

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіотехнологій і технічного захисту інформації  
(повна назва)

Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

### РОЗРОБКА СТАБІЛІЗОВАНОГО ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТУ (тема)

Виконав:  
студент II курсу, групи ІРТМ-22-1  
Кайко В.О.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекоунікації та радіотехніка  
(код і повна назва спеціальності)

Освітня програма Інформаційні радіотехнології  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Зарудний О.А.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

В.о. зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Зарудний О.А.  
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційних радіо технологій і технічного захисту інформації

Кафедра Радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(код і повна назва)

Освітня програма Радіоелектроні пристрої, системи та комплекси  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Кайко Вячеславу Олександровичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка стабілізованого джерела електроживлення для лабораторного макету

затверджена наказом університету від 20.10.2023 р. № 1221Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 8 січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи:

літературні джерела та електронні ресурси за темою кваліфікаційної роботи

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

перелічити назви всіх розділів роботи від вступу до додатків (див. зміст)

Вступ. 1 ОГЛЯД ВІДОМИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ. 2 ВИБІР І ОБГРУНТУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ 3. ВИБІР, ОБГРУНТУВАННЯ І РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ВУЗЛІВ ПРИСТРОЮ. Висновки. Перелік джерел посилання. Додатки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) \_\_\_\_\_

Комп'ютерна презентація

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основна частина	доц. Зарудний О.А.		

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення зі завданням. Уточнення ТЗ	01.09.2023	вик.
2	ОГЛЯД ВІДОМИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ	18.09.2023-29.09.2023	вик.
3	ВИБІР І ОБГРУНТУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ	30.09.2023-20.10.2023	вик.
4	ВИБІР, ОБГРУНТУВАННЯ І РОЗРАХУНОК	21.10.2023-30.10.2023	вик.
5	Оформлення презентаційного матеріалу, підготовка до захисту у ЕК	31.10.2023-15.12.2023	вик.
6	Представлення роботи на кафедрі	8.01.2024	вик.

Дата видачі завдання 20 жовтня 2023 р.

Студент \_\_\_\_\_ (підпис) Кайко В.О. (прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ (підпис) доц. Зарудний О.А. (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи магістра містить 74 сторінок тексту, 33 рисунків, 18 джерел посилання 2 додатки.

### ДЖЕРЕЛО. ЖИВЛЕННЯ. КОЕФІЦІЄНТ. МОДУЛЯЦІЯ. СТАБІЛІЗАТОР. НАПРУГА.

Предметом дослідження є джерело вторинного електроживлення.

Мета роботи – розробка стабілізованого джерела електроживлення для лабораторного макету.

У наслідок виконаної роботи було розроблено джерело електроживлення, розраховані вузли ДЖ, та проведено програмне моделювання.

Результати дослідження можуть бути використані для виготовлення джерела вторинного електроживлення.

## ABSTRACT

The explanatory note of the master's thesis contains 74 pages of text, 33 figures, 18 reference sources.

SOURCE. POWER. COEFFICIENT. MODULATION.

STABILISER. VOLTAGES.

The subject of research is a source of secondary power supply.

The purpose of the work is to develop a stabilized power source for a laboratory model.

As a result of the work performed, a power supply source was developed, the DH nodes were calculated, and software modeling was carried out.

The results of the research can be used for the production of a source of secondary power supply.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧОК, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І СКОРОЧЕНЬ..	6
ВСТУП.....	7
1 ОГЛЯД ВІДОМИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ .....	8
1.1 Класифікація джерел живлення.....	8
1.2 Основні характеристики ДВЕЖ .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 20
1.3 Порівняльний аналіз лінійних та імпульсних ДЖ	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 22
2 ВИБІР І ОБГРУНТУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ .....	26
2.1 Опис роботи пристрою.....	28
2.2 . Ескізний розрахунок пристрою .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 29
2.3 Визначення топології інвертора .....	30
3 ВИБІР, ОБГРУНТУВАННЯ І РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ВУЗЛІВ ПРИСТРОЮ .....	36
3.1 Випрямляч.....	36
3.2 Розрахунок трансформатора.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 37
3.3 Вихідний фільтр .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 41
3.4 Розрахунок ємності конденсатора вихідного фільтра	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 45
3.5 Вибір ШІМ контролера .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 46
3.6 Вибір мікросхеми драйвера керування	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 53
4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КЛЮЧОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІНВЕРТОРА З НАСТУПНИМ ВИПРЯМЛЕННЯМ.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 57
ВИСНОВКИ .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 63
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	6564
Додаток А – КОПІЇ ПРЕЗЕНТАЦІЇ.....	66

