

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ  
ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інформаційних технологій та електроніки

Кафедра інформаційних технологій та програмування

## Пояснювальна записка

до магістерської дипломної роботи

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: «Розробка автономного інвертора напруги для живлення  
електронних пристроїв від бортової мережі автомобіля»

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕЛ-23дм  
171 «Електроніка»

(шифр і назва спеціальності)

Тарасенко М.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник Самойлова Ж.Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Захожай О.І.

(прізвище та ініціали)

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА  
ДАЛЯ

Факультет інформаційних технологій та електроніки  
Кафедра інформаційних технологій та програмування  
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр  
Спеціальність 171 «Електроніка»  
(шифр і назва спеціальності)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ІТП  
\_\_\_\_\_ д.т.н., проф. Захожай О.І.  
(підпис)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

### ЗАВДАННЯ

на магістерську дипломну роботу студенту

Тарасенко Микиті Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Розробка автономного інвертора напруги для живлення електронних пристроїв від бортової мережі автомобіля» »  
керівник роботи доцент, к.т.н. Самойлова Жанна Георгіївна,  
(вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по батькові)  
затверджені наказом університету від « 06 » 12 2024 року №361/15.15-С
  2. Строк подання студентом роботи: 15 грудня 2024 р.
  3. Вихідні дані до роботи: Матеріали науково-дослідної практики, науково-методична література; дані інтернет-мережі.
  4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
    - 4.1 Вступ
    - 4.2 Аналітичний огляд питання (огляд публічних джерел інформації)
    - 4.3 Основна частина, в якій висвітлити методи, які будуть використовуватися для реалізації проекту.
    - 4.4 Практична частина – розробка конструкції пристрою автономного інвертора напруги для живлення електронних пристроїв від бортової мережі автомобіля
    - 4.4 Висновки
    - 4.5 Перелік використаних джерел
  5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
- 
-

## 6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 08 листопада 2023р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Одержання завдання на виконання роботи	08.11.2024	
2.	Укладання і погодження з керівником плану і етапів виконання роботи	11.11.2024	
3.	Узагальнення даних літературних джерел	12.11.2024	
4.	Аналіз шляхів виконання завдання. Вибір і погодження з керівником оптимального шляху виконання завдання	18.11.2024	
5.	Аналіз технічних засобів та існуючих систем	21.11.2024	
6.	Реалізація практичної частини завдання	29.11.2024	
7.	Укладання, оформлення та погодження пояснювальної записки з керівником	05.12.2024	
8.	Надання пояснювальної записки на кафедрі	06.12.2024	
9.	Підготовка доповіді та презентації	09.12.2024	

Студент Тарасенко М.О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)Керівник роботи Самойлова Ж.Г.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломного проекту містить:

76 сторінок , 17 рисунків, 5 таблиць, 34 джерел, мова - українська.

ЄМНІСТЬ, ЕЛЕКТРОРАДІОЕЛЕМЕНТ, РЕЗИСТОР, КОНДЕНСАТОР, МІКРОСХЕМА, ПОЛЬОВИЙ ТРАНЗИСТОР, ТРАНЗИСТОР, ДРУКОВАНИЙ ПРОВІДНИК, МОНТАЖНИЙ ОТВІР, КОНТАКТНА ПЛОЩАДКА, КОНСТРУКЦІЯ, ТРАСУВАННЯ

Об'єкт розробки – дослідження розробки автономного інвертора напруги для живлення електронних пристроїв від бортової мережі автомобіля.

Мета роботи - дослідити процес розробки автономного інвертора напруги для живлення електронних пристроїв від бортової мережі автомобіля, спроектувати топологію плати автономного інвертора напруги для живлення електронних пристроїв від бортової мережі автомобіля на основі схеми електричної принципової відповідно до вимог технічного завдання.

Метод дослідження - теоретичний із застосуванням комп'ютерної техніки.

У дипломній роботі досліджені процеси розробки автономного інвертора напруги для живлення електронних пристроїв від бортової мережі автомобіля, розраховані показники безвідмовності та спроектована топологія плати автономного інвертора напруги для живлення електронних пристроїв від бортової мережі автомобіля на основі схеми електричної принципової. Проведені конструктивні розрахунки, розрахунки по постійному та змінному струму. Проаналізовані та узагальнені отримані результати.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ РІШЕНЬ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ....	8
1.1. Огляд сучасних автономних інверторів напруги. ....	8
1.2. Аналіз вимог до автономних інверторів для автомобільних систем. ....	10
1.3. Постановка завдань дослідження. ....	13
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ ІНВЕРТОРА НАПРУГИ .....	15
2.1. Обґрунтування вибору схеми інвертора напруги. ....	15
2.2. Принципова електрична схема інвертора.....	20
2.3. Вибір елементної бази (електронні компоненти). ....	22
2.4. Моделювання роботи інвертора (використання спеціалізованого ПЗ).....	36
2.5. Аналіз роботи схеми (перевірка напруги, струму, ККД).....	38
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ .....	40
3.1. Вибір типу та розміру друкованої плати. ....	40
3.2. Конструктивно-технологічний розрахунок друкованої плати. ....	41
3.3. Розрахунок по постійному струму. ....	47
3.4. Розрахунок силових компонентів.....	48
3.5. Розміщення елементів та трасування на платі. ....	50
3.7. Аналіз та розрахунок технологічності конструкції. ....	52
3.8. Розрахунок надійності елементів друкованої плати з урахуванням пайки.	54
РОЗДІЛ 4. ВИРОБНИЦТВО ТА ТЕСТУВАННЯ .....	58
4.1. Вибір матеріалів для виготовлення плати. ....	58
4.2. Опис процесу виготовлення друкованої плати. ....	61
4.3. Тестування готового пристрою. ....	65
4.4. Аналіз результатів тестування. ....	68
Загальні висновки по роботі .....	72
Перелік посилань .....	74

## ВСТУП

У сучасних умовах розвиток електронних технологій відіграє важливу роль у забезпеченні ефективного функціонування різних галузей, зокрема автомобільної промисловості. Системи електроживлення автомобілів, особливо при інтеграції сучасних електронних пристроїв, таких як інвертори напруги, потребують високої надійності, енергоефективності та відповідності стандартам безпеки. Автономні інвертори напруги, які перетворюють постійну напругу бортової мережі в змінну, дозволяють підключати побутові електроприлади до автомобільних джерел живлення, розширюючи функціональні можливості транспортних засобів.

Розробка інверторів напруги з оптимальними параметрами є актуальною через зростаючий попит на універсальні електронні пристрої, які відповідають сучасним екологічним та енергетичним стандартам. Інвертори напруги широко використовуються в автомобільній галузі, портативних системах енергозабезпечення та інших сферах, де потрібне перетворення напруги. Ефективне проектування друкованих плат, вибір елементної бази та оптимізація схемних рішень сприяють підвищенню продуктивності й довговічності таких пристроїв.

Об'єктом дослідження є процес перетворення електричної енергії в автомобільній бортовій мережі за допомогою автономного інвертора напруги.

Предметом дослідження є конструктивно-технологічні особливості розробки інвертора напруги для живлення електронних пристроїв від бортової мережі автомобіля, включаючи схему керування, компоновання друкованої плати та вибір елементної бази.

Метою дослідження є розробка та оптимізація конструкції автономного інвертора напруги, який забезпечує ефективне перетворення напруги в умовах автомобільної експлуатації, відповідає сучасним стандартам якості та надійності.

### **Завдання дослідження**

1. Провести аналіз сучасних рішень та технологій, які використовуються в автономних інверторах напруги.

2. Розробити принципову електричну схему інвертора напруги, що відповідає заданим технічним вимогам.
3. Вибрати елементну базу для побудови пристрою з урахуванням енергетичних, теплових і механічних характеристик.
4. Виконати розрахунок і проектування друкованої плати, включаючи компонування елементів та трасування доріжок.
5. Розробити модель друкованої плати та протестувати її працездатність.
6. Провести аналіз надійності пристрою, включаючи розрахунок теплового режиму та механічної стійкості.
7. Запропонувати рекомендації щодо підвищення ефективності та довговічності інверторів напруги.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ РІШЕНЬ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ

### 1.1. Огляд сучасних автономних інверторів напруги.

Огляд сучасних автономних інверторів напруги є важливою частиною дослідження, оскільки дозволяє зрозуміти поточний стан технологій, визначити переваги та недоліки існуючих рішень, а також обґрунтувати вибір схеми і компонентів для власного проєкту. Автономні інвертори напруги широко використовуються для перетворення постійного струму у змінний, що дозволяє забезпечити живлення електронних пристроїв та електрообладнання від акумуляторних батарей або інших джерел постійної напруги. Особливо актуальними вони є у транспортних засобах, де потреба у змінному струмі для живлення різноманітних пристроїв стає все більш затребуваною через збільшення електронного оснащення автомобілів.

Сучасні автономні інвертори напруги можна поділити на кілька основних категорій за призначенням, принципом роботи та параметрами. Найбільш поширеними є інвертори, призначені для використання в автомобілях, які мають забезпечувати стабільну роботу електроприладів при змінних умовах експлуатації. До них висуваються жорсткі вимоги щодо компактності, енергоефективності, надійності, а також адаптації до можливих коливань напруги у бортовій мережі автомобіля. Крім того, автомобільні інвертори повинні бути захищеними від впливу зовнішніх факторів, таких як вібрація, температурні перепади та можливе перевантаження [12].

Однією з ключових характеристик сучасних автономних інверторів є їхній коефіцієнт корисної дії (ККД). У високоякісних пристроях ККД може перевищувати 90%, що дозволяє мінімізувати втрати енергії і забезпечити тривалий термін служби акумуляторних батарей. Для досягнення високої ефективності у сучасних інверторах використовуються інноваційні напівпровідникові компоненти, такі як транзистори на основі карбіду кремнію (SiC) та нітриду галію (GaN). Ці матеріали мають низькі втрати під час перемикання і дозволяють створювати пристрої з меншими габаритами та покращеними параметрами.



Ще однією важливою характеристикою є форма вихідної напруги. Ідеальним варіантом для живлення чутливих електронних пристроїв є синусоїдальна форма сигналу. Проте багато бюджетних моделей використовують модифіковану синусоїду або навіть прямокутні імпульси, що може бути прийнятним для менш вимогливих до якості електроживлення пристроїв. Інвертори з чистою синусоїдою на виході забезпечують стабільну роботу таких пристроїв, як комп'ютери, побутова техніка, медичне обладнання, та відзначаються меншою ймовірністю викликати перегрів чи пошкодження електродвигунів.

Технології керування інверторами також досягли значного прогресу. Сучасні моделі оснащуються мікроконтролерами, які дозволяють здійснювати тонке налаштування параметрів роботи, а також забезпечують інтеграцію з іншими системами автомобіля. Деякі інвертори підтримують функції дистанційного моніторингу та керування через бездротові протоколи, такі як Bluetooth або Wi-Fi. Це особливо важливо для сучасних автомобілів з інтелектуальними системами керування енергоспоживанням.

Система охолодження також є важливим компонентом автономних інверторів. Для забезпечення стабільної роботи інвертора в умовах високих температур використовуються різноманітні методи охолодження, включаючи пасивні радіатори, активні вентилятори або навіть рідинне охолодження в потужних моделях. Це дозволяє зменшити ризик перегріву і підвищити надійність пристрою.

Одним із перспективних напрямків розвитку автономних інверторів є впровадження енергоефективних алгоритмів керування. Зокрема, застосування ШІ для оптимізації перемикання ключів та адаптації до змінних умов експлуатації дозволяє зменшити споживання енергії та підвищити термін служби пристрою. Також активно досліджуються можливості інтеграції інверторів з іншими елементами автомобільної електроніки, такими як системи рекуперації енергії, що дозволяє використовувати енергію гальмування для заряджання акумуляторів.

На ринку автономних інверторів представлені пристрої різних виробників, які пропонують як бюджетні, так і преміум-моделі. Наприклад, компанії Victron Energy, Renogy та AIMS Power спеціалізуються на виробництві інверторів високої

потужності з широкими можливостями налаштування та інтеграції. У той же час, інвертори середнього класу, наприклад від компанії BESTEK, популярні серед звичайних користувачів завдяки оптимальному співвідношенню ціни та якості.

Одним із викликів, що стоять перед розробниками автономних інверторів, є необхідність забезпечення сумісності з широким спектром споживачів. Наприклад, автомобільні інвертори повинні бути здатні підтримувати роботу як невеликих електронних пристроїв, так і потужних споживачів, таких як електроінструменти. Для цього необхідно враховувати як статичні, так і динамічні навантаження, що потребує ретельного вибору компонентів та алгоритмів керування.

Підсумовуючи, сучасні автономні інвертори напруги демонструють значний прогрес у напрямках підвищення ефективності, зниження втрат енергії, покращення якості вихідного сигналу та інтеграції з інтелектуальними системами. Огляд існуючих рішень дозволяє визначити основні тенденції і напрями для вдосконалення, що є важливим етапом у розробці нового пристрою [25].

## **1.2. Аналіз вимог до автономних інверторів для автомобільних систем.**

Аналіз вимог до автономних інверторів для автомобільних систем є важливим кроком у розробці ефективного та надійного пристрою, який зможе забезпечити стабільну роботу електронного обладнання в умовах специфічного середовища автомобільної бортової мережі. Основні вимоги до таких інверторів обумовлені технічними, експлуатаційними та екологічними аспектами, які забезпечують відповідність пристроїв сучасним стандартам і очікуванням користувачів.

Перш за все, автономний інвертор для автомобільної системи має відповідати вимогам до напруги і частоти вихідного сигналу. У більшості випадків це 220 В і 50 Гц для змінного струму, які необхідні для живлення побутових приладів та електронного обладнання, що використовується в автомобілях. При цьому важливо забезпечити стабільність вихідної напруги та частоти, оскільки відхилення можуть спричинити неправильну роботу або пошкодження підключених пристроїв. Для

цього в інверторі застосовуються системи регулювання вихідних параметрів, зокрема через імпульсно-широтну модуляцію (ШІМ).

Другою важливою вимогою є форма вихідного сигналу. У високоякісних інверторах забезпечується чиста синусоїда, яка гарантує сумісність із чутливими електронними пристроями, такими як ноутбуки, зарядні пристрої, аудіоапаратура та інше обладнання. У бюджетних моделях може використовуватися модифікована синусоїда, яка менш витратна у реалізації, але менш ефективна для живлення складних пристроїв. Для автомобільних інверторів пріоритетом є можливість підключення різного типу обладнання без ризику пошкодження.

Ще одним важливим критерієм є потужність інвертора. Вона визначається виходячи з вимог споживачів, які планується підключати до пристрою. Сучасні автомобільні інвертори мають широкий діапазон потужності — від 150 до 3000 Вт і більше.

Надійність є ключовим параметром для автомобільних інверторів, оскільки пристрій повинен функціонувати в умовах, які часто є несприятливими. Це включає захист від перепадів напруги в бортовій мережі автомобіля, які можуть виникати через роботу стартера, генератора або інших компонентів. Інвертори мають бути обладнані системами захисту від перевантаження, короткого замикання, перегріву, зворотної полярності підключення та інших потенційно небезпечних ситуацій. Багато сучасних моделей мають вбудовані системи самодіагностики та автоматичного відключення для запобігання пошкодженню як самого інвертора, так і підключених пристроїв.

Компактність і легкість пристрою також є важливими вимогами для автомобільних інверторів. У транспортних засобах, де простір обмежений, інвертори повинні бути невеликими, легкими та простими у встановленні. При цьому важливо зберегти баланс між компактністю і тепловиділенням, оскільки надмірне зменшення габаритів може призвести до перегріву пристрою. Для вирішення цієї проблеми використовуються вдосконалені системи охолодження, такі як ефективні радіатори, вентилятори або навіть рідинне охолодження для потужних моделей.

Однією з унікальних вимог для автомобільних інверторів є стійкість до вібрацій і механічних ударів. У процесі руху автомобіля пристрій піддається постійним механічним навантаженням, тому його конструкція повинна бути міцною і надійною. З цією метою використовуються спеціальні кріплення, що амортизують, та матеріали, які знижують ризик пошкодження компонентів інвертора.

