

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра мікроелектронних та електронних інформаційних систем

(повна назва кафедри)

**Пояснювальна записка**

до кваліфікаційної роботи

другої (магістерської)

(рівень вищої освіти)

на тему Дослідження та розробка  
фотовольтаїчної системи отримання  
синусоїдальної напруги

Виконав: студент II курсу, групи 8.1539-3  
спеціальності 153 „Мікро- та наносистемно  
техніка”

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Мікроелектронні  
інформаційні системи

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації \_\_\_\_\_

(код і назва спеціалізації)

Гатсиченко С.В.

(ініціали та прізвище)

Керівник доцент, доцент, к.ф.м.н. Світанько М.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент засл. нар. учка ПРАТ „Укрспрайт” Небенюк О.І.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя  
2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Факультет \_\_\_\_\_  
Кафедра мікроелектроніки та електронних інформаційних систем  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 153 „Мікро- та наносистемна техніка“  
(код і назва)  
Освітня програма Мікроелектронні інформаційні системи  
(код і назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри М.Т.В. Кримська  
“01” грудня 2020 року


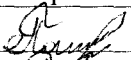

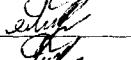

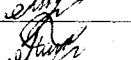

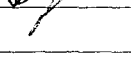
ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Латіщенко Сергію Віталійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи (проекту) Дослідження та розробка фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги  
керівник роботи Світанько Микола Вікторович, к.ф.-м.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)  
затверджені наказом ЗНУ від 25 травня 2020 року № 601-с
- Строк подання студентом роботи 01 грудня 2020 року
- Вихідні дані до роботи сонячна станція, постійна напруга 12 В, змінна напруга 200В, інвертор стабілізатор напруги, моделювання в Proteus, EWB, Mathcad.
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Перетворювальна техніка у сонячній енергетиці. 2. Розробка фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги. 3. Техніко-економічне обґрунтування. 4. Охорона праці та технічна безпека при розробці електричних систем.
- Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Структурна схема фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги. 2. Електрична схема керування батареї конденсаторів

фотovoltaїчної системі отримання синусоїдальної напруги.  
 3. Схеми електричного кабелювання фотovoltaїчної системи отримання синусоїдальної напруги. 4. Електрична схема інвертора. 5. Налаштування схеми інвертора фотovoltaїчної системи отримання синусоїдальної напруги в редакторі Proteus


### 6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
I	Світанько М. В., доцент	 24.05.2020	
II	Світанько М. В., доцент	 24.05.2020	
III	Світанько М. В., доцент	 24.05.2020	
IV	Світанько М. В., доцент	 24.05.2020	


7 Дата видачі завдання 24.05.2020

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Літературний огляд	26.06.2020	всес.
2	Розрахункова частина	30.10.2020	всес. к.
3	Техніко-економічне обґрунтування розробки	30.09.2020	всес.
4	Розробка заходів з охорони праці та техногенної безпеки	30.09.2020	всес.
5	Розробка графічної частини роботи	20.11.2020	всес.
6	Оформлення пояснювальної записки	20.11.2020	всес. к.
7	Формокоонтроль	24.11.2020	всес.
8	Попередній захист роботи	26.11.2020	всес. к.

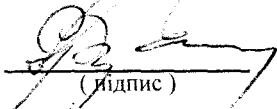
Студент   
 (підпис)

Латіженко С. В.  
 (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту)   
 (підпис)

Світанько М. В.  
 (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер   
 (підпис)

Вербовкін Л. Л.  
 (прізвище та ініціали)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ**

**Кафедра мікроелектронних та електронних інформаційних систем**  
(повна назва кафедри )

**Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи**

**другий (магістерський)**  
(рівень вищої освіти )

**на тему Дослідження та розробка фотовольтаїчної системи отримання  
синусоїдальної напруги**

Виконав: студент  II  курсу, групи  8.1539-з   
спеціальності  153 «Мікро- та наносистемна   
техніка

(код і назва спеціальності)

освітньої програми  Мікроелектронні інформаційні   
системи

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації

(код і назва спеціалізації)

**Патліченко С.В.**

(ініціали та прізвище)

Керівник  доцент, доцент, к.ф.-м.н, Світанько М.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент  заст. нач. цеха ПрАТ «Укрграфіт» Небеснюк О.І.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя  
2020

## Реферат

Дипломна робота містить 73 сторінки, 38 рисунків, 12 таблиць, 20 посилань на літературу.

Об'єкт дослідження – мікроелектронна інформаційна система для контролю процесу акумуляції сонячної енергії та перетворення її в електричну заданої форми сигналу.

Мета роботи – дослідження та розробка фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги.

Задачі роботи: провести схемотехнічне моделювання системи; виконати аналіз функціонування окремих блоків.

Методика досліджень – моделювання приладу за допомогою програмного забезпечення ELECTRONICS WORKBENCH, PROTEUS, MATHCAD.

Короткий виклад результатів досліджень – спроектовано фотовольтаїчну систему отримання синусоїдальної напруги, блок накопичення енергії, систему електронного навантаження, електричну схему інвертора та проведено моделювання роботи кожного із блоків окремо.

Результаті впровадження – система пройшла апробацію на кафедрі мікроелектронних та електронних інформаційних систем.

Прогнозні пропозиції – рекомендується для впровадження в приладах сонячної енергетики.

СОНЯЧНИЙ ЕЛЕМЕНТ, НАКОПИЧУВАЧ ЕНЕРГІЇ, МІКРОСХЕМА, ІНВЕРТОР, ELECTRONICS WORKBENCH, PROTEUS, MATHCAD.

Дипломну роботу виконано на кафедрі мікроелектронних та електронних інформаційних систем, з 24.05.2020 р. по 01.12.2020 р.

## ЗМІСТ

	Стор.
Вступ .....	6
1. Перетворювальна техніка у сонячній енергетиці.....	7
1.1 Характеристики сонячного випромінювання .....	7
1.2 Параметри та характеристики фотоелектричних перетворювачів (ФЕП).....	7
1.3 Інверторна техніка в сонячній енергетиці .....	12
1.3.1 Вимоги до електричних систем живлення інверторних перетворювачів .....	12
1.3.2 Регульовані інвертори .....	14
1.3.3 Акумуляторні інвертори .....	18
1.4 Сучасний стан умов експлуатації сонячних енергетичних станцій.....	20
2. Розробка фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги	22
2.1 Функціональна структурна схема системи.....	22
2.2 Акумуляуючий пристрій .....	23
2.3 Система електронного навантаження .....	27
2.4 Інвертор для перетворення постійної напруги в синусоїдальну .....	35
2.5 Моделювання функціональних вузлів фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги .....	38
2.5.1 Моделювання перехідного процесу на ємнісних елементах накопичувача.....	38
2.5.2 Моделювання процесу заряду акумуляуючого пристрою накопичувача енергії.....	41
2.5.3 Моделювання роботи інвертора в редакторі Proteus.....	45
2.5.4 Розрахунок гармонік напруги після перетворення в інверторі.....	46
3 Техніко - економічне обґрунтування виготовлення електронних схем фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги.....	51

3.1 Обґрунтування вибору технології виготовлення електронних схем фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги .....	51
3.2 Розрахунок витрат на виготовлення електронних схем фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги .....	55
4 Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги .....	57
4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів .....	57
4.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	59
4.3 Виробнича санітарія.....	59
4.4 Електробезпека.....	60
4.5 Пожежна та техногенна безпека.....	62
4.6 Розрахунок штучного освітлення точковим методом .....	63
Висновки та рекомендації.....	69
Перелік посилань.....	71

## Вступ

Енергетика, яка базується на використанні сонячного випромінювання називається геліоенергетика (або сонячна енергетика). Сонячна енергія впевнено займає стійкі позиції в світовій енергетиці. До переваг сонячної енергетики відноситься те, що сонячна енергія - це екологічно чисте джерело енергії, що дозволяє використовувати його в зростаючому масштабі без негативного впливу на навколишнє середовище. Сонячна енергія - це практично невичерпне джерело енергії, сонячна енергія доступна в кожній точці нашої планети. Потенційні можливості енергетики, що засновані на використанні безпосередньо сонячного випромінювання, надзвичайно великі. Так використання всього лише 0,0125 % кількості енергії Сонця могло б забезпечити всі сьогоденні потреби світової енергетики, а використання 0,5 % - повністю покрити потреби на перспективу [1].

Але, до теперішнього часу існує проблема перетворення сонячної енергії в електричні сигнали правильної форми та подальше їх транспортування до споживача. Одним із напрямків вирішення цієї проблеми є використання у якості перетворювачів сонячної енергії в електричну різного типу інверторів. Інвертор служить для перетворення постійного струму (DC), який виробляють сонячні елементи, в змінний (AC). Ця конвертація необхідна для передачі згенерованої сонячної енергії в розподільну мережу і використання цієї енергії споживачами змінного струму [2].

Тому, актуальною є проблема ефективного перетворення сонячної енергії в електричну.



## 1. Перетворювальна техніка у сонячній енергетиці

### 1.1 Характеристики сонячного випромінювання

Сонячне випромінювання характеризується таким параметром, як інтенсивність, тобто потужність, що падає на поверхню певної площі. Цей параметр відрізняється в різних регіонах Землі, причому максимальна інтенсивність сонячного випромінювання на нашій планеті перевищує 1300 Вт на кв. метр, але для зручності при вимірах приймають стандартне значення на рівні 1 кВт / кв. м.

Іншим важливим параметром є розподіл сонячного випромінювання за довжинами хвиль, тобто спектральний склад світла. Для його характеристики введено поняття «повітряної чи атмосферної маси» (АМ – Атмосферна маса): так спектральний склад випромінювання з повітряною масою АМ0 відповідає спектру сонячного світла за межами атмосфери Землі; АМ1 відповідає випромінюванню на поверхні Землі за умови, що Сонце знаходиться строго над точкою спостереження, тобто промені світла пройшли крізь 1 атмосферу. При вимірах стандартом є АМ1.5, що відповідає сонячному випромінюванню, яке пройшло 1,5 атмосфери [3-5].

### 1.2 Параметри та характеристики фотоелектричних перетворювачів (ФЕП)

Основною експлуатаційною характеристикою ФЕП, як і для будь-якого перетворювача одного виду енергії в інший, є коефіцієнт корисної дії (к.к.д.). К.к.д. перетворювача сонячної енергії - це відношення електричної потужності, виробленої при роботі ФЕП, до потужності сонячного

випромінювання, падаючого на його поверхню при стандартній щільності сонячної радіації  $1\text{кВт/м}^2$  ( $1000\text{Вт/м}^2$ ). Так наприклад, при к.к.д. 10% з  $1\text{м}^2$  ФЕП можна одержати 100 Вт електричної потужності. По своєму конструктивно-технологічному рішенню фотоелектричні перетворювачі являють собою наукомісткі вироби електронної техніки. Перші надійні й довговічні ФЕП були виготовлені на основі монокристалічного кремнію для електропостачання космічних апаратів [1].

Тому що для роботи більшості споживачів потрібні більш високі значення напруги й струму, то одиничні ФЕП послідовно збираються в сонячні модулі необхідної потужності й вихідної напруги. Вартість цих модулів визначається високою ціною пластин монокристалічного кремнію товщиною 300...500 мкм, використовуваних у його конструкції. Такі пластини з Si одержують розрізанням вирощеного при температурі більше  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  монокристалічного циліндра діаметром до 300 мм. При розрізанні на пластини майже половина цього дорогого матеріалу йде в стружку. Тому ФЕП на основі монокристалів Si використовуються переважно для апаратів космічного призначення. При виробництві монокристалічних кремнієвих ФЕП затрачається така кількість енергії й праці, що окупається протягом декількох років при загальному часі їхньої експлуатації 25...30 років [2,5].

Для широкомасштабного наземного використання ФЕП сьогодні застосовуються монокристали кремнію діаметром 100...200 мм, що вирощують за методом Чохральського з менш очищеного, а тому й більш дешевого, полікристалічного кремнію напівпровідникової чистоти. К.к.д. таких ФЕП сьогодні складає 14...18 %. Більш дешевими є ФЕП, що виробляються з пластин мультикристалічного кремнію – полікристалічного кремнію зі стовпчастою структурою та розмірами кристалічних зерен 3..5 мм. Проте к.к.д. таких ФЕП сьогодні є значно меншим - 11...13 %.

Кремнієві сонячні елементи (фотоелектричні перетворювачі) є нелінійними пристроями й для пояснення характеристик елемента

користуються сімейством вольтамперних характеристик (ВАХ). Приклад ВАХ сонячного елемента наведений на рисунку 1.1 [5].

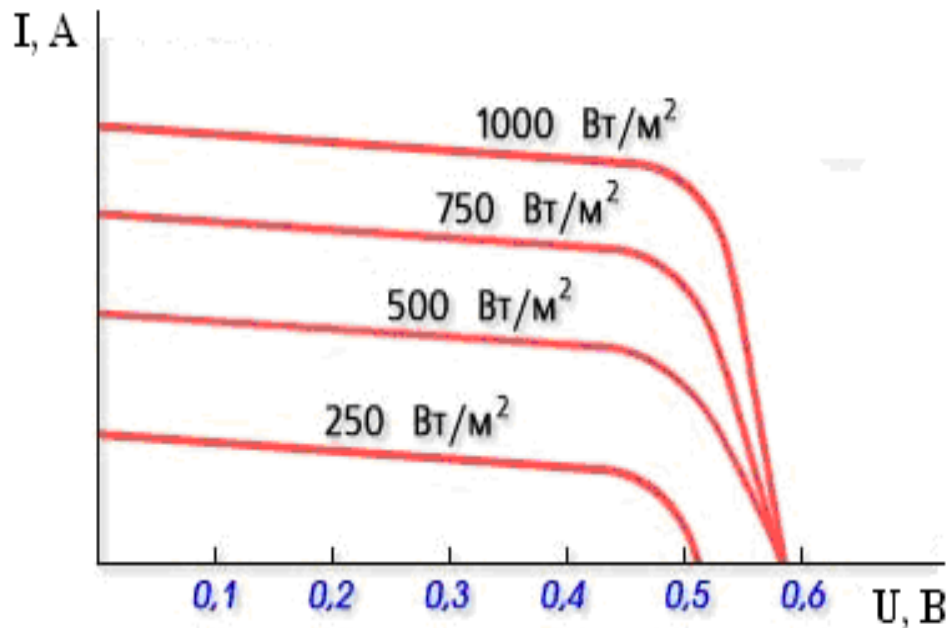


Рисунок 1.1 - Сімейство вольтамперних характеристик сонячного елемента

Напруга холостого ходу, що генерується одним елементом, становить близько 0,6 В. Ця величина не залежить від розмірів елемента. Величина струму залежить від інтенсивності світла й розміру елемента, під яким мається на увазі площа його поверхні, що приймає випромінювання.

Елемент розміром  $100 \times 100 \text{ мм}^2$  в 100 разів перевершує елемент розміром  $10 \times 10 \text{ мм}^2$  і, отже, він при тій же освітленості видасть струм в 100 разів більший.

Пікова потужність відповідає напрузі близько 0,47 В. Таким чином, щоб правильно оцінити якість сонячного елемента, а також заради порівняння елементів між собою в однакових умовах, необхідно навантажити його так, щоб вихідна напруга рівнялася 0,47 В. Після того, як сонячні елементи підібрані для роботи, необхідно їх спаяти. На серійних елементах нанесені струмоз'ємними сітками, які призначені для припаювання до них провідників.

Важливим моментом роботи сонячних елементів є їхній температурний режим. При нагріванні елемента на один градус понад 25 °С він втрачає в напрузі 0,002 В, тобто 0,4 %/градус.

На рисунку 1.2 наведено сімейство кривих ВАХ для температур 25 °С та 60 °С [5,6].

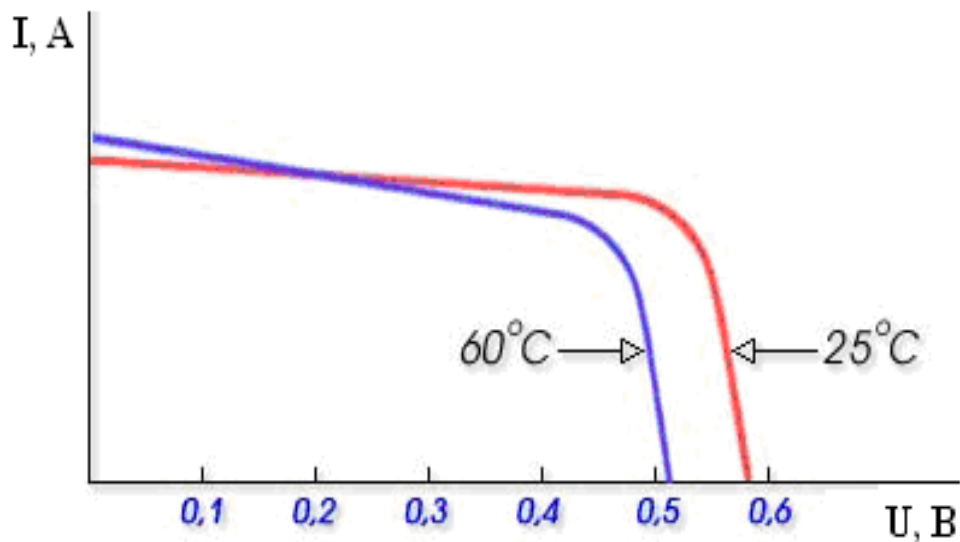


Рисунок 1.2 - Сімейство кривих ВАХ сонячного елемента при різних температурах

Коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) звичайного сонячного елемента в цей час коливається в межах 10...16 %. Це значить, що елемент розміром 100x100 мм<sup>2</sup> при стандартних умовах може генерувати 1...1,6 Вт.

Стандартними умовами для паспортизації елементів в усьому світі визнаються наступні:

- освітленість 1000 Вт/м<sup>2</sup>;
- температура 25 °С;
- спектр АМ 1,5 (сонячний спектр на широті 45°).

У цей час загальносвітова потужність, вироблювана сонячними установками, дорівнює 300 МВт при сумарній площі батарей в 3000000 м<sup>2</sup>. Крім установок, призначених для рішення конкретних завдань, вітчизняна промисловість випускає ряд сонячних модулів, з яких можна збирати, як з конструктора, джерела електричної енергії всілякої потужності. Відповідною

комутацією модулів можна змінювати робочу напругу на навантаженні. Невеликі сонячні батареї можуть служити джерелами енергії для зарядки акумуляторів, роботи електродвигунів різного призначення, живлення освітлювальних приладів і радіоелектронної апаратури в польових умовах [1]. Особливо ефективні ці батареї в регіонах з відносно великим числом сонячних днів у році. Крім цих установок, призначених для рішення конкретних завдань, промисловістю випускаються ряд сонячних модулів, з яких можна збирати, як з конструктора, джерела електричної енергії всілякої потужності. Відповідною комутацією модулів можна змінювати робочу напругу на навантаженні [1,6].

