

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних  
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра  
**АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ НА БАЗІ  
МІКРОКОНТРОЛЕРА АТМЕГА 328P**

студента гр. ЕП-61

А.М. Погуляйло

Науковий керівник,  
ст. викладач, к.ф.-м.н.

І. П. Бурик

Нормоконтроль,  
ст. викладач, к.т.н.

О.Д. Динник

Конотоп 2020

## РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження даної роботи є автоматизовані системи збору даних на базі мікроконтролера ATmega 328P.

Мета роботи полягає у розробленні концепції побудови та застосування пристроїв на базі мікроконтролера ATmega 328P, для автоматичного дослідження ФСЕ, побудови темнових, світлових ВАХ та визначення їх експлуатаційних параметрів.

На сьогодні розроблені автоматичні системи збору даних, але більшість приладів обмежені максимальною напругою зміщення близько 5В та мають досить малу роздільна здатність. У роботі розглядається питання розробки апаратно-програмного комплексу для автоматичного вимірювання та побудови характеристик ФСЕ.

Робота складається із вступу, основної частини із 3 розділів та висновків. У першому розділі наведено огляд методів та засобів дослідження ФСЕ, їх основні характеристики. У другому розділі приведено методику розробки апаратно-програмного комплексу. У третьому розділі наведено аналізується експлуатаційні параметри ФСЕ, отримані за допомогою автоматизованої системи збору даних з відкритим кодом та можливостями міжмашинної комунікації (M2M)

Загальний обсяг роботи становить 39 сторінок, в тому числі 19 рисунків, список літератури з 33 найменувань.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** МІКРОКОНТРОЛЕР, ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ СОНЯЧНИЙ ЕЛЕМЕНТ, АВТОМАТИЧНІ СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	4
<b>ВСТУП</b> .....	5
<b>РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ФСЕ</b> .....	6
1.1. Основні параметри ідеальних та реальних ФСЕ .....	6
1.2. Основні параметри ФСЕ .....	9
<b>РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ</b> .....	13
2.1. Технологія електронного навантаження для знаття ВАХ ФСЕ .....	13
2.2. Методика симуляція роботи схеми електронного навантаження....	17
<b>РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ</b> .....	25
3.1. Особливості роботи автоматичних систем збору даних .....	22
3.2. Автоматизована система збору даних на базі Polytropon .....	31
<b>ВИСНОВОК</b> .....	37
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	38

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- ЗЗ — Зворотний зв'язок
- ФСЕ — Фотоелектричний сонячний елемент
- ВАХ — Вольт-амперна характеристика
- ХХ — Холостий хід
- КЗ — Коротке замикання
- ККД — Коефіцієнт корисної дії
- FF — Фактор заповнення
- НП — Напівпровідник
- STC — Standard test conditions (Стандартні умови вимірювання)
- AR — Air mass (Маса повітря)
- АЧТ — Абсолютно чорне тіло
- ФНЧ — Фільтр низьких частот
- MQTT — Message Queuing Telemetry Transport

## ВСТУП

Разом з розвитком інформаційних технологій та технологій зв'язку з'явилася можливість перетворити електромережі в «розумні» мережі в котрих ЗЗ між виробником та споживачем електроенергії відіграє вирішальну роль для стабільності та економічності енергоспоживання.

Сьогодні, вироблення «зеленої» енергії для зменшення викидів парникового газу в атмосферу є обов'язковим. Також в більшості країнах світу існує політика що направлена на збільшення вироблення електроенергії з розповсюджених та відновлюваних джерел, та покращення заходів енергоощадження зі сторони споживачів.

Серед відновлюваних джерел енергії, сонячна енергія відіграє важливу роль у глобальному масштабі. Проте розподілені системи вироблення електроенергії на основі ФСЕ, піддається впливу змін інтенсивності сонячного випромінювання що у поєднанні зі змінами характеристик ФСЕ, через різні ефекти може призвести до неоптимального перетворення сонячної енергії.

В роботі розглядається реалізація характерографа здатного проводити безліч вимірів за долі секунди. Проект базується на платформі з відкритим вихідним кодом та інтегрованим мікроконтролером що об'єднує в собі сучасні технології енергоспоживання та вимірювання спільно з мережевими технологіями для між машинної комунікації (M2M). Така реалізація може вбудовуватися в сонячні панелі для оптимізації перетворення сонячної енергії, шляхом надання характеристики сонячної панелі на місці. Детальна інформація щодо методики аналізу та проектування портативної системи вимірювання та збору характеристик ФСЕ, представлені у розділі 3.

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ФСЕ

### 1.1. Основні параметри ідеальних та реальних ФСЕ

Перетворення енергії у ФСЕ базується на фотовольтаїчному ефекті в неоднорідних напівпровідникових структурах. Ефективність ФСЕ сильно залежить від перешкод що блокують сонячне випромінювання, накопичення грязі, допуски притаманні технологічному процесу виготовлення ФСЕ, відмінності в орієнтації та деградація ФСЕ під дією сонячного випромінювання (field-aged деградація) [1-6]. ФСЕ є нелінійними напівпровідниковими елементами, до їх переваг можна віднести стійкість до коротких замикань. Для дослідження ФСЕ використовують сімейства ВАХ. Старіння ФСЕ впливає на їх ВАХ, тому система виміру продуктивності ФСЕ може представляти цілісну інформацію для оптимізації генерації електроенергії. З польових досліджень відомо що найбільш деградовані модулі зовні ніяк не відрізнялись від інших.

ВАХ — залежність струму що протікає крізь ФСЕ від напруги при постійних значеннях температури та інтенсивності сонячного випромінювання.

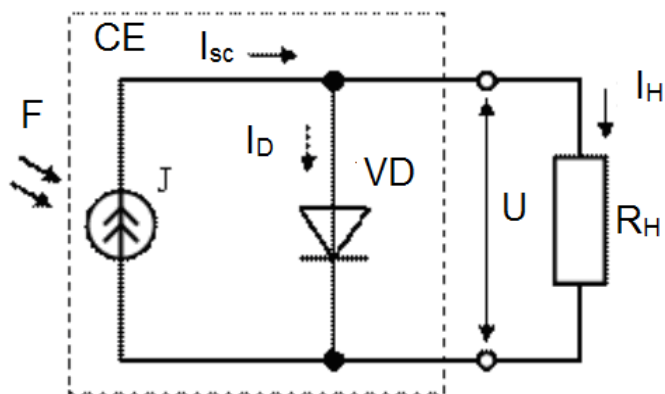


Рис. 1.1. Еквівалентна схема заміщення ідеального ФСЕ [5]

$$I = I_{SC} - I_D = I_0 \left[ \exp\left(\pm \frac{eU}{AkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

де  $I$  — струм крізь ФСЕ;

$I_D$  — струм діода еквівалентної схеми заміщення;

$I_0$  — зворотній струм насичення діода;

$e$  — заряд електрона;

$U$  — напруга на ФСЕ;

$k$  — стала Больцмана;

$A$  — коефіцієнт ідеальності переходу;

$T$  — температура переходу

При розгляданні ідеального ФСЕ використовується еквівалентна схема заміщення. ФСЕ представляється у вигляді діода, тому що він являє собою гомо або гетеро перехід, та джерела струму. Джерело струму моделює струм створений у ФСЕ під дією сонячного випромінювання. Виходячи з світлової ВАХ так кривої навантаження визначаються такі параметри фотоелектричних приладів як:  $U_{OC}$  — напруга ХХ;  $I_{SC}$  — струм КЗ; FF — фактор заповнення ВАХ;  $\eta$  — ККД

При переході до реальних ФСЕ необхідно враховувати додаткові енергетичні втрати, які пояснюються появою на еквівалентній схемі заміщення додаткових шунтуючого та послідовного опорів.

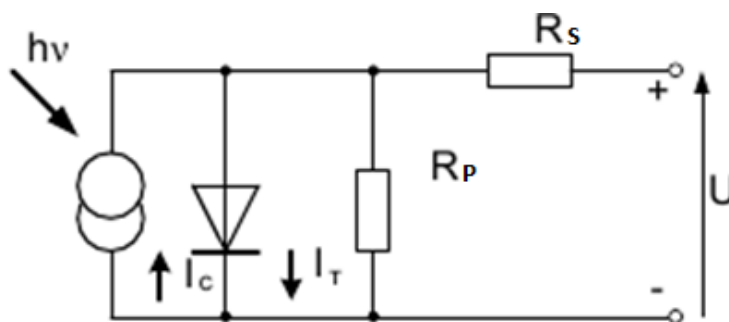


Рис. 1.2. Схема заміщення реального ФСЕ [5]

$$I = I_0 \left[ \exp \frac{e(U - IR_S)}{AkT} - 1 \right] + \frac{(U - IR_S)}{R_P} \quad (2)$$

де  $R_S$  — послідовний опір фотоелементу;