Додаток Б – ВІДОМОСТІ АТЕСТАЦІЙНОГО ПРОЕКТУ.....	73
--	----

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧОК, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І СКОРОЧЕНЬ

ДЖ – джерело живлення

ДВЕ – джерело вторинного електроживлення

ЕРС – електрорушійна сила

ККД – коефіцієнт корисної дії

РЕК – радіоелектронний комплекс

АС – змінний струм

ДС – постійний струм

## ВСТУП

На сучасний момент майже всі пристрої радіоелектроніки вимагають одного або декількох автономних джерел живлення. На ринку доступний широкий вибір різноманітних джерел живлення, тому важливим етапом є аналіз вимог до таких джерел. Зазвичай отримати необхідне джерело електроживлення, яке відповідає вимогам, не представляє складнощів. Проте при розробці конкретної електронної апаратури може бути доцільним використовувати спеціально створені джерела живлення.

Індивідуальні вимоги до джерел живлення визначаються експлуатаційними характеристиками конкретного електронного пристрою. Наприклад, при створенні джерела живлення для пристроїв, які працюють у умовах значних електричних наведень через мережі живлення, необхідно створювати спеціальні джерела зі специфічною напругою, струмом, полярністю та допустимою стійкістю до нестабільності. Додаткові вимоги, такі як умови експлуатації (вологість, температура, тиск), також враховуються.

У таких випадках застосовують джерела вторинного електроживлення, які використовують імпульсне перетворення та керування. Ці джерела широко застосовуються в багатьох сучасних електронних пристроях. Порівняно з традиційними лінійними схемами електроживлення, імпульсні схеми відрізняються підвищеними вимогами до фільтрації високочастотних складових на виході, що призводить до їхньої збільшеної складності та вартості. Проте цей недолік не є критичним, коли важливі високі експлуатаційні характеристики джерела живлення.

Розроблене джерело живлення призначене для живлення лабораторного обладнання.

Мета - розробка стабілізованого джерела електроживлення для лабораторного макету.

Задачі - розробка стабілізованого джерела електроживлення для лабораторного макету

## 1 ОГЛЯД ВІДОМИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

### 1.1 Класифікація джерел живлення

Практично усі радіоелектронні пристрої (РЕП) вимагають одного чи кількох джерел живлення. Багато компаній проводять дослідження в галузі первинних та вторинних джерел електроживлення, виробляють їх у значних обсягах та постачають на ринок. Зазвичай, на сьогоднішній день, придбання необхідного джерела електроживлення не є проблемою. В той же час, при розробці будь-якої радіоапаратури також вивчається і розробляється відповідне джерело живлення.

Для забезпечення роботи більшості електронних пристроїв потрібне наявність одного чи декількох джерел живлення постійного струму.

Джерела живлення поділяються на два основних типи: джерела первинного електроживлення, які здійснюють перетворення енергії з неелектричних форм в електричну, та джерела вторинного електроживлення, що використовують енергію від джерела первинного електроживлення (або системи електропостачання). Останні призначені для формування необхідних напруг для роботи електронних елементів із заданими характеристиками [1].

До джерел первинного електроживлення можна віднести:

- хімічні джерела струму (гальванічні елементи, батареї та акумулятори);
- термобатареї;
- термоелектричні перетворювачі;
- фотоелектричні перетворювачі (фотоелементи та сонячні батареї);
- паливні елементи;
- біохімічні джерела струму;
- атомні елементи;
- електромеханічні генератори. [2]

Хімічні джерела струму широко використовуються для живлення невеликих пристроїв та апаратури, які потребують автономного живлення.

Вихідна напруга цих джерел майже не містить змінної складової пульсацій, але значною мірою залежить від величини витоку струму в навантаження та ступеня розряду. Саме через це в галузях, де важлива стабільність напруги живлення, хімічні джерела струму застосовуються разом із стабілізаторами напруги. Крім того, батареї та акумулятори розглядаються як додаткові та резервні джерела енергії для пристроїв, які живляться від мережі змінного струму.