Енергоефективність є ще однією важливою вимогою до автомобільних інверторів. Оскільки живлення забезпечується від акумуляторної батареї, необхідно мінімізувати втрати енергії під час перетворення. Сучасні інвертори можуть досягати коефіцієнта корисної дії (ККД) понад 90%, що дозволяє збільшити тривалість роботи підключених пристроїв і зменшити навантаження на акумулятор.

Автомобільні інвертори також повинні бути сумісними з широким спектром пристроїв, що вимагає високої універсальності у виборі вхідних і вихідних параметрів. Наприклад, багато моделей підтримують вхідну напругу в діапазоні від 10 до 15 В постійного струму, що дозволяє використовувати їх із бортовими мережами 12 В. Крім того, для потужних пристроїв можуть бути передбачені варіанти з підтримкою напруги 24 В або навіть 48 В.

Вимоги до інтерфейсу керування та моніторингу також є важливим аспектом для сучасних інверторів. Багато моделей оснащуються дисплеями для відображення основних параметрів, таких як вихідна напруга, струм, ККД та температура. Також зростає популярність бездротових рішень, які дозволяють керувати інвертором через мобільні додатки за допомогою Bluetooth або Wi-Fi.

Екологічні вимоги також відіграють значну роль у сучасних розробках інверторів. Виробники прагнуть зменшити використання токсичних матеріалів у конструкції пристроїв, а також забезпечити можливість їхньої утилізації після завершення терміну служби. Крім того, автомобільні інвертори повинні відповідати міжнародним стандартам електромагнітної сумісності, щоб не створювати перешкод для роботи інших систем автомобіля.

Таким чином, автономні інвертори для автомобільних систем мають відповідати широкому спектру вимог, включаючи стабільність вихідних

параметрів, високу енергоефективність, надійність, компактність, стійкість до механічних впливів і зручність у використанні. Аналіз цих вимог дозволяє визначити ключові критерії, які слід враховувати при розробці нового пристрою, та спрямувати дослідження у відповідному напрямку для створення сучасного та конкурентоспроможного рішення [32].

### **1.3. Постановка завдань дослідження.**

Постановка завдань дослідження є одним із ключових етапів наукової роботи, що визначає основні напрями та пріоритети розробки. У рамках цього дослідження завдання формулюються з урахуванням технічних, функціональних та експлуатаційних вимог до автономного інвертора напруги, який призначений для роботи у складі бортової мережі автомобіля. Основна мета дослідження полягає у розробці сучасного, ефективного та надійного інвертора напруги, який забезпечить стабільну роботу підключених електронних пристроїв за різних умов експлуатації.

Першим завданням дослідження є аналіз існуючих рішень у галузі автономних інверторів напруги, що використовується у автомобільних системах. Це включає вивчення принципів роботи, переваг і недоліків різних схемних рішень, особливостей конструкції, а також можливостей їх застосування в умовах обмеженого простору і високих вимог до енергоефективності. Проведення такого аналізу дозволить виділити ключові аспекти, які варто враховувати під час проектування власного пристрою.

Наступним завданням є визначення технічних вимог до розроблюваного інвертора. Важливо врахувати особливості автомобільної бортової мережі, такі як вхідна напруга, можливі коливання напруги, наявність імпульсних перешкод і змінних навантажень. Також необхідно встановити параметри вихідного сигналу, які забезпечать сумісність з широким спектром підключених пристроїв, включаючи чутливу електроніку. Особливу увагу слід приділити досягненню стабільності вихідних параметрів за умов змінних вхідних характеристик.

Третє завдання пов'язане з вибором схемотехнічного рішення, яке забезпечить відповідність встановленим вимогам. Це включає обґрунтування

вибору топології інвертора, таких як мостові або напівмостові схеми, враховуючи їхню енергоефективність, компактність і простоту реалізації. Також необхідно підібрати елементну базу, включаючи напівпровідникові ключі, діоди, конденсатори та інші компоненти, які забезпечать високу продуктивність та довговічність пристрою [10].

Четверте завдання передбачає моделювання роботи інвертора у спеціалізованому програмному забезпеченні. Цей етап включає створення математичної моделі пристрою, яка дозволить оцінити його поведінку за різних умов експлуатації. Проведення симуляцій дозволить оптимізувати параметри пристрою, уникнути потенційних проблем на етапі виготовлення і мінімізувати витрати на розробку.

П'яте завдання стосується розробки друкованої плати для інвертора. Важливо підібрати оптимальний тип і розмір плати, враховуючи обмеження простору та тепловиділення. Необхідно здійснити трасування, розмістивши всі компоненти так, щоб забезпечити мінімізацію електромагнітних перешкод, надійність з'єднань і ефективно відведення тепла. На цьому етапі також передбачається проведення конструктивно-технологічного розрахунку та розрахунку надійності елементів плати, враховуючи їхнє зношування та вплив паяльних процесів.

Шостим завданням є проведення аналізу результатів тестування і внесення можливих коректив у конструкцію інвертора. Якщо будуть виявлені недоліки або невідповідність очікуваним параметрам, необхідно розробити заходи для їх усунення, наприклад, зміну схеми, вибір інших компонентів або вдосконалення конструкції друкованої плати.

Останнім, але не менш важливим завданням є розробка рекомендацій щодо подальшого вдосконалення пристрою та його можливого використання в інших сферах. Зокрема, це може включати розширення функціональності, зменшення габаритів, інтеграцію з іншими системами автомобіля або підвищення екологічності за рахунок використання матеріалів, придатних для переробки [19].

## РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ ІНВЕРТОРА НАПРУГИ

### 2.1. Обґрунтування вибору схеми інвертора напруги.

Обґрунтування вибору схеми інвертора напруги є важливим етапом розробки, який забезпечує реалізацію поставлених технічних і експлуатаційних вимог до пристрою. Схема інвертора визначає його функціональні можливості, ефективність, стабільність роботи, а також безпосередньо впливає на конструкцію, розміри та вартість пристрою. Вибір схеми базується на аналізі характеристик різних топологій, їх переваг і недоліків, а також відповідності поставленим завданням і умовам експлуатації.

Основна функція інвертора полягає у перетворенні постійної напруги, що подається від джерела живлення (наприклад, акумуляторної батареї автомобіля), у змінну напругу стандартних параметрів, таких як 220 В, 50 Гц. Для даної роботи було вирішено розробляти DC-DC перетворювач для живлення ноутбука.

DC-DC перетворювачі — це електронні пристрої, які перетворюють одну постійну напругу на іншу. Такі перетворювачі знаходять широке застосування в різних електронних пристроях та системах, включаючи автомобільну електроніку, блоки живлення, сонячні інвертори, портативні пристрої та системи безперебійного живлення. Основна мета перетворювача – забезпечити ефективне перетворення напруги з мінімальними втратами енергії.

DC-DC перетворювачі можна класифікувати за такими критеріями:

1. За принципом перетворення напруги:

Знижувальні Перетворювачі (Buck);

Підвищуючі перетворювачі (Boost);

Знижувально-підвищуючі (Buck-Boost) перетворювачі;

Перетворювачі, що інвертують (Inverting Converters).

2. За способом регулювання:

Лінійні перетворювачі;

Імпульсні перетворювачі.

3. За типом ізоляції:

Гальванічно-ізольовані перетворювачі;

Неізольовані перетворювачі.

## **Основні види DC-DC перетворювачів**

### **Знижувальні Перетворювачі**

Знижувальні перетворювачі зменшують вхідну напругу до нижчого рівня. Вони працюють за принципом ключового перетворення, де MOSFET-транзистор вмикається та вимикається з високою частотою. Енергія накопичується в дроселі і передається на навантаження при вимиканні транзистора. Основні характеристики:

Коефіцієнт перетворення:  $U_{out} < U_{in}$ .

ККД: Високий (до 90-95%), особливо при значній різниці напруги.

Застосування: Зарядні пристрої, портативні пристрої, блоки живлення.

### **Підвищувальні перетворювачі (Boost Converters)**

Перетворювачі, що підвищують, збільшують вхідну напругу. Вони працюють за принципом накопичення енергії в дроселі під час замикання ключа та подальшого її вивільнення на вихід. Основні характеристики:

Коефіцієнт перетворення:  $U_{out} > U_{in}$ .

ККД: Близько 90-95%.

Застосування: Живлення світлодіодів, сонячні інвертори, пристрої живлення від акумуляторів.



## **Знижувально-підвищуючі перетворювачі (Buck-Boost Converters)**

Цей тип перетворювачів може знижувати, так і підвищувати вхідну напругу. Це досягається за рахунок зміни режиму роботи ключа та дроселя. Існує кілька варіацій Buck-Boost перетворювачів, включаючи класичну схему та її модифікації.

Основні характеристики:

Коефіцієнт перетворення:  $U_{out}$  може бути більшим або меншим за  $U_{in}$ .

ККД: Залежить від конкретної топології.

Застосування: Електронні пристрої з батарейним живленням, де напруга батареї може змінюватись у широкому діапазоні.

## **Перетворювачі, що інвертують (Inverting Converters)**

Перетворювачі, що інвертують, змінюють полярність вихідної напруги щодо вхідної. Принцип роботи схожий на Buck-Boost перетворювачами, але вихідна напруга має негативний знак щодо входу. Основні характеристики: Коефіцієнт перетворення:  $U_{out} = -U_{in} * D / (1-D)$  ( $D$  - коефіцієнт заповнення ШІМ).

ККД: Залежить від режиму роботи.

Застосування: Джерела негативної напруги аналогових пристроїв.

### **За способом регулювання**

#### **Лінійні перетворювачі**

Лінійні DC-DC перетворювачі працюють за принципом розсіювання надлишкової потужності на регулюючому елементі (транзистор або стабілітрон). Вони забезпечують плавну та стабільну вихідну напругу без високочастотних пульсацій, але мають низький ККД (50–70%).

**Застосування:** Системи, де важлива мінімізація шумів (аналогові схеми, аудіоапаратура).

## **Імпульсні перетворювачі**

Імпульсні DC-DC перетворювачі використовують високочастотне перемикання транзисторів та накопичення енергії в дроселі чи конденсаторі. Ці перетворювачі мають високий ККД (до 95%) і можуть знижувати, підвищувати чи інвертувати напругу.

**Застосування:** Зарядні пристрої, блоки живлення, джерела безперебійного живлення (UPS).

## **За типом ізоляції**

### **Гальванічно ізольовані перетворювачі**

Гальванічна ізоляція розділяє вхід та вихід, забезпечуючи безпеку та захист від перевантажень. Приклад - зворотноходові та форвардні перетворювачі з трансформатором.

**Застосування:** Джерела живлення для керування, медичні прилади, системи безпеки.

### **Неізольовані перетворювачі**

У неізольованих перетворювачах вхід та вихід електрично з'єднані. Вони простіші за конструкцією і мають високий ККД.

**Застосування:** Зарядні пристрої, блоки живлення ноутбуків та портативної електроніки.

## **Висновок**

DC-DC перетворювачі відіграють ключову роль у сучасній електроніці, забезпечуючи ефективне перетворення напруги для різних програм. Основні види перетворювачів включають понижуючі, що підвищують, знижувально-підвищують та інвертують. Кожна топологія має свої переваги та використовується

для конкретних завдань. Лінійні перетворювачі забезпечують низький рівень шуму, а імпульсні перетворювачі – високий ККД. Гальванічна ізоляція необхідна в системах з вимогою до безпеки та захисту від перевантажень. Сучасні DC-DC перетворювачі широко застосовуються в автомобілях, портативних пристроях, блоках живлення та системах керування.

Для розроблюваного інвертора, який призначений для роботи у складі автомобільної системи та забезпечення стабільного живлення ноутбука, найбільш доцільним є використання імпульсний підвищувач без гальванічної ізоляції. Цей вибір обумовлений її здатністю забезпечувати високу якість вихідного сигналу та ефективність.

Вибір конкретних компонентів для імпульсного підвищувача також є важливим етапом. Наприклад, MOSFET транзистори часто використовуються у схемах низької та середньої потужності завдяки їхнім низьким втратам провідності та високій швидкості перемикавання. Для даного проєкту слід підібрати транзистори, які відповідають вимогам до потужності та напруги, враховуючи умови роботи інвертора у бортовій мережі автомобіля [20].

Для керування необхідно застосувати спеціалізований драйвер, який забезпечує точне перемикавання ключів. Сучасні драйвери дозволяють реалізувати імпульсно-широтну модуляцію (ШІМ). Крім того, драйвери часто мають вбудовані захисти, такі як обмеження струму або відключення при перегріві, що підвищує надійність пристрою.

Для додаткового зниження втрат і підвищення ефективності можна передбачити використання силових діодів із низьким падінням напруги, а також конденсаторів високої ємності для згладжування вихідного сигналу. Важливим компонентом є також фільтри, які зменшують рівень електромагнітних перешкод і забезпечують відповідність пристрою вимогам стандартів електромагнітної сумісності.

Таким чином, вибір підвищуючої схеми з використанням сучасних напівпровідникових компонентів і передових методів керування є оптимальним рішенням для розроблюваного інвертора. Це дозволяє забезпечити високу якість вихідного сигналу, ефективність, надійність і відповідність вимогам автомобільної

індустрії. Обґрунтування такого вибору базується на аналізі переваг і недоліків різних топологій, а також урахуванні специфічних умов експлуатації та завдань, які ставляться перед пристроєм [33].

## 2.2. Принципова електрична схема інвертора.

Принципова електрична схема інвертора є основою для реалізації його функціональних можливостей, забезпечуючи перетворення постійної напруги. У процесі розробки такої схеми важливо врахувати всі технічні вимоги, поставлені до пристрою, а також забезпечити його ефективність, стабільність роботи та захист від можливих несправностей. У випадку автомобільного інвертора напруги це особливо актуально, оскільки умови експлуатації в автомобілі включають постійні механічні вібрації, зміни температури та коливання вхідної напруги.

Основою принципової електричної схеми інвертора є блок перетворення напруги, який складається з вхідного фільтра, генератора імпульсів, вихідного фільтра. Кожен із цих компонентів виконує важливу роль у роботі пристрою.

Вхідний фільтр є першим елементом, через який постійна напруга подається від джерела живлення (акумулятора автомобіля). Він виконує функцію згладжування імпульсних перешкод, які можуть виникати у бортовій мережі автомобіля через роботу інших електронних систем, таких як генератор, стартер або системи запалювання. Типовими елементами вхідного фільтра є електролітичні та керамічні конденсатори.

У сучасних інверторах для керування ключами використовується імпульсно-широтна модуляція (ШІМ), яка дозволяє формувати сигнал із необхідною частотою та амплітудою. Генератор створює серію імпульсів, що керують роботою транзистора. Як правило, генератор реалізується на базі мікроконтролера або спеціалізованої інтегральної схеми (ШІМ-контролера), яка забезпечує високий рівень точності та стабільності.

Ключовий етап схеми інвертора включає силовий транзистор, який перемикає струм через навантаження у відповідності до сигналів, що надходять із генератора імпульсів. У сучасних схемах найчастіше використовуються MOSFET

транзистори завдяки їхнім перевагам, таким як низькі втрати під час перемикання, висока швидкість і здатність працювати з великими струмами та напругами. У підвищуючих схемах використовується один транзистор.

Вихідний фільтр є важливим елементом, який забезпечує згладжування імпульсів. Основними компонентами вихідного фільтра є дроселі та конденсатори, які зменшують рівень гармонік і забезпечують відповідність сигналу стандартним вимогам. Це особливо важливо для живлення чутливих пристроїв, таких як комп'ютери, медичне обладнання та інші системи, що потребують стабільної форми сигналу.

Захист інвертора від несправностей є ще однією важливою складовою принципової електричної схеми. У сучасних інверторах реалізуються такі функції захисту, як обмеження струму, відключення при перевантаженні, контроль температури транзисторів і зворотної полярності підключення. Для цього використовуються резистори шунтування, датчики температури, а також спеціалізовані інтегральні схеми контролю захисту.