$R_P$  — шунтуючий опір

Формула для розрахунку ККД ФСЕ має наступний вигляд:

$$\eta = \frac{FF \cdot I_{SC} \cdot U_{OC}}{P}$$

де  $P$  — Потужність випромінювання що падає на ФСЕ

$FF$  — фактор заповнення ВАХ, який дорівнює

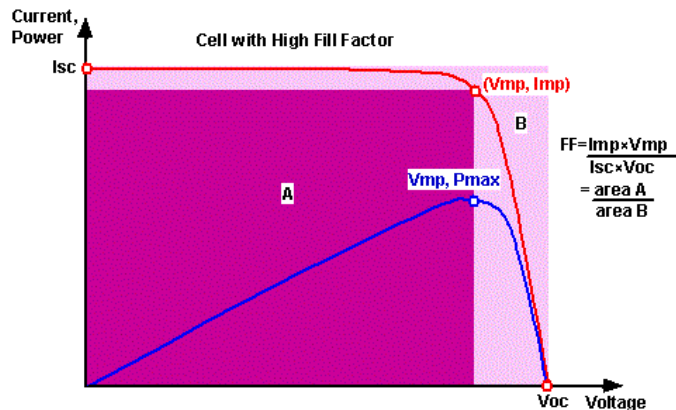


Рис. 1.3. ВАХ, крива навантаження та фактор заповнення ФСЕ [5]

$$FF = \frac{I_m \cdot U_m}{I_{SC} \cdot U_{OC}} \quad (3)$$

де  $I_m$  — сила струму при максимальній потужності приладу

$U_m$  — напруга при максимальній потужності приладу



Ефективність ФСЕ залежить від великої кількості параметрів як приладу так і НП на основі якого він створений. Але основні енергетичні втрати зумовлені: відбиттям сонячного випромінювання від віконного шару ФСЕ; проходження фотоном світла поглинаючого шару ФСЕ без безпосереднього поглинання приладом; опорами приладу (внутрішній, контактний); рекомбінацією генерованих носіїв заряду (міжфазна, об'ємна)

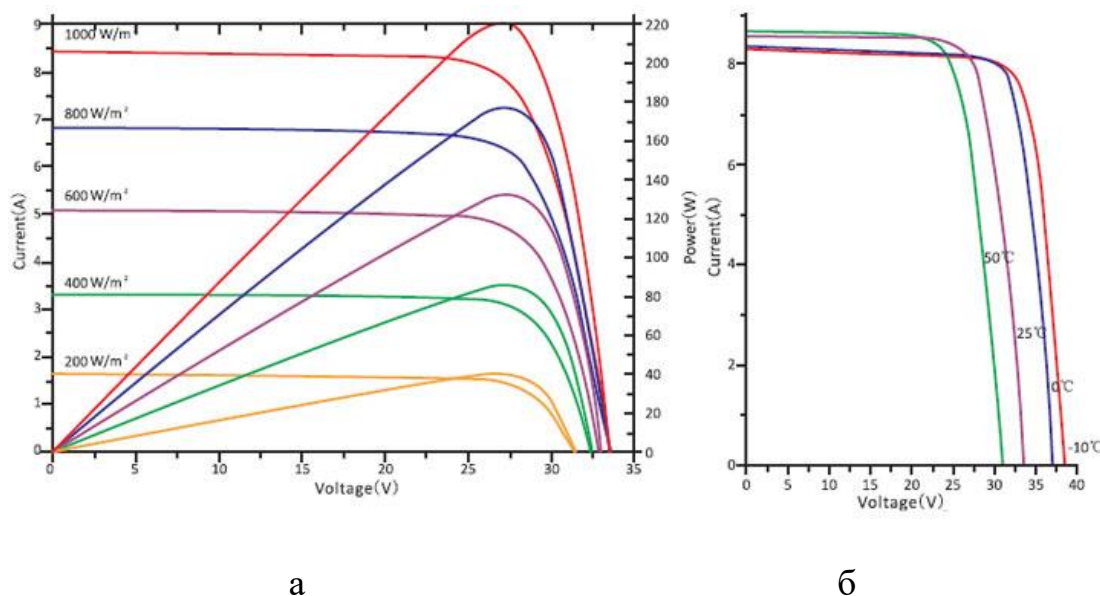


Рис. 1.4. Сімейство ВАХ (а) та криві потужності (б) при змінах інтенсивності сонячного випромінювання, та температури ФСЕ [7]

## 1.2. Основні параметри ФСЕ

Зазвичай тестування ФСЕ проводиться лише на виробництві за стандартних умов, а потім ФСЕ залишаються без нагляду. Допуски при виготовленні ФСЕ можуть бути в межах 5%, отже цей відсоток зеленої енергії втрачається, при послідовному підключенні ФСЕ найгірший модуль значно зменшує генеровану потужність [14]. Рішенням можуть бути оптимізатори та

мікро інвертори, але вони мають досить високу вартість, тому використання таких рішень є невиправданим. Необхідність процедури безперервного контролю ФСЕ є дуже важливою для впровадження, особливо у поєднанні з сучасними оптимізаторами, що забезпечують кожен ФСЕ даними про їх ВАХ.

Виміряні електричні параметри надаються у вигляді ВАХ виміряних за стандартних умов STC:

1. Освітленість  $1 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$

2. Спектральний склад AM1.5

3. Температура  $25^\circ\text{C}$

Види спектральних складів випромінювання:

4. **AM0** — Спектральний склад сонячного випромінювання за межами земної атмосфери. Рівне випромінюванню АЧТ температурою 5800К. Використовується для вимірювання характеристик ФСЕ що будуть використовуватися за межами земної атмосфери (супутники).

5. **AM1** — Спектральний склад сонячного випромінювання після проходження одної земної атмосфери (повітряної маси) на рівні моря при нормальному куті ( $\alpha = 0^\circ$ ) падіння сонячного випромінювання. Використовується для вимірювання параметрів ФСЕ для екваторіальних та тропічних зон.

6. **AM1.5** — ФСЕ як правило не працюють зі спектральним складом сонячного випромінювання що пройшов крізь одну атмосферну масу якщо сонце знаходиться під певним кутом до поверхні землі то ефективна товщина атмосферної маси буде більшою. Цей спектральний склад відповідає сонячному випромінюванню в помірних широтах. Через те що найбільш розвинені країни світу знаходяться переважно в цих широтах, то й цей спектральний склад випромінювання є найбільш розповсюдженим. Цей спектральний склад відповідає сонячному випромінюванню при зенітному куту ( $\alpha = 48,2^\circ$ ), цей кут

змінюється протягом доби, тому AM1.5 відповідає середньому значенню спектрального складу сонячного випромінювання для помірних широт.

7. **AM2~3** — Це значення корисне для оцінки загальної середньої продуктивності ФСЕ що працюють на полярних широтах. Також це значення корисне для оцінки зимової продуктивності сонячних панелей в помірних широтах. Ці значення відповідають кутам падіння сонячного випромінювання на рівні моря ( $\alpha = 60^\circ$ ) та ( $\alpha = 70^\circ$ ) відповідно.

8. **AM38** — Це значення відповідає куту падіння сонячного випромінювання на рівні моря близькому до ( $\alpha = 90^\circ$ ). Але на практиці є дуже велика варіативність інтенсивності сонячного випромінювання вимірюю при цих кутах.

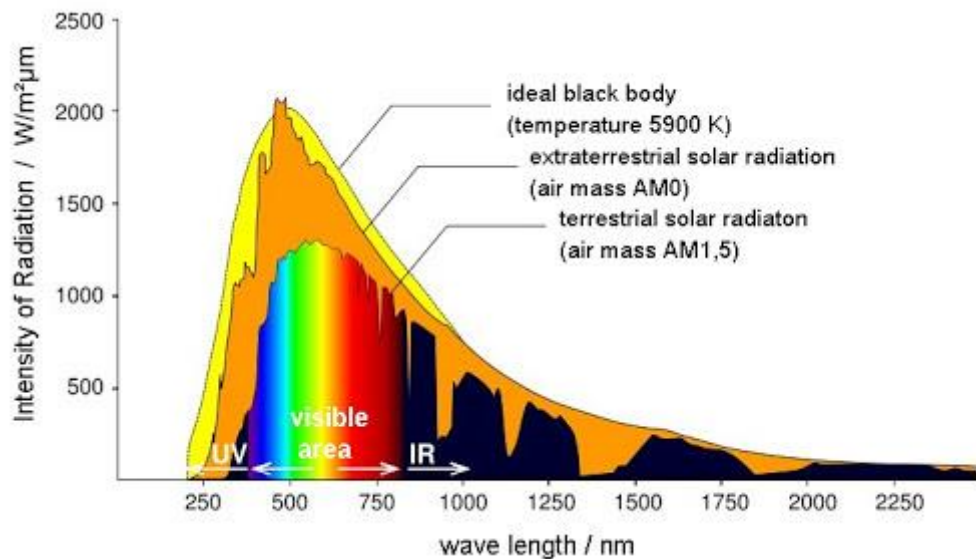


Рис. 1.5. Залежність інтенсивності випромінювання від довжини хвилі при найбільш популярних значеннях атмосферної маси, та спектр випромінювання абсолютно АЧТ

Важливо щоб джерело освітлення при вимірюванні характеристик ФСЕ мало дуже гарну спектральну подібність до сонячного випромінювання за стандартних умов.

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

### 2.1. Технологія електронного навантаження для зняття ВАХ ФСЕ

В літературі [7 — 11] було запропоновано ряд електронних навантажень, однак вони базуються на ручому керуванні за участі оператора. У цій роботі представлено комплексний підхід, при якому електронне навантаження є частиною процедури оптимізації в реальному часі для всіх панелей встановлених на сонячній електростанції, що забезпечують оптимізатори повними даними про сонячні панелі. Адміністратор сонячної електростанції за допомогою використання веб-технологій може отримувати дані про кожну сонячну панель. Для впровадження технічного обслуговування окремих сонячних панелей сонячних панелей у децентралізованій системі.

Для зняття ВАХ ФСЕ необхідне просте електронне навантаження що зображено на рис. 2.1.