Термобатареї складаються з термопар, які з'єднані послідовно. Ці джерела живлення застосовуються для живлення пристроїв невеликої потужності. Простий термоелектричний генератор представляє собою батарею термопар, де один кінець спаєв нагрівається, а інший має низьку температуру. Це створює термо-ЕРС, і в зовнішньому ланцюгу виникає електричний струм.

Термоелектричні перетворювачі – це пристрої, що складаються з термопар, виготовлених із різних металів, та використовуються як термочутливі елементи. Вони призначені для вимірювання температур у діапазоні від мінус 270 до плюс 2500°C. Термопара представляє собою два провідники із різних матеріалів, які з'єднані на одному кінці і утворюють частину пристрою, що використовує термоелектричний ефект для вимірювання температури. Перетворення теплової енергії в електричну відбувається через різницю температур на електродах пристрою. На одному кінці електрони мають більше енергії та швидкості порівняно з іншим кінцем. Це призводить до руху електронів від гарячого кінця до холодного, створюючи електричний струм. Термоелектронні перетворювачі можна класифікувати в залежності від температури нагрівання катода на низькотемпературні (1200 - 1600 °C) і помірно температурні (1900 - 2000 °C). Ефективність конверсії енергії у помірно температурних перетворювачах перевищує ефективність низькотемпературних більше ніж у 2 рази, досягаючи 20%.

Фотоелектричні перетворювачі виконують роль первинних вимірювальних засобів, перетворюючи теплову та світлову енергію сонячних променів у електричну. Сонячні батареї складаються з ряду фотоелементів, які конвертують випромінювану енергію в електричну.

Ці фотоелектричні перетворювачі знаходять широке застосування як джерела електроенергії для живлення радіоапаратури, радіотехнічної та телеметричної апаратури на земних супутниках та автоматичних міжпланетних станціях. Сонячні батареї є простими у використанні, мають великий термін служби та працюють в широкому діапазоні температур.

Паливні елементи забезпечують перетворення енергії хімічних реакцій у електричну енергію шляхом окислювально-відновних процесів, схожих на реакції горіння палива. У цих елементах окислювач подається ззаду, що відрізняє їх від горіння палива. Важливою перевагою цієї технології є високий ККД, оскільки енергія відразу перетворюється в електрику без проміжних механічних пристроїв. У паливних елементах в якості окислювача використовується кисень, забезпечуючи ефективне використання навколишнього кисню. Паливо в цих елементах - водень. Хімічна реакція в паливних елементах відбувається при взаємодії активних речовин, що подаються на електроди в різних агрегатних станах (рідких, твердих або газоподібних).

Біохімічні джерела струму можна розглядати як родзину паливних елементів, оскільки у них відбуваються аналогічні окислювально-відновні процеси. Основна відмінність між біохімічними елементами та паливними полягає в тому, що активні речовини (або одна з них) утворюються за участю бактерій чи ферментів із різних вуглеводів та вуглецевих сполук.

Атомні елементи знаходять широке застосування в сучасності, особливо для живлення невеликої апаратури. Їхні конструкції різноманітні і залежать від призначення та принципу дії. Елементи, які використовують радіоактивне випромінювання, мають металевий стрижень як внутрішній електрод, на якому розташований радіоактивний ізотоп стронцію-90. Другий електрод може мати металеву оболонку, і між ними розташований твердий діелектрик чи вакуум. Під дією  $\beta$ -променів на електродах виникає заряд, і напруга в таких елементах може досягати кількох кіловольт. Атомні елементи, де принцип дії заснований на контактній різниці потенціалів, використовують електроди у вигляді пластинок з різнорідних матеріалів. У паливних елементах, які використовуються у

біохімічних процесах, електроди можуть бути покриті різними каталітичними матеріалами.

Атомні елементи, що опромінюються, використовують радіоактивні речовини, нанесені на поверхню напівпровідника (кремнію). Під впливом вибитих електронів утворюється електричний струм, забезпечуючи електричну енергію. У таких елементах внутрішній опір та ККД можуть досягати значних значень. Недоліком є обмежений термін служби через вплив радіації на напівпровідник.

Електромеханічні генератори є пристроями, які здатні перетворювати механічну енергію на електричну. Ці генератори класифікуються за типом струму, який вони виробляють, на генератори постійного та змінного струму. За видом вихідної напруги вони можуть бути однофазними або багатофазними. Трифазні синхронні та асинхронні генератори є найбільш поширеними і використовують обертове магнітне поле.