Для забезпечення стабільності роботи інвертора і його інтеграції у бортову систему автомобіля важливим є також включення в схему елементів керування та моніторингу. Це може бути дисплей або світлодіоди, які інформують користувача про стан пристрою, а також інтерфейси зв'язку, такі як Bluetooth або CAN-шина, які дозволяють взаємодіяти з іншими системами автомобіля [26].

У підсумку, правильно розроблена принципова електрична схема є основою для створення ефективного, надійного та універсального інвертора напруги. Вона забезпечує перетворення напруги з урахуванням усіх вимог до вихідного сигналу, ефективності та безпеки, а також відповідає сучасним стандартам автомобільної індустрії. Цей підхід дозволяє розробити пристрій, який не лише задовольнить потреби користувачів, але й сприятиме інтеграції новітніх технологій у транспортних засобах [33].

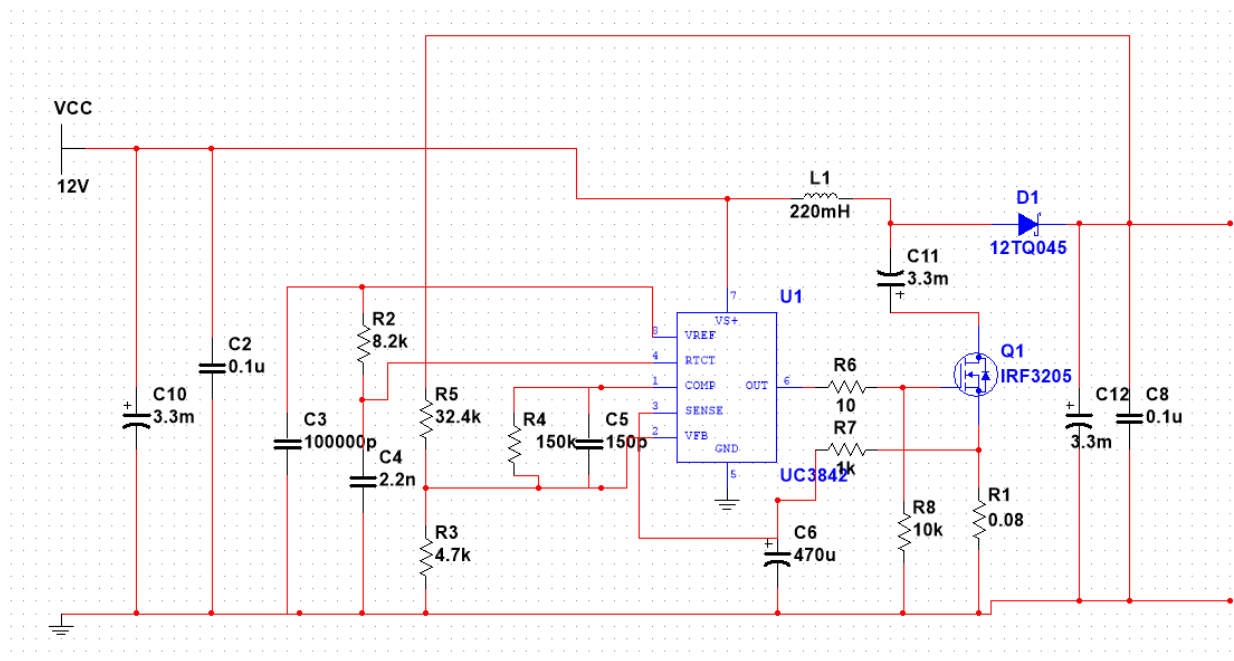


Рисунок 2.1. – Електрична схема перетворювача напруги

Розрахунок вихідної потужності:

$$P_{out} = U_{out} \cdot I_{out}$$

Для схеми з  $U_{out} = 20\text{В}$  та  $I_{out} = 4\text{А}$ :

$$P_{out} = 20 \cdot 4 = 80 \text{ Вт}$$

Розрахунок вхідного струму: При КПД  $\eta = 90\%$ :

$$I_{in} = P_{out} / (\eta \cdot U_{in})$$

При  $U_{in} = 12\text{В}$ :

$$I_{in} = 80 / (0.9 \cdot 12) \approx 7.41 \text{ А}$$

### 2.3. Вибір елементної бази (електронні компоненти).

Вибір елементної бази для розробки перетворювача напруги є одним із ключових етапів, який визначає ефективність, надійність і довговічність пристрою. Елементна база включає всі електронні компоненти, які забезпечують функціонування інвертора, починаючи від силових елементів і закінчуючи допоміжними компонентами для керування та захисту. Для створення інвертора, що відповідає сучасним вимогам автомобільної індустрії, необхідно враховувати широкий спектр технічних, експлуатаційних і економічних факторів під час вибору кожного з компонентів.

Основним компонентом будь-якого інвертора є силовий ключ, який здійснює комутацію струму у схемі. У сучасних інверторах широко використовуються транзистори типу MOSFET. MOSFET транзистори відрізняються високою швидкістю перемикачання, низькими втратами під час роботи на високих частотах і можливістю працювати з напругами до кількох сотень вольт. Ці транзистори ідеально підходять для інверторів малої та середньої потужності, де важливими є компактність і енергоефективність.

Серед критеріїв вибору транзисторів особливо важливими є параметри максимальної напруги колектор-емітер (або стік-витік), струму, що протікає через транзистор, і допустимої потужності розсіювання. У схемах інверторів для автомобілів, які працюють у бортовій мережі 12 В, часто використовуються транзистори з максимальною напругою 40-100 В, що дозволяє враховувати можливі стрибки напруги в системі. Також слід враховувати опір каналу в відкритому стані ( $R_{ds(on)}$ ), оскільки він визначає втрати енергії на ключах.

Для стабілізації напруги та струму у схемі використовуються різноманітні пасивні компоненти, такі як резистори, конденсатори і дроселі. Конденсатори грають важливу роль у фільтрації напруги і зменшенні рівня електромагнітних перешкод. У бортових мережах автомобілів часто використовуються електролітичні та керамічні конденсатори з високою ємністю, які дозволяють згладжувати низькочастотні та високочастотні пульсації. Вибір ємності залежить від параметрів системи, таких як робоча частота, струм і напруга.

Дроселі виконують функцію згладжування струму в силових ланцюгах і фільтрації високочастотних перешкод. Вибір індуктивності залежить від рівня струму та частоти роботи інвертора. Для автомобільних систем зазвичай використовуються тороїдальні дроселі, які мають високу ефективність і низький рівень втрат.

Для підвищення надійності та захисту пристрою у схему включаються діоди, які виконують функцію захисту від зворотної напруги та стабілізації струму. У перетворювачах часто використовуються швидкодіючі діоди з низьким падінням напруги, такі як Шотткі-діоди, які зменшують втрати енергії та підвищують ККД пристрою [4].

Особливу увагу слід приділити вибору мікроконтролера або ШІМ-контролера, які відповідають за формування керуючих сигналів і забезпечення точності роботи пристрою. У сучасних перетворювачах використовуються мікроконтролери, які дозволяють реалізовувати складні алгоритми керування, включаючи імпульсно-широтну модуляцію (ШІМ) та системи адаптивного регулювання.

Плати повинні бути виготовлені з якісних матеріалів, які забезпечують низький рівень електричних втрат, стійкість до температурних змін і механічних впливів. Системи охолодження, такі як радіатори, вентилятори або теплові трубки, мають забезпечувати ефективне відведення тепла від транзисторів і інших силових компонентів [8].

Підсумовуючи, вибір елементної бази є багатокритеріальним процесом, який потребує врахування технічних, експлуатаційних і економічних вимог. Правильний підхід до вибору компонентів дозволяє створити інвертор, який відповідає сучасним стандартам ефективності, надійності та безпеки, забезпечуючи стабільну роботу в умовах автомобільної бортової мережі.

Розрахунок резистора  $R_x$  для вихідної напруги: Формула:

$$R_x = (U_{\text{out}} - 2.5) \cdot 1880$$

Для  $U_{\text{out}} = 19,5\text{В}$ :

$$R_x = (19,5 - 2.5) \cdot 1880 = 17.5 \cdot 1880 \approx 31,9 \text{ кОм}$$



## Перелік елементів схеми;

### ШИМ-контролер UC3843

8-pin ceramic SOP  
(FPT-8C-A01)

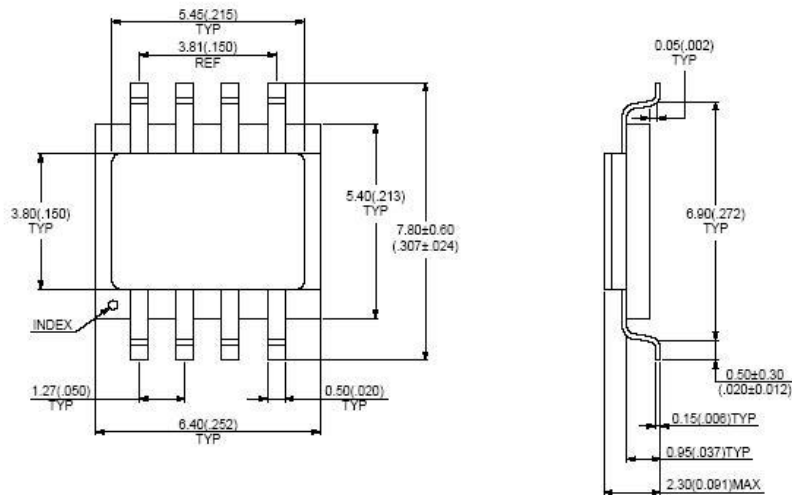


Рисунок 2.2. ШИМ-контролер UC3843

Мікросхема UC3843 - це ШИМ (широко-імпульсний) перетворювач. Було вирішено використовувати корпус SOIC-8.

Основні технічні дані:

- Напруга живлення (джерело з низьким імпедансом) 30 В напруга живлення ( $I_{CC} < 30$  мА)
- Самообмеження вихідного струму.. ..... $\pm 1$  А
- Вихідна енергія (ємнісне навантаження)..... 5 мкДж
- Аналогові входи (контакти 2, 3) .....від -0,3 В до +6,3 В
- Вихідний струм споживання підсилювача помилки.. .....10 мА
- потужності Розсіювана потужність при  $T_A \leq 25^\circ\text{C}$  (DIL-8).....1 Вт
- Розсіювана потужність при  $T_A \leq 25^\circ\text{C}$  (SOIC-14)..... .725 мВт

## Діод Шотткі 12TQ045

**TO-220F-3**

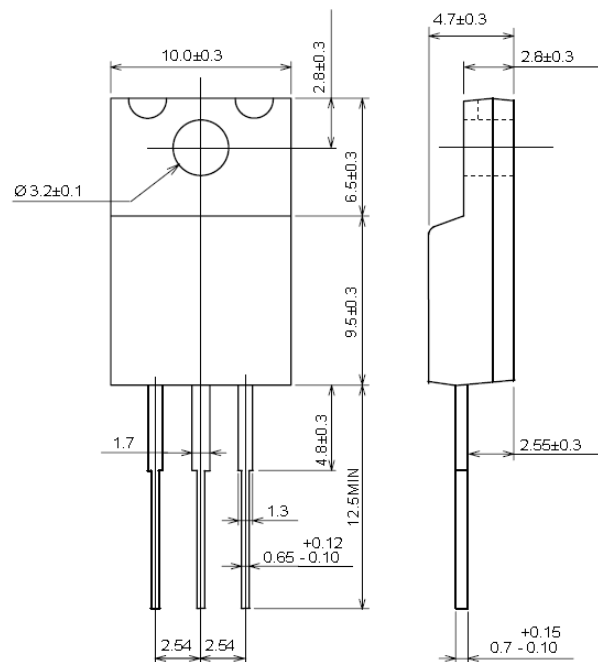


Рисунок 2.3. Діод Шотткі 12TQ045

Основні технічні дані:

- 150 °C T<sub>J</sub> робота
- Дуже низьке падіння прямої напруги
- Високочастотна робота
- Високотемпературна епоксидна смола високої чистоти інкапсуляція для посиленого механічного міцність і вологостійкість
- Захисне кільце для підвищеної міцності та довговічності

Надійність

Корпус TO-220-3

- Схема включення діодів одиночний
- Максимальна зворотна напруга діода 45 В
- Прямий струм діода (середній) 15 А

- Пряме падіння напруги 710 мВ
- Зворотний струм діода 1,75 мА

## Польовий транзистор IRF3205ZLPBF

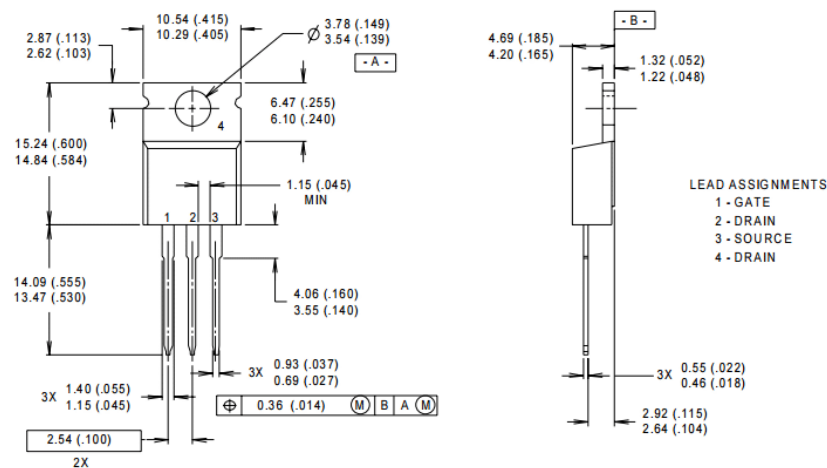


Рисунок 2.4. Польовий транзистор IRF3205ZLPBF

Основні технічні дані:

- Тип транзистора: MOSFET
- Полярність: N
- Максимальна потужність, що розсіюється: 170 W
- Гранично допустима напруга сток-исток: 55 V
- гранично допустима напруга затвор-витік: 20 V
- Порогова напруга включення: 4 V
- Максимально допустимий постійний струм стоку: 75 A
- Максимальна температура каналу: 175 °C
- Загальний заряд затвора: 76 nC
- Час зростання: 95 ns
- Вихідна ємність: 550 pF
- Опір сток-витік відкритого транзистора: 0.0065 Ohm
- Тип корпусу: TO262

## Дросель тороїдальний 220мкГн (3А)

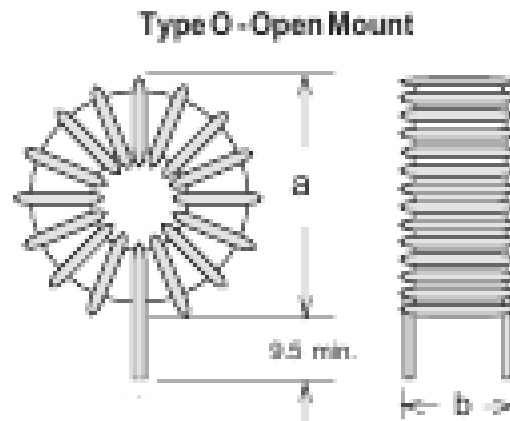


Рисунок 2.5. Дросель тороїдальний 220мкГн (3А)

Основні технічні дані:

- Тип дроселя - дротяний
- Монтаж - виводи
- Вид дроселя - тороїдальний
- Індуктивність - 220 мкГн
- Робочий струм - 3 А
- Діаметр - 13 мм.
- Ширина - 5мм.
- Діаметр дроту - 0,5мм.
- Точність - 10%

## Конденсатор електролітичний 2200 мкФ

Основні технічні дані:

- Номінальна ємність: 2200 мкФ
- Допустиме відхилення ємності:  $\pm 20\%$

- Номінальна напруга: 25 В
- Максимальна робоча температура: 105 °С
- Розмір: 20 x 14 мм

Производитель	Размеры (D×L, мм)							
	6,3В	10В	16В	25В	35В	50В	63В	100В
JAMICON	-	10×21	12,5×20	-	16×25	16×35	18×35	22×40
ELZET	10×17	10×17	10×20	12×26	16×25	16×36	-	-
SAMWHA	-	10×20	10×20	12,5×20	16×25	16×35,5	18×35,5	-
JWCO	-	-	-	-	16×25	-	18×35	25×40
TEAPO	-	-	-	13×26	-	-	18×35	-