Поєднання модулів на великих площах представляє собою сонячну енергетичну станцію (рисунок 1.3)

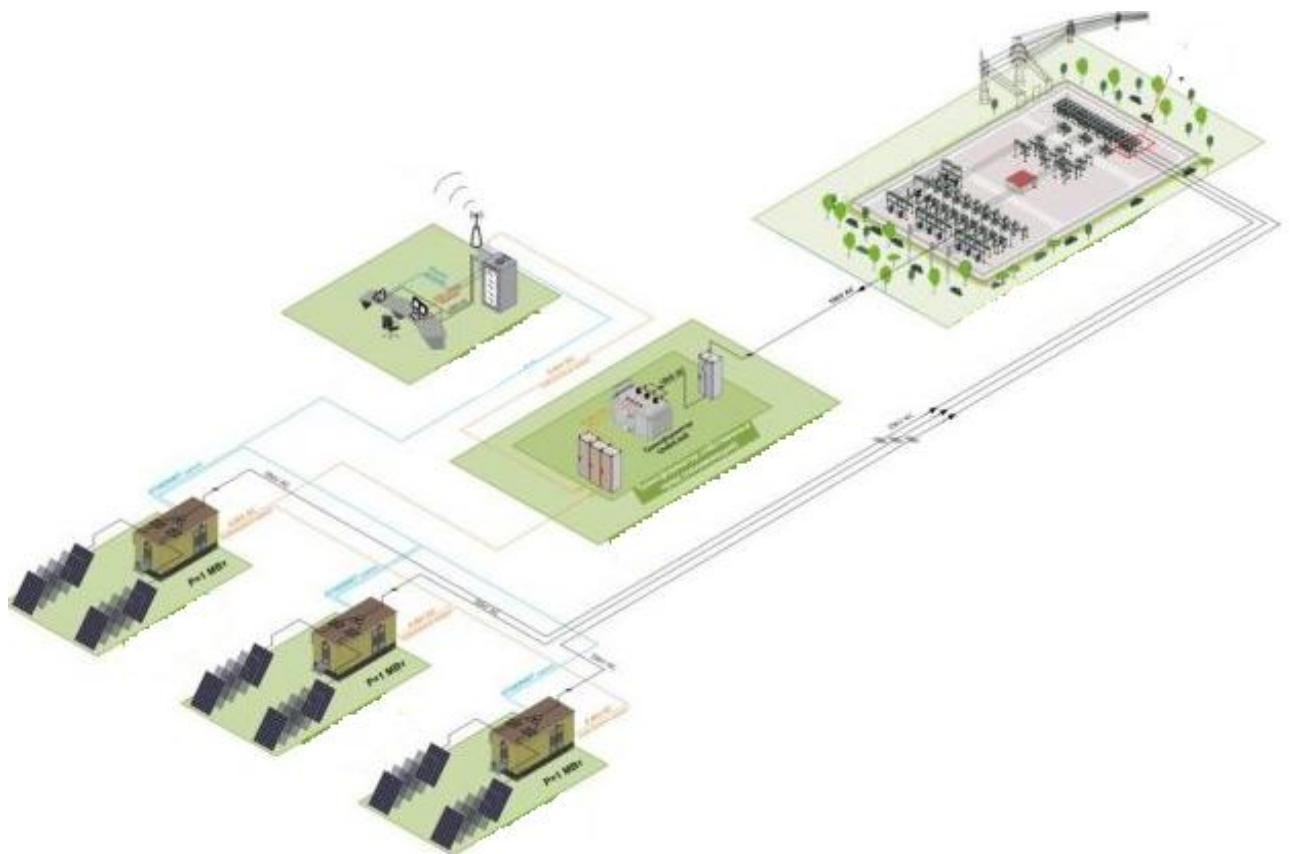


Рисунок 1.3 – Сонячна станція

### 1.3 Інверторна техніка в сонячній енергетиці

#### 1.3.1 Вимоги до електричних систем живлення інверторних перетворювачів

З розвитком мікроелектронних технологій стали жорсткішими вимоги до стабільності номіналів напруг і струмів, значно зменшилися розміри і габарити, посилились вимоги щодо надійності, безпечності та економічності. Однак всі електричні системи живлення повинні відповідати вимогам щодо надійності, відхилення вихідних параметрів від номінального значення, пульсації вихідних параметрів, типу захисту від аварійних ситуацій, коефіцієнта корисної дії, масогабаритних показників. Ступінь важливості кожного показника залежить від призначення електричних систем живлення, типу навантаження, умов експлуатації. Строк роботи до першої відмови окремих функціональних вузлів джерел вторинного електроживлення складає  $(50 \times 10^3 - 100 \times 10^3)$  годин, окремих джерел вторинного електроживлення -  $(20 \times 10^3 - 70 \times 10^3)$  годин, ймовірність безвідмовної роботи джерел вторинного електроживлення та їх вузлів складає 0,95 на кожні 1000 годин неперервної роботи. Значення пульсації вихідної напруги визначає електромагнітну сумісність джерел вторинного електроживлення з навантаженням. Електронні системи, виконані на цифрових елементах, потребують менш стабільних параметрів живлення. Наприклад цифрові мікросхеми вимагають живлення постійною напругою з пульсацією не вище 1%. Для аналогової апаратури в більшості випадків допустимою є пульсація  $(0,1 - 0,2)\%$ . Для джерел живлення високовольтної апаратури радіопередавачів можуть висуватись вимоги щодо складових гармонічного спектру вихідної напруги. Наявність вказаних вимог визначається режимом обробки сигналів в приймально-передавальній апаратурі (неперервний або дискретний) [7].

Форма вхідного струму джерел вторинного електроживлення визначає ступінь його електромагнітної сумісності з системою електропостачання.

Рівень електромагнітних завад зі сторони джерела живлення залежить від форми вхідного струму і зсуву фаз між першою гармонікою струму і напругою системи електропостачання. Рівень завад джерела живлення не повинен перевищувати значення, наведеного у нормативно-технічній документації [8].

Нестабільність вихідної напруги стабілізованого джерела вторинного електроживлення зумовлена зміною вхідного струму джерел вторинного електроживлення і температури навколишнього середовища. Значення нестабільності джерел вторинного електроживлення, як правило, не перевищує 2%. Більший ККД за тієї ж вихідної потужності, як правило, мають джерел вторинного електроживлення з більшим значенням вихідної напруги. Однак в малопотужних високовольтних джерел вторинного електроживлення (наприклад джерел живлення електропроменевих трубок) забезпечення високого ККД ускладнено режимом роботи, близьким до холостого ходу. Тому у високовольтних джерел живлення потужністю до 1 кВт ККД не перевищує значення (55-70)%. У джерел вторинного електроживлення з великими вихідними струмами ККД визначається потужністю втрат у напівпровідникових пристроях вихідного каскаду джерел вторинного електроживлення. У низьковольтних джерел вторинного електроживлення при неперервному перетворенні параметрів електроенергії ККД складає (45-55)%, при імпульсному (75-80)%. Технічні вимоги до характеристик джерел вторинного електроживлення повинні виконуватись за заданих умов їх експлуатації. Ці умови визначаються призначенням апаратури. Якщо апаратура розміщується в опалювальному приміщенні, то вони розраховуються на температуру навколишнього середовища (+5 – +40) °С, атмосферний тиск не нижчий, ніж 460 мм. рт. ст. і відносну вологість повітря 95% за температури 30 °С. Якщо апаратура розміщується у транспортних засобах або неопалювальних приміщеннях, діапазон температури розширюється до (-50 – +65) 0С, а значення відносної вологості підвищується до значення (98-100) %. До джерел живлення електронних

засобів також висуваються вимоги щодо стійкості до радіаційного випромінення. У цьому випадку необхідно враховувати зворотні і незворотні зміни, що виникають у напівпровідникових структурах, конденсаторах, електромагнітних компонентах і т.д. Найкритичнішим параметром для високовольтної конструкції джерел вторинного електроживлення є опір ізоляції. Під впливом радіаційного випромінення він може знижуватись на декілька порядків. Конструкції джерел живлення, окрім допустимих значень маси та об'єму, повинні забезпечувати заданий температурний режим, рівень технологічності, уніфікації, а також зручність технічного обслуговування і безпечність роботи. Різноманітні вимоги щодо параметрів електроенергії живлення електронної апаратури, умов експлуатації, габаритів та ККД ЕСЖ обумовлюють велику номенклатуру існуючих джерел вторинного електроживлення [7,8].

### 1.3.2 Регульовані інвертори

Джерела живлення з підвищеною частотою перетворення мають у декілька разів менші габарити. На рисунку 1.4 наведена схема високовольтного потужного ВДЕЖ з живленням від мережі однофазного змінного струму. У схемі використано активний коректор потужності і регульований мостовий інвертор. Вказана схема може забезпечити вихідну потужність 3-5 кВт [7-9].



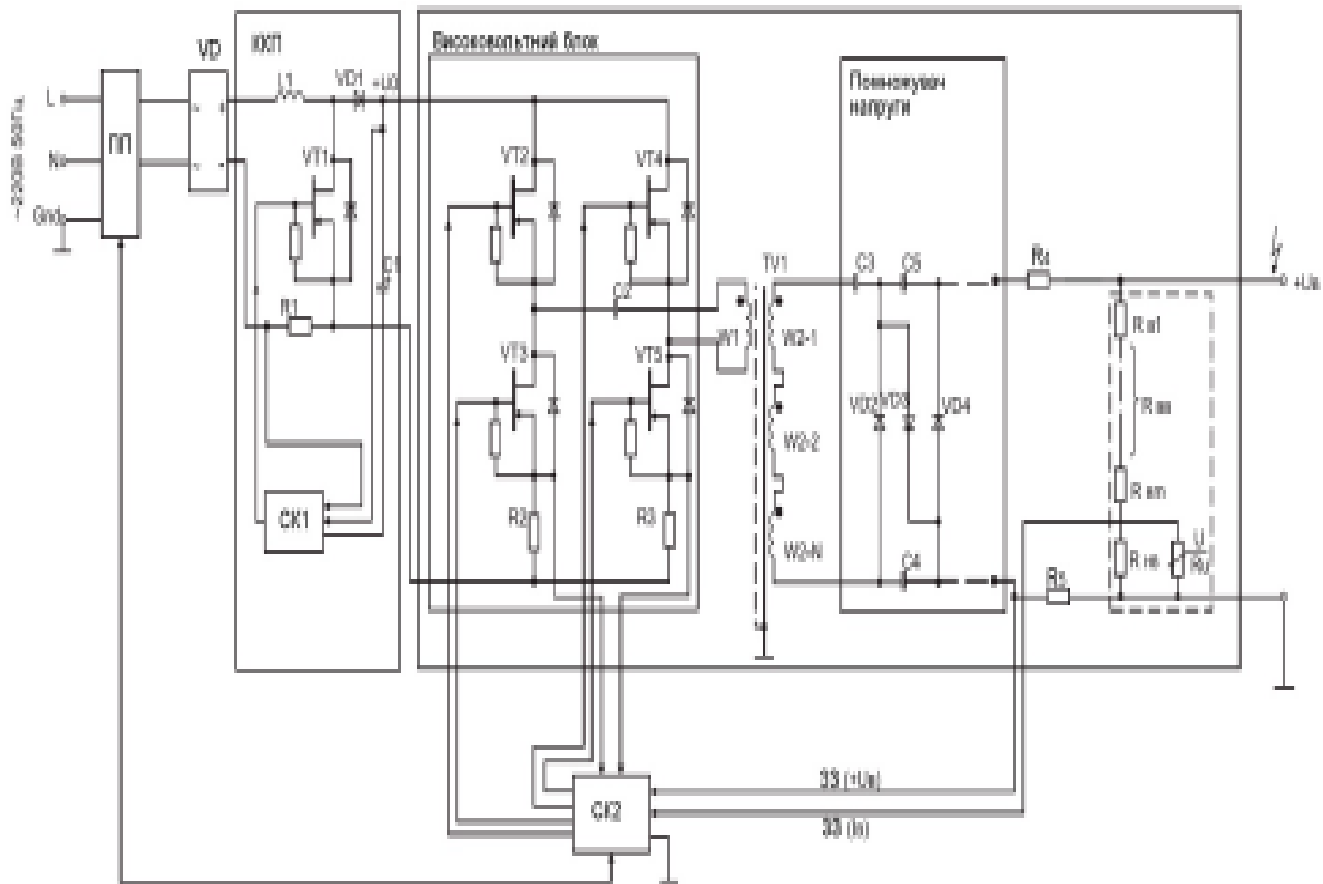


Рисунок 1.4 - Функціональна схема джерела живлення на основі регульованих інверторів з підвищеною частотою перетворення

Коректор потужності виконано на основі підвищувального перетворювача з системою керування СК1. Інвертор виконано по мостовій схемі на транзисторах VT2-VT5. На виході трансформатора інвертора TV1 встановлено помножувач напруги на конденсаторах C3-C5 і діодах VD2-VD4. На виході перетворювача встановлені давачі напруги і струму [7-9].

Потужні електровакуумні пристрої і рентгенівські трубки часто працюють у імпульсному режимі, тобто їх живлення здійснюють серією високовольтних імпульсів великої потужності, для чого використовують імпульсні високовольтні джерела живлення. Загалом імпульсні високовольтні джерела живлення використовують:

- для випробувального устаткування при генеруванні потужних високовольтних імпульсів;
- для рентгеноімпульсних апаратів діагностики та дефектоскопії (перевірка якості зварних швів, ступеня зношеності металоконструкцій);
- для рентгенолюмінісцентних сепараторів (сортувальників) при виділенні цінних порід у руді.

Параметри імпульсних високовольтних джерел живлення мають широкий діапазон напруг і струмів: амплітуда напруги 10 кВ-1,5 МВ у імпульсі, струму – 10 мА-10 кА. Використовуються як окремі імпульси, так і їх послідовності. Діапазон тривалості імпульсів 1 нс-1 мс, частота 1Гц-1 кГц. Найрозповсюдженішими схемами формування імпульсів є:

- схема розрядження на навантаження попередньо розрядженого конденсатора через імпульсний трансформатор;
- та ж схема з некерованим розрядником на вторинній стороні трансформатора для формування прямокутної форми імпульсу;
- схема з формувальними лініями та імпульсними трансформаторами;
- схема розрядження високовольтного конденсатора безпосередньо на навантаження [7-9].

З великої кількості розроблених останнім часом інверторних джерел живлення можна відзначити джерела фірм "Fronius", "Messer Griesheim", "ESAB", "KEMPP" [8].

TRANSPOKET 1400 ("Fronius") – забезпечує за допомогою системи контролю дуги стабільне високоякісне зварювання, запобігає прилипанню електрода. При зварюванні покритим електродом з крупнокраплинним перенесенням металу через дугу в разі короткого замикання дугового проміжку сила зварювального струму автоматично підвищується, що сприяє швидкому встановленню заданого режиму зварювання. Джерело має незначну масу (4,2 кг) і габарити (312x110x200 мм) [9].

TRANSPOKET 330 ("Fronius") – апарат для виробництва, монтажу трубопроводів та промислових установок, а також суднобудування.

Забезпечує зварювання змінним та постійним струмом способами ММА та ТІГ. Система електронного керування дає змогу отримати стабільну силу зварювального струму незалежно від коливання напруги мережі, мале розбризкування металу при зварюванні. Завдяки функції "гарячий старт" запалювання дуги відбувається швидко [8,9].

TRFNSSYNERGIC 3300 ("Fronius") – повністю цифрове інверторне джерело живлення для механізованого зварювання в середовищі інертного та активного газу (МІГ/МАГ), розроблено для використання в автомобільній та суміжних галузях промисловості, в апаратобудуванні, хімічному машинобудуванні, на судноверфях та вагонобудівних підприємствах. Джерело обладнане системою програмного вибору зварювальних режимів, завдяки чому придатне для роботизованого зварювання [9].

TRANSSYNERGIC 4000 ("Fronius") – пересувне повністю цифрове інверторне джерело живлення для механізованого зварювання в середовищі захисних газів (МІГ/МАГ). Система керування джерела забезпечує роботу в синергетичному (однаковому з механізмом подавання електродного дроту автомату) режимі. Наявність програм роботи дає змогу виконувати зварювання суцільним та порошковим дротом з плавним наростанням та зниженням струму відповідно на початку та в кінці шва. Джерело, крім того, обладнане дистанційним регулятором та цифровим дисплеєм, на якому реєструються наступні параметри: зварювальний струм, напруга в дузі, довжина дуги, швидкість подавання електродного дроту, товщина матеріалу, що зварюється, та інші.

TRANSPULSSYNERGIC 2700 ("Fronius") – переносне імпульсне джерело живлення з вбудованим блоком подавання електродного дроту. Апарат використовується на будівельних майданчиках, в ремонтних майстернях, на судноверфях та в інших умовах, коли необхідна велика мобільність зварювального поста. Джерело придатне для зварювання не тільки сталей, а й для МІГ-паяння оцинкованих листів та зварювання алюмінію і його сплавів. Система керування та інтерфейс мікропроцесора

забезпечують виконання таких самих функцій, як і в джерелі живлення TRANSSYNERGIC 4000 [9].

TIME SYNERGIC ("Fronius") – джерело живлення для механізованого зварювання сталей в середовищі однокомпонентних та багатоконпонентних захисних газів. За рахунок електронного регулювання, незалежно від коливання напруги мережі живлення, забезпечуються стабільність зварювального струму та точний відрив краплі металу від кінця електрода. Система керування дає змогу виконувати зварювання за програмою або без програми в дво- або чотиритактовому режимах з керуванням по трьох параметрах: подача захисного газу, зварювального дроту та струму зварювання [9].

### 1.3.3 Акумуляторні інвертори

Для роботи у польових умовах, на транспорті, у монтажних умовах будівельного виробництва є агрегати (машинні перетворювачі), які характеризуються великими габаритами і масою. Перспективним напрямком розвитку джерел живлення для вказаних умов є акумуляторні зварювальні агрегати (АЗА), що вже використовуються для живлення різноманітних електроустановок (у тому числі і зварювальних) на космічних орбітальних станціях. Внаслідок того, що акумуляторні батареї є джерелом постійного струму, на їх базі можна створювати інверторні зварювальні джерела живлення з широким діапазоном перетворення частоти напруги – від сотень герців до десятків кілогерців. Такі джерела живлення можуть використовуватися для зварювання покритими електродами, неплавким електродом та механізованого зварювання в середовищі захисних газів. В умовах надзвичайних ситуацій для виконання ремонтних робіт може використовуватися зварювальний апарат ранцевого типу (рисунок 1.5). Силовий блок апарата являє собою інверторний перетворювач, частота комутації якого становить понад 50 кГц. До його складу входять:

транзисторний перетворювач (ТРП), виконаний на біполярних транзисторах, блок керування та діагностики (БКД), високочастотний трансформатор (ВТ) і випрямляч VD1,VD2. Контактор К призначений для виключення пристрою при розряді АБ нижче припустимого рівня [10].