Синхронні машини використовуються при синхронній частоті, коли частота обертання магнітного поля співпадає з частотою обертання ротора. У таких генераторах процес перетворення енергії відбувається при точній синхронізації частот. З іншого боку, асинхронні машини використовують асинхронну частоту, коли частота обертання ротора відрізняється від частоти обертання магнітного поля. Такий процес перетворення енергії застосовується в асинхронних генераторах, де відсутня точна синхронізація частот.

Пряме застосування первинних джерел живлення утруднюється тим, що вихідна напруга в більшості не піддається регулюванню, а також його низька стабільність. Як би там не було для живлення радіоелектронної апаратури в переважній більшості випадків потрібна високостабільна напруга з різними номінальними значеннями – від одиниць вольт до кількох сотень вольт. [3]

Джерела вторинного електроживлення класифікуються за такими параметрами.

За видом використовуючого живильного кола ДВЕЖ поділяються на три типи:

- одержують електричну енергію від однофазної мережі змінного струму;
- одержують електричну енергію від трифазної мережі змінного струму;
- отримують електричну енергію від автономного джерела постійного струму.

Джерела змінної напруги, як правило, виробляють напругу гармонійної форми з фіксованою частотою 50, 400 або 1000 герц і фіксованим значенням 110, 127, 220 або 380 вольт. Як джерела постійної напруги виступають акумулятори або сонячні батареї. Вони, як правило, також мають фіксовану напругу з ряду: 6, 12, 24 або 48 вольт

За напругою на навантаженні ДВЕЖ ділять:

- низької напруги (до 100 В);
- середньої напруги (від 100 до 1000 В);
- Висока напруга (понад 1000 В).

За потужністю навантаження ДВЕЖ можна поділити на:

- малу потужність (до 100 Вт);
- середньої потужності (від 100 до 1000 Вт);
- велику потужність (понад 1000 Вт).

За родом струму навантаження ДВЕЖ можна поділити на три види:

- з виходом на змінному струмі;
- з виходом на постійному струмі;
- з виходом на змінному та постійному струмі.

Відштовхуючись від класифікації за видом ланцюга, що використовується, і роду струму навантаження ДВЕЖ, можна виділити:

– інверторні - застосовуються для перетворення змінної напруги в постійну напругу, а також постійної напруги первинного джерела в змінну напругу, що живить навантаження. Це означає, що вони змінюють як значення, а й рід вихідного напруги. Наприклад, до інверторів можна віднести випрямляч та електричний генератор;

– конверторні – застосовуються перетворення напруги одного значення на інше. Приклад: конвертори постійної напруги електронні стабілізатори

постійної напруги, конвертори змінної напруги трансформатори. Будь-який конвертор може містити в собі як інвертор і навпаки.

За кількістю вихідних каналів ДВЕЖ ділять:

- одноканальні, що мають один вихід постійного або змінного струму;
- багатоканальні, що мають дві або більше вихідні напруги.

Якщо в будь-якому каналі застосовується індивідуальний стабілізатор вихідної напруги, тоді це багатоканальний ДВЕЖ з індивідуальною стабілізацією. У разі, коли для стабілізації всіх вихідних напруг застосовується вихідна напруга тільки одного джерела, в такому випадку подібні джерела називають ДВЕЖ з груповою стабілізацією.

За стабільністю напруги на навантаженні ДВЕЖ ділять на:

- стабілізовані;
- нестабілізовані.[4]

Традиційним блоком живлення є трансформаторний блок живлення (ТБЖ). Він складається з понижуючого трансформатора або автотрансформатора, у якого первинна обмотка розрахована на певну напругу. На наступному етапі встановлюється випрямляч, який змінює змінну напругу на постійну.

У схемі можуть бути встановлені фільтри щоб стабілізатор напруги та струму. На рисунку 1.1 зображена схема найпростішого трансформаторного БЖ з двонапівперіодним випрямлячем.