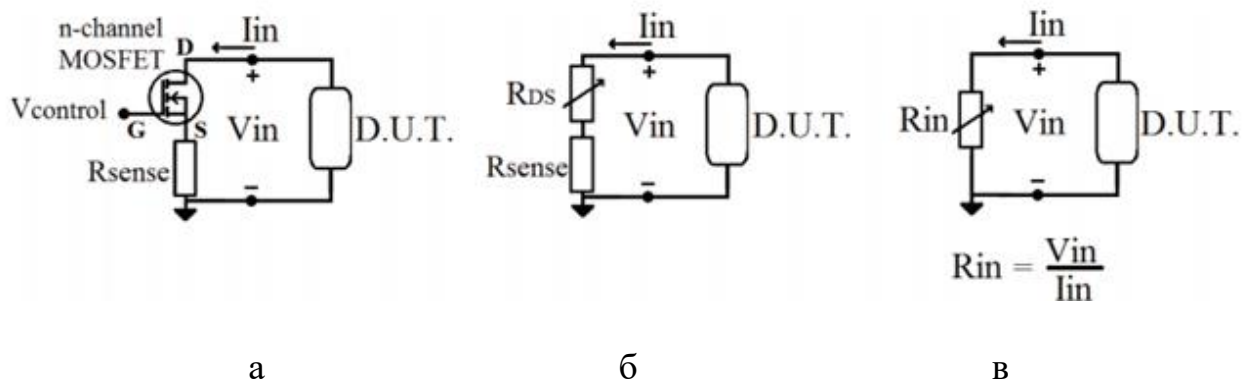


Рис. 2.1. Просте електронне навантаження використанням MOSFET транзистора та резисторів [33]

Навантаження є змінним, за допомогою нього можна проводити вимірювання значень напруги та струму, з періодичним повторенням для необхідного діапазону значень ВАХ. Для автоматичної реалізації такої процедури електронне навантаження повинне керуватися напругою або струмом

через комп'ютер або МК. Найбільш простий підхід зображено на рис. 2.1.а. Де в якості змінного навантаження використовується MOSFET транзистор, керований напругою що подається на його затвор. Коли транзистор знаходиться в області насичення струм стік-витік керується напругою прикладеною між затвором та виткомом.

Резистор  $R_{sense}$  – це вимірювальний резистор та струм, ФСЕ можна виміряти, вимірюючи падіння напруги на цьому резисторі. Вимірювання ВАХ ФСЕ проводиться шляхом зміни опору електронного навантаження під дією прикладеної до затвора напруги.

Загалом існує чотири типи електронних навантажень відповідно до величин які є заздалегідь визначеними та сталими процесі роботи пристрою: постійний струм; постійна напруга; постійний опір; постійна потужність

Зняття ВАХ ФСЕ проходить шляхом зміни певного значення згаданого вище, та вимірювання поточних значень струму та напруги. Зазвичай для отримання характеристик ФСЕ шляхом зняття її ВАХ використовують два з цих типів: постійний струм; постійна напруга

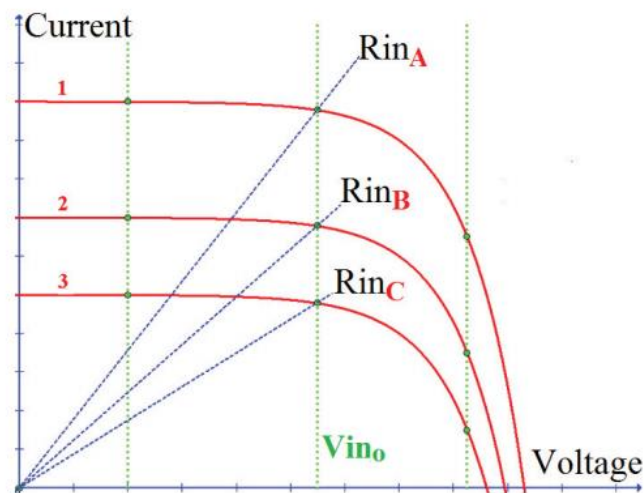


Рис 2.2. Отримання ВАХ ФСЕ за допомогою електронного навантаження з постійною напругою [33]

У цій роботі представлені дані, що стосуються конструкції електронного навантаження з постійною напругою. Такий підхід має властиву йому простоту конструкції та стабільність, відносно електричного навантаження з постійним струмом, та відповідно і низькою вартістю конструкції. На рис. 2.2. зображено процедуру отримання ВАХ ФСЕ за допомогою електронного навантаження з постійною напругою. На цьому рисунку приведено криві ВАХ ФСЕ для різних умов освітлення.

Наприклад, для отримання кривої №1 напруга  $V_{in_0}$  регулюється за рахунок зміни вхідного опору електронного навантаження до значення  $R_{in_A}$ . Перетин кривої навантаження з кривою №1 (точка спокою). Питомі значення опору вимірюється та зберігається. Процедура повторюється зі зміною напруги за допомогою блока керування електронним навантаженням. Таким чином отримується ВАХ ФСЕ. Повний цикл процедури вимірювання повинен бути швидшим, щоб зменшити вплив коливання інсоляції та температури на ВАХ.

На рис. 2.3 представлено блок схему розробленого електронного навантаження з фіксованою напругою. Основна концепція приладу це використання MOSFET транзистора в якості навантаження керованого напругою, та використання технік оптимізації, в топології керування ЗЗ, що стосується стабільності, часу відгуку, простоти конструкції та вартості.

Схема керування (рис. 2.3) генерує напругу на затворі MOSFET транзистора, за допомогою якої визначається робоча точка ФСЕ.

Оскільки було розроблено електронне навантаження з постійною напругою, принцип роботи якого згідно зі схемою (рис. 2.3) полягає в тому що керуюча напруга значення якої ми хочемо отримати визначається як різниця потенціалів на клеммах ФСЕ. Блок керування приймає сигнал ЗЗ з різницею

напруги  $V_{in}$  на клеммах ФСЕ після проходження блоку диференційного підсилювача. Ланцюг управління автоматично регулює напругу ( $V_g$ ) на затворі MOSFET транзистора, при роботі схеми в замкненому контурі, що переходить у рівноважний стан. Після того як напруга на ФСЕ через певний час (час спокою) зрівнюється з напругою керування, що подається мікроконтролером.

Враховуючи, що падіння напруги на вимірювальному резисторі незначне, контролер електронного навантаження генерує відповідну напругу  $V_{ds}$  між стоком та витком MOSFET транзистора, яка приблизно дорівнює сумі напруг на сонячній панелі та напруги зміщення.

Загальна конструкція приладу реалізована з використанням:

1. Диференціального підсилювача, з функцією  $H(S)$
2. Контролера, з передавальною функцією  $F(S)$
3. MOSFET транзистором, з функцією  $H(s)$ , ( $S$  позначає площину  $S$ ).

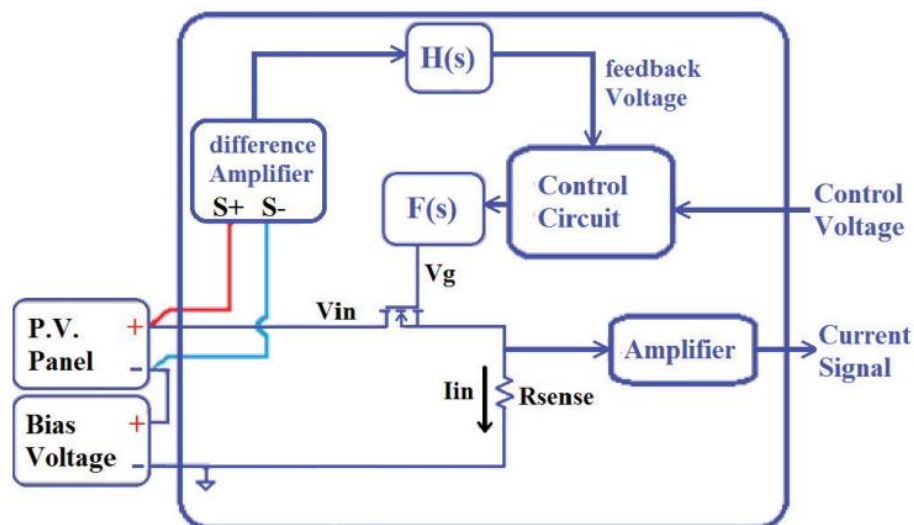


Рис 2.3. Блок схема електронного навантаження з постійною напругою [33]

Робота контролера може бути описана за допомогою наступних кроків:



1. Процедура починається з подання певної напруги керування, що генерується мікроконтролером. Спочатку вимірюється напруга  $V_{DC}$ , в розімкненому контурі. Що дорівнює максимальній вихідній напрузі ФСЕ, при максимальному опорі електронного навантаження. Напруга що регулює транзистор вимірюється як вихідна напруга для контуру ЗЗ після проходження диференціального підсилювача.

2. Сигнал  $V_{in}$  послаблюється в системі  $H(s)$ , оскільки напруга керування, як правило, менша за напругу на сонячній панелі. Таким чином генерується сигнал ЗЗ для контуру керування.

3. Схема управління приводить в дію MOSFET транзистор, напруга на затворі після проходження часу спокою досягає такого значення при якому сигнал ЗЗ буде рівним сигналу управління. Фактична напруга на клеммах ФСЕ буде рівною добутку напруги керування та коефіцієнта згасання  $H_0$  (передавальна характеристика  $H(s)$  при постійному струмі).

4. Кроки повторюються зі зміною напруги управління, значення напруги та струму зберігаються для кожного кроку, так отримується ВАХ ФСЕ.

Напруга зміщення використовується для зміщення MOSFET транзистора вимірювання поблизу області струму КЗ ( $I_{SC}$ ) та навіть для зняття зворотної гілки ВАХ ФСЕ, якщо це потрібно в темнових умовах. Щоб мінімізувати споживання електроенергії, напруга зміщення повинна утримуватися в мінімальному значенні при значенні якої досягається мінімальна напруга на клеммах ФСЕ.

Ми можемо обчислити мінімальну напругу зсуву як:

$$V_b = R_{min} \cdot I_{SC}$$

де  $R_{min}$  — мінімальний вхідний опір електронного навантаження

$I_{sc}$  — струм КЗ ФСЕ

## 2.2. Методика симуляція роботи схеми електронного навантаження

Конкретна реалізація розробленого електронного навантаження представлена в даному підрозділі разом з теоретичним аналізом, який використовується для опису роботи системи.

Алгоритмом (рис.2.4) описується реалізація загальної топології, представленої на рис. 2.3.