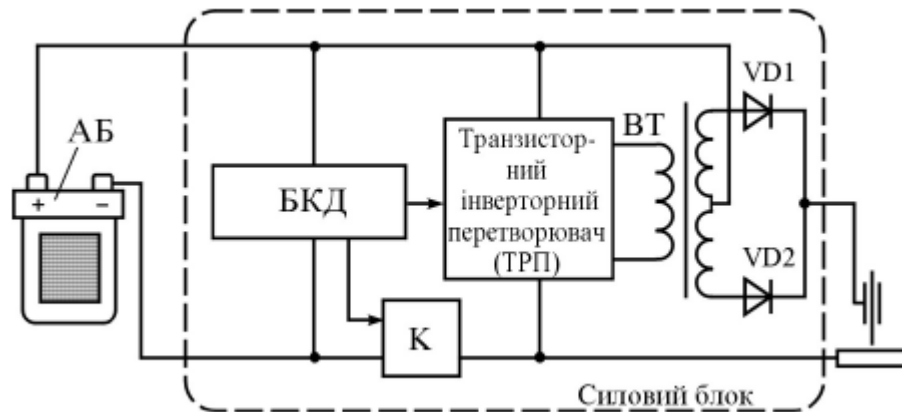


Рисунок 1.5 - Структурна схема зварювального апарату ранцевого типу  
Джерело живлення призначене для короткочасного використання у важкодоступних місцях, куди доставка традиційного зварювального обладнання неможлива. Через те, що система електропостачання апарата є низьковольтною ( $U_{ж} \leq 24 \text{ В}$ ), його можна використовувати в умовах підвищених вимог до електробезпеки.

За допомогою сучасних мікропроцесорів система інтегрального процесу через математичну модель (алгоритм) розраховує параметри оптимального зварювального процесу. Незалежно від умов зварювання (матеріал, діаметр дроту, захисний газ, швидкість подавання дроту, постійне або імпульсне подавання струму) система інтегрального процесу визначає найкращі необхідні параметри режиму та автоматично виставляє їх на установці. В результаті цього забезпечуються оптимальні характеристики збудження дугового розряду, підтримується коротка, стабільна дуга, здійснюється чітке, без короткого замикання, перенесення краплин електродного металу, виконується автоматичний підбір амплітуди, тривалості та частоти імпульсів струму. Таким чином досягається дуже

висока якість зварювального шва в поєднанні з високою продуктивністю зварювального процесу [10].

#### 1.4 Сучасний стан умов експлуатації сонячних енегетичних станцій

Аналіз стану проблеми на теперішній час показав, що на сучасних сонячних електростанціях існує проблема відключення: при перевищенні потужності сонячних панелей відбувається відсічення надлишкової потужності. Цей режим називають «зрізанням» («clipping») (рисунок 1.6).

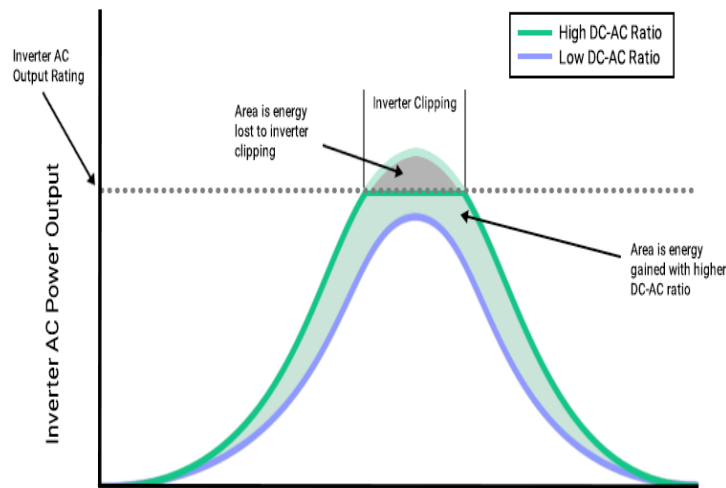


Рисунок 1.6 - Графік генерації сонячної станції в режимі перенавантаження

Процес зрізання відбувається в той час, коли максимальна точка максимальної потужності має потужність більше, ніж номінальна потужність інвертора. «Зрізання» інвертора призводить до втрат кількості згенерованої електроенергії в пікові години.

Для вирішення представленої проблеми в роботі запропоновано використати систему перетворення сонячної енергії в електричну шляхом збільшення потужності сонячних панелей, так щоб коефіцієнт навантаження інвертора був більше 1. Таке рішення дозволяє збільшити кількість виробітку

електроенергії в той час, коли потужність сонячних панелей нижче номінальної потужності інвертора.

Тому, метою дипломної роботи є дослідження та розробка фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

1) провести аналіз сучасних фотовольтаїчних систем отримання синусоїдальної напруги способів реєстрації оптичних сигналів та обрати для розробки найбільш оптимальну;

2) розробити структурну схему пристрою перетворення сонячної енергії в джерело сигналу синусоїдальної форми;

3) розробити електричні схеми основних функціональних блоків пристрою;

4) провести моделювання роботи електричних схем перетворювача за допомогою сучасних САПР;

5) виконати розрахунки по техніко-економічному обґрунтуванні розробки пристрою та розробити заходи по умовам дотримання техніки безпеки та охорони праці робіт, що планується здійснити.

## 2. Розробка фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги

### 2.1 Функціональна структурна схема системи

Структурна схема ситми представлена на рисунку 2.1. Збільшення потужності системи забезпечимо за рахунок використання акумулюючого пристрою. У якості акумулюючого пристрою в розробці пропонується використати систему з'єднання суперконденсаторів. Використання конденсаторів зумовлене тим, що швидкість зарядки акумулятора обмежена швидкістю хімічних процесів, що протікають в нім. В той же час, швидкість зарядки конденсатора обмежена лише максимальним струмом, який дає зарядний пристрій.

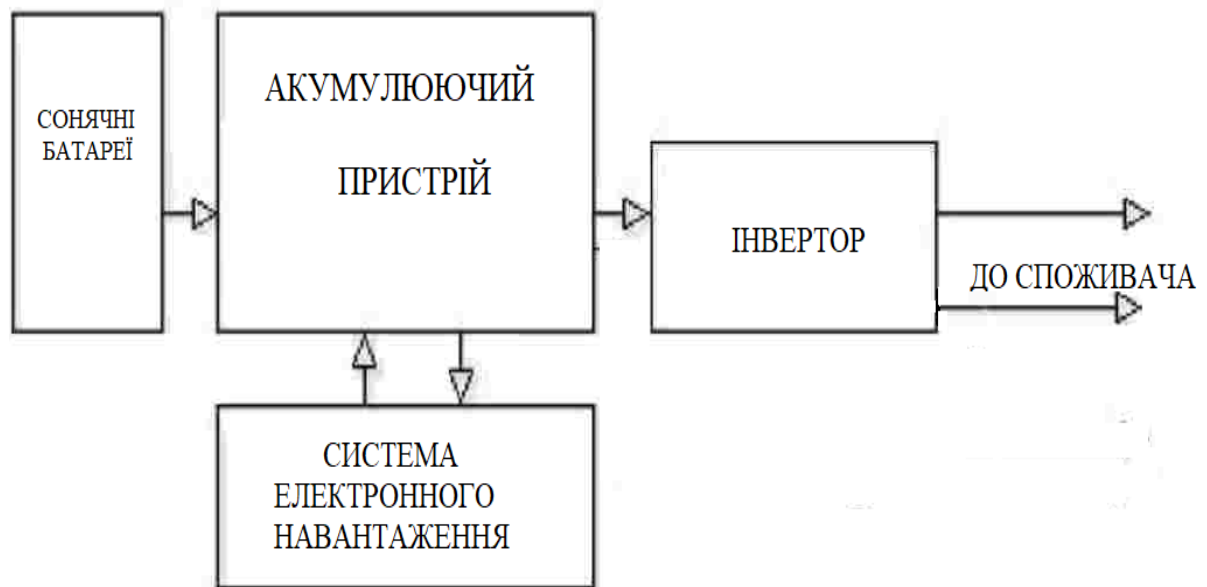


Рисунок 2.1 – Функціональна структурна схема системи отримання синусоїдальної напруги.

Для узгодження роботи акумуляторного пристрою із системою сонячних батарей в роботі запропоновано використати принцип



електронного навантаження. Сигнал від акумуляторного накопичувача надходить до інвертора перетворення постійної напруги в синусоїдальну шляхом сполучення мультивібратора із двотактним підсилювальним каскадом.

## 2.2 Акумуляуючий пристрій

У якості акумуляуючого пристрою в розробці пропонується використати систему з'єднання суперконденсаторів.

Причина, по якій конденсатори були витиснені акумуляторами, була пов'язана із значними великими значеннями електроенергії, які вони здатні нагромаджувати. Іншою причиною є те, що при розряді напруга на виході акумулятора міняється дуже слабо, так що стабілізатор напруги або не потрібний або ж може мати дуже просту конструкцію.

Головна відмінність між конденсаторами і акумуляторами полягає в тому, що конденсатори безпосередньо зберігають електричний заряд, а акумулятори перетворюють електричну енергію на хімічну, запасують її, а потім назад перетворюють хімічну енергію в електричну. При перетвореннях енергії частина її втрачається. Тому навіть в кращих акумуляторів ККД складає не більше 90%, в той час, як в конденсаторів він може досягати 99%. Інтенсивність хімічних реакцій залежить від температури, тому на морозі акумулятори працюють помітно гірше, ніж при кімнатній температурі. Окрім цього, хімічні реакції в акумуляторах не повністю зворотні. Звідси мала кількість циклів заряду-розряду (порядку одиниць тисяч, найчастіше ресурс акумулятора складає близько 1000 циклів заряду-розряду), а також «ефект пам'яті». Нагадаємо, що «ефект пам'яті» полягає в тому, що акумулятор потрібно завжди розряджати до певної величини накопиченої енергії, тоді його ємність буде максимальною. Якщо ж після розрядки в ньому залишається більше енергії, то ємність акумулятора поступово зменшуватиметься. «Ефект пам'яті» притаманний практично усім типам

аккумуляторів, що серійно випускаються, окрім, кислотних (включаючи їх різновиди — гелі і AGM). Хоча прийнято вважати, що іонним для літію і полімерним для літію аккумуляторам він не притаманний. Що ж до кислотних аккумуляторів, то в них виявляється ефект сульфатації пластин, що викликає безповоротне псування джерела живлення. Однією з причин є тривале знаходження аккумулятора в стані заряду менш, ніж на 50%. Швидкість зарядки аккумулятора обмежена швидкістю хімічних процесів, що протікають в ній. Можна скоротити час зарядки до 1 години, але ніяк не до декількох хвилин. В той же час, швидкість зарядки конденсатора обмежена лише максимальним струмом, який дає зарядний пристрій.

Перераховані недоліки аккумуляторів зробили актуальним використання замість них конденсаторів.

Суперконденсатор є системою із двома обкладинками з активованого вугілля, залитим електролітом. Між ними розташована мембрана, яка пропускає електроліт, але перешкоджає фізичному переміщенню часток активованого вугілля між обкладинками.

Слід зазначити, що суперконденсатори самі по собі не мають полярності. Цим вони принципово відрізняються від електролітичних конденсаторів, для яких, як правило, властива полярність, недотримання якої наводить до виходу конденсатора з буд.

Максимальна ємність окремого суперконденсатора, складає 12000 Ф. У суперконденсаторах, що випускаються серійно, вона не перевищує 3000 Ф. Максимально допустима напруга між обкладинками не перевищує 10 В. Для суперконденсаторів, що серійно випускаються, цей показник, як правило, лежить в межах 2,3 – 2,7 В. Низька робоча напруга вимагає використання перетворювача напруги з функцією стабілізатора у зв'язку з тим, що при розряді напруга на обкладинках конденсатора змінюється в широких межах. Побудова перетворювача напруги для підключення навантаження і зарядного пристрою є нетривіальним завданням. Для спрощення розгляду питання нехтуватимемо втратами в перетворювачі напруги і стабілізаторі. В тому

випадку, якщо ви працюєте із звичайним акумулятором з напругою 12 В, то електроніка, що управляє, повинна витримувати струм в 5 А. Такі електронні прилади широко поширені і мають невисоку вартість. Але зовсім інша ситуація складається при використанні суперконденсатора, напруга на якому складає 2,5 В. Тоді струм, що протікає через електронні компоненти перетворювача, може досягати 24 А, що вимагає нових підходів до схемотехніки і сучасної елементної бази. Саме складність з побудовою перетворювача і стабілізатора можна пояснити той факт, що суперконденсатори стали широко використовуватися в самих різних областях.

Суперконденсатори можуть з'єднуватися в батареї з використанням послідовного або паралельного з'єднання. У першому випадку підвищується максимально допустима напруга. У другому випадку — ємність. Підвищення максимально допустимої напруги в такий спосіб є одним із способів вирішення проблеми, але заплатити за неї доведеться зниженням ємності.

На рисунку 2.2 представлено схему батареї суперконденсаторів, робота якої контролюється мікросхемою LT3094.

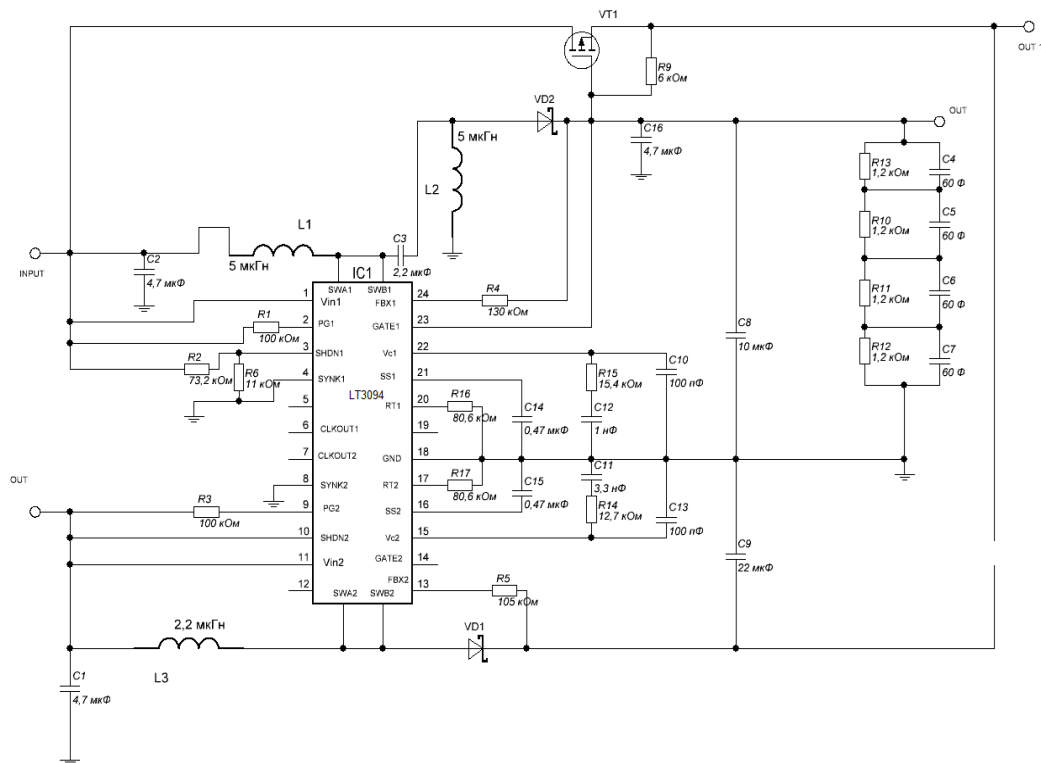


Рисунок 2.2 – Схема керування батареї суперконденсаторів із використанням мікросхеми LT3094

Мікросхема LT3094 є стабілізатором напруги із високим коефіцієнтом пригнічення пульсацій.

Використання мікросхеми LT3094 засноване на тому, що вона має найбільш оптимальні параметри, порівняно із іншими схемами. Параметри мікросхеми представлено у таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Параметри мікросхеми LT3094

Вихідна напруга, В	Вхідна напруга, В	Падіння напруги, В	Перегрівання, °С	Вхідний струм, А	ККД системи, %
±3,3	±4,55	1,25	8	0,48	57
±5	±6,25	1,25	8	0,65	65
±12	±13,22	1,22	9	1,25	78

Розміри суперконденсаторів, природно, залежать від їх ємкості. Типовий суперконденсатор ємкістю 3000 Ф є циліндром діаметром близько 5 см і завдовжки 14 см. При ємкості 10 Ф суперконденсатор має розміри 1 – 1,5 см.

Хороші суперконденсатори здатні витримати сотні тисяч циклів заряду-розряду, перевершуючи по цьому параметру акумулятори приблизно в 100 разів. Але, як і в електролітичних конденсаторів, для суперконденсаторів існує проблема старіння із-за поступового витoku електроліту. Поки скільки-небудь повної статистики виходу з буд суперконденсаторів з даної причини не накопичено, але за непрямыми даними, термін служби суперконденсаторів можна приблизно оцінити величиною 15 років.

### 2.3 Система електронного навантаження

Для контролю електричних параметрів процесу накопичення енергії від сонячних елементів можна використовувати стандартні тестуючі схеми (рисунок 2.3)

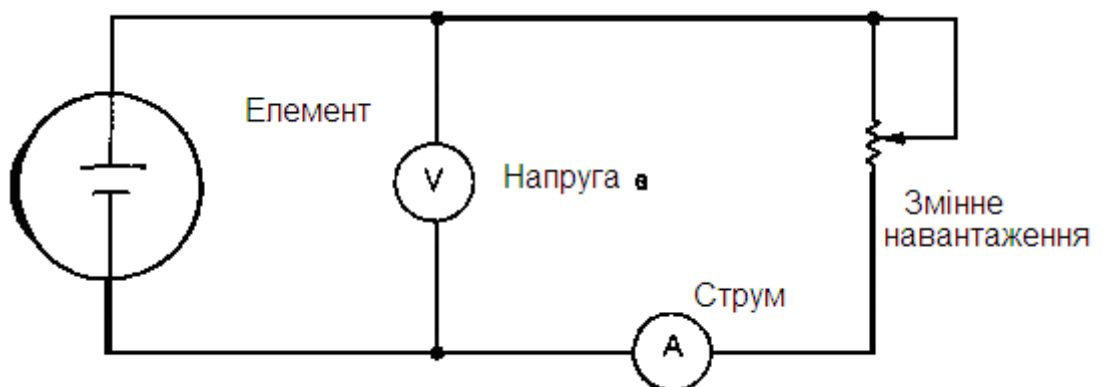


Рисунок 2.3 – Схема для контролю параметрів ВАХ сонячних елементів

Проте всі елементи злегка розрізняються, і, отже, опори, відповідні піковій потужності окремих елементів, будуть також різними. Відповідно до цього необхідно кожного разу змінювати опір навантаження, аби відновилася необхідна робоча напруга. Крім того, енергія, що виробляється сонячним елементом, повністю розсіюється на потенціометрі, обумовлюючи його нагрів і нестабільність. Вирішенням даної проблеми була б заміна резистора навантаження в схемі на транзистор. У даному конкретному використанні транзистор можна розглядати як динамічний опір. Невеликий струм бази транзистора викликає значну зміну струму колектора. Струм бази фактично змінює опір транзистора, який у свою чергу використовується як навантаження для сонячного елемента.

На жаль, транзистор володіє тим же недоліком, що і потенціометр, тобто необхідністю підстроювання базового струму при зміні тестованого елемента. Така операція виправдана при невеликій кількості елементів, але якщо необхідно перевірити 30, 40 або більше елементів - це відніме надто багато часу.

Тому, для автоматичного підстроювання базового струму в розроблюваному пристрої пропонується використати систему електронного навантаження, робота якої базуватиметься на керованій зміні опору польового транзистора, керованого мікросхемою. Структурна схема пристрою представлена на рисунку 2.4.