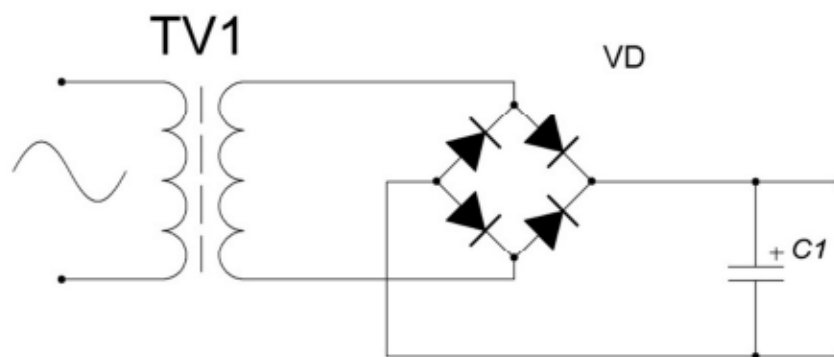


Рисунок 1.1 - Схема найпростішого трансформаторного БЖ з двонапівперіодним випрямлячем

Переваги трансформаторних БЖ

- висока надійність;
- проста конструкція;
- відсутність радіоперешкод, що створюються (на відміну від імпульсних, що створюють перешкоди за рахунок гармонійних складових)

Недоліки трансформаторних блоків живлення:

- металомісткість;
- невисокий ККД 50-60%;
- велика вага та габарити, особливо при великій потужності

Надійність джерела живлення з безтрансформаторним входом насамперед визначається коефіцієнтом запасу за допустимим рівнем напруги та струму для силових елементів схеми (транзисторів, діодів, конденсаторів).

Важливим показником джерела живлення є його ККД. Чим вище ККД тим менше кількості тепла, що виділяється в джерелі. Це дозволяє зменшити масу та габарити джерела, а також споживання електричної енергії.

Для конвертації змінного струму в постійний використовуються випрямлячі. Вони складаються з одного чи декількох елементів, що з'єднані певним чином, і мають односторонню провідність, яку забезпечують вентиля. Змінний струм трансформується в однополярний або пульсуючий за допомогою цих вентилів. Такий струм одночасно містить як постійні, так і змінні компоненти. Для зменшення змінних компонент в схемі випрямляча використовується згладжуючий фільтр. Випрямляч з фільтром згладжування підключається безпосередньо до мережі змінного струму.

Всі випрямлячі можуть бути розділені на дві групи: некеровані та керовані. Вони характеризуються або повною потужністю, що споживається від вхідної мережі, або коефіцієнт корисної дії.

Нерегульовані випрямлячі є нестабілізуючими функціональними вузлами вторинного електроживлення - напруга на їх виході пропорційна напрузі живлення і істотно залежить від струму навантаження.

Нерегульовані випрямлячі залишаються одним з найбільш поширених функціональних вузлів, оскільки переважна частина ланцюгів живлення будь-

якої радіоелектронної апаратури споживає електричну енергію як енергії постійного струму, а найдоступнішим з первинних джерел енергії є промислова електрична мережа змінного струму частотою 50 Гц.

Нерегульовані випрямлячі виконуються на напівпровідникових діодах за структурною схемою, наведеною на рисунку 1.2. У цьому потужність неспроможна регулюватися.



Рисунок 1.2 - Структурна схема нерегульованого випрямляча

Регульовані випрямлячі виконуються на тиристорах. З збільшенням фазового кута вихідна випрямлена напруга зменшується. Фазовий кут включення тиристорів здійснюється від змінної напруги вхідної мережі живлення. Потужність схеми можна регулювати від 0 до 100%. На рисунку 1.3 показана структурна схема регульованого випрямляча



Рисунок 1.3 - Структурна схема регульованого випрямляча

У схемі тиристори одночасно перетворюють змінну напругу на постійне і регулюють рівень вихідної напруги.

Основні схеми випрямлення однофазної напруги змінного струму наведені на рисунку 1.4: однонапівперіодна (рисунку 1.4.а), двонапівперіодна бруківка (рисунку 1.4.в).