Рисунок 2.6. Конденсатор електролітичний 2200 мкФ

### Конденсатор електролітичний 3300 мкФ

Основні технічні дані:

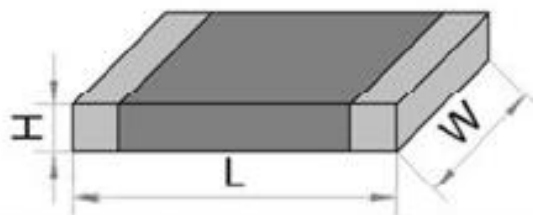
- Номінальна ємність: 33000 мкФ
- Допустиме відхилення ємності:  $\pm 20\%$
- Номінальна напруга: 25 В
- Максимальна робоча температура: 105 °С
- Розмір: 25 x 13 мм

Производитель	Размеры (D×L, мм)		
	16В	25В	35В
JAMICON	25×40	35×45	-
ELZET	-	35×50	-
SAMWHA	30×40	35×45	40×50

Рисунок 2.7. Конденсатор електролітичний 3300 мкФ

### SMD конденсатор 100 nF



Типоразмер		L (мм)	W (мм)	H (мм)
дюйм	мм			
Керамические				
0402	1005	1	0,5	0,55
0603	1608	1,6	0,8	0,9
0805	2012	2	1,25	1,3
1206	3216	3,2	1,6	1,5
1210	3225	3,2	2,5	1,7
1812	4532	4,5	3,2	1,7
1825	4564	4,5	6,4	1,7
2220	5650	5,6	5,0	1,8
2225	5664	5,6	6,3	2,0

Рисунок 2.8. SMD конденсатор 100 nF

Основні технічні дані:

- Тип Керамічні; SMD
- Ємність; 100 nF
- Напруга; 50 V
- Точність та ТКС;  $\pm 10\%$  К

- Типорозмір; 0603
- Діелектрик; X7R

### **SMD конденсатор 2.2 nF**



Рисунок 2.9. SMD конденсатор 2.2 nF

Основні технічні дані:

- Корпус; 0805
- Тип конденсатора; Керамічний
- Тип діелектрика; X7R
- Номінальна ємність; 2.2 nF
- Допуск;  $\pm 10\%$
- Номінальна напруга; 50 V
- Робоча температура;  $-55\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +125\text{ }^{\circ}\text{C}$

### **SMD конденсатор 470 pF**

Основні технічні дані:

Корпус; 0805

Тип конденсатора; Керамічний

Тип діелектрика; NP0

Номинальна Ємність; 470 pF

Допуск;  $\pm 5\%$

Номинальна напруга; 50 V

Робоча температура;  $-55\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +125\text{ }^{\circ}\text{C}$



Рисунок 2.10. SMD конденсатор 470 pF

### **SMD резистор 0603**



Рисунок 2.11. SMD резистор 0603



### Construction

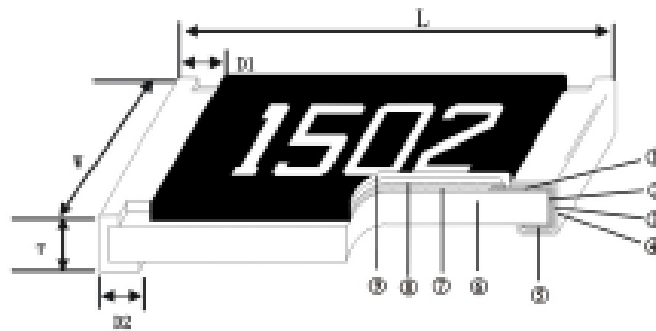


Рисунок 2.12. Конструкція SMD резисторів

Таблиця 2.1. Розміри резисторів

### Dimensions

Type	Size (Inch)	L (mm)	W (mm)	T (mm)	D1 (mm)	D2 (mm)	Weight (g) (1000pcs)
RC01005	01005	0.40 ± 0.02	0.20 ± 0.02	0.13 ± 0.02	0.10 ± 0.03	0.10 ± 0.03	0.037
RC0201	0201	0.60 ± 0.03	0.30 ± 0.03	0.23 ± 0.03	0.15 ± 0.05	0.15 ± 0.05	0.150
RC0402	0402	1.00 ± 0.05	0.50 ± 0.05	0.35 ± 0.05	0.20 ± 0.10	0.20 ± 0.10	0.620
RC0603	0603	1.60 ± 0.10	0.80 ± 0.10	0.45 ± 0.10	0.30 ± 0.20	0.30 ± 0.20	2.042
RC0805	0805	2.00 ± 0.10	1.25 ± 0.10	0.50 ± 0.10	0.35 ± 0.20	0.40 ± 0.20	4.368
RC1206	1206	3.10 ± 0.10	1.55 ± 0.10	0.55 ± 0.10	0.50 ± 0.25	0.50 ± 0.25	8.947
RC1210	1210	3.10 ± 0.10	2.80 ± 0.15	0.55 ± 0.10	0.50 ± 0.25	0.50 ± 0.25	15.959
RC2010	2010	5.00 ± 0.10	2.50 ± 0.15	0.55 ± 0.10	0.60 ± 0.25	0.60 ± 0.25	24.241
RC2512	2512	6.35 ± 0.10	3.10 ± 0.15	0.55 ± 0.10	0.60 ± 0.25	0.50 ± 0.25	39.448

У схемі використовується декілька резисторів розміру 0603.

- Резистори з опором 10 кОм; 2 шт
- Резистори з опором 4,7 кОм; 1 шт
- Резистори з опором 150 кОм; 1 шт
- Резистори з опором 32 кОм; 1 шт

Загальні характеристики SMD резисторів 0603;

- Корпус; 0603
- Нормований допуск; ±5%
- Розсіюється; 0.1 Вт
- Робоча температура; -55 ° C ... +125 ° C

- Тип резистора; Керамічний
- Спосіб монтажу; Поверхневий (SMD)
- Максимальна робоча напруга; 50 V

### **SMD резистор 1206**



Рисунок 2.13. SMD резистор 1206

У схемі використовується декілька SMD резисторів 1206.

- Резистори з опором 1 кОм; 1 шт
- Резистори з опором 10 Ом; 1 шт

Загальні характеристики SMD резисторів 1206;

- Корпус; 1206
- Нормований допуск;  $\pm 1\%$
- Потужність, що розсіюється; 0.25 Вт
- Робоча температура;  $-55\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +125\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Тип резистора; Керамічний
- Спосіб монтажу; Поверхневий (SMD)
- Максимальна робоча напруга; 200 V

## Керамічно цементний резистор

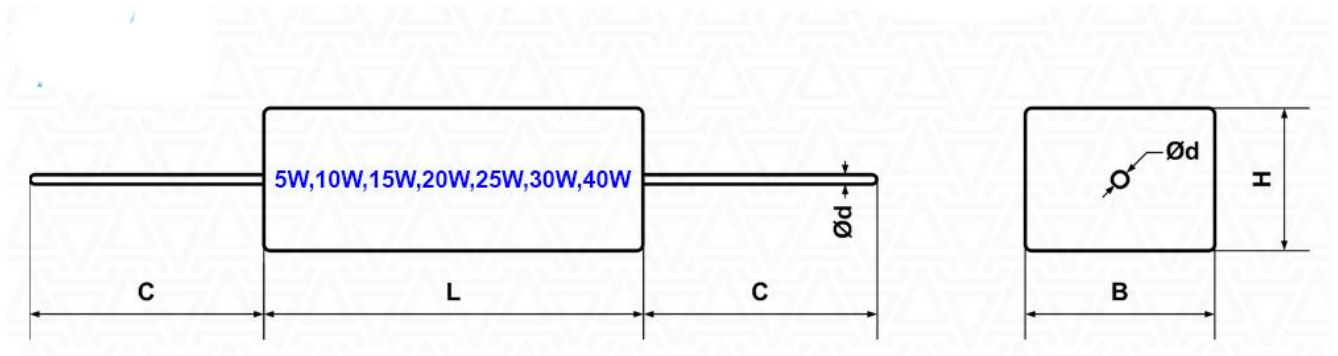


Рисунок 2.14. Керамічно цементний резистор

Таблиця 3.2. Габаритні та настановні розміри резисторів керамічно цементних:

Серия	Размеры, мм				
	L	B	H	C	Ød
Резисторы 5W	22	10	9	35±3	0,75
Резисторы 10W	48	10	9		
Резисторы 15W	48	12,5	12,5		
Резисторы 20W	60	14,5	13,5		
Резисторы 25W	64	14,5	13,5		
Резисторы 30W	75	19	17		
Резисторы 40W	89	19	19		

- Номінальний опір; 75 мОм
- Нормований допуск; ±5%
- Потужність, що розсіюється; 5 Вт
- Робоча температура; -55 ° С ... +155 ° С
- Тип резистора; Дротовий
- Спосіб монтажу; В отвори
- Максимальна робоча напруга; 350 V
- Тип упаковки; Коробка
- Розміри; 22×10×9 мм

## 2.4. Моделювання роботи інвертора (використання спеціалізованого програмного забезпечення).

Моделювання роботи інвертора є ключовим етапом у процесі його розробки, який дозволяє оцінити функціональність схеми, перевірити її відповідність технічним вимогам і уникнути помилок ще на стадії проектування. Використання спеціалізованого програмного забезпечення (ПЗ) для симуляції електронних схем забезпечує точне відображення характеристик пристрою, дозволяє оптимізувати параметри його роботи та підвищити ефективність.

Одним із основних завдань моделювання є перевірка роботи силової частини інвертора, яка включає транзистори, діоди, конденсатори, дроселі та інші компоненти. Для цього створюється математична модель пристрою, яка враховує всі параметри схеми, зокрема вхідну напругу, струм, частоту роботи, втрати енергії та форму вихідного сигналу. Це дозволяє визначити оптимальні режими роботи компонентів і забезпечити стабільність вихідних характеристик.

Серед програмного забезпечення, що широко використовується для моделювання електронних схем, можна виділити такі, як **LTspice**, **Proteus**, **PSIM**, **MATLAB/Simulink** та **OrCAD PSpice**. Кожна з цих програм має свої особливості та переваги, які роблять їх ефективними для різних етапів розробки інвертора.

Одним із найбільш популярних інструментів для моделювання силових схем є **LTspice**, який надає можливість створення математичних моделей транзисторів, діодів, індуктивностей і конденсаторів. У цій програмі можна провести симуляцію роботи мостової схеми інвертора, оцінити вплив різних факторів на його роботу, таких як зміна вхідної напруги або навантаження, а також вивчити форму вихідного сигналу. Важливим аспектом є можливість аналізу втрат енергії на транзисторах і дроселях, що дозволяє оптимізувати вибір компонентів для досягнення максимальної ефективності.

**Proteus** також є популярним серед розробників електронних пристроїв завдяки своїй інтегрованій можливості моделювання схем і створення віртуальних друкованих плат. Використовуючи Proteus, можна моделювати як силову частину інвертора, так і його керуючу схему, включаючи драйвери транзисторів і

мікроконтролери. Це особливо важливо для забезпечення коректного керування ключами, що впливає на якість вихідного сигналу та стабільність роботи пристрою [29].

**PSIM** є ще одним спеціалізованим інструментом, який широко використовується для моделювання силових електронних пристроїв, включаючи інвертори. Ця програма дозволяє моделювати роботу інвертора в динамічних умовах, оцінювати його поведінку при зміні навантаження або коливаннях вхідної напруги. PSIM забезпечує простий у використанні інтерфейс і підтримує широкий спектр компонентів, що робить його ідеальним для аналізу складних схем.

Для більш детального аналізу системи керування інвертором та інтеграції його з іншими елементами автомобільної електроніки використовується **MATLAB/Simulink**. Цей інструмент дозволяє створювати моделі не лише силової частини, але й алгоритмів керування, таких як імпульсно-широтна модуляція (ШІМ) або адаптивне регулювання. MATLAB/Simulink дає можливість вивчати взаємодію між електричними та механічними системами, що є важливим для аналізу роботи інвертора в реальних умовах експлуатації.

Процес моделювання роботи інвертора включає кілька основних етапів. На першому етапі створюється схема пристрою у вибраному програмному забезпеченні, де задаються параметри кожного компонента. Для цього використовуються технічні характеристики компонентів, такі як номінальна напруга, струм, опір і частота перемикачів. Важливо правильно налаштувати всі параметри, щоб модель точно відображала реальні умови роботи пристрою.

На наступному етапі проводиться симуляція роботи схеми. Це дозволяє отримати такі важливі характеристики, як форма вихідного сигналу, ККД, рівень втрат енергії на ключах і фільтрувальних компонентах. Результати симуляції використовуються для оптимізації схеми, наприклад, вибору ємності конденсаторів або індуктивності дроселів, які забезпечують мінімізацію гармонійних спотворень і стабільність вихідної напруги.

За допомогою симуляції можна визначити температуру транзистора і діода під час роботи пристрою. Це дозволяє уникнути перегріву і забезпечити надійність пристрою протягом тривалого часу [23].

Моделювання також дає можливість оцінити стійкість роботи інвертора в умовах змінних навантажень або перепадів вхідної напруги. Це особливо актуально для автомобільних інверторів, які працюють у середовищі з високим рівнем імпульсних перешкод. Наприклад, у MATLAB/Simulink можна змоделювати вплив імпульсних завад на роботу пристрою і перевірити ефективність фільтрувальних компонентів.

На завершальному етапі моделювання результати аналізуються для визначення можливих недоліків схеми. Якщо виявляються проблеми, наприклад, низький ККД або нестабільна форма сигналу, схема коригується шляхом зміни параметрів компонентів або конфігурації схеми. Після внесення змін проводиться повторна симуляція, щоб переконатися у досягненні оптимальних характеристик.

Таким чином, моделювання роботи інвертора за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення є потужним інструментом, який дозволяє створити ефективний, надійний і оптимізований пристрій. Це не лише скорочує час розробки, але й мінімізує витрати на виготовлення прототипів, забезпечуючи високу якість кінцевого продукту. Результати моделювання стають основою для переходу до наступних етапів розробки, таких як виготовлення друкованої плати та тестування реального зразка [25].

## **2.5. Аналіз роботи схеми (перевірка напруги, струму, ККД).**

Аналіз роботи схеми інвертора є завершальним етапом у процесі її моделювання та налаштування, який дозволяє оцінити ефективність, стабільність і відповідність технічним вимогам. Основними аспектами цього аналізу є перевірка напруги, струму та коефіцієнта корисної дії (ККД) пристрою. Детальний аналіз роботи схеми дозволяє виявити потенційні проблеми, оптимізувати роботу компонентів і забезпечити надійну експлуатацію інвертора в умовах автомобільної бортової мережі.

Перевірка напруги є одним із найважливіших кроків у процесі аналізу. Вона включає оцінку стабільності вхідної та вихідної напруги за різних режимів роботи. В автомобільних системах вхідна напруга може змінюватися через коливання в

бортовій мережі, викликані роботою стартера, генератора або інших електронних компонентів. Наприклад, напруга в акумуляторі може знижуватися до 9-10 В під час запуску двигуна або зростати до 14-15 В при заряджанні. Схема інвертора повинна забезпечувати стабільну вихідну напругу, незважаючи на ці коливання. Для цього використовуються елементи стабілізації, такі як конденсатори, регулятори напруги та імпульсно-широтна модуляція (ШІМ).

Перевірка струму є наступним важливим аспектом аналізу роботи схеми. У цьому процесі оцінюється струм, який протікає через ключові елементи схеми, такі як транзистори, діоди, дроселі та конденсатори. Важливо визначити максимальний струм, який проходить через силові компоненти під час роботи пристрою з номінальним і піковим навантаженням. Це дозволяє переконатися, що вибрані компоненти здатні працювати у заданих умовах без ризику пошкодження. Якщо струм перевищує допустимі значення для будь-якого з компонентів, необхідно змінити параметри схеми або вибрати компоненти з вищими характеристиками.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) є одним із ключових показників ефективності роботи інвертора. Він визначається як відношення потужності, що подається на навантаження, до потужності, споживаної від джерела живлення. У сучасних інверторах ККД може досягати 90-95%, залежно від умов роботи та якості компонентів. Низький ККД свідчить про високі втрати енергії в схемі, які можуть бути пов'язані з неефективними компонентами, поганим трасуванням друкованої плати або недостатньо оптимізованою системою охолодження.