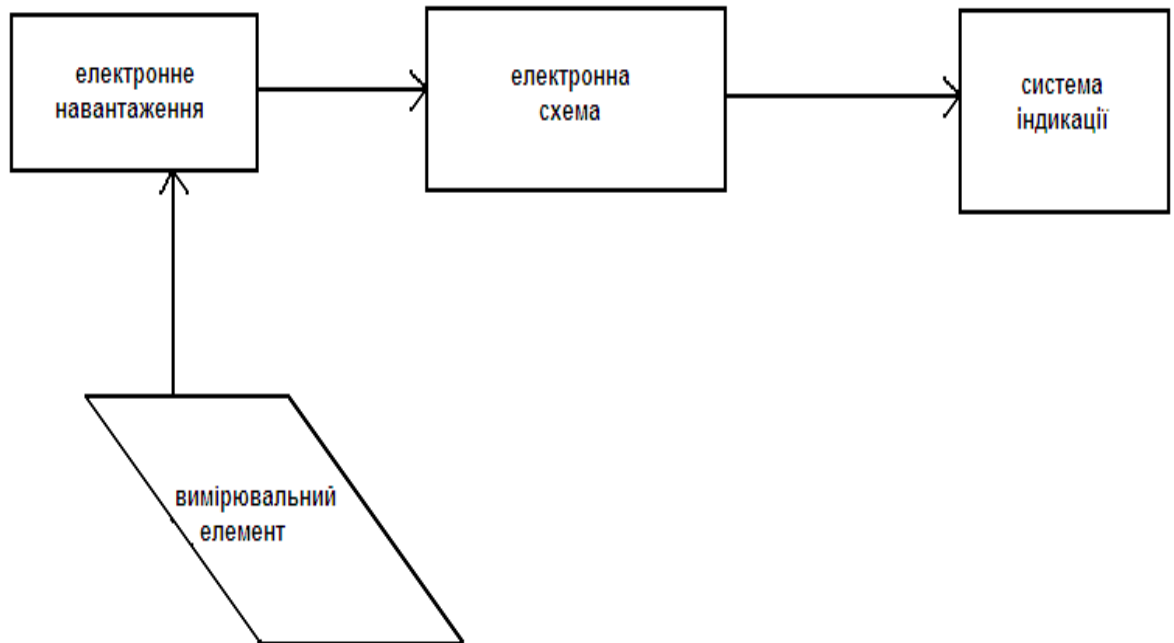


Рисунок 2.4 – Структурна схема приладу вимірювання критичних характеристик сонячних елементів

У якості системи індикації можуть бути використані як універсальні вимірювачі, так і ПЕОМ. Для останньої необхідно додатково включити до структурної схеми лінію зв'язку (інтерфейс).

Принцип дії електронного навантаження заснований на зміні опору затвора польового транзистора VT1. Принципова схема електронного навантаження представлена на рисунку 2.5.

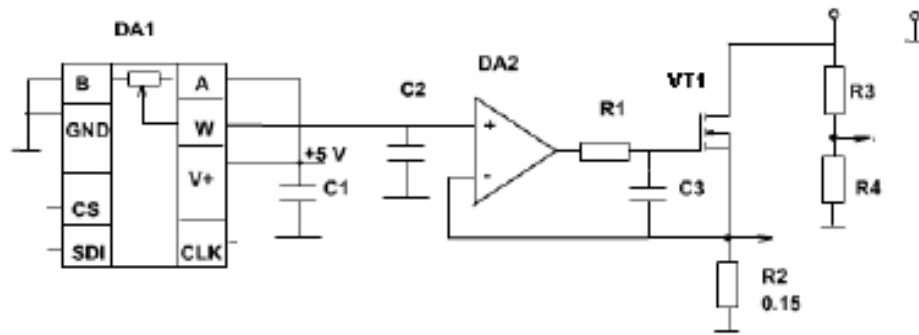


Рисунок 2.5 - Принципова схема електронного навантаження

Управління затвором транзистора забезпечується мікросхемою DA1 через операційний підсилювач.

При розрахунку операційного підсилювача за основу приймемо принцип підсилення на транзисторному каскаді [11].

Визначаємо необхідну (мінімальну) кількість каскадів підсилювача низької частоти. Для цього коефіцієнт посилення заданий у вихідних даних переводимо в децибели і визначаємо кількість каскадів підсилювача:

$$K_{dB} = 20 \lg K_U = 20 \lg 67 = 36,4 \text{ dB}$$

$$n = \frac{K_{dB}}{20} = \frac{36,4}{20} = 1,82$$

Приймається кількість каскадів рівна двом.

Розподіляємо величину частотних спотворень між каскадами ( $M_K$ ) вважаючи що величина спотворень розподіляється між каскадами рівномірно.

$$M_K = \frac{M_\Sigma}{n} = \frac{3}{2} = 1,5 \text{ (dB)},$$

де  $M_\Sigma = 3 \text{ dB}$ .



Знаючи напругу живлення підсилювача і максимальний струм, що протікає через навантаження, виберемо транзистори для вихідного каскаду за наступними умовами:

$$I_{K \max \text{ доп}} \geq 1,5 \times I_{H \max} \geq 1,5 \times 30 \text{ мА} \geq 45 \text{ мА}$$

$$U_{KE \max} \geq 2 \times E_{Ж} \geq 2 \times 24 \text{ В} \geq 48 \text{ В}$$

$$P_{K \max} \geq 2 \times P_K \geq 2 \times 108 \text{ мВт} \geq 216 \text{ мВт}$$

$$f_T \geq f_B \geq 7 \times 10^4 \text{ Гц} \geq 70 \text{ кГц}$$

Визначаємо параметри транзистору на основі довідкових даних:

опір бази транзистора

$$r_{\delta} = \tau_{oc} / C_{\kappa} = 100 \text{ нс} / 6n\Phi = 16 \text{ Ом}$$

де  $\tau_{oc}$  - постійна часу ланцюга внутрішнього зворотного зв'язку в транзисторі на високих частотах (100 нс);

опір емітера транзистора

$$r_e = 25,6 / I_e = 25,6 / 2 \text{ мА} = 12,8 \text{ Ом}$$

при  $I_e$  міліамперах  $r_e$  отримується в омах;

динамічну ємність емітерного переходу транзистора

$$C_{eo} = 1 / (2\pi f_{zp} r_e) = 1 / (2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 12,8) = 3 \text{ пФ}$$

де  $f_{zp}$  - гранична частота підсилення по струму транзистора з ЗЕ,

$$f_T = |h_{21e}| \cdot f_{zp} = 200 \cdot 200 \text{ кГц} = 4 \cdot 10^7 \text{ Гц}$$

коефіцієнт передачі струму транзистора в схемі з ЗЕ:

$$\alpha = h_{21e} / (1 - h_{21e}) = 200 / 1 + 200 = 0,995 ,$$

де  $h_{21e}$  - низькочастотне значення коефіцієнта передачі струму транзистора з ЗЕ.

За параметрами еквівалентної схеми біполярного транзистора визначимо його низькочастотне значення крутизни  $S_0$ :

$$S_0 = \frac{h_{21e}}{(1 + h_{21e})(r_{\delta} + r_e + \Delta r)} = \frac{200}{(1 + 200)(16 + 12,8 + 1)} = 33 \text{ (мА/В)},$$

Знаходимо величину вхідної провідності транзистора:

$$Y_{11e} = (1 - \alpha) / (r_o + r_e + \Delta r) = (1 - 0,995) / (16 + 12,8 + 1) = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ (См)}.$$

Проводимо побудову прямої, навантаження підсилювального каскаду. Для чого визначаємо дві характерні її точки. При закритому транзисторі характерна точка прямої, навантаження, має параметри  $I_K = 0$  і  $U_K = E_{жив}$ . При відкритому транзисторі характерна точка прямої, навантаження, має параметри  $U_K = U_H$  і

$$I_K = \frac{E_{жив}}{R_K} = \frac{24}{910} = 26 \text{ (мА)}.$$

Розраховуємо потужність яка розсіюється на колекторі транзистора в робочій точці

$$P_K = U_{K0} \cdot I_{K0} = 10 \cdot 0,015 = 150 \text{ мВт}$$

Потужність яка розсіюється на колекторі транзистора не перевищує максимально-допустиму для цього транзистора.

Розраховуємо потужність яка розсіюється на резисторі в колекторному ланцюзі ( $R_K$ ) в робочій точці

$$P_{RK} = I_{K0}^2 \cdot R_K = (0,015)^2 \cdot 910 = 205 \text{ мВт}$$

Визначаємо величину резистора ( $R_E$ ) в ланцюзі емітера транзистора

$$R_E = \frac{0,2E_{жив}}{I_{K0}} = \frac{0,2 \cdot 24}{0,015} = 320 \text{ Ом}.$$

Розрахуємо потужність розсіювань резистора  $R_E$

$$P_{RE} = I_{K0}^2 \cdot R_E = (0,015)^2 \cdot 320 = 72 \text{ мВт}$$

Визначимо величину опору резистора в ланцюзі емітера з урахуванням, що каскад буде працювати в заданому інтервалі температур і параметри робочої точки (зокрема  $I_{K0}$ ) не будуть змінюватися більш ніж на 10%.

$$R_E \geq \frac{\gamma \Delta T}{0,1 I_{K0}} = \frac{0,002 \cdot 50}{0,1 \cdot 0,015} = 66 \text{ Ом},$$

де  $\gamma = 2 \text{ мВ/}^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T$  – інтервал робочих температур ( $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

З даного розрахунку можна зробити висновок, що номінал резистора в ланцюзі емітера обраний правильно і каскад буде нормально функціонувати в заданому інтервалі температур.

Розрахуємо величину резистора ( $R_{\sigma 1}$ ) дільника в ланцюзі для зсуву робочої точки транзистора:

$$R_{\sigma 1} = \frac{I_{K0} \cdot R_E + U_{BE}}{3I_B} = \frac{0,015 \cdot 390 + 0,7}{3 \cdot 0,000075} = 29 \text{ кОм}$$

Розрахуємо потужність розсіювань резистора  $R_{\sigma 1}$ :

$$P_{R_{\sigma 1}} = 3I_{\sigma}^2 \cdot R_{\sigma 1} = 3 \cdot (0,000075)^2 \cdot 29000 = 489 \text{ мкВт}$$

Розрахуємо величину резистора  $R_{\sigma 2}$  дільника в ланцюзі для зсуву робочої точки транзистора:

$$R_{\sigma 2} = \frac{E_{жив} - (I_{K0} \cdot R_E + U_{BE})}{3I_B} = \frac{24 - (0,015 \cdot 390 + 0,7)}{3 \cdot 0,000075} = 77 \text{ кОм}$$

Розрахуємо потужність розсіювань резистора  $R_{\sigma 2}$

$$P_{R_{\sigma 2}} = 3I_{\sigma}^2 \cdot R_{\sigma 2} = 3 \cdot (0,000075)^2 \cdot 77000 = 1,29 \text{ мВт}$$

Розподілимо величину частотних спотворень що приходяться на кінцевий каскад на окремі його елементи (розділові і блокувальні конденсатори) припускаючи що дані спотворення розподіляються порівну між вказаними ланцюгами.

$$M_{np} = M_{нб} = \frac{M_{ни}^2}{2} = \frac{1,5dB}{2} = 0,75dB = 1,09$$

Визначимо необхідну значення постійної часу для розділових і блокувальних ланцюгів підсилювача з наступних співвідношень:

$$\tau_n = \frac{1}{2\pi f_n \sqrt{M_{np}^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 28 \sqrt{1,09^2 - 1}} = 0,03 \text{ с,}$$

де  $M_{ни}$  - частка частотних спотворень в області НЧ, розподілених на розділові й блокувальні ланцюги.

Визначимо величину ємності конденсатора блокування ( $C_E$ ) в ланцюзі емітера транзистора:

$$C_E \geq \tau_n \cdot S_0 \geq 0,03 \cdot 0,033 = 990 \text{ мкФ}$$

Визначимо величину ємності розділового конденсатора ( $C_p$ ) в ланцюзі навантаження:

$$C_p \geq \frac{\tau_n}{R_K + R_H} \geq \frac{0,03}{910 + 460} \geq 21 \text{ мкФ}$$

Розрахуємо вхідний опір каскаду по змінному струму:

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{о1}} / (1 + Y_{11E} \cdot R_{\text{о1}}) = 30000 / (1 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot 30000) = 5,8 \text{ кОм}$$

Розрахуємо величину коефіцієнта підсилення каскаду:

$$K_u = S_0 \cdot R_{\text{екв}} = 0,033 \cdot 305 = 10,06$$

Розрахуємо величину вхідної напруги підсилювального каскаду

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вих}} / K_u = 5 / 15,45 = 0,324 \text{ В}$$

Для підтвердження правильності виконаних розрахунків проводимо моделювання і визначення основних параметрів розрахованого каскаду в середовищі Electronic Workbench.

Принципова схема моделі кінцевого каскаду приведена на рисунку 2.6.

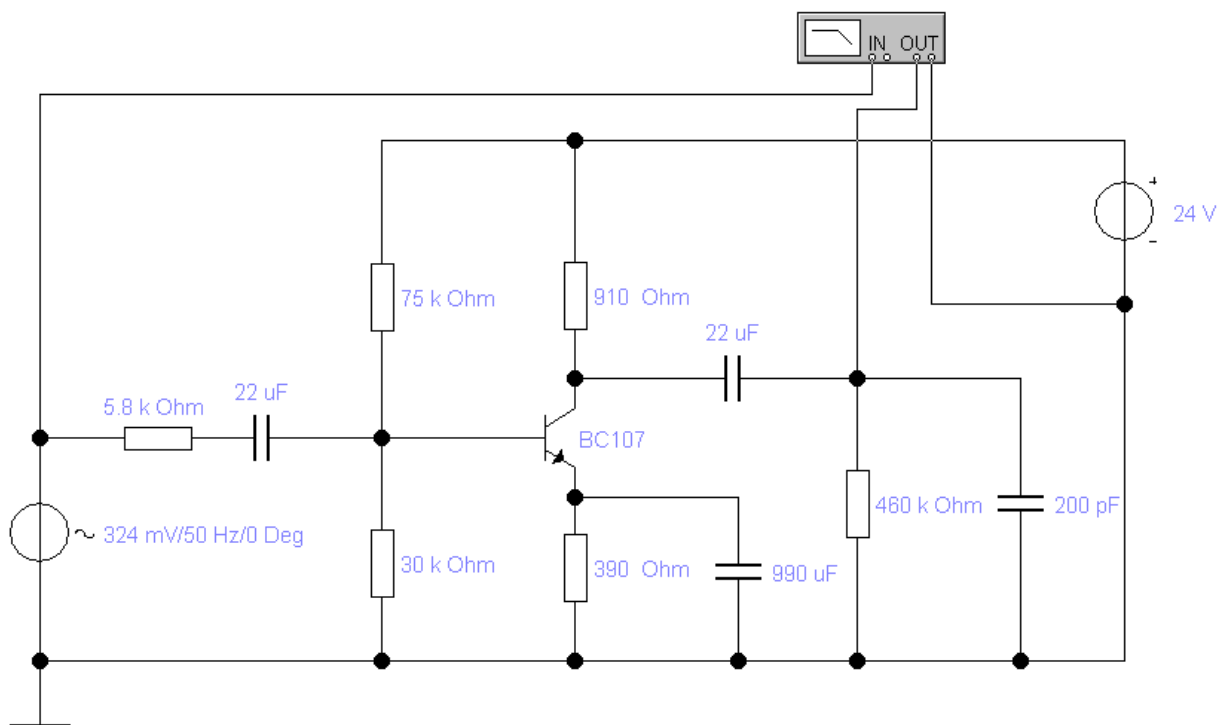


Рисунок 2.6 – Схема електрична принципова моделі кінцевого каскаду

Амплітудно-частотна характеристика розрахованого каскаду приведена на рисунку 2.7. Згідно приведенного рисунку коефіцієнт підсилення каскаду

складає 22,17 дБ, нижня межа смуги пропускання рівна 27 Гц, а верхня межа смуги пропускання складає 70 КГц.

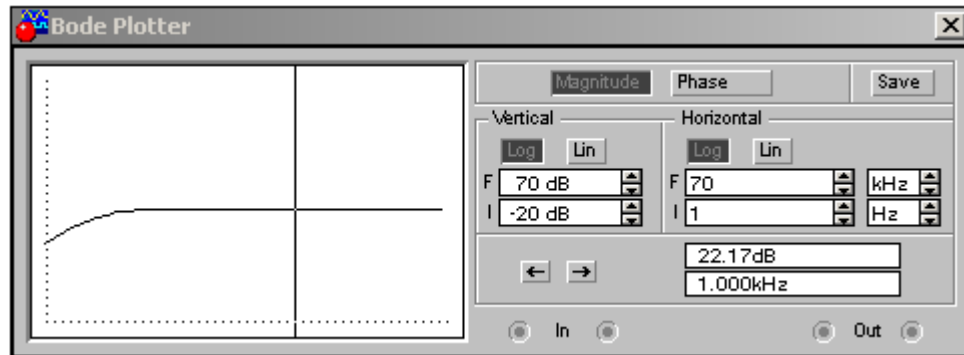


Рисунок 2.7 - Амплітудно-частотна характеристика кінцевого каскаду

#### 2.4 Інвертор для перетворення постійної напруги в синусоїдальну

Перетворювач складається із задаючого генератора, виконаного за схемою симетричного мультівібратора на транзисторах VT1, VT2, і підсилювача потужності на транзисторах VT3 - VT8.

Він працює таким чином. При подачі живлення вимикачем SB1 мультівібратор починає генерувати симетричні імпульси. З колекторів транзисторів мультівібратора імпульси через ланцюжки R2C3 і R6C4 поступають на транзистори двотактного підсилювача потужності. Коли на колекторі транзистора VT1 високий рівень напруги, на колекторі транзистора VT2 - низький.

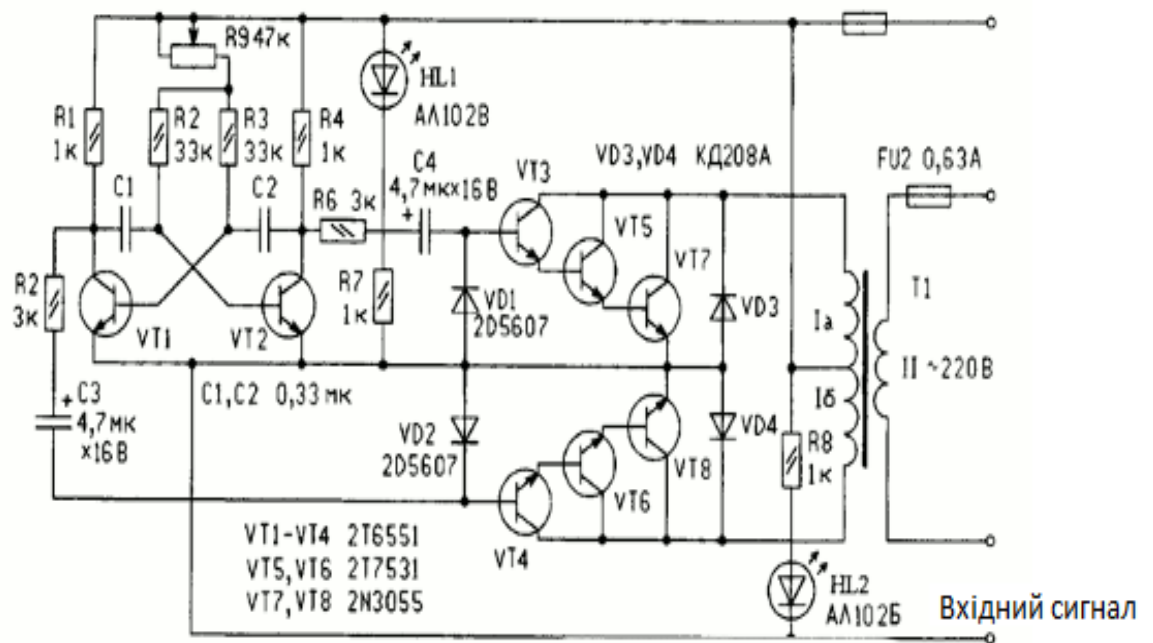


Рисунок 2.8 - Принципова схема інвертора постійної напруги в синусоїдальну

Протягом напівперіоду транзистори VT4, VT6 і VT8 відкриті і через них і обмотку трансформатора T1 протікає струм від джерела живлення 12 В. Транзистори верхнього плеча підсилювача потужності закриті. Протягом другого напівперіоду відкриті транзистори VT3, VT5 і VT7 - і струм протікає через відповідну обмотку.