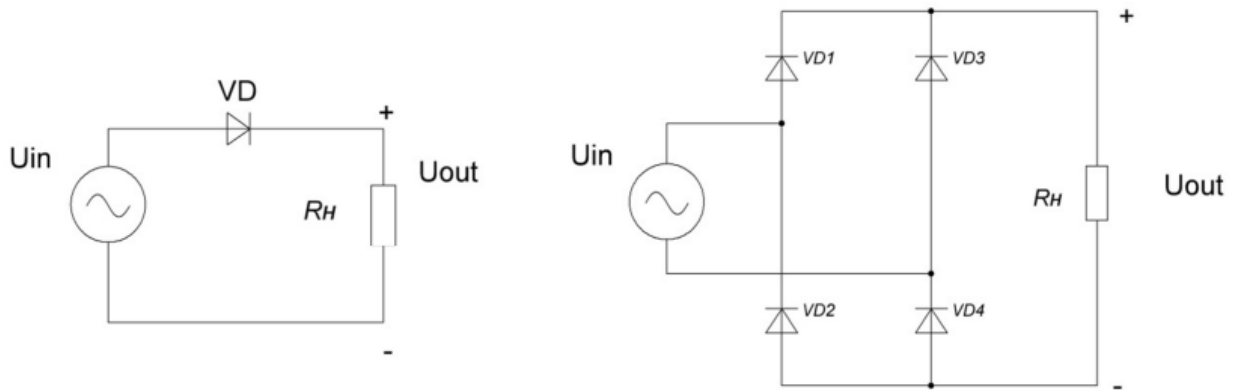


Рисунок 1.4. - Основні електричні схеми випрямлення: однонапівперіодна (а), двонапівперіодна бруківка (в)

В однофазній схемі однонапівперіодного випрямлення струм протікає через діод  $VD$  коли напруга падається на діоді позитивне.

Така схема має просту конструкцію, мінімальну кількість вентилів та невисоку вартість.

Однак однонапівперіодна схема випрямлення теж має велике значення пульсацій випрямленої напруги та низьку частоту пульсацій. Одночасно значення зворотної напруги на діоді високе (в 3,14 разів більше за випрямлену напругу).

На практиці однонапівперіодні схеми випрямлення часто застосовуються при малій вихідній потужності (порядку 1...3 Вт) та низьких вимогах до пульсацій випрямленої напруги.

Однофазні мостові двонапівперіодні схеми випрямлення (див. рисунку 1.4.в) виконуються на чотирьох діодах, включених за мостовою схемою.

Порівняно з однонапівперіодною схемою мостова схема має вищий ККД, рівень пульсацій менший у 2 рази.

Схеми мають велику кількість діодів, тому це призводить до зниження її ККД та збільшення вартості; При встановленні всіх чотирьох діодів на загальному радіаторі повинні ставити електроізоляції.

Для зменшення змінних складових (пульсацій) випрямленої напруги фільтр, що згладжує, включається між випрямлячем і навантаженням. Це фільтр складається з індуктивних елементів - дроселів та з ємнісних елементів конденсаторів. На рисунку 1.5 показана схема фільтрів, що згладжують : Індуктивного(а), ємнісного(б), активно-ємнісного(в)

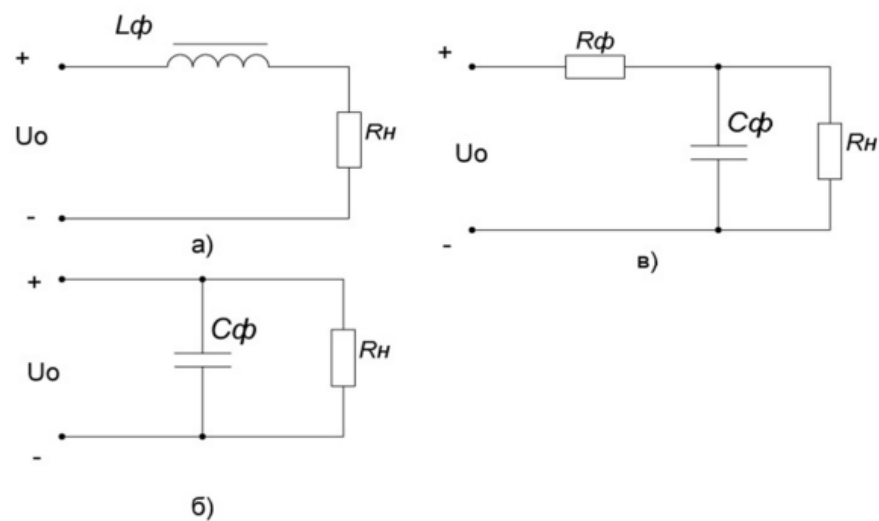


Рисунок 1.5. - Схема фільтрів, що згладжують : Індуктивного(а), ємнісного(б), активно-ємнісного(в)

Індуктивний фільтр має малі втрати потужності. При роботі коефіцієнт згладжування фільтра підвищується зі збільшенням індуктивності дроселя, числа фаз напруги живлення і зі зменшенням опору навантаження.

Ємнісний фільтр, що згладжує (рисунку 1.5, б) складається з конденсатора  $C\phi$ . Заряд н розряд конденсатора фільтра відбувається із частотою пульсації  $f_p$  випрямленої напруги.

