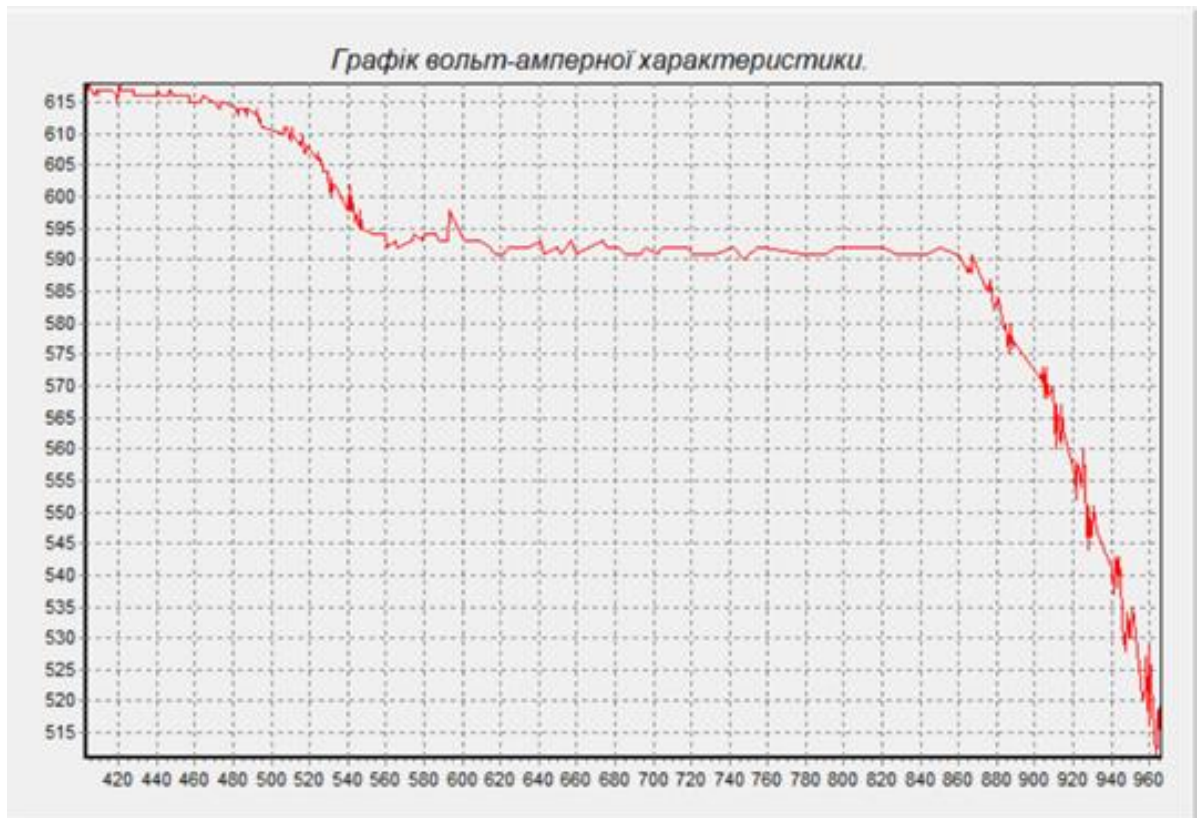


Рисунок 3.16 ВАХ ФЕМ, що має забруднення.



Рисунок 3.17 ВАХ ФЕМ, після очищення поверхні.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Зняття ВАХ проводилось два рази. У першому випадку ФЕМ мала незначні забруднення та поверхня була частково вкрита снігом. Площа поверхні, яка була вкрита снігом, орієнтовно складає 5%.

Як видно з рисунка 3.16, на ВАХ спостерігається «сходінка». Це може свідчити, як було описано раніше, про наявність затінення окремих комірок ФЕМ, забруднення поверхні. Для перевірки цього припущення поверхня ФЕМ була ретельно очищена.

Наступне зняття ВАХ проводилось з ФЕМ, робочу поверхню якої було очищено від снігу та забруднень. Графік ВАХ для цього випадку зображено на рисунку 3.17.

Порівнюючи обидві ВАХ, добре спостерігається зміна форми ВАХ ФЕМ: «сходінка», яка була присутня на графіку (рисунок 3.16) зникла. Також видно, що після очищення струм КЗ ФЕМ збільшився з 615 до 630 одиниць. ВАХ ФЕМ (рисунок 3.17) має вигляд, близький до ідеальної форми.

Частина кривої ВАХ (по осі абсцис в діапазоні до 760) є горизонтальною. Це свідчить про те, що ФЕМ, яка була вибрана для тестувань, є справною. Відхилення від нормальної роботи, як виявилось, спричиняли забруднення, що були присутні на поверхні.