Таким чином, на первинній обмотці трансформатора T1 формується змінна напруга прямокутної форми з амплітудою, приблизно рівною напрузі джерела.

Змінний магнітний потік в магнітопроводі трансформатора індукуює у вторинній обмотці напругу, амплітуда якої залежить від співвідношення витків вторинної і первинної обмоток.

Діоди VD1 і VD2 служать для усунення імпульсів негативної полярності, що виникають при роботі задаючого генератора в моменти перехідних процесів. Діоди VD3 і VD4 захищають транзистори вихідного

рівня підсилювача потужності від напруги зворотної полярності, що виникає за рахунок самоіндукції.

Трансформатор Т1 виконаний на магнітопроводі ШЗ6х36. Кожна з половин первинної обмотки має по 21 витку, намотаних дротом ПЕЛ 2,1, вторинна обмотка має 600 витків дроту ПЕЛ 0,59.

Вторинна обмотка при виконанні трансформатора укладається першою, а поверх неї -первичная обмотка, яку для кращої симетрії слід виконувати одночасно в два дроти.

При використанні транзистори VT5 і VT7, VT6 і VT8 слід попарно розташувати на тепловідводах. Тепловідводи мають бути ізольовані один від одного і від шини загального ланцюга живлення.

Для виміру струму живлення від джерела постійного струму (він не повинен перевищувати 10А) в розрив дроту, що йде від середньої точки первинної обмотки трансформатора Т1 до плавкої вставки FU1, бажано включити амперметр із струмом повного відхилення 10А (на схемі не показаний). Це полегшить візуальний контроль при роботі з потужними споживачами.

Налаштування перетворювача полягає в установці частоти задаючого генератора змінним резистором R9. Для налаштування слід підключити осцилограф або частотомір до колектора одного з транзисторів мультівібратора і включити живлення перетворювача. Регулюванням змінного резистора добитися частоти коливань, що генеруються, 50 Гц.

Змонтований і відрегульований пристрій слід розмістити в корпусі, на передній панелі якого розташовують клеми для підключення зовнішнього джерела струму (акумулятора) і навантаження, тримачі плавких вставок, вимикач напруги задаючого генератора, світлодіоди індикаторів робочого стану - червоний (HL2), сигналізуючий підключення зовнішнього джерела струму, і зелений (HL1 ) - включення задаючого генератора.

При виготовленні інвертора напруги допустимі наступні заміни елементів: 2Т6551 - КТ601А, 277531 - КТ801А. 2N3055 -КТ819ГМ, 205607 -

Д226А. діод КД208А застосований російського виробництва. Як індикатори можна застосувати світлодіоди АЛ307В (зелений) і АЛ307Б (червоний).

## 2.5 Моделювання функціональних вузлів фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги

### 2.5.1 Моделювання перехідного процесу на ємнісних елементах накопичувача

У якості моделі перехідного процесу на ємнісних елементах розглянемо модель із еквівалентним джерелом живлення, представлену на рисунку 2.9.

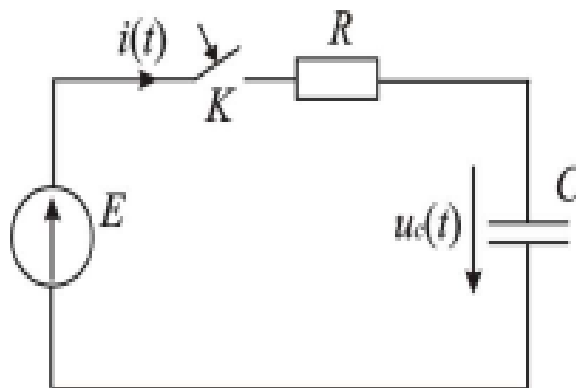


Рисунок 2.9 – Модель ємності накопичувача енергії

Для урахування можливих сплесків енергії встановимо наступні параметри:  $R = 10^5$  Ом,  $C = 100$  мкФ,  $E = 110$  В. При замиканні ключа  $K$  відбувається перехідний процес.

Визначаємо при перехідному процесі:

- струм  $i(t)$ ;
- напругу на конденсаторі  $u_c(t)$ .

Для вирішення задачі треба знати основи класичного методу розрахунку перехідних процесів в колах постійного струму.

Вирішення



Задачу можна вирішити двома способами: через напругу на конденсаторі  $u_C$  та через струм  $i$ .

### Перший спосіб

1. Запишемо загальне рівняння напруги на конденсаторі:

$$u_C = u_{Cm} + u_{Cв}.$$

2. Н.П.У.:  $u_C = 0$  В.

3. Примусова складова напруги буде дорівнювати напрузі джерела живлення  $u_{Cnp} = E = 110$  В.

4. Складемо характеристичне рівняння і знайдемо його корінь  $p$ :

$$Z = R + \frac{1}{p \cdot C} = 0 \Rightarrow p = -\frac{1}{R \cdot C} = -\frac{1}{10^5 \cdot 100 \cdot 10^6} = -0,1 \text{ с}^{-1}.$$

Тоді вільна складова напруги має вигляд:  $u_{Cв} = A \cdot e^{-0,1t}$ .

5. Визначимо постійну інтегрування  $A$ :

$$u_C = 110 + A \cdot e^{-100t}.$$

При  $t = 0$ :  $u_C(0) = 0 = 110 + A \Rightarrow A = -110$ .

6. Напруга на конденсаторі  $u_C = 110 - 110 \cdot e^{-0,1t} = 110 \cdot (1 - e^{-0,1t})$  В.

7. Визначимо струм кола в момент комутації:

$$i = C \cdot \frac{du_C}{dt} = 11 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-0,1t} \text{ А}.$$

### Другий спосіб

1. Запишемо рівняння струму кола як суму примусової та вільної складових:  $i = i_{np} + i_{в}$ .

2. Знайдемо залежну початкову умову, тобто значення  $i(0)$ .

Так як  $u_C(0) = 0$ , то за другим законом Кирхгофа

$$i = \frac{E - u_C}{R} = \frac{110 - 0}{10^5} = 11 \cdot 10^{-4} \text{ А}.$$

3. Примусова складова струму  $-i_{np} = 0$ .

4. Характеристичне рівняння і загальне співвідношення для вільної складової струму має такий самий вигляд, як і при першому способі, тобто

$$i_{в} = B \cdot e^{-0,1t}.$$

5. Визначимо постійну інтегрування  $B$ :

$$i = B \cdot e^{-0,1t} \Rightarrow B = i = 11 \cdot 10^{-4}.$$

6. Струм кола:  $i = 11 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-0,1t}$  А.

7. Визначимо напругу на конденсаторі в момент комутації:

$$u_c = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i dt = \frac{11 \cdot 10^{-4}}{100 \cdot 10^{-6}} \cdot \int_0^t e^{-0,1t} dt = -110 \cdot e^{-0,1t} \Big|_0^t = 110 \cdot (-e^{-0,1t}) \text{ В.}$$

Схемне моделювання проводимо в редакторі Proteus.

На рисунку 2.10 представлена схемна модель ємнісного елемента в редакторі Proteus.

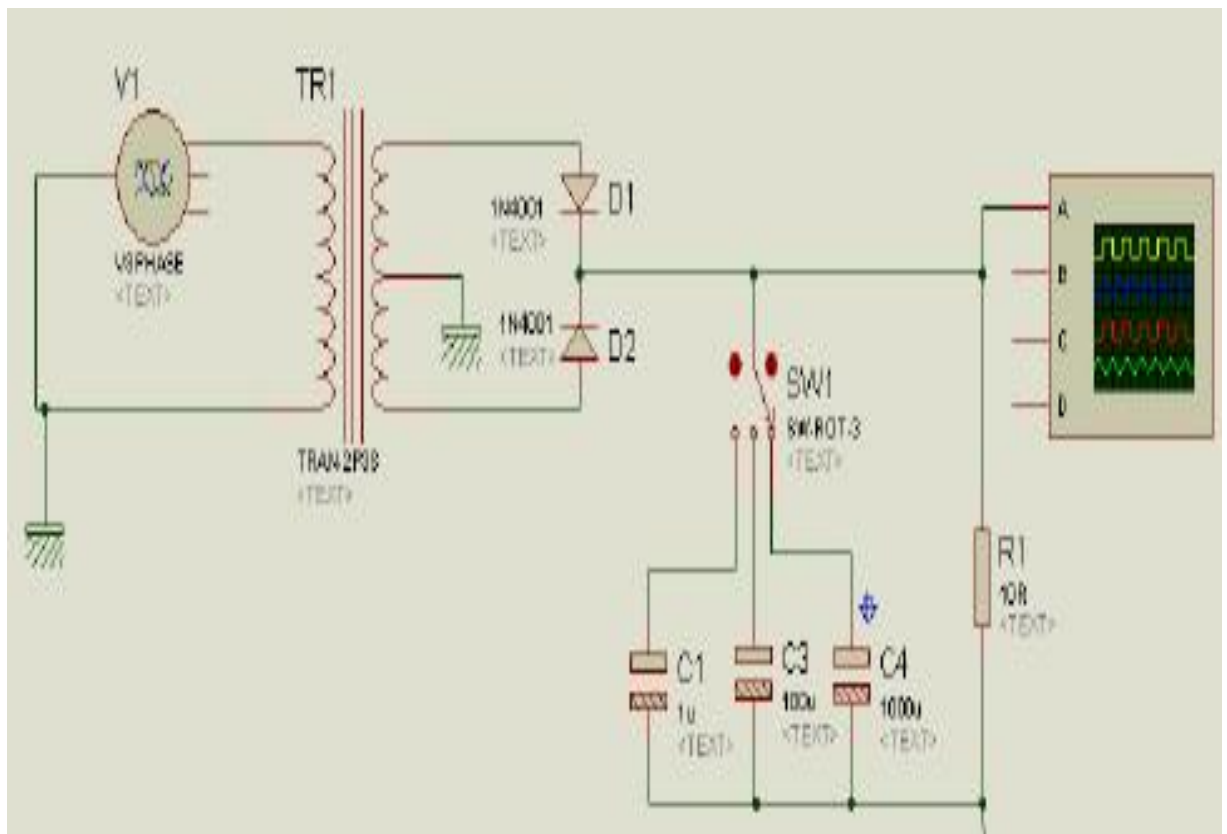


Рисунок 2.10 - Модель ємнісного елемента в редакторі Proteus

На рисунку 2.11 представлені результати моделювання протікання перехідного процесу в редакторі Proteus.

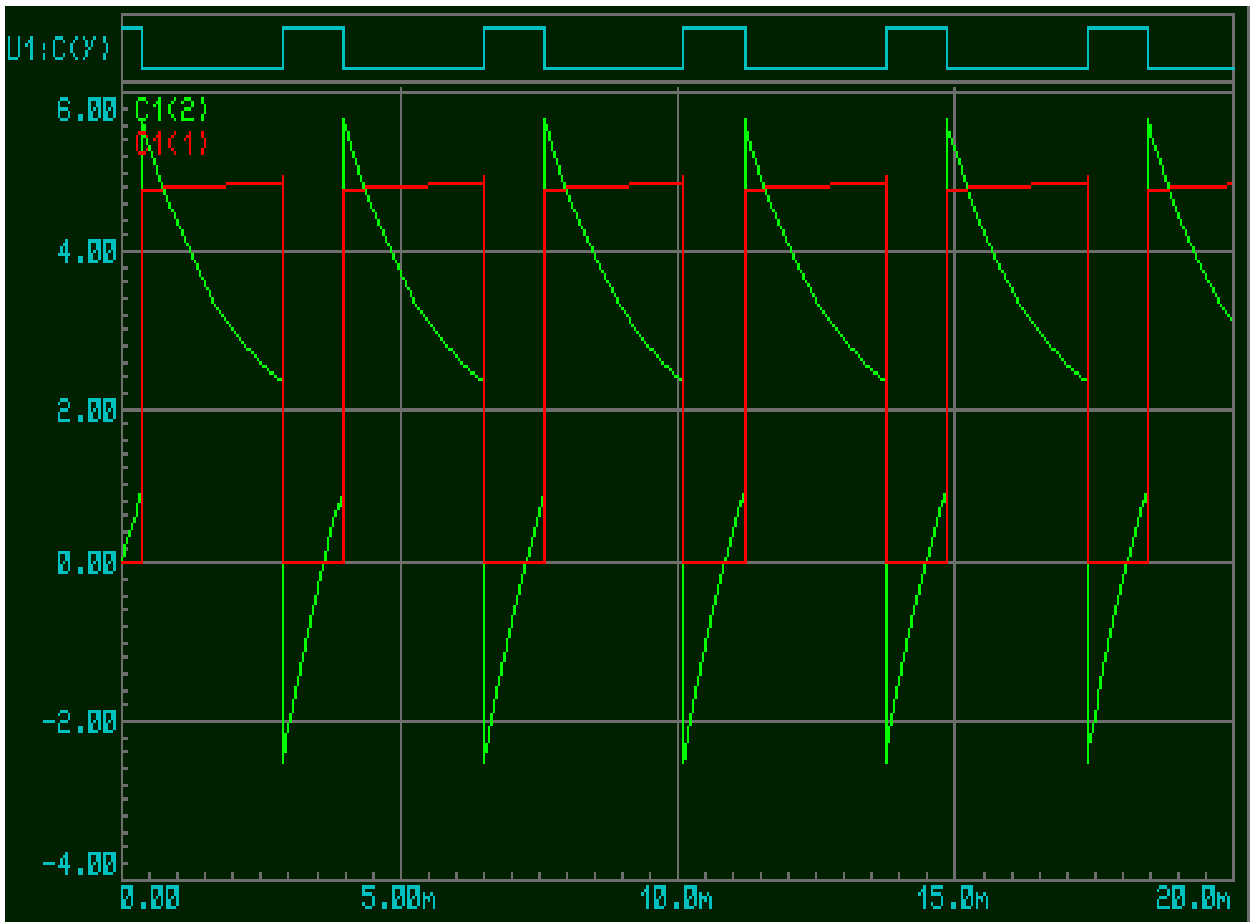


Рисунок 2.11 – Результати моделювання перехідного процесу в редакторі Proteus

Результати моделювання демонструють співпадання із розрахунковими даними, отриманими, вище.

### 2.5.2 Моделювання процесу заряду акумуляючого пристрою накопичувача енергії

Для контролю процесу заряду акумуляючого пристрою пропонується використати систему на мікроконтролерах. Система дозволить контролювати процес зарядки від декількох незалежних джерел електроенергії в оптимальному режимі, знижуючи швидкість її зносу, а також своєчасно попереджувати процес зносу.

Модуль контролера заряду у свою чергу реалізує наступні функції:

- управління зарядкою залежно від поточного рівня заряду;
- інформування користувача про критичний знос.

Вимірювати параметри акумуляуючого пристрою можна за допомогою мікросхеми MAX17055. Вона вимірює такі параметри, як цільову напругу, струм заряду, струм відключення зарядного пристрою і ін. і передає їх по інтерфейсу I2C. Ці дані можуть бути прийняті мікроконтролером і передані ним мікросхемі контролера заряду. Контролювати процес заряду дозволить мікросхема BQ24151. Для управління роботою мікросхем вибраний мікроконтролер STM32F446RET. У даному мікроконтролері використовується процесорне ядро ARM Cortex M4. Мікроконтролери STM32 відрізняються поєднанням характеристик малого енергоспоживання і високої продуктивності.

Мікроконтролер STM32F446RET підтримує вбудований інтерфейс I2C і одночасну роботу з двома пристроями по даному інтерфейсу, і може приймати і передавати дані через порти SCL і SCA відповідно. Напруга живлення мікроконтролера STM32F446RET складає 3,3 В, а напруга, що подається на пристрій +5 В. У зв'язку з цим потрібно використовувати стабілізатор напруги на 3,3 В.

Індикація режимів роботи здійснюється за допомогою чотирьох діодів: зелений (заряджено, зарядка не потрібна), жовтий (йде зарядка), синій (знос перевищує допустимий), червоний (помилка роботи).

Зарядка здійснюється за допомогою мікросхеми BQ24151. Внутрішня структура мікросхеми відома з документації на дану мікросхему (рисунок 2.12) [12]. В ході розробки було проведено спрощене моделювання роботи контролера заряду, складена схема, що моделює роботу частини внутрішньої структури мікросхеми.

Схема для моделювання включає спрощену аналогову частину внутрішньої структури мікросхеми, що працює в режимі заряду (Charge mode) (рисунок 2.13).