Для визначення ККД проводиться серія вимірювань при різних навантаженнях. Наприклад, інвертор тестується з низьким, середнім і максимальним навантаженням, а також у режимі простою. Це дозволяє оцінити його поведінку в реальних умовах експлуатації та виявити залежність ККД від рівня навантаження. Якщо ККД значно знижується за певних умов, це може свідчити про проблеми, які потрібно вирішити на етапі проектування.

Ще одним важливим аспектом аналізу є перевірка стабільності роботи схеми під час різких змін навантаження або вхідної напруги. Це дозволяє оцінити, наскільки швидко пристрій може адаптуватися до змін і чи не виникають при цьому нестабільності, такі як осциляції або провали напруги. Для цього інвертор

тестується з імпульсними навантаженнями, які імітують реальні умови роботи в автомобільній бортовій мережі.

У підсумку, аналіз роботи схеми є важливим етапом, який дозволяє переконатися в її ефективності, стабільності та надійності. Результати аналізу використовуються для оптимізації схеми та підвищення її характеристик, забезпечуючи відповідність пристрою сучасним стандартам і вимогам автомобільної індустрії [10].

## **РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ**

### **3.1. Вибір типу та розміру друкованої плати.**

Вибір типу та розміру друкованої плати є одним із ключових етапів у процесі розробки інвертора напруги, оскільки від цього залежить його функціональність, надійність та можливість ефективної роботи у реальних умовах. Друкована плата є основою для розташування електронних компонентів і забезпечення їхнього взаємозв'язку через електричні з'єднання. При виборі типу та розміру плати необхідно враховувати як технічні, так і експлуатаційні вимоги до пристрою, а також особливості його застосування в автомобільній бортовій системі.

Першим кроком у виборі друкованої плати є визначення її типу. Друковані плати поділяються на односторонні, двосторонні та багат шарові. Односторонні плати мають провідникові доріжки лише на одній стороні і використовуються для простих схем із невеликою кількістю компонентів. Вони мають низьку вартість і простоту виготовлення, але обмежені в можливості розташування компонентів. Для інвертора напруги, який включає велику кількість силових і керуючих елементів, одностороння плата є недостатньою через обмеження у площі трасування.

Двосторонні плати є більш поширеним вибором для сучасних пристроїв середньої складності. Вони мають провідникові доріжки з обох сторін, що дозволяє більш ефективно розташовувати компоненти та зменшити розміри плати. Для інвертора, який працює в умовах автомобільної бортової мережі, двостороння



плата забезпечує достатню гнучкість у трасуванні, дозволяючи оптимізувати електромагнітну сумісність і забезпечити ефективне розташування силових і керуючих компонентів.

Багатошарові друковані плати є найсучаснішим рішенням, яке дозволяє розмістити провідникові доріжки на кількох шарах. Це забезпечує високу щільність розташування компонентів, мінімізацію електромагнітних перешкод і покращену тепловіддачу. Багатошарові плати особливо корисні для високочастотних пристроїв і схем із високою щільністю елементів, але вони мають вищу вартість і складність у виготовленні. Для розроблюваного інвертора багатошарова плата може бути доцільною, якщо необхідно забезпечити компактність конструкції та покращену електромагнітну сумісність.

Після вибору типу плати необхідно визначити її розмір. Розмір друкованої плати залежить від кількох факторів, включаючи кількість і розміри компонентів, максимальний струм, що проходить через доріжки, а також вимоги до тепловіддачі. Для інвертора напруги важливо забезпечити достатній простір для розташування силових компонентів, таких як транзистори, дроселі, конденсатори та трансформатор, а також зон ізоляції для запобігання пробоям у високовольтних ланцюгах.

Підсумовуючи, вибір типу та розміру друкованої плати є комплексним завданням, яке потребує врахування технічних, експлуатаційних і економічних факторів. Двостороння або багатошарова плата є оптимальним вибором для розроблюваного інвертора, забезпечуючи ефективне розташування компонентів, високу надійність і компактність. Правильний підхід до вибору плати дозволяє створити пристрій, який відповідає сучасним вимогам і забезпечує стабільну роботу в умовах автомобільної бортової мережі [15].

### **3.2. Конструктивно-технологічний розрахунок друкованої плати.**

Конструктивно-технологічний розрахунок друкованої плати є важливим етапом розробки інвертора напруги, який забезпечує правильне компонування елементів, оптимальне трасування провідників і відповідність конструкції вимогам

виробничих технологій. Цей розрахунок дозволяє забезпечити надійність, функціональність і довговічність пристрою, зокрема в умовах експлуатації автомобільної бортової мережі. Основні аспекти розрахунку охоплюють визначення розмірів плати, товщини та ширини провідників, організацію шарів друкованої плати, компоновання елементів і оптимізацію тепловіддачі.

Першим кроком у конструктивно-технологічному розрахунку є визначення розмірів друкованої плати. Розмір плати залежить від кількості компонентів, їхніх розмірів, а також простору, доступного для встановлення пристрою в автомобілі. Для автомобільних інверторів зазвичай існують обмеження щодо розмірів, тому плата повинна бути компактною, але водночас забезпечувати достатньо місця для компонентів і трасування провідників. Використання програмного забезпечення для проектування друкованих плат, такого як Altium Designer або KiCad, дозволяє ефективно визначити розміри плати та оптимізувати її компоновання.

Розмір друкованої плати розраховується за формулою:

$$S = K_3 * \Sigma (n_i * S_i), \quad (3.1.)$$

де  $K_3$  - коефіцієнт втрат площі ( $K_3 = 1 \dots 3$ ), виберемо  $K_3 = 3$ ;  $S_i$  - установча площа  $i$ -го елемента

$$\begin{aligned} S &= 3*(35+47.25+52.6+283.4+154+132.7+(5.1*9)+(8.4*2)+(10.5*2)+31) = \\ &= 2457\text{мм}^2 \end{aligned}$$

Розмір друкованої плати 80x50 мм.

Під час виконання конструктивно-технологічного розрахунку друкованого монтажу необхідно враховувати виробничі похибки, пов'язані зі створенням малюнка провідників, базуванням, свердлінням тощо.

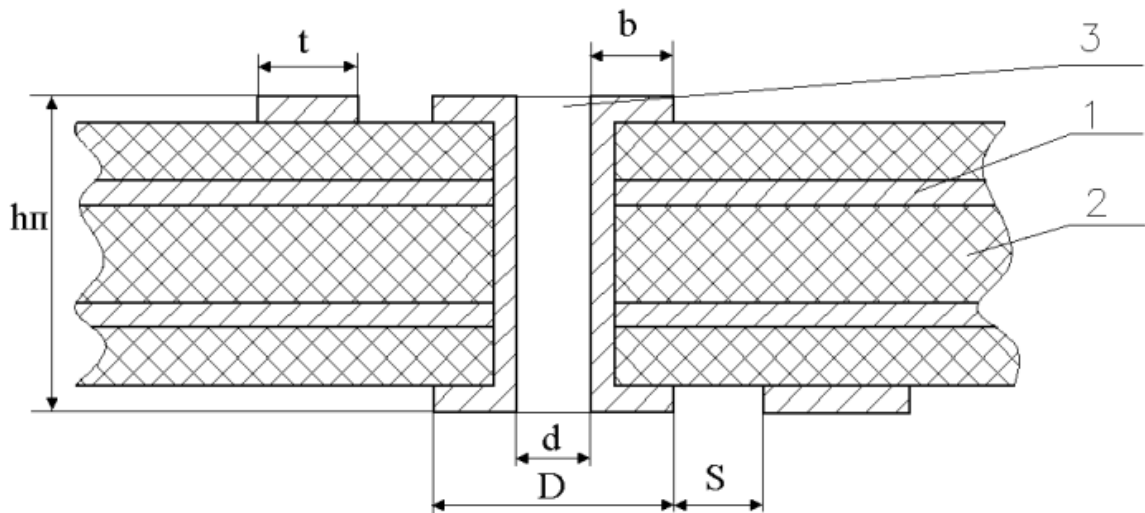


Рисунок 3.1. Креслення двосторонньої друкованої плати

- 1 – провідний шар;
- 2 – діелектрична прокладка;
- 3 – металізований отвір.

Таблиця 3.1. Основні характеристики друкованого рисунка

Найменування розрахункового елемента	позначення	Значення параметрів для третього класу точності ДП
Ширина провідника, мм	$T_M$	0.25
Відстань між краями сусідніх елементів рисунка, що проводить, мм	$S_M$	0.25
Відношення діаметра металізованого отвору до товщини плати	$I$	0.33
Ширина гарантійного паска, мм	$B_M$	0.1

мінімальний діаметр перехідного отвору визначається за формулою;

$$d_{\text{ПО}} \geq I * h_{\text{П}} \quad (3.2.)$$

$$d_{\text{ПО}} \geq 0,33 * 1,6 = 0,53 \text{ мм};$$

Діаметр перехідного отвору візьмемо 0,6 мм.

Мінімальне значення монтажного отвору - зі співвідношення:

$$d_{\text{МО}} \geq d_{\text{В}} + |\Delta d_{\text{НО}}| + \Delta \quad (3.3.)$$

$d_{\text{В}}$  - максимальне значення діаметра націпного елемента;  $d_{\text{НО}}$  - нижнє граничне відхилення номінального значення діаметра отвору ;

$\Delta$  - зазор між выводами і монтажним отвором для пайки ( $\Delta = 0,1 \dots 0,4$  мм);

$$d_{\text{МО1}} \geq 0,5 + 0,10 + 0,4 = 1,0 \text{ мм};$$

$$d_{\text{МО2}} \geq 0,8 + 0,10 + 0,3 = 1,2 \text{ мм}$$

Приймаємо діаметр монтажного отвору  $d_{\text{МО1}} = 1,0$  мм,  $d_{\text{МО2}} = 1,2$  мм.

Таблиця 3.2. Допустимі похибки виконання конструктивних елементів

Похибка	Позначення	Максимальне значення, мм
Допуск на отвір без металізації	$\Delta d$	+0,05; -0,1 +0,10; -0,15
При $1 \leq \varnothing$ мм		
При $\varnothing > 1$ мм		
Допуск на ширину провідника	$\Delta t$	

Без покриття		$\pm 0,03$
З покриттям		$\pm 0,05$
Допуск при розташуванні отворів При розмірі ДП, мм $180 \leq L \leq 360$	$\delta d$	0,08
Допуск на розташування контактних площадок, мм при $180 \leq L \leq 360$	$\delta p$	0,35
Допуск на розташування провідників	$\delta$	0,05

Розрахунок номінального значення ширини провідника проведемо за формулою;

$$t = t_M + |\Delta t_{HO}| \quad (3.4)$$

де  $t_M$  - мінімальна допустима ширина провідника (таблиця 3.1);

$|\Delta t_{HO}|$  - нижнє граничне відхилення ширини провідника (таблиця 3.2);

$$t = 0,25 + 0,05 = 0,3 \text{ мм};$$

Приймаємо  $t = 0,3$  мм.

Розрахунок мінімальної відстані між елементами рисунка провідника визначемо за формулою:

$$S = S_M * \Delta t_{BO} \quad (3.5)$$

де  $S_M$  - мінімально допустима відстань між сусідніми елементами рисунка, що проводить (таблиця 2.2);

$t_{BO}$  - верхнє граничне відхилення ширини провідника (таблиця 3.2);

$$S = 0,25 + 0,05 = 0,3 \text{ мм};$$

Приймаємо  $S = 0,3 \text{ мм}$ .

Розрахунок мінімального діаметра контактної площадки роблять за формулою:

$$D = (d_{MO} + \Delta d_{BO}) + 2 * b_M + \Delta t_{BO} + 2 * \Delta d_{TP} + \sqrt{\delta d^2 + \delta p^2 + \Delta t_{HO}^2} \quad (3.6)$$

де  $d_{BO}$  - верхнє граничне відхилення діаметра отвору (таблиця 3.2);  $d_{TP}$  - глибина підтравливання діелектрика для багатошарових друкованих плат (приймається рівною 0,03).

$$D1 = (1 + 0,05) + 2 * 0,1 + 0,05 + 2 * 0,03 + \sqrt{(0,08^2 + 0,35^2 + 0,05^2)} = 1,72 \text{ мм};$$

$$D2 = (1,2 + 0,1) + 2 * 0,1 + 0,05 + 2 * 0,03 + \sqrt{(0,08^2 + 0,35^2 + 0,05^2)} = 1,97 \text{ мм};$$

Приймаєм  $D1 = 1,75 \text{ мм}$ ,  $D2 = 2 \text{ мм}$ .

Виконаємо розрахунок мінімальної відстані для прокладки  $n$  - ої кількості провідників з контактними майданчиками діаметрів  $D1$  і  $D2$

$$l = \frac{D1 + D2}{2} + t_M * n + S * n + \delta l \quad (3.7)$$

де  $n$  - кількість провідників ( $n = 1$ );

$$l = (1,75 + 2) / 2 + 0,15 * 1 + 0,2 * (1 + 1) + 0,05 = 2,5 \text{ мм};$$

Після аналізу проведених конструктивно-технологічних розрахунків, можн виділити декілька основних параметрів друкованого монтажу;

- Діаметри перехідних отворів 0,6 мм;
- Діаметри монтажних отворів 1 мм та 1,2 мм;
- Номінальна ширина провідника 0,3 мм;
- Діаметр контактних площадок 1,75 мм та 2мм;
- Номінальна відстань між елементами рисунка, який проводить струм, 0,3 мм.
- 

### 3.3. Розрахунок по постійному струму.

Розрахунок по постійному струму є важливим етапом у розробці інвертора напруги, який дозволяє визначити параметри силових компонентів, зокрема провідників друкованої плати, транзисторів, діодів, конденсаторів і дроселів, що працюють у ланцюгах постійного струму. Мета цього розрахунку полягає у забезпеченні надійності та ефективності пристрою, уникненні перегріву та надмірних втрат енергії, а також оптимізації конструкції друкованої плати.

Розрахуємо перетин провідника сигнального кола:

$$S_{\geq} \rho l * I * l / U_R \quad (3.8)$$

де  $\rho$  - опір провідника  $Om * мм^2 / м$ ;

$h_{\phi}$  – товщина фольги провідника;

$b_{пр}$  – ширина провідника;

$l$  - довжина провідника, м;

$I$  - струм, А.

За допомогою цієї формули порахуємо мінімальний перетин провідника в основній частині.

$$S \geq \rho * I * l / U_R = 0,017 * 0,4 * 0,392 / 0,4 = 0,0066 \text{ мм}^2$$

$$t \geq \frac{S1_c}{h_{TM}} = \frac{0,0066}{0,035} \geq 0,18_{mm} \quad (3.9)$$

З конструкторських міркувань прийmemo ширину провідника в основній частині 0.3 мм.

На деяких ділянках плати струм досягає 4А. Розрахуємо ширину доріжки;

$$S \geq \rho * I * l / U_R = 0,017 * 4 * 0,2 / 0,4 = 0,034 \text{ мм}^2$$

Ширину провідників визначемо за формулою (3.9):

$$t \geq \frac{S1_c}{h_{TM}} = \frac{0,034}{0,035} \geq 0,97_{mm^2}$$

З міркувань що до надійності друкованої плати прийmemo ширину провідника 1,7 мм.

### 3.4. Розрахунок силових компонентів

#### 1. Транзистори

Для роботи в ланцюгах постійного струму транзистори повинні витримувати як максимальний струм, так і теплове навантаження. Втрати потужності в транзисторі розраховуються за формулою:

$$P_{Tr} = I^2 \times R_{ds(on)} \quad (3.10.)$$

де:  $P_{Tr}$  – втрати потужності у транзисторі (Вт),  $R_{ds(on)}$  – опір каналу транзистора у відкритому стані (Ом).