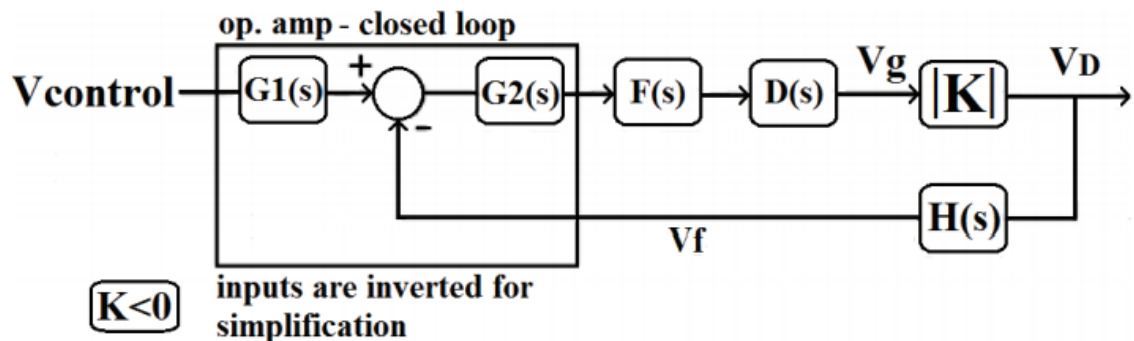


Рис 2.4. Алгоритм роботи електронного навантаження [33]

$V_{control}$  — вхідний сигнал до контролера, що генерується блоком мікроконтролера, що генерується згідно до описаних вище кроків, тоді як  $G_1(S)$  та  $G_2(S)$  походять від спрощеної моделі ОП що використовується як контролер.

Існують також і інші характеристики ОП які неможливо змодельовати, такі як, швидкість повороту вихідної напруги  $A(S)$ , які можуть пояснити коливання, що виникають в реальній реалізації (рис. 2.4).

К — являє собою включення MOSFET транзистора зі спільним стоком в поєднанні з лінеаризованою відповіддю ФСЕ. Тому можна вважати К як сталу (ФСЕ та MOSFET транзистор). Напруга що подається на затвор MOSFET транзистора на виході ОП, через компенсатор  $F(s)$ , та ФНЧ  $D(s)$ , створений з вхідної ємності MOSFET транзистора та резистора  $R_6$ .

$H(s)$  — схема що оброблює  $V_d$  та генерує  $V_f$  (напругу ЗЗ,  $V_{feedback}$ ) для контроллера.

На принциповій схемі (рис. 2.5) зображено реалізацію загальної топології представленої на (рис 2.4), на цій схемі також зображена проста модель сонячної панелі.

$U_1$  — повторювач, призначений для віднімання напруги зміщення ( $V_{bias}$ ) від вхідної напруги електричного навантаження. За допомогою дільника напруги  $H(S)$  відношення:

$$\frac{V_{panel}}{V_{feedback}}$$

(5)

А отже і регулює відношення:

$$\frac{V_{panel}}{V_{control}}$$

(6)

$H(0)$  — Значення постійного струму для  $H(S)$ .

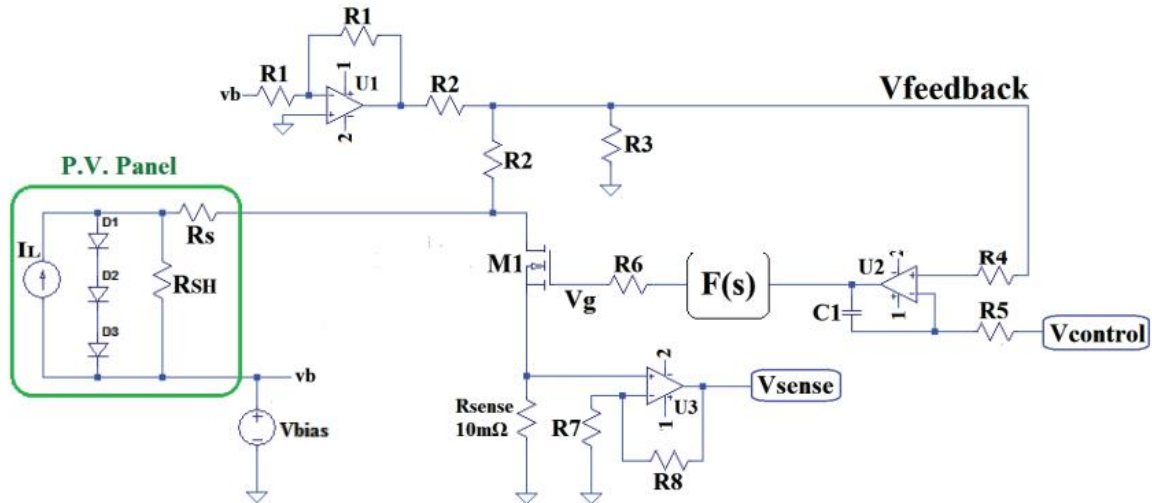


Рис. 2.5. Принципова схема реалізації запропонованого електричного навантаження [33]

В наступному розділі приведено аналіз пасивного субстрактора з функцією передачі, визначена як незалежна від частоти.

$$H(Ss) = \frac{R_3}{2R_3 + R_2}$$

(7)

Виходячи зі схеми зображеної на рис. 2.4 та рис. 2.5, було обрано загальний підхід для інтегратора на основі ОП ( $U_2$ ), де:

$R_5$  — навантажувальний резистор

$C_1$  — конденсатор ЗЗ інвертуючого підсилювача

$$G_1(s) = \frac{1}{C_1 R_5 + 1}$$

(8)

$$G_2(Ss) = \frac{1}{\frac{1 + \frac{s}{\omega_b}}{A_0} + \frac{sC_1R_5}{sC_1R_5 + 1}} \quad (9)$$

де  $A_0$  — коефіцієнт підсилення ОП;

$0$  — пропускна здатність ОП

В наступному розділі наведено аналіз функції інвертуючого інтегратора, що призводить до функції передачі  $G_1(s)$  та  $G_2(Ss)$  приведених вище.

Функція  $D(s)$  (рис. 2.4) відповідає ФНЧ при поєднанні ємкості затвора  $C_g$  MOSFET транзистора, та опору  $R_6$ . Цей фільтр вводить затримку фази та збільшує «простріл», що виникає коли як  $V_{control}$  засовується ступінчаста характеристика, для вивчення стабільності електронного навантаження. Виходячи з цього ми можемо написати наступне рівняння:

$$D(s) = \frac{1}{sC_{gs}R_6 + 1} \quad (10)$$

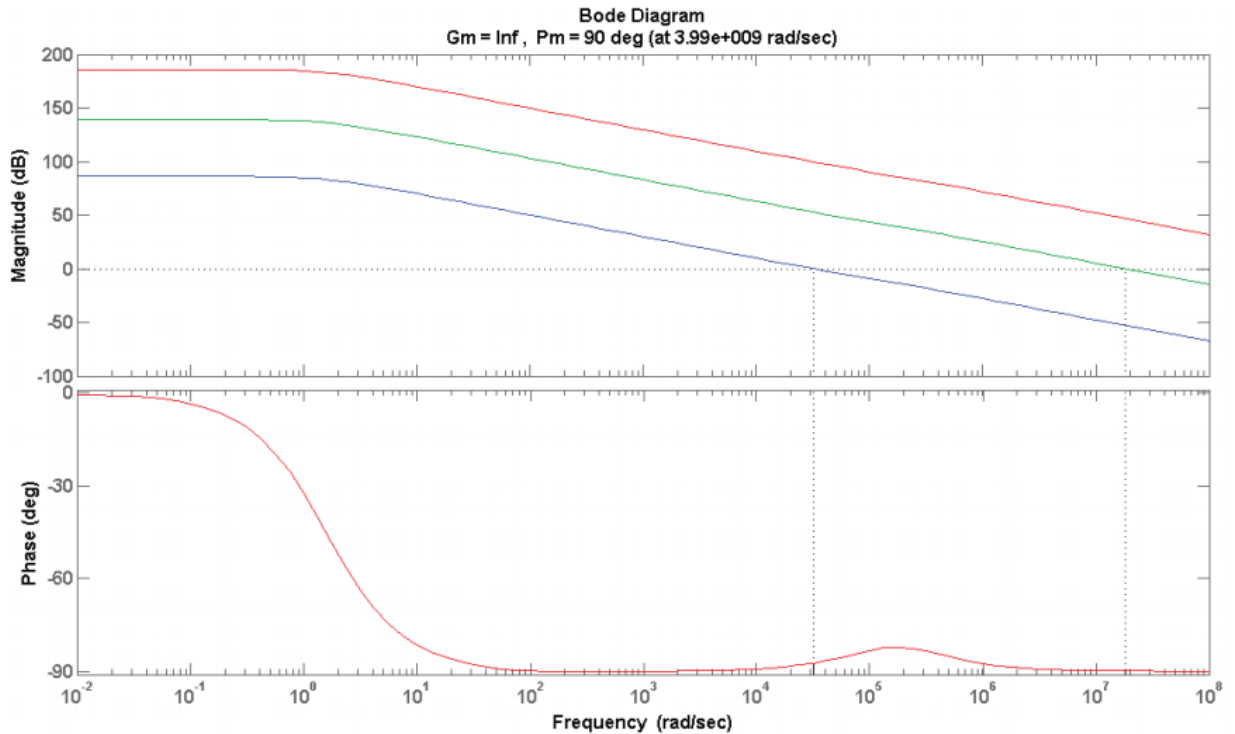


Рис. 2.6. Логарифмічна амплітудно-фазова та частотна характеристика роботи пасивного субстрактора [33]

В цій роботі було вибрано n-канальний MOSEFT транзистор BUK9Y12-100E від NXP:

1. Максимальна напруга стоку 100В
2. Максимальний струм стоку 85А
3. Максимальна потужність розсіювання 238 Вт
4. Максимальний опір  $R_{dson} = 12$  мОм

Типове значення ємності затвору для цього трназистора становить 6.5 нФ.