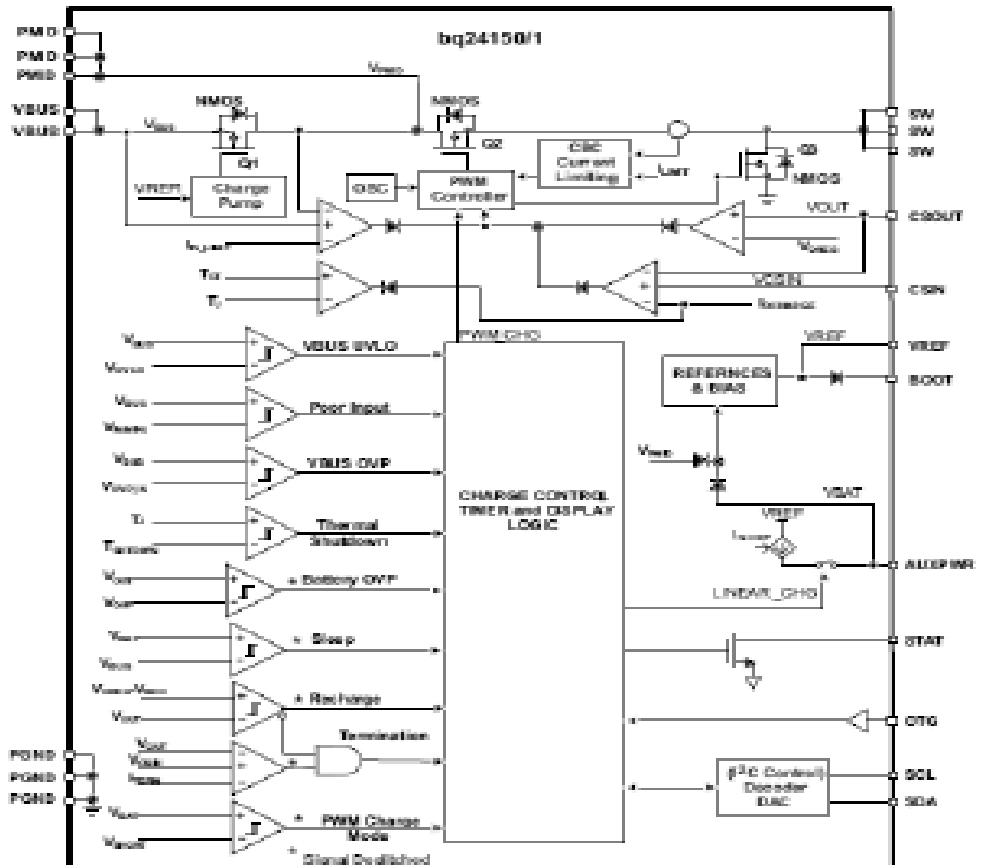


Рисунок 2.12 – Внутрішня структура мікросхеми BQ24151

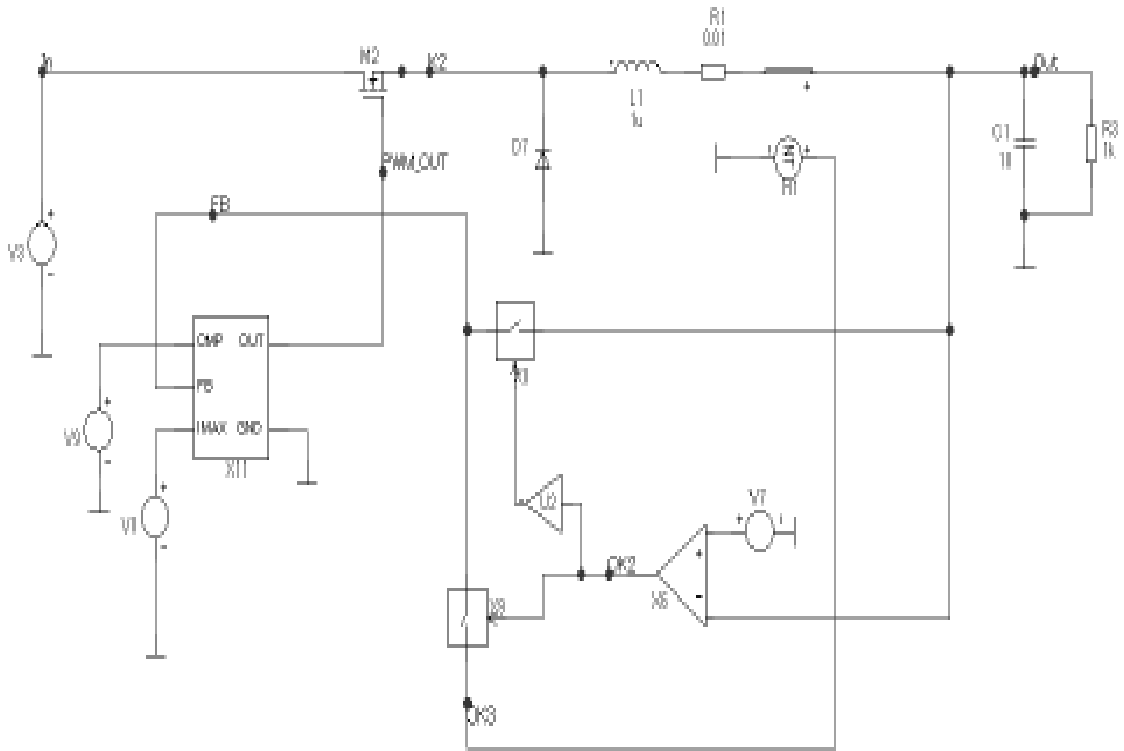


Рисунок 2.13 – Схема для моделювання мікросхеми BQ24151

На схемі X11 виконує функцію ШІМ контролера. Компаратор X6 переключає ланцюг зворотного зв'язку: по напрузі та по струму. У першому випадку напруга зворотного зв'язку знімається з виходу, в другому – формується за допомогою функціонального джерела напруги, залежної від струму. Акумуляючий пристрій моделюється за допомогою паралельно сполученого конденсатора і резистора (конденсатора C1 і резистора R3). В результаті роботи схеми конденсатор заряджає до напруги 6 В (рисунок 2.14).

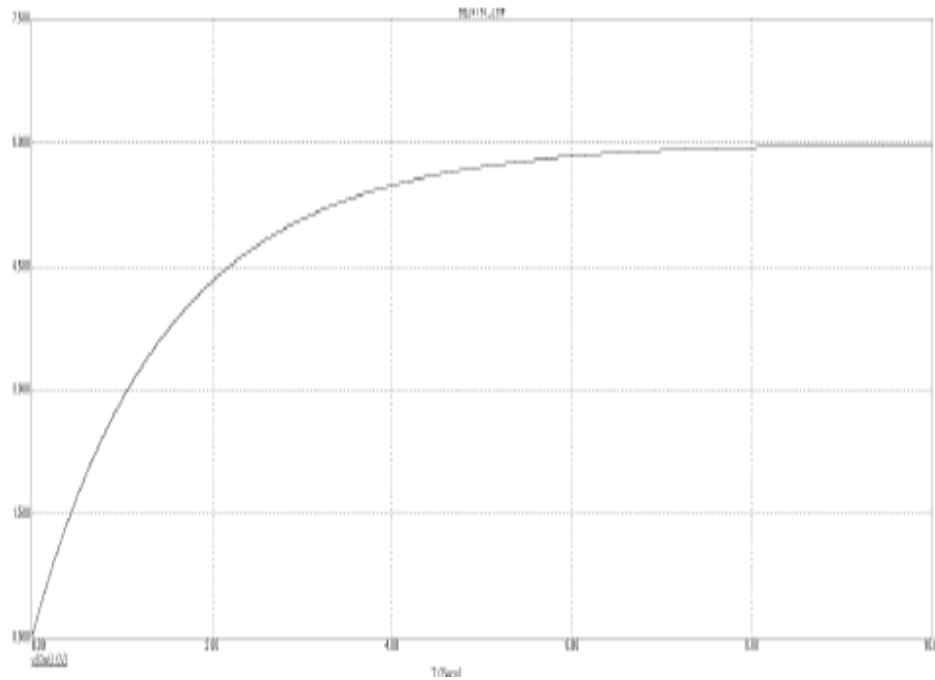


Рисунок 2.14 – Результат моделювання процесу заряду

Результати моделювання показують, що пристрій задовольняє вихідним вимогам і коректно здійснює зарядку пристрою.

### 2.5.3 Моделювання роботи інвертора в редакторі Proteus

Результат моделювання роботи інвертора фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги представлено на рисунку 2.15.

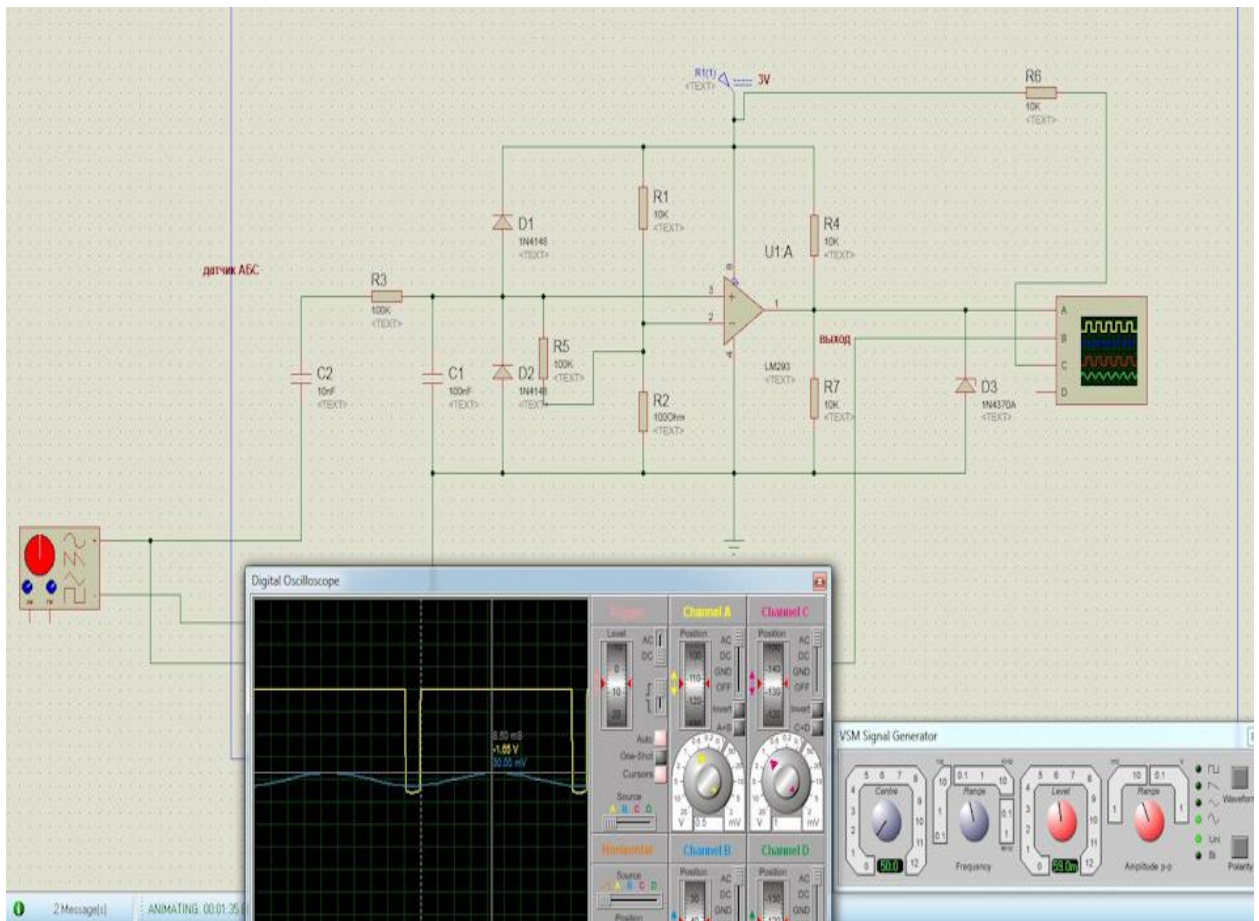


Рисунок 2.15 – Моделювання роботи інвертора фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги в редакторі Proteus

Як видно із результатів моделювання, сигнал на виході інвертора має вид гармонійної функції.

#### 2.5.4 Розрахунок гармонік напруги після перетворення в інверторі

Розглянемо розрахунок вихід інвертора на заданий коефіцієнт гармонік синусоїдальної напруги на навантаженні. Для розрахунку необхідно, як відзначалося вище, одержати форму вихідної напруги інвертора. Тому спочатку розглянемо саме цю проблему. Допустимо, що всі елементи в схемі ідеальними, а всі процеси, що протікають в інверторі, будемо розглядати на періоді вихідної напруги в сталому режимі. Всі математичні розрахунки,



побудова графіків і діаграм роботи будемо реалізовувати на персональному комп'ютері з використанням пакета математичних обчислень Mathcad [13].

Імпульси по синусоїдальній функції побудови одержуємо, як показано на рисунку 2.16, шляхом порівняння керуючого випрямленого синусоїдального сигналу з пилоподібною розгортаючою напругою.

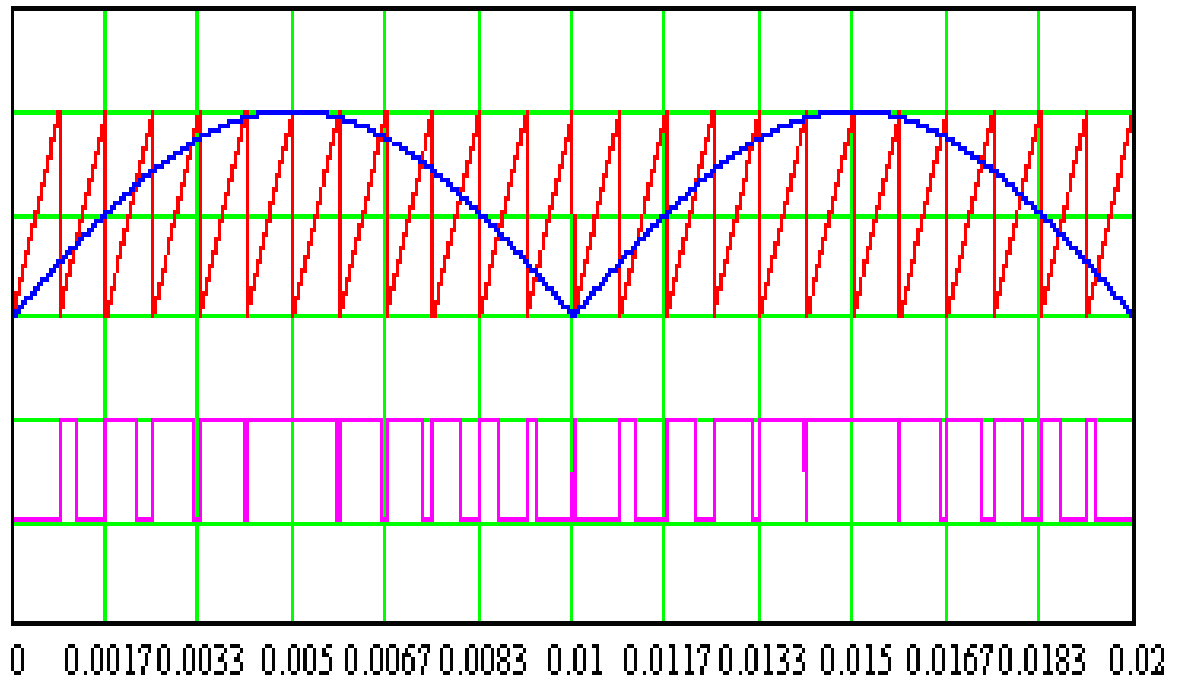


Рисунок 2.16 – Вхідні сигнали інвертора

Із побудови графіків видно, що з постійної напруги на вході інвертора одержали двохполярну модульовану по синусоїдальній функції побудови напругу на виході інвертора. Розкладаємо отриману функцію і визначаємо її спектр амплітуд гармонійних складових (рисунок 2.17).

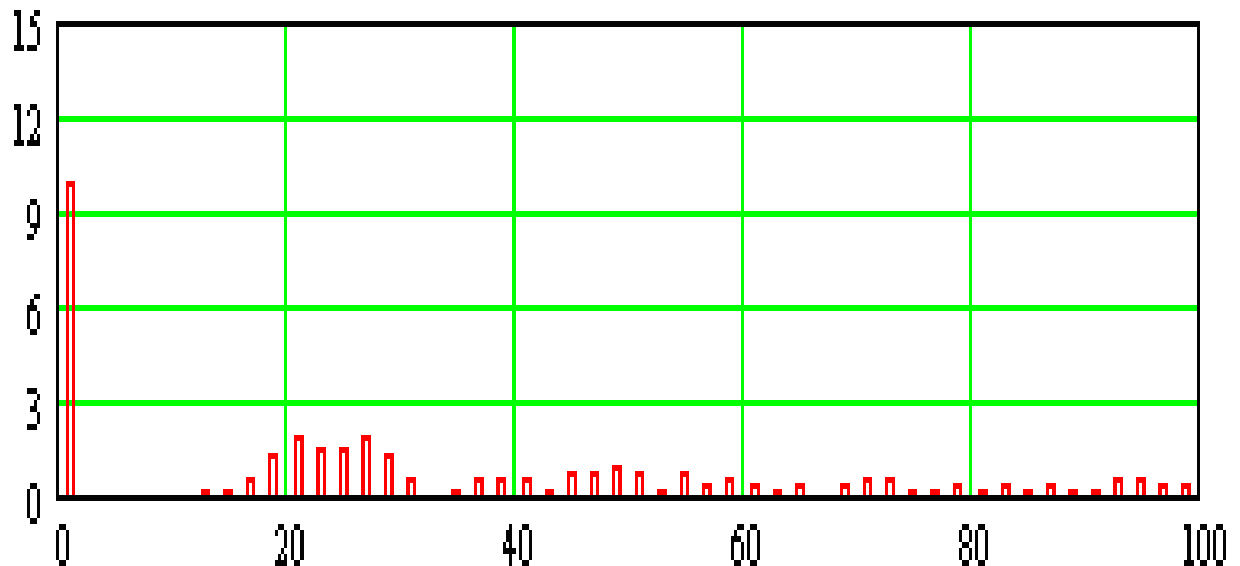


Рисунок 2.17 - Спектр амплітуд гармонійних складових

Спектр складається з першої гармонійної складової (50 Гц) і масивів більш високочастотних гармонік, сконцентрованих біля частот, кратних частоті квантування (1,2 кГц, 2,4 кГц і т.д.).

Тобто даний спектр не містить щодо низькочастотних гармонійних складових (крім першої), а тільки високочастотні й, отже, звичайним LC-фільтром можна легко їх відфільтрувати, залишивши тільки першу гармоніку. Причому, чим більше буде частота квантування, тим у більш високому частотному діапазоні виявляться масиви високочастотних гармонійних складових.

Знаходимо діаграму напруги на навантаженні, зображену на рисунку 2.18 у порівнянні із сигналом ідеальної синусоїдальної напруги, яка має такі ж амплітуду й фазовий зсув.

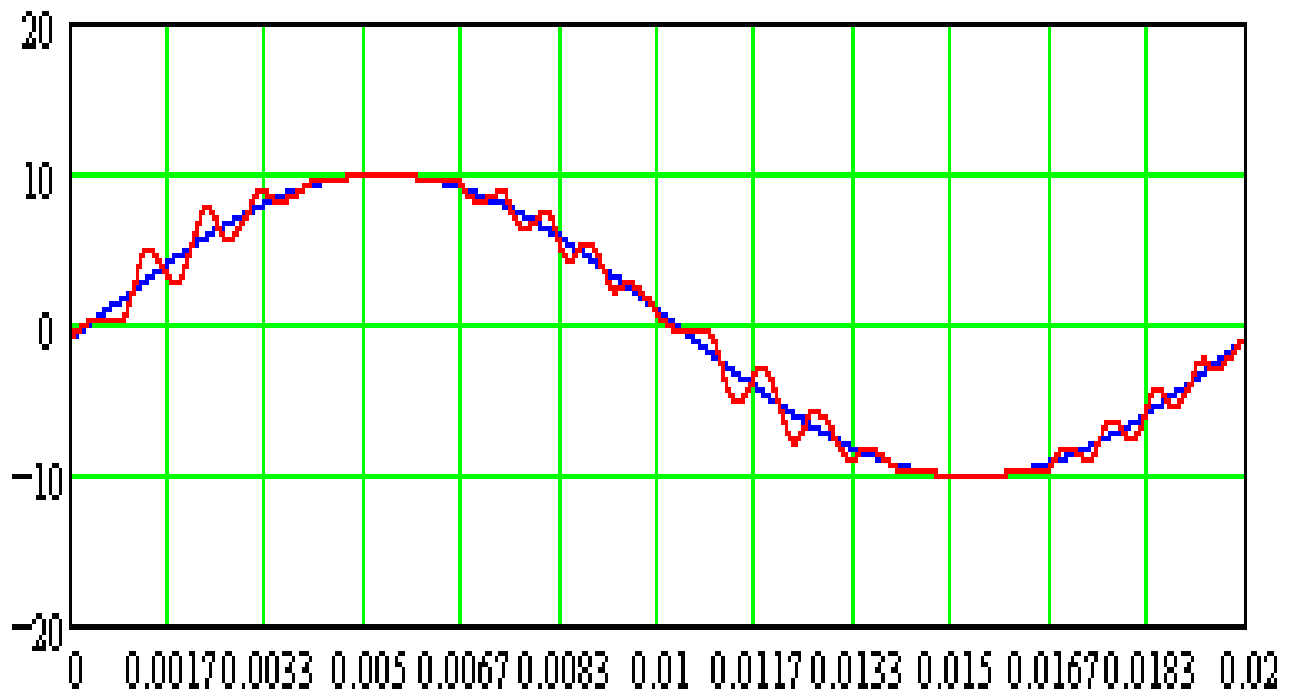


Рисунок 2.18 - Напруга на навантаженні

Отже, напруга на навантаженні має синусоїдальний характер.