3.4 Висновки до третього розділу.

В третьому розділі обґрунтовано вибір резистивного методу зняття ВАХ ФЕМ, розроблено структурну схему пристрою.

Описано функціональне призначення кожного вузла структурної схеми.

Створено схеми принципів усіх вузлів пристрою.

Керуючись вимогами технічного завдання та принципівими схемами, було визначено характеристики, яким повинні відповідати елементи. Зроблено розрахунки та визначені номінали електронних елементів, що входять до складу пристрою.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 58
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Виготовлено експериментальний зразок пристрою.

Було розроблено блок-схему ПЗ для МК, написано код програми.

Проведено випробування пристрою з метою виявлення можливих помилок при проектуванні. Отримано перші результати вимірів.

Написано код програми для ПК та проведено остаточне випробування з побудовою ВАХ в реальних умовах.

Зроблено аналіз знятих ВАХ та підтверджено на практиці, що обраний метод та пристрій дають змогу виявити відхилення від нормальної роботи ФЕМ.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Висновки

В ході виконання завдання магістерської роботи було зроблено експериментальний зразок приладу для зняття ВАХ ФЕМ, проведено тестові випробування та зняті виміри з реальної ФЕМ.

Результати випробувань показали, що розрахунки та рішення, які були зроблені в ході виконання роботи, є життєздатними та можуть бути використані на практиці.

Виміри, які отримано, дали змогу побудувати ВАХ ФЕМ. Отримані ВАХ відповідають очікуваним та дають змогу зробити висновок щодо відхилень в роботі ФЕМ. Підтверджено, що пристрій відповідає вимогам, які висуваються до пристрою у ТЗ.

На підставі вимірів, які були проведено, виявлено відхилення ВАХ від норми через забруднення на поверхні ФЕМ. Після усунення забруднень поверхні знято повторно ВАХ, вигляд якої став близькою до норми. Це дає підставу вважати, що пристрій, який було розроблено та випробувано, може бути використано в практичній роботі для виявлення ФЕМ, що можуть мати пошкодження.

Під час випробувань експериментального зразка приладу не було виявлено пошкоджень елементів, їх перегріву, зміни робочих параметрів тощо. Експлуатаційні вимоги та характеристики близькі до очікуваних.

В ході експлуатації зразка було виявлено кілька питань, які потребують доопрацювання. До таких можна віднести, зокрема, невеликі флуктуації вимірних значень напруги та сили струму. Проте, такі флуктуації не перешкоджають експлуатації та не спотворюють загальний висновок про якість ФЕМ.

Експериментальний зразок має можливість модернізації та розширення функціоналу.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Вважаю, що зразок приладу, який було розроблено та протестовано у реальних умовах, дозволяє проводити діагностику ФЕМ та виявляти пошкодження, які іншими доступними методами зробити неможливо.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Про ратифікацію Кіотського протоколу до Рамкової Конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1430-15#Text>
2. Хмельницька інфекційна лікарня отримала власну сонячну електростанцію [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ye.ua/sypilstvo/72140_Hmelnicka_infekciyna_likarnya_otrimala_vl_asnu_sonyachnu_elektrostanciyi.html
3. Photovoltaic Solar cells: A review [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2571-5577/5/4/67>
4. Сонячна батарея [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BE%D0%BD%D1%8F%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D0%B1%D0%B0%D1%82%D0%B0%D1%80%D0%B5%D1%8F
5. Сонячний інвертор [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BE%D0%BD%D1%8F%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D1%96%D0%BD%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%BE%D1%80
6. Top 3 main types of solar inverters: Which is the best one for homes? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.solarsquare.in/blog/types-of-solar-inverters/>
7. ДСТУ 8647:2016 Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і/або експлуатації в умовах малої кількості відмов [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=93147
8. ДСТУ 2860.94 «Надійність техніки. Терміни та визначення». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25034

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

9. Рожков П. П. Конспект лекцій з дисципліни «Надійність електричних мереж». Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ, 2017
10. Релейний захист електроенергетичних систем : навч. посіб. [для студентів електроенергет. спец. ВНЗ, аспірантів, викл.] / В. П. Кідиба ; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2015.
11. Енергоефективність фотоелектричних перетворювачів для забезпечення екологічно чистої енергетики: [монографія] / С.О. Вамболь, Я.О. Сичікова, Н.В. Дейнеко – Бердянськ : Видавець Ткачук О.В., 2016.
- 12.5 потенційних загроз від PV-систем при пожежі та як їх запобігти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://solarity.eu/ua/blog/fire-hazards-and-mitigation-in-photovoltaic-systems/>
13. Top 20 solar panel testing methods [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://infinitalab.com/blogs/top-20-solar-panel-testing-methods/>
14. Guide To Interpreting I-V Curve Measurements of PV Arrays. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.solmetric.com/application-notes-articles/>
15. https://www.researchgate.net/publication/338279061_Photovoltaiic_Maximum_Power_Point_Technique_based_on_Incremental_Conductance_InControl_Algorithm/link/5f04072f458515505091afb9/download?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicHJldmldvXNQYWdlIjoieX2RpcmVjdCJ9fQ
16. Визначення параметрів схем заміщення сонячних панелей за експериментальними даними. Мартинюк В. І., Клен К. С., Жуйков В. Я. За матеріалами конференції STEE-2021 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://elc.kpi.ua/article/download/237316/237453/547762>