Для спрощення системного аналізу було використано лінеаризовану функцію для фактичної системи, та я к результат передавальна функція для електронного навантаження може бути записана як:

$$G_S(s) = \frac{G1(Ss) \cdot G2(s) \cdot F(Ss) \cdot D(s) \cdot |K|}{1 + H(s)} \quad (11)$$

При постійному струмі ( $s = 0$ ):

$$G_S(s) = \frac{R3 + R2}{R3} = 1 + \frac{R2}{R3} \quad (12)$$

Тому співвідношення:

$$\frac{V_{panel}}{V_{control}} \quad (13)$$

Не залежить від параметрів системи. Після цього ми можемо обчислити передавальну функцію для MOSFET транзистора.

$$G_{op}(s) = H(s) \cdot G2(s) \cdot F(s) \cdot D(s) \cdot |K| \quad (14)$$

Реалізація електронного навантаження моделювалася відповідно до передавальної функції, представленої вище. Аналіз представленої функції електронного навантаження показав невелике відставання по фазі, що призводить до стабільності або зменшення стабільності системи.

Проведено аналіз електронної системи навантаження з резистивним субстрактором, для забезпечення зсуву фази та типової однополюсної моделі

контролера, як показано на рис 2.6. Отже система є більш стабільною, тому був реалізований саме цей підхід.



## РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

### 3.1. Особливості роботи автоматичної системи збору даних

Для ОП (рис.3.1) з коефіцієнтом підсилення ( $K_{оп}$ ) рівним  $A$ . Наступні рівняння справедливі для  $V_{in}$  та  $V_{nin}$  для інвертуючого на неінвертуючого входів ОП відповідно:

$$\frac{V_{in} - V_{inv}}{Z1(S)} = \frac{V_{in} - V_0}{Z2(S)} \quad (15)$$

$$V_0 = A(S)(V_{nin} - V_{inv}) \quad (16)$$

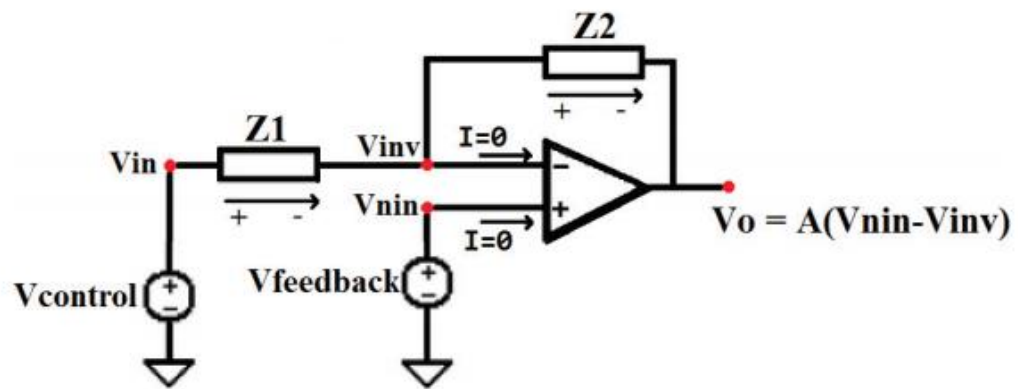


Рис. 3.1. Топологія інвертуючого підсилювача на ОП [33]

Розв'язавши рівняння отримуємо:

$$V_o(s) = \frac{V_{in} - V_{nin} \cdot \frac{Z2(s)}{Z1(s) + Z2(s)}}{\frac{1}{A(s)} + \frac{Z1(s)}{Z1(s) + Z2(s)}} \quad (17)$$

Ми можемо замінити:

$$V_{in} = V_{feedback} \quad (18)$$

$$V_{in} = V_{control} \quad (19)$$

Зважаючи на те що Z1 є резистором зі значенням R, а Z2 є конденсатором ми отримаємо:

$$V_o(s) = \frac{V_{feedback} - V_{control} \cdot \frac{1}{sCR + 1}}{\frac{1}{A(s)} + \frac{sCR}{sCR + 1}} = \frac{V_{feedback} \cdot [sCR + 1] - V_{control}}{sCR[\frac{1}{A(s)} + 1] + \frac{1}{A(s)}} \quad (20)$$

Рівняння для  $G1(S)$  та для  $G2(S)$  використані в блок схемі вище:

$$V_o(s) = [V_{feedback} - V_{control} \cdot \frac{1}{sCR + 1}] \cdot \frac{1}{\frac{1 + s/\omega_b}{A_o} + \frac{sCR}{sCR + 1}}$$

$$V_o(s) = [V_{feedback} - V_{control} \cdot G1(s)] \cdot G2(s) \quad (21)$$

Припустивши, що ми маємо ідеальний ОП отримаємо наступне рівняння:

$$V_o(s) = V_{feedback} \frac{sCR + 1}{sCR} - V_{control} \frac{1}{sCR} \quad (22)$$

Як ми бачимо, що раптові зміни сигналу ЗЗ обробляються ОП швидше, що призводить до швидшої та стабільнішої реакції системи.

Величину параметра К можна оцінити зробивши лінійне наближення моделі MOSFET транзистора та сонячної панелі, припускаючи, що навантаження працює поблизу точки, де було здійснено наближення, для MOSFET транзистора, ми можемо визначити значення похідних:

$$Y_1 = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} > 0 \quad Y_2 = \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} > 0 \quad (23)$$

Для незначних змін напруги  $V_{GS}$  та  $V_{DS}$  поблизу робочої точки, можемо припустити:

$$\begin{aligned} \Delta I_D &= \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \cdot \Delta V_{GS} + \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \cdot \Delta V_{DS} \\ \Delta I_D &= \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \cdot (\Delta V_G - \Delta I_D \cdot R_{sense}) + \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \cdot (\Delta V_D - \Delta I_D \cdot R_{sense}) \\ \Delta I_D &= \frac{Y_1}{1 + R_{sense}(Y_1 + Y_2)} \cdot \Delta V_G + \frac{Y_2}{1 + R_{sense}(Y_1 + Y_2)} \cdot \Delta V_D \end{aligned} \quad (24)$$

Напруга сонячної панелі змінюється відносно струму у відношенні:

$$P = \frac{\partial V_{panel}}{\partial I_{panel}} < 0 \quad (25)$$

Для малих змін поблизу робочої точки з відомим Р можемо припустити:

$$\Delta V_D = \frac{\partial V_{panel}}{\partial I_{panel}} \cdot \Delta I_D \quad (26)$$

Змінна  $K$  – це відношення зміни вхідної напруги до зміни напруги на затворі:

$$K = \frac{\Delta V_D}{\Delta V_G} = \frac{P \cdot Y_A}{1 - P \cdot Y_B} = \frac{-|P| \cdot Y_A}{1 + |P| \cdot Y_B} < 0$$

(27)

Вираз буде мати наступний вигляд:

$$K = \frac{-|P| \cdot \frac{Y_1}{1 + R_{sense}(Y_1 + Y_2)}}{1 + |P| \cdot \frac{Y_2}{1 + R_{sense}(Y_1 + Y_2)}} = \frac{-|P| \cdot Y_1}{1 + R_{sense}(Y_1 + Y_2) + |P| \cdot Y_2} \Rightarrow$$

(28)

$$K = \frac{-\left| \frac{\partial V_{panel}}{\partial I_{panel}} \right| \cdot \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}}{1 + R_{sense} \left( \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} + \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right) + \left| \frac{\partial V_{panel}}{\partial I_{panel}} \right| \cdot \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}}}$$

(29)

Якщо ми будемо використовувати напругу зміщення з вхідним опором  $R_5$ , то отримаємо:

$$K = \frac{-\left| \frac{\partial V_{panel}}{\partial I_{panel}} \right| + R_5 \cdot \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}}{1 + R_{sense} \left( \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} + \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} \right) + \left| \frac{\partial V_{panel}}{\partial I_{panel}} \right| + R_5 \cdot \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}}}$$

(30)

Для віднімання напруги зміщення використовується схема трьох резисторів. Основою перевагою такої схеми є те що струм при використанні такої схеми проходить без затримки в порівнянні зі схемою на ОП.

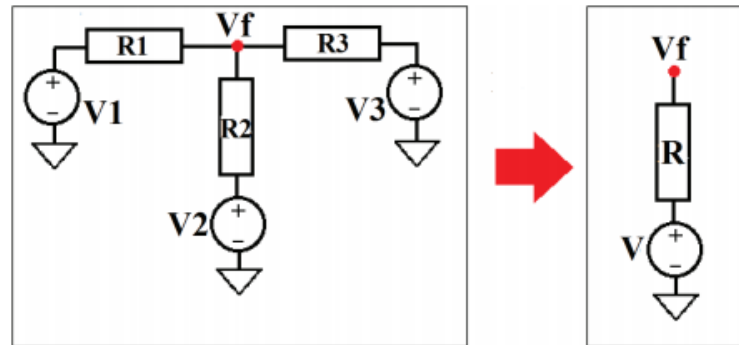


Рис 3.2. Схема субстрактора за використанням резисторів [33]

Джерела напруги можна перетворити на еквівалентні [33]:

$$I = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}$$

(31)

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

(32)

Потім це джерело перетворюється на еквівалентне джерело напруги:

$$V = I \cdot R = \frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{V_1 \cdot R_2 R_3 + V_2 \cdot R_1 R_3 + V_3 \cdot R_1 R_2}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}$$

(33)

$$R = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3} \quad (34)$$

Для того щоб відділити  $V_{bias}$  від загальної вхідної напруги, було використано ОП включеного як інвертуючий підсилювач з коефіцієнтом підсилення рівним 1 ( $K_{OP} = 1$ ). Резистори  $R_2$  та  $R_1$  повинні мати рівні значення. Резистор  $R_3$  підключений до спільного провідника використовується для подальшого ослаблення сигналу напруги ЗЗ ( $V_{feedback}$ ).