Отже, за результатами розділу можна зробити наступні висновки:

1) розроблено структурну схему фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги у якій за рахунок використання акумулюючого пристрою досягнуто збільшення потужності;

2) розроблено схему керування акумулюючим пристроєм із використанням мікросхеми LT3094, яка є стабілізатором напруги і має більш високий коефіцієнт пригнічення пульсацій, ніж її відомі аналоги;

3) для узгодження роботи акумуляторного пристрою із системою сонячних батарей в роботі запропоновано використати принцип електронного навантаження, що підвищує рівень стійкості системи;

4) запропоновано схему інвертора перетворення постійної напруги в синусоїдальну шляхом сполучення мультівібратора із двотактним підсилювальним каскадом, що значно здешевлює вартість на виготовлення;

5) моделювання режимів роботи пристрою в редакторі Proteus показали добре співпадання із розрахунковими результатами.

### 3 Техніко - економічне обґрунтування виготовлення електронних схем фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги

#### 3.1 Обґрунтування вибору технології виготовлення електронних схем фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги

Топологічний аналіз показує, що система може бути реалізована у вигляді малогабаритних мікромодулів і виконана за сучасною маловитратною технологією тонко плівкових гібридних мікроборок. Але у відмінності від стандартної технології у гібридного виконання всі елементи будуть навісними, а напиленням на підкладці виконується лише струмопровідний шар.

Для вибору технології виготовлення електронних схем фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги проаналізуємо ієрархії чотирьох варіантів (таблиця 3.1), враховуючи шкалу відносної важливості (таблиця 3.2) [14].

Таблиця 3.1 - Можливі варіанти технологій виробництва пристрою

Технологія		Короткий опис
A	Напівпровідникових інтегральних схем	Всі елементи та між елементні з'єднання виконані на поверхні та в об'ємі загального кристала напівпровідника
B	Толстоплівкових гібридних інтегральних схем	Всі елементи та між елементні з'єднання виконані у вигляді товстих композитних плівок.
C	Тонкоплівкових гібридних інтегральних схем	Всі елементи та між елементні з'єднання виконані у вигляді тонких плівок провідних та резистивних матеріалів.
D	Тонкоплівкових гібридних мікроборок	Активні та пасивні елементи схеми навісні, а струмопровідний шар виконано у вигляді тонких плівок.

Вибір робимо за критеріями, наведеними в таблиці 3.3.

Встановлюємо відносну вагу кожного критерію на основі матриці попарних порівнянь для обраних критеріїв (таблиця 3.3) [14].

Таблиця 3.2 - Шкала відносної важливості

Інтенсивність відносної важливості	Визначення
1	рівна важливість
3	помірна перевага
5	сильна перевага
7	значна перевага
9	дуже сильна перевага
2,4,6,8	проміжні судження

Таблиця 3.3 – Попарне порівняння критеріїв

Критерій	1	2	3	4	5	6	$\sqrt[6]{\prod_{i=1}^6 \omega_i}$	$X_i$
1. Швидкодія	1	1/3	3	1/7	1/5	3	0,664	0,073
2. Завадостійкість	3	1	3	1/3	1/7	3	1,042	0,116
3. Споживання	1/3	1/3	1	1/5	1/7	3	0,460	0,051
4. Площа	7	3	5	1	1/5	7	2,297	0,254
5. Сумісність	5	7	7	5	1	5	4,277	0,473
6. Вартість	1/3	1/5	1/3	1/7	1/5	1	0,293	0,033
	$\Sigma$						9,033	1,00

У матриці прийняті наступні позначення:  $i$  – номер критерію; при порівнянні 6-ох критеріїв (таблиця 3.3)  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ;  $X_i$  - локальний пріоритет, тобто відносна вага  $i$ -го критерію в глобальному критерії:

Далі аналогічно складаємо 6 матриць попарних порівнянь альтернатив стосовно кожного критерію (таблиці 3.4 - 3.9). Оскільки тепер порівнюються 4 технології по одному критерію, то  $i = 1, 2, 3, 4$ .

$$X_i = \frac{\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}}{\sum_{i=1}^4 \sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}},$$

де  $\Sigma$  - сума по стовпці  $\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$ .

Таблиця 3.4 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «швидкодія»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	X <sub>i</sub>
A	1	1/5	3	3	1,16	0,19
B	5	1	7	7	3,96	0,65
C	1/3	1/7	1	1/2	0,39	0,07
D	1/3	1/7	2	1	0,56	0,09
Σ					6,07	1,00

Таблиця 3.5 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «завадостійкість»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	X <sub>i</sub>
A	1	5	1	1/3	1,14	0,21
B	1/5	1	1/5	1/7	0,48	0,09
C	1	5	1	1/3	1,56	0,29
D	3	7	3	1	2,20	0,41
Σ					5,37	1,00

Таблиця 3.6 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «споживання»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	X <sub>i</sub>
A	1	5	1/5	1/7	0,61	0,09
B	1/5	1	1/7	1/9	0,24	0,04
C	5	7	1	1/3	1,85	0,29
D	7	9	3	1	3,71	0,58
Σ					6,41	1,00

Таблиця 3.7 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «площа»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	X <sub>i</sub>
A	1	5	3	5	0,99	0,21
B	1/5	1	1/3	1/2	0,24	0,05
C	1/3	3	1	3	2,03	0,43
D	1/5	2	1/3	1	1,47	0,31
Σ					4,73	1,00

Таблиця 3.8 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «сумісність»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	X <sub>i</sub>
A	1	5	1/3	1/5	0,76	0,13
B	1/5	1	1/7	1/9	0,24	0,04
C	5	7	1	1/2	2,41	0,41
D	3	9	2	1	2,47	0,42
Σ					5,88	1,00

Таблиця 3.9 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «вартість»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	X <sub>i</sub>
A	1	3	5	6	3,08	0,56
B	1/3	1	3	4	1,41	0,26
C	1/5	1/3	1	2	0,60	0,11
D	1/6	1/4	1/2	1	0,38	0,07
Σ					5,47	1,00

Глобальний пріоритет для кожної альтернативи обчислюється як сума добутків кожного локального пріоритету на його ваговий коефіцієнт (таблиця 3.10) [14].

З порівняння глобальних пріоритетів різних технологій видно, що найбільшим є пріоритет у варіанта виготовлення електронних схем системи з використанням технології тонкоплівкових гібридних мікроборок.

Таблиця 3.10 - Глобальний пріоритет для кожної альтернативи

Пріоритети	№1	№2	№3	№4	№5	№6	Глобальний
Вага	0,073	0,116	0,051	0,254	0,473	0,033	
Напівпровідникових інтегральних схем	0,19	0,21	0,09	0,21	0,13	0,56	0,176
Толстоплівкових гібридних інтегральних схем	0,65	0,09	0,04	0,05	0,04	0,26	0,100
Тонкоплівкових гібридних інтегральних схем	0,07	0,29	0,29	0,43	0,41	0,11	0,360
Тонкоплівкових гібридних мікроборок	0,09	0,41	0,58	0,31	0,42	0,07	0,364



За допомогою методу аналізу ієрархій проведено порівняння чотирьох типів технологій виготовлення електронних схем системи за наступними критеріями: 1) швидкодія; 2) завадостійкість; 3) споживана потужність; 4) площа, займана на кристалі; 5) сумісність; 6) вартість. Найбільший локальний пріоритет у критерію «сумісність» (таблиця 3.3). За даними таблиці 3.9 локальний пріоритет за критерієм «вартість» є найвищим для технології напівпровідникових інтегральних схем. Проте найбільший глобальний пріоритет має технологія тонкоплівкових гібридних мікроборок. Саме вона й буде використовуватися для виготовлення електронних схем фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги.

### 3.2 Розрахунок витрат на виготовлення електронних схем фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги

Витрати на матеріали і напівфабрикати, вказані в таблиці 3.11, склали 1751,4 грн.

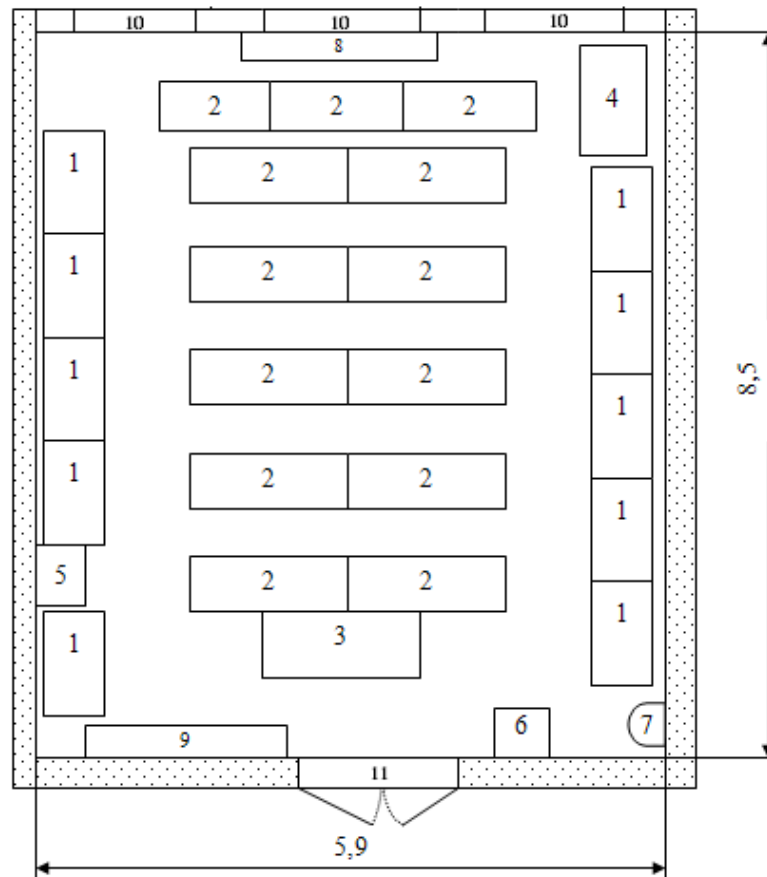
Таблиця 3.11 - Розрахунок вартості основних покупних виробів

Матеріали і напівфабрикати	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Вартість матеріалів і напівфабрикатів, грн.
Фольгований склотекстоліт	м <sup>2</sup>	0,6	10	6,0
Хлорне залізо	кг	1,5	40	60,0
Конденсатор	шт.	21	20	420,0
П'єзокерамічний конденсатор	шт.	1	20,5	20,5
Роз'єми комутації	шт.	7	18	126,0
Резистор	шт.	28	1,1	30,8
Реле PVG613PBF	шт.	1	43,7	43,7
ОП К140У	шт.	2	81,5	163,0
Випрямляючий діод КД208	шт.	4	2,0	8,0
Стабілітрон КС156	шт.	2	8,0	16,0
Світлодіод АЛ102Б	шт.	2	1,1	2,2
ПТ IRF730	шт.	2	14,4	28,8
БПТ КТ815	шт.	8	19,2	153,6
Стабілізатор напруги LT3094	шт.	1	83,8	83,8
Папір писальний	уп.	1	89	89,0
Транспортно-заготівельні витрати				500,0
Разом				1751,4

#### 4 Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги

##### 4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

В даному розділі як об'єкт дослідження розглянуто приміщення в якому проводяться роботи по дослідження та вивченню фотовольтаїчних систем. План приміщення наведено на рисунку 4.1 [15].



1 - стіл комп'ютерний, 2 - стіл аудиторний, 3 - стіл викладача, 4 - установка Холла, 5 - шафа силова, 6 - сейф, 7 - умивальник, 8 - спліт система, 9 - дошка аудиторна, 10 - вікно, 11 - двері

Рисунок 4.1 – План розташування робочих місць

Приміщення, в якому знаходяться відео термінальні пристрої, має такі характеристики:

- довжина приміщення 8,5 м;
- ширина приміщення 5,9 м;
- висота 4 м;
- число вікон 3;
- кількість робочих місць 28;
- забарвлення інтер'єру: біла стеля, блідо-бежеві стіни, підлога бетонна, обтягнута лінолеумом коричневого кольору.

Відповідно до ПХТ 12.0.003-74 небезпечні та шкідливі фактори за природою дії поділяються на такі групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні [15,16].

В даному приміщенні діють такі фізичні небезпечні та шкідливі фактори:

- підвищений рівень вібрацій, інфразвукових коливань, ультразвуку, іонізуючих випромінювань, статичної електрики, електромагнітних випромінювань, ультрафіолетової чи інфрачервоної радіації;

- підвищені чи знижені барометричний тиск, вологість, іонізація та рухомість повітря;

- небезпечне значення напруги в електричному колі; підвищена напруженість електричного чи магнітного полів;

- недостатня освітленість робочої зони; підвищена яскравість світла;

Також присутні небезпечні та шкідливі психофізіологічні фактори, до яких належать фізичні (статичні та динамічні) і нервово-психічні перевантаження (розумове перенапруження, перенапруження органів чуття, монотонність праці, емоційні перевантаження).

#### 4.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Одним із заходів є підвищення комфортності роботи шляхом раціоналізації параметрів робочого місця та робочого приміщення з ергономічної точки зору [16].

Обсяг приміщення на одного працюючого за санітарними нормами має становити не менше  $20 \text{ м}^3$ , а площа приміщення – не менше  $6 \text{ м}^2$ . Ширина основних проходів у приміщенні повинна становити не менше 1,5 м. Ширина виходів з приміщення повинна бути не менше 1 м, висота – не менше 2,2 м. Дане приміщення має обсяг  $V=188,06 \text{ м}^3$ , а площу  $S=50,15 \text{ м}^2$ . Таким чином наше приміщення не відповідає нормам з ергономічної точки зору.

Для зменшення впливу психофізіологічних факторів складено правильний графік трудового дня, встановлено необхідний час перерв, темп та ритм роботи, які необхідні для зменшення дії на організм людини фізичних зусиль, що в свою чергу дозволяють захистити людину від перевтомлення та втрати здоров'я [17].

#### 4.3 Виробнича санітарія

Мікроклімат характеризується наступними параметрами: температура, вологість, швидкість повітря, атмосферний тиск, шум [15].

Для нашого приміщення температура підтримується завдяки вентиляції (природної і штучної) в теплу пору року, та за допомогою опалення та герметизації приміщення в холодну пору року. Оптимальні норми температури для холодної пори року  $21-23^\circ\text{C}$ , для теплої складає  $22-24^\circ\text{C}$ .

Наше приміщення відповідає цим температурним нормам.

В даному приміщенні є два види вентиляції:

– природна (аерація через вікна і двері);

– примусова (приточно-витяжна).

Функціонально близьким, але відмінним від вентиляції за способом повітрообміну є кондиціонування. В даному приміщенні є наявність кондиціонера, який підтримує в приміщенні комфортні умови незалежно від зовнішніх умов (визначеної температури, вологості, чистоти повітря і швидкості повітряних потоків).

Вологість повітря в даному приміщенні не 40-60%, що відповідає оптимальним нормам. Це реалізується за допомогою вентиляції і кондиціонування приміщення, а також за рахунок проведення вологих збирань.

У приміщенні є наявність відео термінальних пристроїв та учбових стендів для проведення лабораторних робіт. Всі ці устаткування мають низький рівень шуму, що в свою чергу не перевищує допустиму норму рівня шуму в 65 дБ.

В нашому приміщенні, де знаходяться відео термінальні пристрої, використовується змішане освітлення, тобто поєднання природного і штучного освітлення.

В якості природного - бокове освітлення через вікна. В даному приміщенні використовується загальне штучне освітлення.

Розрахунок його здійснюється за методом світлового потоку з урахуванням потоку, відбитого від стін і стелі [17].

Нормами для даних робіт в даному приміщенні встановлена необхідна освітленість робочого місця  $E_n = 300 \text{лк}$  (середня точність роботи по розрізненню деталей розміром від 1 до 10 мм).

#### 4.4 Електробезпека

Приміщення за ступенем небезпеки ураження людей електричним струмом відповідно до ПУЕ і ГОСТу 12.1.013-78 являється приміщенням без підвищеної небезпеки [15-19].

Приміщення сухе, добре опалюване з струмонепровідною підлогою, з температурою 18-24 °С, з вологістю 40-50%. З електроустаткувань в ньому знаходяться відео термінальні пристрої та учбові стенди, які знаходяться під напругою.

Причини ураження електричним струмом [17].

1. Пошкодження устаткування.
2. Пошкодження ізоляції.
3. Коротке замикання на землю або на корпус.
4. Порушення правил техніки безпеки и роботи с електроустаткуванням.

Для забезпечення електробезпеки в даному приміщенні використовуються такі технічні засоби:

- захисне заземлення;
- мала напруга;
- захисне відімкнення;
- ізоляція струмопроводів;
- знаки безпеки.

Захисне заземлення — навмисне електричне з'єднання з землею або її еквівалентом металевих струмопровідних частин, що можуть опинитися під напругою.

Учбові стенди, які знаходяться в приміщенні, працюють на мінімально можливих напругах, що забезпечує додаткову безпеку.

Усі електроустаткування можна у разі потреби вимкнути через електронний щит управління, який миттєво знеструмлює усі стенди та відео термінальні пристрої. Скрізь, де встановлені розетки є попереджувальні знаки.

#### 4.5 Пожежна та техногенна безпека об'єкту

Приміщення відноситься за вибухопожежною небезпекою до категорії “Б” [18].

Основними причинами пожеж в даному приміщенні є:

- необережне поводження з вогнем;
- незадовільний стан електротехнічних пристроїв, порушення правил їх монтажу та експлуатації;
- невиконання вимог нормативних документів з питань пожежної безпеки.