Для транзистора з опором 0,008 Ом і струмом 5 А втрати потужності становлять 0,2 Вт.



## 2. Діоди.

Діоди у схемі інвертора використовуються для випрямлення струму та забезпечення захисту від зворотних імпульсів. Втрати в діодах визначаються як:

$$P_{\text{діод}} = I \times V_f \quad (3.11.)$$

де:  $P_{\text{діод}}$  – втрати потужності у діоді (Вт),  $V_f$  – падіння напруги на діоді (В).

Для діодів із низьким падінням напруги, таких як Шотткі-діоди ( $V_f \approx 0,4$  В), втрати при струмі 5 А становитимуть 2 Вт.

## 3. Конденсатори.

Конденсатори в ланцюгах постійного струму використовуються для згладжування пульсацій і стабілізації напруги. Їхня ємність розраховується за формулою:

$$C = I / (2 \times \pi \times f \times \Delta V) \quad (3.12.)$$

де:  $C$  – ємність конденсатора (Ф),  $f$  – частота пульсацій (Гц),  $\Delta V$  – допустиме відхилення напруги (В).

Для забезпечення стабільної роботи інвертора необхідна ємність близько 3100-5000 мкФ.

## 4. Дроселі.

Дроселі в ланцюгах постійного струму згладжують імпульсні завади. Їхня індуктивність визначається як:

$$L = (\Delta V \times t) / I \quad (3.13.)$$

де:  $L$  – індуктивність (Гн),  $t$  – тривалість імпульсу (с).

Дросель повинен мати індуктивність 180-250 мілігенрі.

### 3.5. Розміщення елементів та трасування на платі.

Розміщення елементів та трасування на друкованій платі є ключовими етапами проектування інвертора напруги, що забезпечують ефективну роботу пристрою, його надійність, стійкість до електромагнітних завад і відповідність вимогам до тепловідведення. Цей процес є багатокритеріальним і вимагає врахування як технічних параметрів компонентів, так і конструктивних обмежень, пов'язаних із габаритами плати та умовами її експлуатації.

Для керуючих компонентів, таких як мікроконтролери, драйвери транзисторів і ШІМ-контролери, важливо уникати впливу високочастотних завад. Ці елементи розміщуються подалі від силових компонентів.

Довгі доріжки створюють додатковий опір і можуть стати джерелом електромагнітних перешкод.

Особливу увагу слід приділити розміщенню компонентів, які потребують ефективного тепловідведення. Транзистори, діоди та інші силові елементи генерують тепло під час роботи, тому вони повинні розташовуватися в зоні доступу до радіаторів або інших систем охолодження. Крім того, під ними можна передбачити спеціальні теплопровідні доріжки або площини, які допомагають розподіляти тепло по платі. У разі багатошарових плат одна з площин може бути виділена під тепловідведення [8].

Розташування конденсаторів і дроселів також має бути продумане з урахуванням їхніх функцій. Наприклад, фільтрувальні конденсатори, що згладжують пульсації напруги, повинні бути розташовані якомога ближче до джерела живлення і навантаження, щоб забезпечити мінімальний опір і стабільність сигналу. Дроселі, які використовуються для згладжування струму, слід розташовувати поруч із силовими ключами, щоб мінімізувати перешкоди.

Підсумовуючи, процес розміщення елементів і трасування на друкованій платі є комплексним завданням, яке вимагає врахування багатьох технічних, конструктивних і технологічних аспектів. Від правильного виконання цього етапу залежить стабільність роботи інвертора, його ефективність і надійність в умовах автомобільної бортової системи.

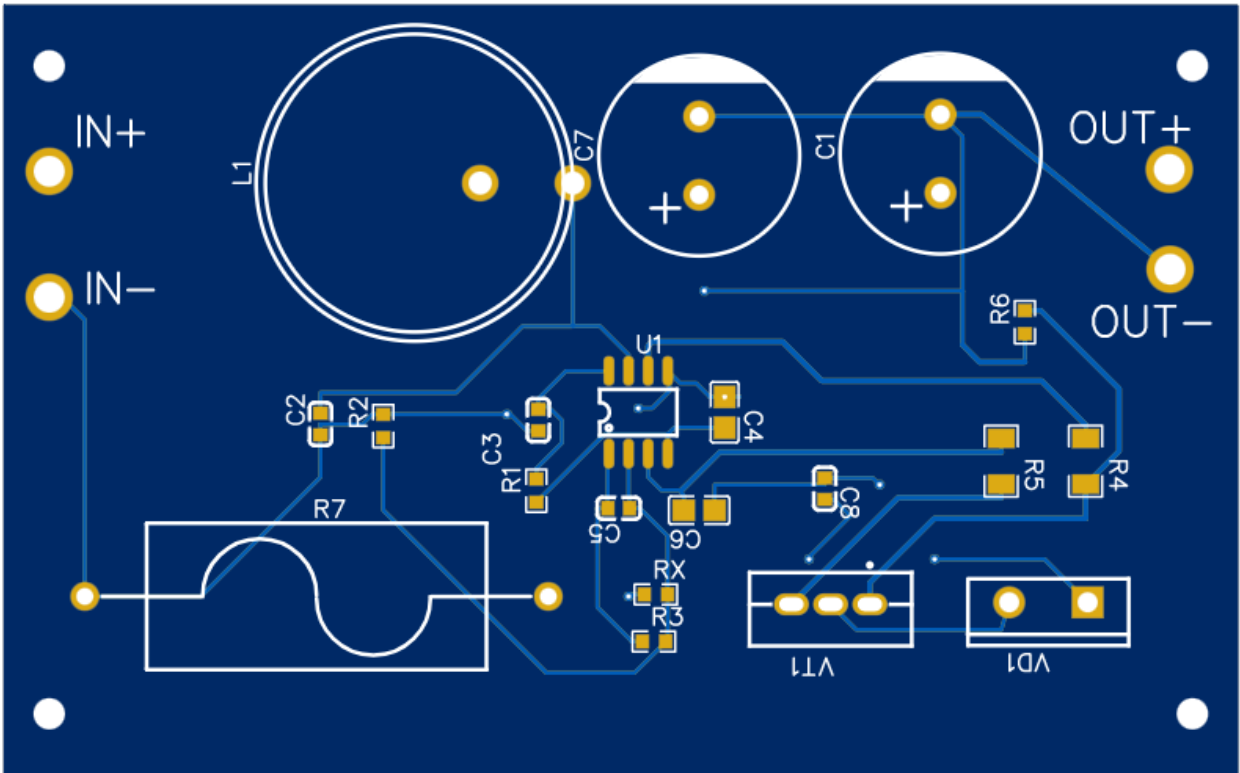


Рисунок 3.2. Трасування друкованої плати з складальним кресленням друкованої плати

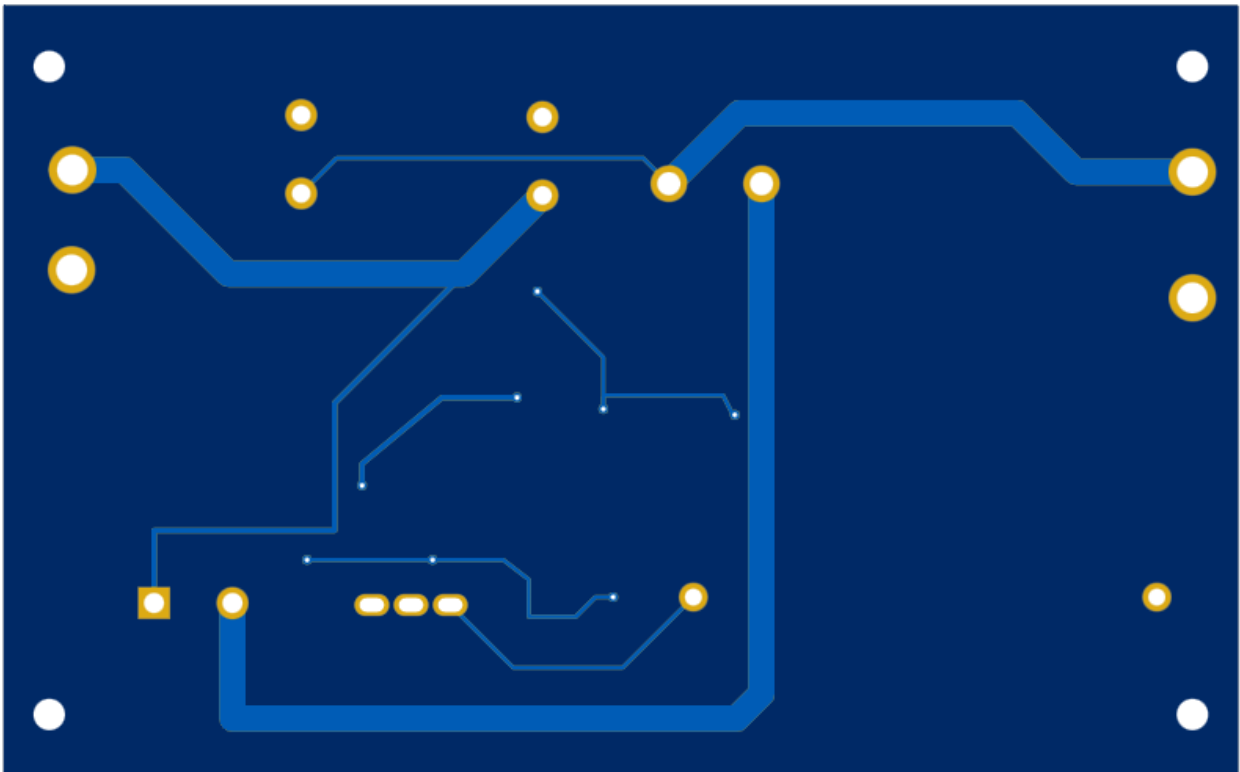


Рисунок 3.3. Дзеркальне відображення плати

### 3.6. Аналіз та розрахунок технологічності конструкції.

Аналіз та розрахунок технологічності конструкції є важливим етапом розробки друкованої плати для інвертора напруги. Технологічність конструкції визначає ступінь адаптованості плати до виробничих процесів, зручність її складання, тестування, монтажу та обслуговування. Цей етап спрямований на забезпечення максимальної ефективності виробництва, зменшення витрат на виготовлення та експлуатацію пристрою, а також підвищення його надійності та довговічності.

Першим кроком аналізу технологічності є оцінка конструктивних особливостей друкованої плати. Основними факторами, що впливають на технологічність, є:

1. **Складність схеми** – кількість компонентів і рівень їх інтеграції.
2. **Щільність розташування елементів** – мінімізація зайнятого простору при збереженні зручності монтажу.
3. **Тип плати** – одностороння, двостороння або багат шарова конструкція.
4. **Матеріали плати** – їхня стійкість до температурних впливів, механічних навантажень та вологості.
5. **Засоби охолодження** – наявність тепловідвідних зон, радіаторів або теплопровідних доріжок.

При аналізі технологічності конструкції важливо враховувати виробничі обмеження. Наприклад, мінімальна ширина провідників, відстань між ними, діаметр отворів і допуски на розташування компонентів залежать від можливостей обладнання на виробничих лініях. Типові виробничі стандарти передбачають мінімальну ширину доріжок у межах 0,2-0,3 мм і мінімальну відстань між ними не менше 0,2 мм.

#### **Компонування та монтаж елементів**

Одним із ключових аспектів технологічності є компонування елементів на платі. Елементи повинні бути розташовані так, щоб забезпечити:

- **Зручність автоматизованого монтажу:** для цього враховуються розташування компонентів у логічній послідовності, мінімізація перекриттів і наявність достатнього простору для роботи паяльного обладнання.
- **Доступність для ручного монтажу та обслуговування:** великі компоненти (наприклад, трансформатори або радіатори) не повинні закривати доступ до інших елементів.
- **Симетрія та рівномірність розташування:** це сприяє зменшенню механічних напружень у платі під час її експлуатації.

Додатково слід забезпечити мінімізацію кількості перехідних отворів у двосторонніх і багатошарових платах. Перехідні отвори ускладнюють виробництво і збільшують вартість плати. Однак їхнє використання є доцільним для з'єднання міжшарових доріжок у багатошарових конструкціях, якщо це необхідно [16].

### **Тепловідведення**

Ефективне тепловідведення є ще одним критично важливим аспектом технологічності конструкції. Силові компоненти інвертора, такі як транзистори, діоди та дроселі, генерують значну кількість тепла під час роботи. Для зменшення теплового навантаження використовуються наступні підходи:

- Виділення окремих тепловідвідних зон на платі. Це можуть бути великі мідні площини або додаткові шари для відведення тепла.
- Використання термопровідних матеріалів або підкладок. Наприклад, плати на основі алюмінієвих основ забезпечують високу ефективність тепловідведення.
- Розташування компонентів таким чином, щоб забезпечити рівномірний розподіл тепла та уникнути його концентрації в окремих зонах.

### **Оптимізація вартості виробництва**

Аналіз технологічності також спрямований на зменшення вартості виробництва друкованої плати. Для цього враховуються:

- Використання стандартних компонентів і матеріалів, доступних на ринку.
- Мінімізація кількості шарів у багатошарових платах (якщо це можливо без шкоди для функціональності).

- Зменшення кількості перехідних отворів і складних доріжок.

### **Контроль якості**

Завершальним етапом аналізу є перевірка якості конструкції за допомогою автоматизованих систем тестування. Це дозволяє виявити можливі помилки, такі як занадто вузькі доріжки, неправильне розташування компонентів або недостатній зазор між елементами. Крім того, система контролю якості забезпечує відповідність конструкції стандартам, що використовуються в галузі.

Аналіз та розрахунок технологічності конструкції друкованої плати для інвертора напруги є критично важливими для створення ефективного, надійного та економічного пристрою. Врахування виробничих обмежень, оптимізація тепловідведення, забезпечення електромагнітної сумісності та механічної міцності дозволяють досягти високої якості кінцевого продукту і його відповідності сучасним стандартам. Це не лише спрощує процес виробництва, але й підвищує надійність і довговічність пристрою в умовах експлуатації [27].

### **3.7. Розрахунок надійності елементів друкованої плати з урахуванням пайки.**

Розрахунок надійності елементів друкованої плати з урахуванням пайки є критично важливим етапом у процесі розробки інвертора напруги, особливо з огляду на складні умови експлуатації автомобільної техніки. Цей процес передбачає аналіз довговічності компонентів, які використовуються на платі, їх стійкість до механічних, термічних і електричних навантажень, а також впливу процесу пайки на загальну надійність пристрою.

#### **Основні фактори, що впливають на надійність**

Надійність елементів друкованої плати залежить від багатьох чинників, серед яких можна виділити:

1. **Якість самих компонентів.** Вибір сертифікованих компонентів із високими технічними характеристиками знижує ризик відмов.

2. **Технологія пайки.** Висока температура під час пайки може негативно вплинути на властивості компонентів та контакти.

3. **Тепловий режим роботи плати.** Постійне нагрівання силових компонентів може спричинити деградацію контактів та провідників.

4. **Вібрації та механічні впливи.** Автомобільні інвертори працюють у середовищі з підвищеними вібраціями, які впливають на міцність пайки.

5. **Корозійні процеси.** Висока вологість або агресивне середовище можуть викликати корозію контактів.

### Аналіз довговічності компонентів

Для оцінки надійності електронних компонентів використовується метод розрахунку середнього часу до відмови (Mean Time Between Failures, MTBF). Цей параметр визначає середній час роботи компонентів без виникнення критичних несправностей. MTBF розраховується за формулою:

$$\text{MTBF} = 1 / \lambda \quad (3.14.)$$

де:  $\lambda$  – інтенсивність відмов (відмов/год).

Інтенсивність відмов залежить від кількох факторів, зокрема від температури. Для багатьох компонентів залежність інтенсивності відмов від температури визначається формулою Арреніуса:

$$\lambda = \lambda_0 \times e^{(E_a/kT)} \quad (3.15.)$$

де:  $\lambda_0$  – базова інтенсивність відмов,  $E_a$  – енергія активації (електронвольт),  $k$  – константа Больцмана ( $8.617 \times 10^{-5}$  eV/K),  $T$  – абсолютна температура в Кельвінах.