Схему представлену на рис. 3.2. можна представити за допомогою теореми Тевена як:

$$V = \frac{-V_{bias} R_2 R_3 + (V_{bias} + V_{panel}) R_2 R_3}{R_2 R_2 + R_2 R_3 + R_2 R_3} = V_{panel} \frac{R_3}{R_2 + 2R_3} \quad (35)$$

$$R = \frac{R_2 R_3}{R_2 + 2R_3} \quad (36)$$

$$V = \frac{-V_{bias} R_2 R_3 + (V_{bias} + V_{panel}) R_2 R_3}{R_2 R_2 + R_2 R_3 + R_2 R_3} = V_{panel} \frac{R_3}{R_2 + 2R_3} \quad (37)$$

$$R = \frac{R_2 R_3}{R_2 + 2R_3} \quad (38)$$

### 3.2. Автоматизована система збору даних на базі Polytropon

Загальна концепція верхнього ієрархічного рівня наведена на рис. 3.3, що базується на конструкції, представлений на рис. 2.3, з мікроконтролером, що забезпечує керуючу напругу завдяки ЦАП та вимірює напругу через вбудований АЦП. Платформа Polytropon використовується як система, що забезпечує збір та обробку даних з електронних навантажень.

Ця платформа з відкритим кодом була реалізована на 4-х шаровій друкованій платі з розмірами (6 см\*7.6 см) та описана в [12-13]. В основі приладу лежать два мікроконтролери Atmega 328P з надзвичайно низьким споживанням енергії та підтримкою плат розширення сумісних з Arduino та Launchpad. Платформа Polytropon інтегрує всі необхідні можливості між машинних зв'язків на основі протоколу MQTT для відправки зібраних з сонячних панелей ВАХ. За допомогою підходу «Publish / Subscribe» кожен клієнт отримує тільки ті дані що його цікавлять.

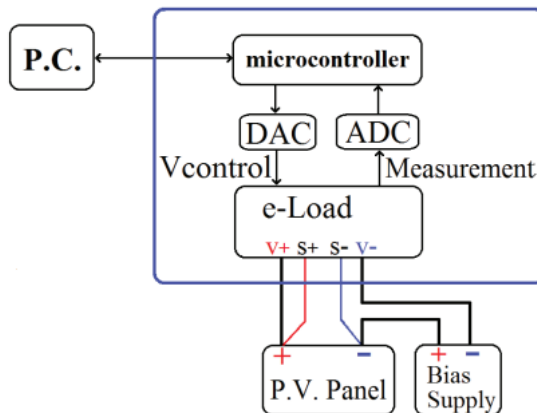


Рис. 3.3. Верхній ієрархічний рівень спроектованої автоматичної системи збору даних [33]

MQTT — «Publish / Subscribe» протокол з відкритим кодом для телеметрії, що легко адаптується до кожної з потреб обміну повідомленнями. На платформі

Polytropol вбудований у шлюз. У вузлах бездротових датчиків платформи реалізована спрощена версія протоколу MQTT-SN, оскільки він не реалізує рівні TCP/IP, що призводить до мінімального споживання енергії.



Рис. 3.4. Зовнішній вигляд двох типів плат платформи Polytropol сумісна з платами Arduino (а), сумісна з платами Launchpad (б) [33]

На рис 3.5 представлена концепція хмарної мережі на базі протоколу MQTT. Як приклад для «Publishers» було обрано вузли WSN, що використовуються для автоматичного зчитування даних з лічильників. Ці вузли не знають адресу своїх абонентів, що можуть бути як віддаленими серверами так і простою HTTP програмою. Всі клієнти мають доступ до зібраної інформації. В платформі Polytropol протокол MQTT-SN був реалізований в кожному вузлі WSN для публікації зібраних даних.

Загальна конструкція програмного забезпечення Polytropol для всіх додатків з різницею, що стосується лише «тем» (заголовків що передаються програмою)



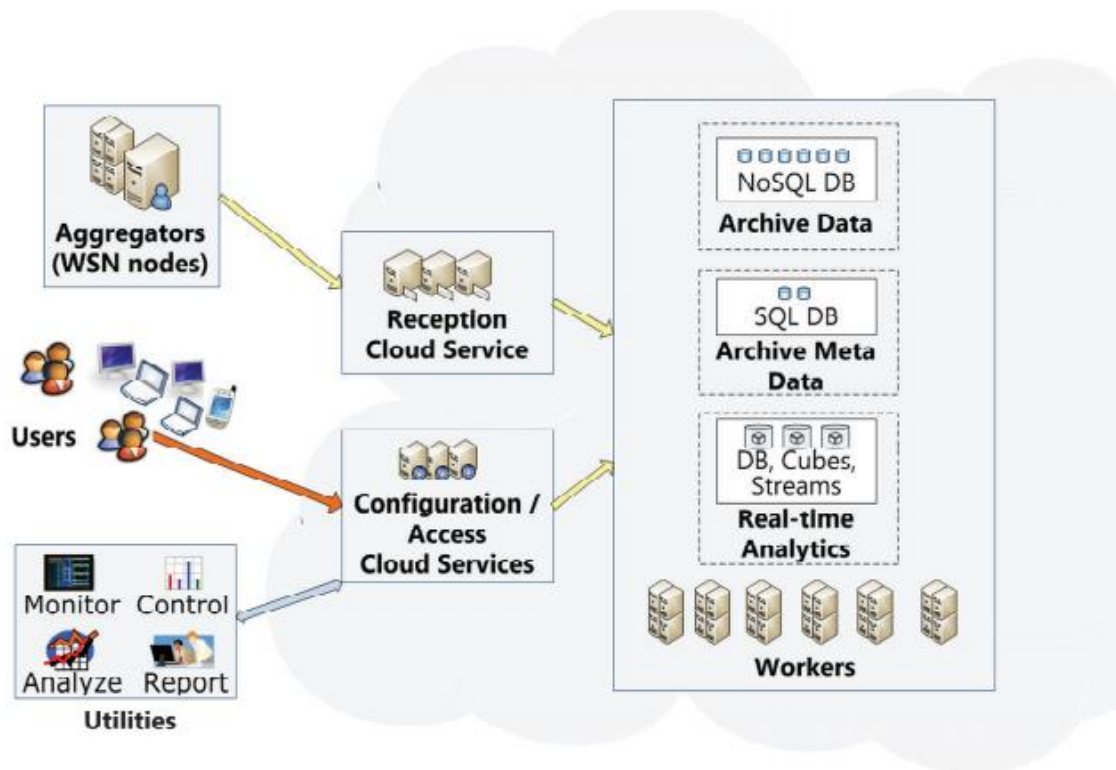


Рис. 3.5. Концепт хмарної автоматичної системи збору даних на базі протоколу MQTT [33]

Програмне забезпечення є загальним для шлюзу та для сервера. У всіх видах використовуються програми які отримують дані, сформовані WSN, та підписані на потрібні їм «теми». Кожна тема має назву «Country/City/PVpark\_1234/Panel\_456/IV\_Curver» посилається на певну сонячну електростанцію. У даному прикладі отримується ВАХ сонячної панелі з ідентифікаційним номером 456, що відноситься до сонячної електростанції з номером 1234. Для отримання ВАХ цей рядок повинен бути переданий через WSN шлюз до конкретного брокера. В роботі було використано дві сонячні панелі невеликих розмірів (2 см \* 3 см). Одна з панелей має дефект який неможливо виявити неозброєним оком візуально, що призводить до неефективної генерації електроенергії. З простого порівняння графіків рис.3.6-рис.3.10 дефект сонячної панелі 2 є очевидним.