17. <https://www.researchgate.net/publication/339676573> Line scan photoluminescence and electroluminescence imaging of silicon solar cells and modules
18. Design and Development of Low Cost, Portable, On-field I-V Curve Tracer Based on Capacitor Loading for HighPower Rated Solar Photovoltaic Modules [Электронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/351467956> Design and Development of Low Cost Portable On-Field I-V Curve Tracer Based on Capacitor Loading for High Power Rated Solar Photovoltaic Modules
19. Binary-based tracer of photovoltaic array characteristics [Электронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/264387497> Binary-based tracer of photovoltaic array characteristics?enrichId=rgreq-dfdb448646fbf7f1033efa7ec074b373-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI2NDM4NzQ5NztBUzozNzUyNjA4Nzc3Mzc5ODVAMTQ2NjQ4MDU3MzYzNg%3D%3D&el=1_x_3&esc=publicationCoverPdf
20. Tietze Schenk – Halbleiterschaltungstechnik [Электронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua.scribd.com/document/646416678/Tietze-Schenk-halbleiterschaltungstechnik-11-Auflage>
21. ACS712ELECTR-20A-T Datasheet – Allegro Microsystems characteristics [Электронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/205338/ALLEGRO/ACS712ELCTR-20A-T.html>
22. 8-BIT SHIFT REGISTER WITH 8-BIT OUTPUT REGISTER [Электронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/74HC595.pdf>

23. TP660P / TP660P(H) 265 / 270 / 275 / 280W Polycrystalline Solar Module
[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.pvo-int.com/wp-content/uploads/2019/01/TP660P-EN.pdf>

24. Геометрична прогресія [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B5%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B5%D1%81%D1%96%D1%8F

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Додаток 1

Лістинг програми для побудови ВАХ.

```
unit UnitMain;
```

```
interface
```

```
uses
```

```
Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,  
Dialogs, StdCtrls, CPortCtl, CPort, ExtCtrls, Unit1;
```

```
type
```

```
TFormMain = class(TForm)
```

```
ComPort: TComPort;
```

```
ComLedConnect: TComLed;
```

```
ComComboBox: TComComboBox;
```

```
ButtonConnect: TButton;
```

```
LabelNComPort: TLabel;
```

```
ButtonDisconnect: TButton;
```

```
ButtonStart: TButton;
```

```
MemoRxTx: TMemo;
```

```
ButtonClear: TButton;
```

```
ButtonGraf: TButton;
```

```
TimerGraf: TTimer;
```

```
procedure ButtonConnectClick(Sender: TObject);
```

```
procedure ComPortAfterOpen(Sender: TObject);
```

```
procedure ButtonDisconnectClick(Sender: TObject);
```

```
procedure ButtonStartClick(Sender: TObject);
```

```
procedure ComPortRxChar(Sender: TObject; Count: Integer);
```

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 66
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

```

procedure ButtonClearClick(Sender: TObject);
procedure ComPortTxEmpty(Sender: TObject);
procedure TimerGrafTimer(Sender: TObject);
procedure ButtonGrafClick(Sender: TObject);
procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
end;

var
  FormMain: TFormMain;

implementation

  {$R *.dfm}

procedure TFormMain.ButtonConnectClick(Sender: TObject);
begin
  If ComPort.Connected=false then
  begin
    ComPort.Port:=ComComboBox.Text;
    try
      ComPort.Open;
    except
      on E : Exception do
        ShowMessage(E.ClassName+' Виникла помилка з кодом : '+E.Message);
    end;
  end;
end;