Таким чином, підвищення робочої температури на  $10^\circ\text{C}$  може суттєво збільшити ймовірність відмови компонентів. Для цього необхідно забезпечити ефективне охолодження силових елементів [20].

## Надійність пайки

Процес пайки є важливим етапом, який безпосередньо впливає на надійність електричних з'єднань на друкованій платі. Під час пайки слід дотримуватись оптимального температурного режиму, щоб уникнути пошкодження компонентів та контактних доріжок.

Для забезпечення високої якості пайки враховуються наступні аспекти:

1. **Температура пайки.** Пайка здійснюється при температурі, яка перевищує температуру плавлення припою, але не настільки висока, щоб спричинити термічне пошкодження компонентів. Для безсвинцевого припою типова температура пайки становить 245-260°C.

2. **Час експозиції.** Компоненти не повинні піддаватись високим температурам занадто довго, щоб уникнути деградації матеріалів.

3. **Тип припою.** Використання якісного припою з низьким рівнем домішок знижує ризик утворення мікротріщин і корозії.

4. **Флюс.** Флюси повинні забезпечувати якісне з'єднання, видаляючи оксиди з поверхонь контактів, але при цьому їхні залишки не повинні викликати корозійних процесів.

Якість пайки оцінюється за такими критеріями:

- Відсутність пористості або мікротріщин у з'єднаннях.
- Однорідність паяного з'єднання, без гострих кутів або виступів.
- Адгезія припою до контактних доріжок і виводів компонентів.

## Механічна міцність контактів

Оцінка механічної міцності паяних з'єднань особливо важлива для автомобільних інверторів, які працюють у середовищі з високим рівнем вібрацій. Для цього проводяться випробування на механічні навантаження, включаючи вібраційні тести та циклічні зміни температури. Міцність пайки можна підвищити, використовуючи:



- Додаткові механічні кріплення для важких компонентів (наприклад, трансформаторів і дроселів).
- Припої з підвищеною пластичністю, які здатні поглинати механічні деформації.

### **Корозійна стійкість**

Для захисту від корозії застосовуються спеціальні покриття, такі як конформні лаки. Вони створюють захисний шар на поверхні друкованої плати, запобігаючи впливу вологи та агресивних хімічних речовин. Крім того, для підвищення стійкості до корозії використовуються припої з додаванням срібла або інших корозійностійких матеріалів.

### **Тестування надійності**

Для перевірки надійності конструкції друкованої плати застосовуються наступні методи:

1. **Термоциклічні випробування.** Плата піддається змінним температурним режимам, які імітують умови роботи в автомобілі.
2. **Вібраційні випробування.** Перевіряється стійкість паяних з'єднань до тривалих механічних впливів.
3. **Ізоляційні випробування.** Тестується опір ізоляції між провідниками для забезпечення електричної безпеки.
4. **Аналіз часу до відмови (MTTF).** На основі даних тестування прогнозується термін служби пристрою.

### **Оптимізація конструкції**

Для підвищення надійності друкованої плати можна виконати такі заходи:

- Зменшити кількість перехідних отворів, які можуть бути слабкими місцями у конструкції.
- Використовувати багатошарові плати з окремим шаром заземлення для зниження електромагнітних завад.
- Застосовувати товстіші шари міді для силових ланцюгів, що знижує нагрівання провідників.

Розрахунок надійності елементів друкованої плати з урахуванням пайки є комплексним процесом, який охоплює оцінку якості компонентів, технології пайки, механічної міцності контактів, корозійної стійкості та впливу теплових навантажень. Правильний підхід до цього етапу дозволяє створити конструкцію, яка відповідає сучасним вимогам надійності, забезпечуючи довговічність і стабільну роботу пристрою в умовах автомобільної бортової мережі [3].

## РОЗДІЛ 4. ВИРОБНИЦТВО ТА ТЕСТУВАННЯ

### 4.1. Вибір матеріалів для виготовлення плати.

Вибір матеріалів для виготовлення друкованої плати є одним із ключових етапів у процесі проектування інвертора напруги. Від правильно підібраних матеріалів залежить стабільність роботи плати, її довговічність, стійкість до зовнішніх впливів і можливість адаптації до умов експлуатації. Для автомобільних інверторів, які працюють у складних умовах (високі температури, вібрації, вологість), вибір матеріалів набуває особливого значення.

#### Основні критерії вибору матеріалів

Під час вибору матеріалів для виготовлення друкованої плати враховуються такі ключові фактори:

1. **Теплопровідність.** Високий рівень теплопровідності матеріалу основи дозволяє ефективно відводити тепло від силових компонентів, таких як транзистори, діоди та дроселі.

2. **Механічна міцність.** Матеріал повинен бути стійким до механічних впливів, зокрема вібрацій і ударів, які є типовими для умов автомобільної експлуатації.

3. **Електроізоляційні властивості.** Матеріал має забезпечувати високий опір ізоляції між провідниками, особливо в зоні високовольтних ланцюгів.

4. **Стійкість до температурних впливів.** Друкована плата повинна зберігати свої властивості при тривалому впливі високих температур, а також бути стійкою до циклічних змін температур.

5. **Стійкість до корозії.** Плата повинна бути захищена від впливу вологи, агресивних хімічних речовин і оксидації.

6. **Вартість матеріалів.** Економічна доцільність вибору матеріалів повинна бути збалансована з вимогами до надійності та функціональності.

### **Матеріали для основи плати**

Найпоширенішим матеріалом для виготовлення друкованих плат є склотекстоліт FR4. Це композитний матеріал на основі епоксидної смоли, армованої скловолокном. FR4 має такі переваги:

- Висока механічна міцність.
- Стійкість до температурних впливів до 130-140°C.
- Хороші електроізоляційні властивості.
- Відносно низька вартість і доступність.

Для автомобільних інверторів, які працюють у складних теплових умовах, можуть використовуватися матеріали з покращеною теплопровідністю. Наприклад:

- **Металеві основи (IMS, Insulated Metal Substrate).** Ці матеріали використовуються для багатошарових плат, де потрібне ефективне відведення тепла. Найчастіше основою є алюміній, покритий ізолюючим шаром. Металеві основи забезпечують високий рівень теплопровідності і дозволяють уникнути перегріву силових компонентів.

- **Матеріали з підвищеною термостійкістю.** Для пристроїв, які працюють при температурах понад 140°C, використовуються спеціалізовані матеріали, такі як PTFE (політетрафторетилен) або поліміди.

Вибір основи залежить від потужності інвертора, умов його експлуатації та вимог до тепловідведення. Для пристроїв середньої потужності (до 1000 Вт) найчастіше достатньо використання FR4, тоді як для високопотужних інверторів (понад 1000 Вт) доцільно застосовувати алюмінієві або мідні основи [19].

### **Матеріали для провідників**

Основним матеріалом для виготовлення провідників на друкованих платах є мідь. Вона має низький питомий опір, високу теплопровідність і добре підходить для силових ланцюгів. Товщина мідного шару зазвичай становить:

- **35 мкм** для ланцюгів із низьким струмом (до 3-5 А).
- **70 мкм** для силових ланцюгів (5-20 А).
- **105 мкм і більше** для ланцюгів із високими струмами (понад 20 А).

Для зменшення втрат енергії в силових ланцюгах можуть використовуватися провідники зі збільшеною товщиною або спеціальні мідні шини. Крім того, на поверхню мідних доріжок може наноситися захисне покриття, наприклад, олово, золото або срібло, щоб запобігти корозії і покращити паяльні властивості.

### **Матеріали для паяльної маски**

Паяльна маска виконує кілька функцій, включаючи захист провідників від корозії, запобігання коротким замиканням і спрощення процесу пайки. Найпоширенішими матеріалами для паяльної маски є полімери на основі епоксидних смол. Вони мають високу термостійкість, забезпечують хорошу адгезію до поверхні плати і стійкість до впливу вологи та хімічних речовин.

Для автомобільних інверторів важливо використовувати паяльну маску, яка стійка до тривалого впливу високих температур і механічних навантажень. Крім того, для зменшення відбиття світла в умовах експлуатації в автомобільному середовищі часто застосовуються маски темних кольорів, наприклад, зеленої або чорної.

### **Матеріали для покриття**

Для підвищення довговічності друкованої плати і захисту від впливу навколишнього середовища на її поверхню наносяться захисні покриття. Це можуть бути:

- **Конформні лаки.** Вони створюють захисний шар, який запобігає впливу вологи, пилу та агресивних хімічних речовин.
- **Гальванічне покриття.** На поверхню провідників наноситься шар олова, золота або срібла, який захищає їх від корозії і покращує паяльність.
- **Захисні гелі.** Використовуються для герметизації особливо вразливих зон плати, таких як силові компоненти або контакти.

### **Екологічні аспекти**

Вибір матеріалів для друкованої плати також повинен враховувати екологічні вимоги. У сучасній електроніці перевага надається матеріалам, які відповідають стандартам RoHS (Restriction of Hazardous Substances), що обмежують використання токсичних речовин, таких як свинець, ртуть і кадмій. Використання безсвинцевих припоїв і матеріалів із низьким рівнем шкідливих домішок є стандартом для більшості виробників.

Вибір матеріалів для виготовлення друкованої плати інвертора напруги є багатоаспектним процесом, що враховує технічні, експлуатаційні та екологічні вимоги. Правильний підбір матеріалів, таких як основа (FR4, металеві підкладки), мідні провідники, паяльна маска та захисні покриття, забезпечує стабільну роботу плати, її довговічність і адаптованість до складних умов автомобільного середовища. Це дозволяє створити надійний і ефективний пристрій, що відповідає сучасним стандартам і потребам ринку [13].

## **4.2. Опис процесу виготовлення друкованої плати.**

Процес виготовлення друкованої плати (ДП) є складним технологічним циклом, що включає кілька етапів, спрямованих на створення міцної, електрично надійної та функціональної основи для електронного пристрою. Виготовлення друкованої плати для інвертора напруги, що використовується в умовах автомобільної бортової мережі, потребує точності, дотримання стандартів якості та використання сучасних технологій.

## Вибір матеріалу основи

Першим етапом у процесі виготовлення є вибір матеріалу для основи плати. Як правило, для виготовлення ДП використовується склотекстоліт FR4 — багат шаровий матеріал, що складається зі скловолокна, просоченого епоксидною смолою. Для автомобільних інверторів, які працюють в умовах підвищеного теплового навантаження, можуть застосовуватися металеві основи (IMS) або спеціальні термостійкі матеріали.

Після вибору матеріалу основи проводиться її підготовка. Це включає обрізання листа до потрібного розміру та нанесення шару міді (як правило, товщиною 35 або 70 мкм), який слугуватиме провідниковим шаром.

## Нанесення фоторезисту

Наступним етапом є нанесення шару фоторезисту на поверхню мідної основи. Фоторезист — це спеціальний світлочутливий матеріал, який використовується для створення шаблону майбутніх провідників. Процес включає кілька кроків:

1. **Очищення поверхні.** Мідний шар очищується від забруднень, пилу та окислів, що покращує адгезію фоторезисту.
2. **Нанесення фоторезисту.** Фоторезист наноситься шляхом ламінування або розпилення, залежно від технології виробництва.
3. **Сушка.** Після нанесення матеріал піддається термічному впливу для його закріплення.

## Експонування та травлення

На цьому етапі створюється шаблон провідників відповідно до дизайну друкованої плати. Процес включає:

1. **Експонування.** На фоторезист через фотошаблон впливає ультрафіолетове (УФ) світло. Ділянки, які піддаються освітленню, стають розчинними у спеціальних розчинах.
2. **Проявлення.** Плата обробляється проявником, який видаляє освітлені ділянки фоторезисту, відкриваючи мідний шар для подальшого травлення.

3. **Травлення.** Мідний шар, що не захищений фоторезистом, видаляється за допомогою хімічного розчину (наприклад, розчину персульфату амонію або хлорного заліза). У результаті залишаються лише ті частини міді, які відповідають провідникам.

### **Зняття фоторезисту**

Після завершення травлення залишки фоторезисту видаляються за допомогою спеціальних розчинників. Цей етап необхідний для очищення поверхні провідників і підготовки до наступних процесів.

### **Нанесення паяльної маски**

Паяльна маска — це полімерне покриття, яке наноситься на поверхню друкованої плати для захисту провідників від корозії, запобігання коротким замиканням і полегшення пайки. Процес включає:

1. **Нанесення маски.** Паяльна маска наноситься на плату за допомогою трафаретного друку або розпилення.
2. **Сушка та полімеризація.** Маска піддається термічному або УФ-випромінюванню для затвердіння.

Для автомобільних інверторів часто використовуються паяльні маски темного кольору (зеленого, чорного), які мають підвищену стійкість до механічних і термічних впливів.

### **Нанесення захисного покриття провідників**

Для покращення паяльних властивостей та захисту провідників від корозії на їхню поверхню наносять спеціальне покриття. Це може бути:

- **Олов'яно-свинцеве покриття** (у традиційних технологіях).
- **Безсвинцевий припій** (відповідає стандарту RoHS).
- **Гальванічне покриття золотом, сріблом або нікелем.**

### **Свердління отворів**

Отвори на платі створюються для монтажу компонентів і забезпечення з'єднання між шарами у багатошарових платах. Процес включає:

1. **Свердління.** Отвори свердляться за допомогою високоточних CNC-машин.

2. **Металізація.** У отвори наноситься металеве покриття (зазвичай мідь) для забезпечення електричного з'єднання між шарами.

### **Тестування електричних з'єднань**

На цьому етапі проводиться перевірка електричної цілісності провідників і відсутності коротких замикань. Для цього використовується спеціальне обладнання, яке тестує всі з'єднання відповідно до проєкту плати.

### **Фінальне різання та маркування**

Після завершення основних процесів друкованої плати обрізають до заданих розмірів і маркують. Маркування включає нанесення серійного номера, логотипу виробника та іншої інформації [18].

### **Контроль якості**

Завершальний етап виготовлення друкованої плати — це перевірка її відповідності стандартам якості. Контроль включає:

- Візуальну перевірку на наявність дефектів, таких як подряпини або порушення доріжок.
- Тестування механічної міцності.
- Перевірку термостійкості.

### **Упаковка та зберігання**

Після перевірки плати упаковуються в антистатичні пакети для захисту від пилу, вологи та електростатичних розрядів. Плати зберігаються у контрольованих умовах, щоб уникнути корозії або інших пошкоджень перед монтажем компонентів.

### **Підсумок**

Процес виготовлення друкованої плати — це складний технологічний ланцюг, який вимагає точності на кожному етапі. Від вибору матеріалів до контролю якості кожен етап спрямований на забезпечення надійності та ефективності плати, що особливо важливо для інверторів напруги, які працюють у складних умовах автомобільної експлуатації. Правильний підхід до виготовлення дозволяє створити продукт, який відповідає найвищим стандартам якості та довговічності.



### 4.3. Тестування готового пристрою.

Тестування готового пристрою є критичним етапом розробки інвертора напруги, який дозволяє перевірити відповідність пристрою технічним вимогам, виявити можливі недоліки та оцінити його роботу в реальних умовах. Цей процес охоплює як перевірку окремих компонентів і підсистем, так і комплексне тестування всього пристрою. Основна мета тестування — забезпечити надійність, ефективність і безпеку роботи інвертора в умовах експлуатації автомобільної бортової системи.

#### Етапи тестування

##### 1. Візуальний контроль

Перед початком функціональних тестів проводиться візуальний огляд пристрою для перевірки якості збірки:

- Перевіряється цілісність друкованої плати, відсутність пошкоджень або подряпин на провідниках.
- Оцінюється якість пайки: паяні з'єднання мають бути однорідними, без пористості, надлишків припою або тріщин.
- Перевіряється правильність монтажу компонентів, зокрема їхнє розташування відповідно до схеми.