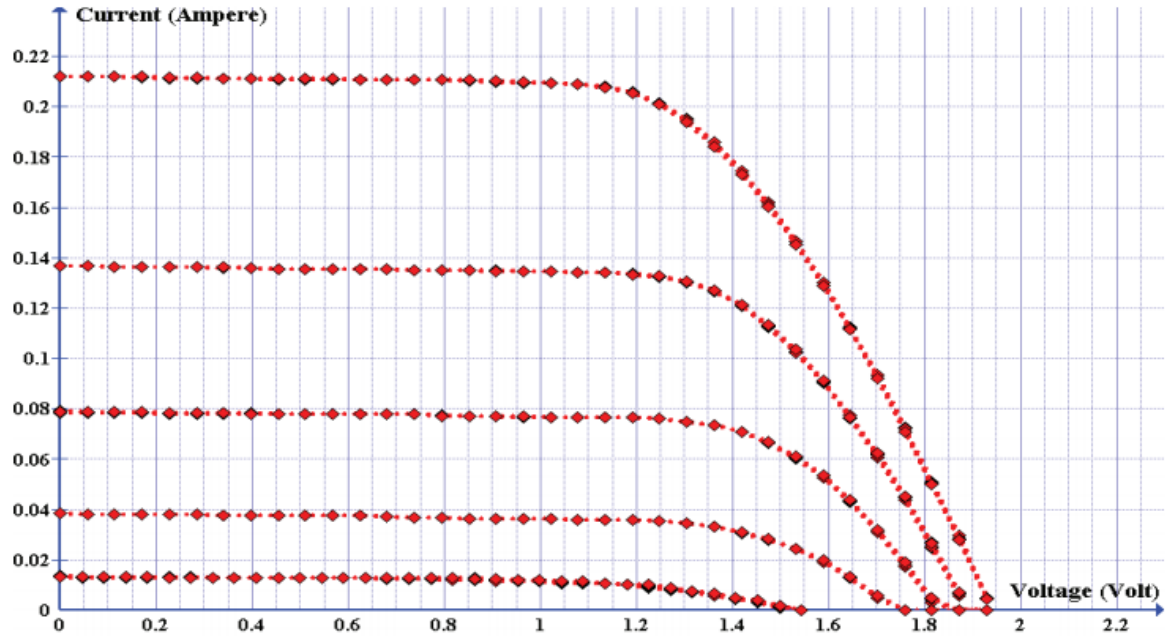


Рис. 3.6. ВАХ сонячної панелі без дефектів

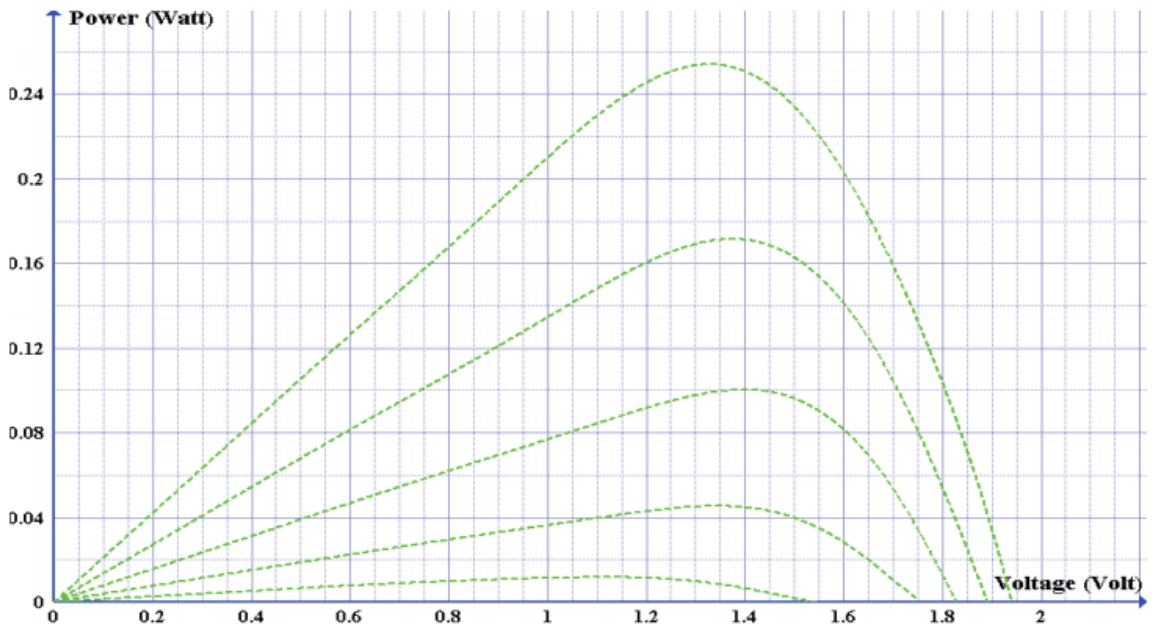


Рис. 3.7. Крива навантаження для панелі без дефектів

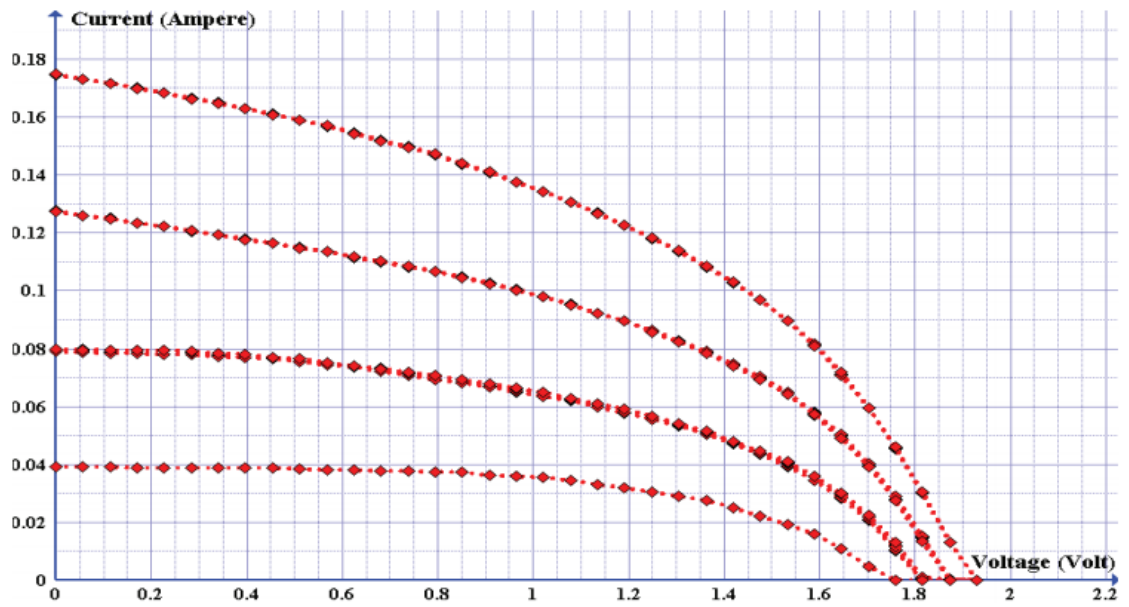


Рис. 3.8. ВАХ сонячної панелі з дефектами

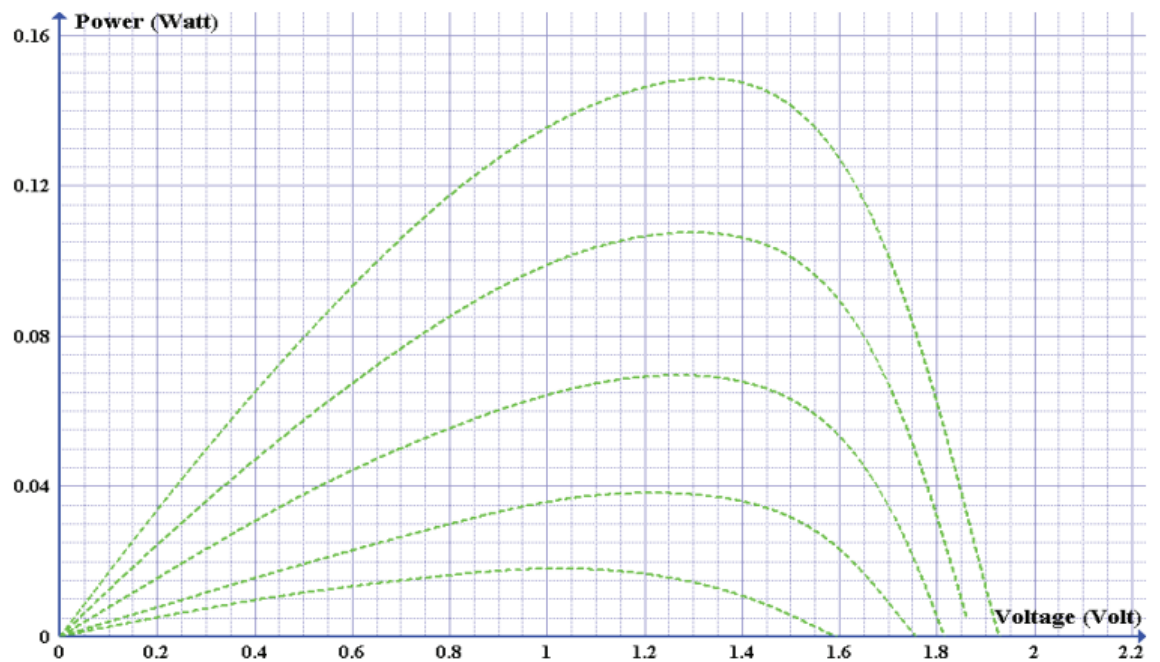


Рис. 3.9. Крива навантаження для панелі з дефектами

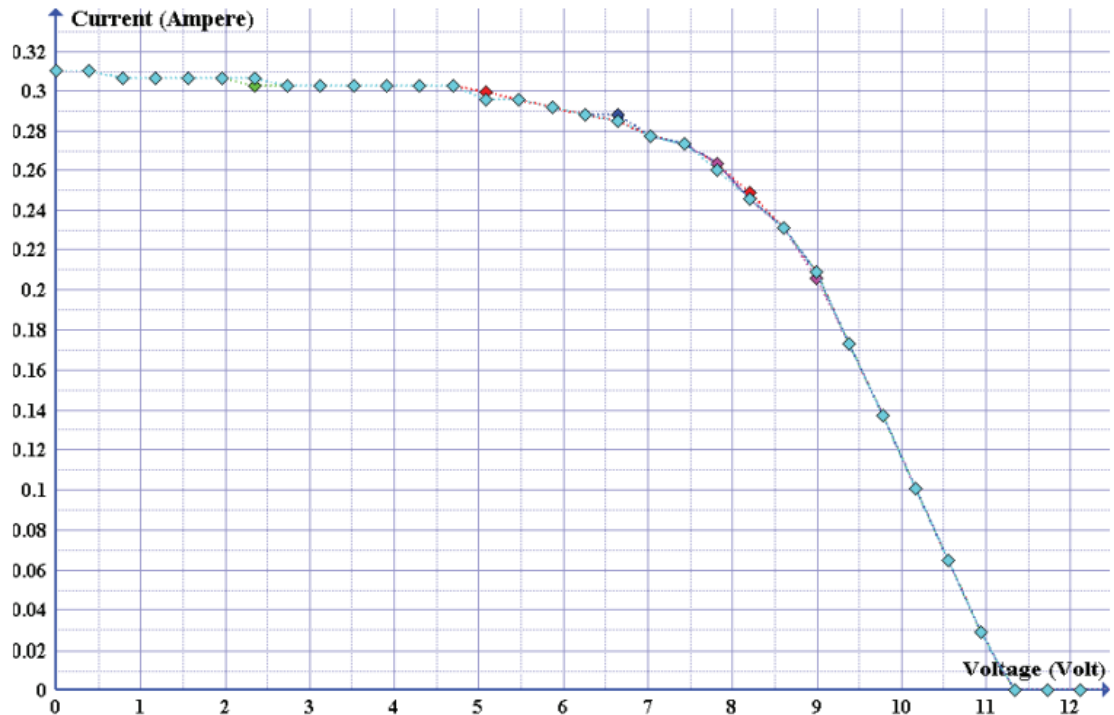


Рис. 3.10. ВАХ для промислової сонячної панелі

Кожна ВАХ складається з 36 точок, кожна точка є середнім значенням 20 вимірювань при одному значенні напруги, що генерується електронним навантаженням для зменшення похибки. Повний цикл від початку вимірювання до отримання ВАХ складає 70 мс.