Приміщення за класом пожеж відноситься до категорії “Е” [18]. Це горіння обладнання та установок, які знаходяться під електричною напругою. Серед необхідних засобів гасіння пожежі в даному приміщенні є два вуглекислих вогнегасники типу ОУ-2. Для мінімізації виникнення пожежі в даному приміщенні вчасно проводиться профілактичний огляд та ремонт електроустаткування. В приміщенні є план евакуації згідно якого люди повинні залишити приміщення у разі виникнення пожежі. Ширина шляхів евакуації в світлі повинна бути не менше 1 м, дверей - не менше 0.8 м. При дверях, що відкриваються з приміщень в загальні коридори, за ширину евакуаційного шляху коридором слід приймати ширину коридору, зменшену:

- на половину ширини дверного полотна - при однобічному розташуванні дверей,
- на ширину дверного полотна - при двосторонньому розташуванні дверей.

Висота проходу на шляхах евакуації повинна бути не менше 2 м. У підлозі на шляхах евакуації не допускаються перепади висот менше 45 см і виступи, винятком порогів в дверних отворах. Висота дверей у просвіті на шляхах евакуації повинна бути не менше 2 м.



#### 4.6 Розрахунок штучного освітлення точковим методом

Точковий метод призначений для розрахунку локалізованого та комбінованого освітлення, а також освітлення похилих площин [20].

Загальне локалізоване освітлення, а також загальне рівномірне при наявності суттєвих затінь повинні розраховуватись за точковим методом. Цей же метод використовується при розрахунку освітленості похилих площин та відкритих просторів, а також місцевого освітлення. Відбита складова освітленості у точковому методі враховується наближено.

Метод називається точковим тому, що дозволяє визначити потужність освітлювальної установки на основі розрахунку освітленості в будь-якій точці робочої поверхні. Методом користуються у всіх випадках, коли метод коефіцієнта використання є неприйнятним (в приміщеннях, захищених обладнанням, затемнених і т. ін.), а також у випадку перевірки освітленості окремих ділянок. Він широко використовується при розрахунку освітлення конвеєрних ліній та галерей, охоронного освітлення, освітлення сходів, спусків, доріг, залізничних колій, підземних протяжних виробок і т. п.. Метод дає хороші результати у випадках використання світильників прямого та переважно прямого світла.

Для виконання розрахунку освітлення попередньо вибирають тип світильників та варіант їх розміщення (висоту підвісу та відстань між ними). В загальному випадку точковий метод дозволяє знайти освітленість робочої поверхні, довільно орієнтованої в просторі. В практиці проектування освітлювальних установок випадки розрахунку освітленості на похилих площинах зустрічається рідко, частіше виникає необхідність розрахунку освітлення або на поверхні, перпендикулярній вісі симетрії світильника (горизонтальна освітленість), або на поверхні, паралельній їй (вертикальна освітленість). Це дає можливість спростити схему розрахунку.

Принцип розрахунку освітленості на горизонтальній та вертикальній поверхні від світильника з круглосиметричним світлорозподіленням нагляд-

но ілюструється на рисунку 4.2, де точка А на робочій поверхні є точкою, в якій визначається освітленість [20]

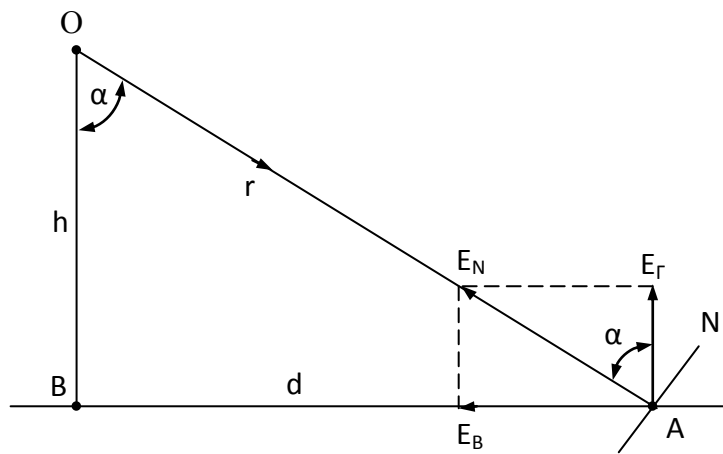


Рисунок 4.2 – Графік до розрахунку освітленості

Освітленість  $E_N$  в точці А на площині, перпендикулярній променю світла, що падає в цю точку, залежить від сили світла  $I_\alpha$  в цьому напрямку та віддаленості  $r$  джерела до точки [20].

$$E_N = \frac{I_\alpha}{r^2}. \quad (4.1)$$

Освітленість в точці А на горизонтальній та вертикальній площині відповідно становить:

$$E_r = \frac{I_\alpha}{r^2} \cdot \cos \alpha, \quad (4.2)$$

$$E_b = \frac{I_\alpha}{r^2} \cdot \sin \alpha. \quad (4.3)$$

Для практичних розрахунків доцільно положення джерела світла (точка О) визначати через координати  $h$ ,  $d$  та кута  $\alpha$ . Тоді із трикутника АОВ можна знайти:

$$\cos \alpha = \frac{h}{r}, \quad (4.4)$$

$$r = \frac{h}{\cos \alpha}. \quad (4.5)$$

Тоді вище наведені залежності для освітленості можна представити:

$$E_r = \frac{I_r \cdot \cos^3 \alpha}{h^2}, \quad (4.6)$$

$$E_b = \frac{I_\alpha \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{h^2} = E_r \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.7)$$

Приймаючи до уваги, що криві розподілення сили світла світильників приводяться для умовної лампи з світловим потоком 1000 лм, для реальної лампи

$$I'_\alpha = c \cdot I_\alpha, \quad (4.8)$$

$$c = \frac{\Phi_l}{1000}, \quad (4.9)$$

де  $\Phi_l$  – світловий потік реального джерела світла, лм.;

$I_\alpha$  – сила світла в напрямі точки А за характеристиками світлорозподілення світильника.

Тоді остаточна залежність для розрахунку освітленості в точці А:

$$E_r = \frac{c \cdot I_\alpha \cdot \cos^3 \alpha}{h^2 \cdot k_3}, \quad (4.10)$$

де  $k_3$  – коефіцієнт запасу, що враховує зниження світлового потоку в процесі експлуатації освітлювальної установки.

Освітленість в розрахунковій точці визначається від кожного світильника, тобто загальна освітленість в точці знаходиться як сума освітленостей  $\sum E_r$  від всіх світильників [20].

Розрахунок вважається закінченим, якщо зберігається умова  $E_{\min} \geq \sum E_r$ .

Практично розрахункова освітленість може відрізнятися від нормованого значення в межах  $-10\% \dots +20\%$ . Якщо умова з такими припущеннями не виконується, необхідно скоректувати розташування світильників.

В якості контрольних вибираються такі точки в межах приміщення, для яких  $\sum E_r$  є мінімальною.

Якщо використовується світильник з несиметричним світло розподіленням, положення розрахункової точки А відносно джерела світла

буде визначатися висотою  $h_p$ , кутом  $\alpha$  та кутом  $\varphi$ , що відраховується від площини симетрії світильника  $OO'O''$  (рисунок 4.3).

При цьому значення кутів визначається з рисунку 4.3:

$$\alpha = \arctg \frac{d}{h_p}; \quad \varphi = \arctg \frac{b}{a} \quad (4.11)$$

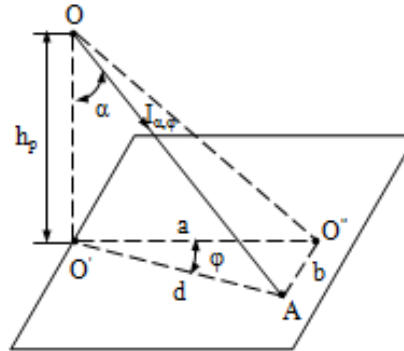


Рисунок 4.3 – Координати, що визначають положення точкового елемента, що світиться, відносно розрахункової точки А

Знайдені значення кутів  $\alpha$  та  $\varphi$  дозволяють, користуючись кривими рівних значень сили світла, визначити значення сили світла в напрямі розрахункової точки і розрахувати освітленість елемента поверхні в цій точці [20]

$$E_z = \frac{I_{\alpha,\varphi} \cdot \cos^3 \alpha}{h_p^2} \quad (4.12)$$

Стосовно випадку розташування світильників світними лініями (світильники з люмінесцентними лампами) широко використовують видозмінений точковий метод – метод кривих рівної відносної освітленості. Характеристикою світних ліній є лінійна густина світлового потоку ламп ( $\Phi'$ ), лм/м, що визначається діленням сумарного потоку ламп  $\Phi$  в лінії на її довжину ( $L$ ). При цьому лінії з рівномірно розподіленими по їх довжині розривами ( $l_p$ ) розглядаються в розрахунках як безперервні якщо  $l_p \leq 0,5 h$ . Для протяжних ліній з такими розривами можна рахувати:

$$\Phi' = \frac{\Phi}{l_{c.l.} + l_p}, \quad (4.13)$$

де  $\Phi$  – потік ламп в суцільній частині лінії ( $l_{c.l.}$ ).

При  $l_p > 0,5 h$  для кожної суцільної частини лінії окремо визначається  $\Phi'$  і створювана цією частиною освітленість.

Розрахунок освітлення виконується за допомогою лінійних ізолюкс, які дають відносну горизонтальну освітленість  $\epsilon$  при  $h = 1$  м та  $\Phi' = 1000$  лм/м, що приводяться в довідниках для проектування освітлення.

Відносна освітленість  $\epsilon$  за графіками лінійних ізолюкс визначається для точок, що знаходяться навпроти кінця ряду світильників, в залежності від координат:

- відносна довжина світної лінії

$$L' = \frac{n \cdot (l_c + l_p)}{h}, \quad (4.14)$$

- відносна відстань від проекції осі лінії до контрольної точки А (рисунок 4.4).

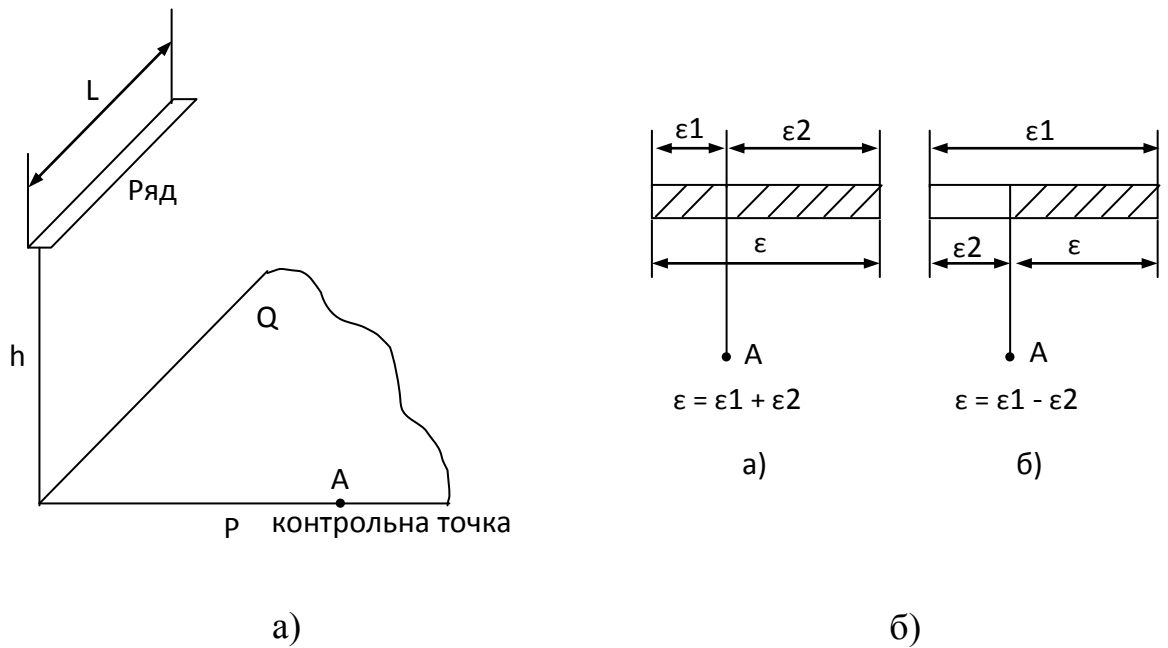
$$P' = \frac{P}{h}. \quad (4.15)$$

Освітленість в точках, що знаходяться не навпроти кінця ряду світильників, визначається шляхом розподілу лінії на дві її частини або доповнення умовним відрізком з послідуочим складанням чи відніманням освітленості, як показано на рисунку 4.4 (б).

Підсумовуючи значення  $\epsilon$  для всіх рядів, що освітлюють контрольну точку, знаходять  $\sum \epsilon$ .

Після цього знаходиться густина потоку  $\Phi'$ , необхідна для одержання в точці заданої освітленості  $E$  при коефіцієнті запасу  $K_z$ :

$$\Phi' = \frac{1000 \cdot E_{\min} \cdot K_3}{\mu \cdot \Sigma \varepsilon}, \quad (4.16)$$



де  $\mu$  – коефіцієнт, що враховує вплив віддалених світильників та відбитого світла ( $\mu = 1,1 \div 1,2$  – для емальованих світильників прямого світла,  $\mu = 1$  – для дзеркальних світильників).

Рисунок 4.4 – Схема розрахунку для люмінесцентного освітлення точковим методом (а), схема розрахунку для точок, що знаходяться не навпроти кінця ряду люмінесцентних ламп (б)

Помноживши  $\Phi'$  на довжину кожного ряду світильників  $l$ , знаходиться повний світловий потік ламп ряду, на основі чого підбирається кількість та потужність ламп [20].

## Висновки та рекомендації

Отже, за результатами роботи можна зробити наступні висновки:

1) запропоновано використати систему перетворення сонячної енергії в електричну шляхом збільшення потужності сонячних панелей, що дасть можливість збільшити кількість виробітку електроенергії;

2) розроблено структурну схему фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги у якій за рахунок використання акумулюючого пристрою досягнуто збільшення потужності;

3) розроблено схему керування акумулюючим пристроєм із використанням мікросхеми LT3094, яка є стабілізатором напруги і має більш високий коефіцієнт пригнічення пульсацій, ніж її відомі аналоги;

4) для узгодження роботи акумуляторного пристрою із системою сонячних батарей в роботі запропоновано використати принцип електронного навантаження, що підвищує рівень стійкості системи;

5) запропоновано схему інвертора перетворення постійної напруги в синусоїдальну шляхом сполучення мультівібратора із двотактним підсилювальним каскадом, що значно здешевлює вартість на виготовлення;

6) моделювання режимів роботи пристрою в редакторі Proteus показали добре співпадання із розрахунковими результатами.

7) розрахунки за техніко-економічними показниками визначили можливість макетної реалізації інвертора з меншими витратами, порівняно із зарубіжними аналогами;

8) розроблено заходи за умовами дотримання техніки безпеки та охорони праці робіт, що планується здійснити.

Як рекомендації щодо розроблюваного пристрою можна відмітити наступне:

1) система може бути використана в подальших розробках установок сонячної енергетики;

2) макетний варіант фотовольтаїчної системи отримання синусоїдальної напруги може бути використаний в лабораторному практикумі та при проведенні практичних занять кафедри мікроелектронних та електронних інформаційних систем.



## Перелік посилань

1. Strebkov D.S., Irodionov A.E. Global solar power system /. Eurosun – 2004, Freiburg, Germany. 14 Intern. Sonnenforum 2004, Vol. 2 p. 336 – 343.
2. Shin D., Kim Y., Seo J., Chang N., Wang Y. and Pedram M., Battery-supercapacitor hybrid system for high-rate pulsed load applications, in 2011 Design, Automation & Test in Europe, 2011, pp. 1–4.
3. Smestad G. Photovoltaic response in electrochemically prepared photoluminescent porous silicon / G. Smestad, M. Kunst, C. Vial // Solar Energy Materials and Solar Cells. — 1992. — Vol. 26. — P. 277 — 283.
4. Moon I. Selective emitter using porous silicon for crystalline silicon solar cells I. Moon, K. Kim, M. Thamilselvan // Solar Energy Materials and Solar Cells. — 2009. — Vol. 93 (6 — 7). — P. 846 — 850.
5. Bilylov R. Multicrystalline silicon solar cells with porous silicon emitter / R. Bilylov, R. Ludemann, W. Wettling // Solar Energy Materials & Solar Cells. — 2000. — Vol. 60. — P. 391 — 420.
6. Швець Е.Я. Технологии и материалы солнечной энергетики / Евгений Яковлевич Швець. – Запоріжжя: ЗДІА, 2007. – 239 с.
7. Пететворювальна техніка. Підручник. Ч. 2 / Гончаров Ю. П., Будьонний О. В., Морозов В. Г., Панасенко М. В., Ромашко, В. Я., В.С. Руденко В. С.. За ред. Руденка В. С. – Харків : Фоліо, 2000. 360 с.
8. Енергетична електроніка. Жуйков В.Я., Рогаль В.В., Будьонний О.В., Пілінський В.В. Київ, 2008. Електронний підручник. <http://fel.kpi.ua/lib/pidruchniki>
9. Системи електроживлення електронної апаратури. Конспект лекцій для студентів спеціальності 171 «Електроніка», спеціалізації 8(7).050802 «Електронні системи» / Укладач : Вербицький Є. В. - К. : НТУУ “КПІ”, 2016. – 180 с.

10. Лебедев В.К. Тенденции развития источников питания для дуговой сварки // Автоматическая сварка. – 1995. – № 5. – С.3–6.
11. Світанько М. В., Верьовкін Л. Л., Хрипко С. Л. Аналогова схемотехніка Методичні вказівки до виконання курсового проекту для студентів ЗДІА спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка» денної та заочної форм навчання // Запоріжжя : 2018 – 48 с.
12. UM1725. Fully Integrated Switch-Mode One-Cell Li-Ion Charger with Full USB Compliance and USB-OTG Support [Электронный ресурс] – Режим доступа:<http://www.alldatasheet.com/datasheetpdf/pdf/236604/TI/BQ24151.html>, (дата звернення:06.09.2020).
13. Mathcad 6.0 PLUS. Финансовые, инженерные и научные расчёты в среде Windows 95. Издание 2-е, стереотипное – М.: Информационно-издательский дом “Филинь”, 1997. – 712 с.
14. Белуха М.Т. Основи наукових досліджень / Белуха М.Т. - К: Вища шк., 1997. - 271с.
15. Горобец А.И. Охрана труда в радиоэлектронной промышленности / А.И. Горобец, А.И. Степаненко. – К.: Техника, 1987. – 345 с.
16. Бегун В.В., Науменко І.М. Безпека життєдіяльності: Навч. посібник. – К.: МОНУ, 2004. – 328 с.
17. Кнорринг Г.М. Справочная книга для проектирования электрического освещения. – Л.: Энергия, 1976. – 391 с.
18. Охорона праці. Методичні вказівки до проведення практичних занять та виконання контрольних робіт для студентів ЗДІА інженерних спеціальностей / Укл. В.Г. Рижков – Запоріжжя, 2005. – 43 с.
19. Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Охрана окружающей среды» с использованием ЭВМ для студентов всех специальностей / Сост. Ю.П. Свириденко, С. П. Панасейко, В.М. Билюшов. – Запорожье, 1989. – 28 с.

20. Безпека життєдіяльності. Методичні вказівки до практичних занять та контрольні завдання для студентів ЗДІА всіх спеціальностей денної та заочної форм навчання / Укл. В.Г. Рижков. – Запоріжжя, 2005. – 24 с.