```

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

```

    end;//if connected
end;

procedure TFormMain.ComPortAfterOpen(Sender: TObject);
begin
    //після відкриття порту робимо неактивними кнопки та інші елементи
    ButtonConnect.Enabled:=false;
    ComComboBox.Enabled:=false;
    LabelNComPort.Enabled:=false;
    ComLedConnect.State:=lsOn;
    ComLedConnect.Kind:=lkGreenLight;
    //кнопку "Роз'єднати" "Старт" робимо активною і передаємо фокус на неї
    ButtonDisconnect.Enabled:=true;
    ButtonStart.Enabled:=true;
    ButtonStart.SetFocus;
end;

procedure TFormMain.ButtonDisconnectClick(Sender: TObject);
begin
    If ComPort.Connected=true then
    begin
        ComPort.Close;
        ButtonConnect.Enabled:=true;
        ComComboBox.Enabled:=true;
        LabelNComPort.Enabled:=true;
        ComLedConnect.State:=lsOff;
        ComLedConnect.Kind:=lkRedLight;
        ButtonStart.Enabled:=false;
        ButtonDisconnect.Enabled:=false;
    end;
end;

```

end;

end;

procedure TFormMain.ButtonStartClick(Sender: TObject);

begin

ComPort.WriteStr('0');

MemoRxTx.Clear;

ButtonStart.Enabled:=false;

end;

procedure TFormMain.ComPortRxChar(Sender: TObject; Count: Integer);

var

RxStr:string;

begin

TimerGraf.Enabled:=false;//резетимо таймер на початок

TimerGraf.Enabled:=true;

ComPort.ReadStr(RxStr, count);

MemoRxTx.Text := MemoRxTx.Text + RxStr;

SendMessage(MemoRxTx.Handle, EM_LINESCROLL,
0,MemoRxTx.Lines.Count);

end;

procedure TFormMain.ButtonClearClick(Sender: TObject);

begin

MemoRxTx.Clear;

If ButtonStart.Enabled=false then ButtonStart.Enabled:=true;

ButtonGraf.Enabled:=false;

end;

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк. 69
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

```
procedure TFormMain.ComPortTxEmpty(Sender: TObject);  
begin  
    ButtonGraf.Visible:=true;  
    TimerGraf.Enabled:=true;  
end;
```

```
procedure TFormMain.TimerGrafTimer(Sender: TObject);  
begin  
    ButtonGraf.Enabled:=true;  
end;
```

```
procedure TFormMain.ButtonGrafClick(Sender: TObject);  
begin  
    FormGraf.ShowModal;  
end;
```

```
procedure TFormMain.FormClose(Sender: TObject; var Action:  
TCloseAction);  
begin  
    TimerGraf.Enabled:=false;  
end;  
  
end.
```

```

unit Unit1;

interface

uses
    Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
    Dialogs, ExtCtrls, TeeProcs, TeEngine, Chart, TeeFunci, Series;

type
    TFormGraf = class(TForm)
        ChartGraf: TChart;
        Series1: TLineSeries;
        TeeFunction1: TAddTeeFunction;
        procedure FormShow(Sender: TObject);
        procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
    private
        { Private declarations }
    public
        { Public declarations }
    end;

var
    FormGraf: TFormGraf;

implementation

uses
    UnitMain;

{$R *.dfm}

```

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						71
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

```

procedure TFormGraf.FormShow(Sender: TObject);
var
  LinesCount, i : integer;
  PosCharA:integer;
  MyStr:string;
  Volt, Amp: string;
  Val_V, Val_A: array of integer;
  Ser1: TLineSeries;
begin
  Ser1:=TLineSeries.Create(ChartGraf);
  //визначаю кількість строк у MEMO
  LinesCount:=FormMain.MemoRxTx.Lines.Count;
  //встановимо розмір масивів Val_V, Val_A
  SetLength(Val_V,LinesCount);
  SetLength(Val_A,LinesCount);
  //Chart1.SeriesList.Clear
  ChartGraf.SeriesList.Clear;
  //обробляємо строки
  For i:=0 to LinesCount-1 do
  begin
    MyStr:=FormMain.MemoRxTx.Lines[i];
    //подивимось чи є значення напруги та струму у строчці
    PosCharA:=Pos('I=',MyStr);
    //якщо значення відсутнє, то наступний крок
    If PosCharA=0 then continue;
    //зчитуємо значення струму
    //спочатку зі троки видалимо непотрібні початкові символи
    Delete(MyStr,1,Pos('=',MyStr));

```

```

    Amp:=Copy(MyStr,1,Pos(Chr(9),MyStr)-1);
    //аналогічно з напругою
    Delete(MyStr,1,Pos('=' ,MyStr));
    Volt:=Copy(MyStr,1,Length(MyStr));
    Val_V[i]:=StrToInt(Volt);
    Val_A[i]:=StrToInt(Amp);
    Ser1.AddXY(Val_V[i],Val_A[i]);
    ChartGraf.AddSeries(Ser1);
end;
end;

procedure TFormGraf.FormClose(Sender: TObject; var Action:
TCloseAction);
begin
    Series1.Free;
end;

end.

```