На рис. 3.10. зображена характерна ВАХ для сонячної панелі звичайних розмірів які використовуються на сонячних електростанціях.

## ВИСНОВОК

Методика використана в цій роботі об'єднує в собі як обчислювальні так і прикладні технології для досягнення результату. Результатом цієї роботи було моделювання та проектування автоматичної системи збору даних сонячних панелей, шляхом автоматичного зняття їх ВАХ. Повний цикл вимірювання ВАХ у спроектованого приладу займає 70 мс. Такі системи можуть використовуватися на децентралізованій сонячних електростанціях. Тому що прилад може бути вмонтований в кожен окрему сонячну панель, та автоматично надавати данні про кожну панель адміністраторові сонячної електростанції, разом з інформацією про парк у якому знаходиться ця панель, та ідентифікаційний номер панелі. Це дає змогу виявити проблемну сонячну панель, та замінити її для більш ефективного перетворення сонячної енергії.

Плюсом є те що прилад базується на платформі з відкритим кодом Polytrop, як протокол для обміну інформацією використовується протокол MQTT та MQTT-SN, що дозволяє автоматизувати систему, та зробити данні доступними з веб мережі. Такий підхід дозволяє кожному експериментувати та вносити свій вклад в розвиток технології для збільшення ефективності, та зручності роботи сонячних електростанцій.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zavorotnyi V.F. The laboratory tester of solar cells with dynamic reconfiguration of measuring system / V. F. Zavorotnyi, O.V. Borisov // *Microsyst Electron Acoust.* – 2018. – vol. 23, №. 1. – P. 23-29.
2. Рябко А. Використання сонячних модулів у лабораторному практикумі з фізики /А. Рябко, Р. Кухарчук // *Педагогічні науки: теорія, історія, інноваційні технології.* – 2018, № 1 (75) . – С. 65-75.
3. Василюха Х. В. Вдосконалення нормативно-технічної бази випробувань сонячних перетворювачів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.01.02 / Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2017. – 20 с.
4. Божко К.М. Вдосконалення методів та засобів контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.13 / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – Київ, 2016. – 24 с.
5. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Числове моделювання робочих характеристик сонячних елементів з використанням програмного пакету SCAPS-3302» з дисципліни "Фізико-технологічні основи перетворення сонячної енергії" / укладачі Кобяков О.М., Єрмоменко Ю.С., Іващенко М.М., Опанасюк А.С. - Суми: СумДУ, 2015. - 28 с.
6. Ivashchenko M.M. Influence of substrate temperature on physical properties of SnS films deposited by close-spaced vacuum sublimation / [M.M. Ivashchenko, I.P. Buryk, A.S. Oranasyuk, O.O. Podoprygora] // Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників "Лашкарьовські читання 2018", м. Київ, 4-6 квітня 2018 р.

7. Ivashchenko M.M. Numerical simulation of SnS/CdS(ZnO)/ITO solar cells / [M.M. Ivashchenko, I.P. Buryk, A.S. Opanasyuk, D.V. Kuzmin, O.O. Podoprygora] // Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників "Лашкарьовські читання 2018", м. Київ, 4-6 квітня 2018 р.
8. Іващенко М.М. Моделювання робочих характеристик фотоперетворювачів, виконаних на базі структури SnS/ZnS/FTO / [М.М. Іващенко, І.П. Бурик, Д.В. Кузьмін, І.А. Гришко, А.С. Опанасюк] // I Міжнародна науково-практична конференція «Елементи, прилади та системи електронної техніки», м. Запоріжжя, 14 – 16 листопада 2018 р.
9. Ivashchenko M. Current-voltage curves numerical simulation of photoconverters based on SnS/SnS<sub>2</sub>/FTO structure / [M. Ivashchenko, A. Opanasyuk, I. Buryk, D. Kuzmin, Yu. Stoliarchuk] // III Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем» MEICS-2018, м. Дніпро, 21 – 23 листопада 2018 р.
10. Борисов О.В. Твердотільна електроніка : підручник / О.В. Борисов, Ю.І. Якименко; за заг. ред. Ю.І. Якименка – К.: НТУУ “КПІ”, 2015. – 484 с.
11. Еволюція сонячної енергетики [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://avenston.com/articles/osnovi-tehnologiyi-virobnitstva-kremniyevih-sonyachnih-fotoperetvoryuvachiv/>
12. Photovoltaic research laboratory [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://pv.mit.edu/home/education/resources-for-educators/build-your-own-sourcemeater/>
13. Arduino [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.arduino.cc/>

14. дослідження роботи фотоелектричного модуля - КПІ [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28287/1/FEP.pdf>.
15. Дослідження вихідних та діодних параметрів ... - Page.if.ua [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://page.if.ua/uploads/pcss/vol2/number2/0203-13.pdf>.
16. Застосування технологій фотоелектричних ... - Core [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://core.ac.uk/download/pdf/52159454.pdf>.
17. Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних ... [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/download/239/238>.
18. Дослідження залежності параметрів ... [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [http://kntu.net.ua/ukr/content/download/75589/438715/file/2020\\_3.06.pdf](http://kntu.net.ua/ukr/content/download/75589/438715/file/2020_3.06.pdf).
19. Кремнієві ФСЕ. Революційні технології детектування - ТОВ ... [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://seltokphotonics.com/info/articles/sipm\\_revolyutsiyini\\_tekhnologiyi\\_detektuvannya/](https://seltokphotonics.com/info/articles/sipm_revolyutsiyini_tekhnologiyi_detektuvannya/).
20. кут нахилу сонячних батарей та його вплив на техніку ... [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/>.
21. аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних ... [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/download/239/238>.
22. Zavorotnyi V.F. The laboratory tester of solar cells with dynamic reconfiguration of measuring system / V. F. Zavorotnyi, O.V. Borisov // *Microsyst Electron Acoust.* – 2018. – vol. 23, №. 1. – P. 23-29.



- 23.Рябко А. Використання сонячних модулів у лабораторному практикумі з фізики /А. Рябко, Р. Кухарчук // Педагогічні науки: теорія, історія, інноваційні технології. – 2018, № 1 (75) . – С. 65-75.
- 24.Василиха Х. В. Вдосконалення нормативно-технічної бази випробувань сонячних перетворювачів: автореф. дис. на здобуття наук. Ступеня канд. техн. наук: спец. 05.01.02 / Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2017. – 20 с.
- 25.Божко К.М. Вдосконалення методів та засобів контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.13 / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – Київ, 2016.
- 26.Ivashchenko M.M. Influence of substrate temperature on physical properties of SnS films deposited by close-spaced vacuum sublimation / [M.M. Ivashchenko, I.P. Buryk, A.S. Opanasyuk, O.O. Podoprygora] // Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників "Лашкарьовські читання 2018", м. Київ, 4-6 квітня 2018 р. – Київ: НАНУ ІФН ім. В.Є. Лашкарьова. – С.19.
- 27.Ivashchenko M.M. Numerical simulation of SnS/CdS(ZnO)/ITO solar cells / [M.M. Ivashchenko, I.P. Buryk, A.S. Opanasyuk, D.V. Kuzmin, O.O.Podoprygora] // Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників "Лашкарьовські читання 2018", м. Київ, 4-6 квітня 2018 р. — Київ: НАНУ ІФН ім. В.Є. Лашкарьова. – С.66.
- 28.Іващенко М.М. Моделювання робочих характеристик фотоперетворювачів, виконаних на базі структури SnS/ZnS/FTO / [М.М. Іващенко, І.П. Бурик, Д.В. Кузьмін, І.А. Гришко, А.С. Опанасюк] // I Міжнародна науково-практична конференція «Елементи, прилади та системи електронної техніки», м. Запоріжжя, 14 – 16 листопада 2018 р.

29. Ivashchenko M. Current-voltage curves numerical simulation of photoconverters based on SnS/SnS<sub>2</sub>/FTO structure / [M. Ivashchenko, A. Opanasyuk, I. Buryk, D. Kuzmin, Yu. Stoliarchuk] // III Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем» MEICS-2018, м. Дніпро, 21 – 23 листопада 2018 р. – Дніпро: ДНУ ім. О.Гончара. – С.185-187.
30. Борисов О.В. Твердотільна електроніка : підручник / О.В. Борисов, Ю.І. Якименко; за заг. ред. Ю.І. Якименка – К.: НТУУ “КПІ”, 2015. – 484с.
31. Еволюція сонячної енергетики [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://avenston.com/articles/osnovi-tehnologiyi-virobnitstva-kremniyevih-sonyachnih-fotoperetvoryuvachiv/>
32. Photovoltaic research laboratory [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://pv.mit.edu/home/education/resources-for-educators/build-your-own-sourcemeater>
33. A low-cost and fast PV I-V curve tracer based on an open source platform with M2M communication capabilities for preventive monitoring [Электронный ресурс] / P.Papageorgasa, D.Piromalisb, T.Valavanisa, и др. — Электрон. журн. — Elsevier Ltd, 2015. — Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215014095>

**ДОДАТОК А**