##### 2. Електричне тестування

На цьому етапі тестуються всі електричні з'єднання пристрою. Це включає:

- **Тестування на цілісність провідників.** Використовуються мультиметри або спеціальні тестери для перевірки всіх електричних ланцюгів на наявність обривів.
- **Перевірка на короткі замикання.** Проводиться аналіз між доріжками та контактами, щоб виявити можливі короткі замикання, що можуть виникнути через дефекти пайки або друкованої плати.

### 3. Перевірка вхідних параметрів

Після завершення електричних тестів пристрій підключається до джерела живлення для перевірки його роботи в нормальних умовах. На цьому етапі оцінюються такі параметри:

- **Вхідна напруга:** відповідність вказаним технічним характеристикам (наприклад, 12 В для автомобільних інверторів).
- **Струм споживання в режимі холостого ходу:** оцінюється мінімальне споживання енергії пристроєм у відсутності навантаження.

### 4. Функціональне тестування

Функціональне тестування спрямоване на перевірку основних функцій інвертора:

- **Вихідна напруга.** Використовується осцилограф або вольтметр для вимірювання амплітуди вихідної напруги, яка має відповідати заявленим параметрам (наприклад, 19,5 В).
- **Коефіцієнт корисної дії (ККД).** Вимірюється споживана потужність на вході та корисна потужність на виході, щоб розрахувати ККД.

### 5. Тестування навантаженням

Проводиться підключення різних типів навантажень для перевірки роботи пристрою в різних режимах:

- **Резистивне навантаження.** Використовуються лампи розжарювання, нагрівальні елементи або резистори, щоб оцінити стабільність вихідної напруги.

Під час тестування навантаженням аналізуються:

- Стабільність вихідної напруги при зміні рівня навантаження.
- Поведінка пристрою під час підключення та відключення навантаження.
- Реакція на короткочасне перевантаження.

## 6. Тепловий аналіз

Теплове тестування є критичним для оцінки роботи інвертора в умовах підвищених температур. Воно включає:

- Вимірювання температури силових компонентів (транзисторів, діодів, дроселів) за допомогою інфрачервоного термометра або тепловізора.
- Оцінку ефективності системи охолодження: перевіряється, чи відповідає температура компонентів допустимим значенням.
- Імітацію тривалого навантаження для перевірки стабільності роботи при підвищеній температурі.

## 7. Довготривале тестування

Для оцінки довговічності проводиться довготривале тестування, під час якого пристрій працює в нормальних і екстремальних умовах протягом тривалого часу. Це дозволяє виявити потенційні слабкі місця конструкції та передбачити термін служби пристрою.

### Аналіз результатів тестування

Результати всіх тестів документуються для подальшого аналізу. Якщо під час тестування виявлені недоліки або несправності, вони виправляються, після чого проводиться повторне тестування. Остаточний звіт містить інформацію про відповідність пристрою технічним вимогам, його надійність і можливі рекомендації щодо вдосконалення.

Тестування готового інвертора напруги — це багатоступеневий процес, який забезпечує високу якість, надійність і відповідність пристрою стандартам. Виконання детальних тестів дозволяє гарантувати стабільну роботу інвертора в реальних умовах експлуатації, забезпечуючи безпеку та довговічність пристрою [10].

Аналіз ефективності пристрою (ККД): Вимірюємо:

$$\text{Вхідна потужність } P_{in} = U_{in} \cdot I_{in}$$

$$\text{Вихідна потужність } P_{out} = U_{out} \cdot I_{out}$$

Ефективність:  $\eta = (P_{out} / P_{in}) \cdot 100\%$

При  $P_{out} = 60 \text{ Вт}$ ,  $P_{in} = 65 \text{ Вт}$ :

$\eta = (80 / 89) \cdot 100 \approx 90\%$

#### 4.4. Аналіз результатів тестування.

Аналіз результатів тестування є завершальним етапом у процесі розробки інвертора напруги. Його мета полягає у всебічній оцінці роботи пристрою, визначенні відповідності технічним вимогам, виявленні потенційних проблем і формуванні рекомендацій для вдосконалення конструкції. Цей процес включає аналіз даних, отриманих під час різних видів тестування: функціонального, електричного, теплового, довготривалого, а також перевірки захисних механізмів і електромагнітної сумісності.

##### Загальна оцінка функціональності

Результати функціонального тестування дають змогу визначити, чи відповідає інвертор заявленим технічним характеристикам. Основні аспекти, які аналізуються:

- **Стабільність вихідної напруги.** Показники вимірюваної напруги мають відповідати заданим значенням.

##### Аналіз електричних параметрів

Перевірка електричних параметрів охоплює аналіз вхідної напруги, струму споживання та ККД пристрою:

- **Споживання струму в режимі холостого ходу.** Цей параметр визначає енергоефективність пристрою без навантаження. Високий рівень споживання свідчить про втрати енергії в силових компонентах, що потребує оптимізації.

- **Коефіцієнт корисної дії (ККД).** Результати вимірювань вхідної та вихідної потужності дозволяють розрахувати ККД пристрою. Якщо ККД нижчий від очікуваного (наприклад, менше 90%), необхідно проаналізувати втрати енергії в силових ключах, дроселях або трансформаторі.

- **Стійкість до змін вхідної напруги.** Інвертор повинен забезпечувати стабільну роботу при зміні вхідної напруги (наприклад, у межах 10-15 В для автомобільної бортової системи). Нестабільність у таких умовах може вказувати на недостатню ефективність системи стабілізації [17].

### **Аналіз довготривалого тестування**

Результати довготривалого тестування дозволяють оцінити надійність пристрою в реальних умовах експлуатації:

- **Час до відмови.** Показує, скільки часу пристрій може працювати без збоїв у стандартних умовах.

- **Стійкість до циклічних змін температури.** Інвертор перевіряється на стабільність роботи при циклічному нагріванні та охолодженні, що імітує реальні умови роботи.

- **Стійкість до вібрацій.** Аналізується робота пристрою під впливом вібрацій, характерних для автомобільного середовища. Якщо під час тесту виявляються від'єднання компонентів або пошкодження пайки, це свідчить про необхідність вдосконалення механічної міцності конструкції.

### **Оцінка електромагнітної сумісності (ЕМС)**

Результати тестування на електромагнітну сумісність дозволяють оцінити рівень випромінювання електромагнітних завад і стійкість пристрою до зовнішніх впливів:

- **Випромінювання.** Якщо рівень електромагнітного випромінювання перевищує допустимі норми, це може спричинити перешкоди для інших електронних пристроїв. У таких випадках необхідно вдосконалити екранування або оптимізувати трасування друкованої плати.

- **Стійкість до завад.** Перевіряється, чи здатний інвертор працювати в умовах імпульсних перенапруг, характерних для автомобільних систем.

### **Рекомендації щодо вдосконалення**

На основі аналізу результатів тестування формуються рекомендації щодо вдосконалення пристрою:

- Оптимізація конструкції друкованої плати для покращення тепловідведення та електромагнітної сумісності.
- Підбір більш ефективних компонентів, таких як транзистори з меншим опором у відкритому стані.
- Вдосконалення захисних механізмів для забезпечення максимальної безпеки пристрою.
- Додавання додаткових заходів охолодження, наприклад, вентиляторів або теплових трубок.

Аналіз результатів тестування дозволяє всебічно оцінити роботу інвертора напруги, виявити недоліки та визначити напрямки для покращення конструкції. Правильно проведений аналіз забезпечує високу якість, надійність і безпеку пристрою, що є критично важливим для його успішної роботи в автомобільних системах [28].

#### 1. Аналіз стабільності вихідної напруги:

Задаємо вхідну напругу:  $U_{in} = 12 \text{ В}$ ; вихідна напруга:  $U_{out} = 19,5 \text{ В}$ .

Відхилення вихідної напруги визначається як:

$$\Delta U_{out} = (U_{out(\text{макс})} - U_{out(\text{номін})}) / U_{out(\text{номін})} \cdot 100\%.$$

При вимірюваннях отримано  $U_{out(\text{макс})} = 19,8 \text{ В}$ :

$$\Delta U_{out} = (19,8 - 19,5) / 19,5 \cdot 100 \approx 1,5\%.$$

#### 3. Перевірка теплових втрат на діоді Шотткі VD1:

Втрати на діоді визначаються як:  $P_D = I_{out} \cdot V_f$ .

При  $I_{out} = 4 \text{ А}$ ,  $V_f \approx 0,5 \text{ В}$  для діода Шотткі:

$$P_D = 4 \cdot 0,5 \approx 2 \text{ Вт}.$$

#### 4. Ефективність перетворювача при різних навантаженнях:

Для тестування було обрано навантаження 50%, 75%, 100%.

Таблиця 4.1. Вхідна та вихідна потужність при кожному навантаженні:

Навантаження (%)	P_in (Вт)	P_out (Вт)	ККД (%)
50	45	40	88.9
75	68	61	89.7
100	89	80	89.9

Загальний аналіз показав стабільну ефективність пристрою на рівні ~90%.

Піковий струм через дросель:

$$I_L = 1.2 / 2 + 4 \approx 4.6 \text{ A.}$$

## Загальні висновки по роботі

У ході виконання роботи було досягнуто основної мети дослідження — розроблено автономний інвертор напруги для живлення електронних пристроїв від бортової мережі автомобіля. Проведені дослідження та розрахунки дозволили вирішити поставлені завдання, забезпечити відповідність конструкції сучасним вимогам енергоефективності, надійності та технологічності.

На основі аналізу сучасних рішень у галузі інверторів напруги було визначено ключові тенденції та технології, які впливають на ефективність та продуктивність пристроїв. Це дозволило обґрунтувати вибір схемотехнічних і конструктивних рішень, які забезпечують високий коефіцієнт корисної дії, стабільність роботи та відповідність вимогам автомобільних систем.

Розроблена принципова електрична схема інвертора напруги включає оптимально підбрану елементну базу, яка забезпечує ефективне перетворення напруги з мінімальними втратами. Було проведено детальне проектування друкованої плати, що включає компонування елементів, трасування доріжок і розрахунок їхньої здатності витримувати струмові навантаження. Виконано розрахунки, які підтвердили відповідність ширини доріжок, товщини мідного шару та відстаней між провідниками стандартам безпеки та експлуатаційним вимогам.

Під час моделювання роботи інвертора в спеціалізованому програмному забезпеченні було перевірено працездатність схеми та її основні характеристики. Отримані результати підтвердили відповідність вихідних параметрів пристрою заявленим вимогам: стабільна вихідна напруга 19,5 В, високий ККД.

Окрему увагу приділено аналізу теплових і механічних характеристик плати. Проведено конструктивно-технологічний розрахунок, що враховує теплові навантаження, розподіл компонентів і забезпечення їхньої довговічності в умовах експлуатації. Було виконано розрахунок надійності паяних з'єднань з урахуванням термічних і механічних навантажень, що підтвердило стабільність роботи пристрою за умов автомобільної бортової мережі.

В ході роботи також розроблено модель друкованої плати та запропоновано рекомендації для її виготовлення в умовах серійного виробництва. Зокрема,



враховано технологічні обмеження, що забезпечують простоту виготовлення та монтажу плати.

Таким чином, результати роботи підтверджують ефективність запропонованих рішень для створення інвертора напруги. Розроблений пристрій відповідає технічним і експлуатаційним вимогам, є надійним у роботі, енергоефективним і технологічно адаптованим для масового виробництва. Рекомендації щодо вдосконалення конструкції можуть бути використані для подальшої оптимізації пристрою та його адаптації до нових вимог і стандартів.

## Перелік посилань

1. Advanced Power Electronics and Drives / Ed. by R. Krishnan. – Springer, 2019. – 590 p.
2. Advances in Electronic Circuit Design / Ed. by H. Amano. – Springer, 2021. – 450 p.
3. EN 60950-1:2013. Safety of information technology equipment. Part 1: General requirements. – European Standardization Organization, 2013.
4. Energy Efficiency in Power Electronics / Ed. by A. Choudhury. – Springer, 2021. – 348 p.
5. International Standard IEC 62368-1:2018. Audio/video, information and communication technology equipment – Safety requirements. – International Electrotechnical Commission, 2018.
6. IPC-2221. Generic Standard on Printed Board Design. – Association Connecting Electronics Industries, 2021. – 156 p.
7. MATLAB Simulink для моделювання інверторів напруги: навчальний посібник / О.М. Ткаченко, С.М. Лещенко. – Київ: НУХТ, 2021. – 198 с.
8. MATLAB для інженерів: навчальний посібник / Під ред. С.І. Іванова. – Київ: НТУУ "КПІ", 2021. – 210 с.
9. Power Electronics for Renewable Energy Systems / Ed. by B. Jayant Baliga. – Academic Press, 2021. – 658 p.
10. Rahman, M. Power Electronics Handbook. – Academic Press, 2020. – 1058 p.
11. Sedra, A.S., Smith, K.C. Microelectronic Circuits. – Oxford University Press, 2020. – 1376 p.
12. Stojanovic, M., Leksell, M. High-Power Electronics Design for Automotive Applications. – Wiley, 2019. – 432 p.
13. Sze, S.M. Semiconductor Devices: Physics and Technology. – Wiley, 2012. – 592 p.
14. Venkataraman, R. Power Electronics: Principles and Applications. – Pearson, 2020. – 478 p.

15. Wright, A., Christopoulos, C. Electrical Power System Protection. – Springer, 2017. – 355 p.
16. Акімов В.О., Кравчук І.В. Основи теплового аналізу в силовій електроніці: навчальний посібник. – Київ: НТУУ "КПІ", 2021. – 188 с.
17. Актуальні аспекти електромагнітної сумісності в силовій електроніці / А.В. Іванов, О.П. Ткаченко. – Київ: Академперіодика, 2020. – 154 с.
18. ДСТУ 3321:2003. Друковані плати. Загальні технічні умови. – Київ: Держспоживстандарт України, 2003. – 47 с.
19. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпека машин. Електрообладнання машин. Частина 1: Загальні вимоги. – Київ: Держспоживстандарт України, 2015. – 154 с.
20. ДСТУ EN 61000-6-2:2016. Електромагнітна сумісність (ЕМС). Стійкість до перешкод. Промислове середовище. – Київ: Держспоживстандарт України, 2016. – 72 с.
21. ДСТУ ІЕС 60050-151:2001. Міжнародний електротехнічний словник. Частина 151. Електронні схеми. – Київ: Держстандарт України, 2001. – 90 с.
22. ДСТУ ІЕС 60571:2003. Електронні пристрої для рухомого складу. Загальні технічні вимоги. – Київ: Держспоживстандарт України, 2003. – 86 с.
23. Електроніка для інженерів: навчальний посібник / За ред. А.В. Ковалю. – Харків: ХНУ ім. Каразіна, 2020. – 452 с.
24. Закон України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/124-19>
25. Керівництво користувача Altium Designer для проектування друкованих плат. – Київ: IT Solutions, 2022. – 112 с.
26. Книш В.І., Бойко О.С. Конструктивні основи електронних систем: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2021. – 289 с.
27. Методичні рекомендації з проектування друкованих плат / Під ред. Ю.М. Савченка. – Харків: НТУ "ХПІ", 2021. – 120 с.
28. Методичні рекомендації щодо розробки інверторів напруги для автомобільних систем / В.М. Дроздов, І.В. Петров. – Київ: НТУУ "КПІ", 2020. – 124 с.

29. Моделювання та аналіз електронних схем: підручник / Під ред. О.В. Іванова. – Київ: Вища школа, 2021. – 256 с.
30. Назаренко В.А. Основи проектування силової електроніки: Навчальний посібник. – Київ: НТУУ "КПІ", 2018. – 314 с.
31. Основи силової електроніки: підручник / За ред. І.О. Пономаренка. – Львів: Львівська політехніка, 2020. – 326 с.
32. Програмне забезпечення для проектування друкованих плат / Під ред. О.В. Миронова. – Львів: Видавництво ЛНУ, 2020. – 145 с.
33. Сертифікація електронних пристроїв в Україні / Під ред. О.М. Ткаченка. – Київ: Наукова думка, 2020. – 95 с.
34. Шумило О.М., Гайдай В.О. Основи електроніки: Навчальний посібник. – Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2019. – 318 с.