Тиристор - це чотиришаровий прилад із трьома р-п переходами, саме  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$ . Коли тиристор включена в прямому напрямку, р-п переходи  $J_1$  і  $J_3$  змішані в прямому напрямку, тобто знаходяться у відкритому стані. Перехід  $J_2$  змішаний у зворотному напрямку та знаходиться у закритому стані. Електричний струм від

анода до катода у разі не протікає. Структура та характеристики тиристора зображені на рисунку 1.6

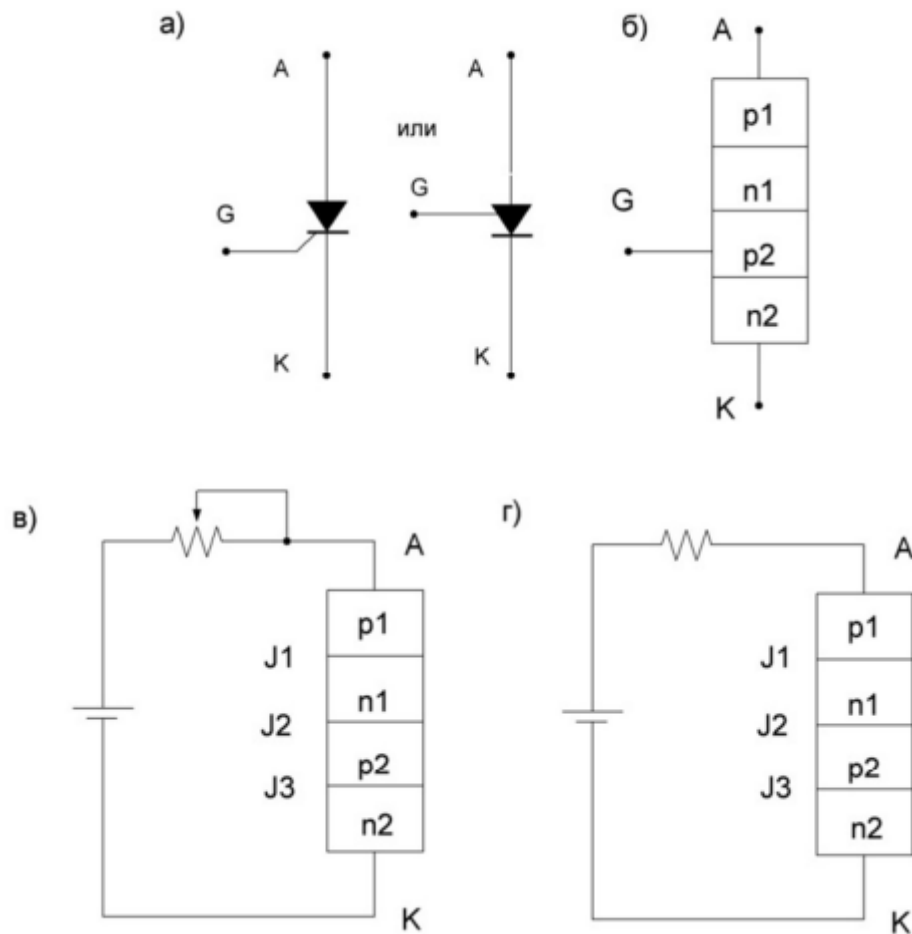


Рисунок 1.6. - а) Символічне позначення тиристора; б) Структура тиристора; в) Схема прямого включення тиристора; г) Схема зворотного включення тиристора.

Якщо напруга на тиристорі збільшується понад  $V_{fb}$  (напруга пробою в прямому напрямку), перехід J2 через інжекцію в нього неосновних носіїв переходить у пряме змішування. Тиристор перемикається в режим провідності. Напруга на тиристорі не дає до величини 1 В, а решта прикладеної напруги падає на резисторі, включеному в анодний ланцюг.

Коли введення тиристора підключений до негативної клеми батареї, а катод до позитивної р-п переходи J1 і J3 зміщені у зворотному напрямку, а р-п перехід J2 змішаний у прямому напрямку. І тут струм від катода до анода не протікає. Тиристор струм не проводить. Еквівалентна схема тиристора при

зворотному змішуванні може бути представлена двома послідовно включеними діодами. Отже, характеристика обернено змішаного тиристора схожа на характеристику обернено змішаного діода.

Процес переходу тиристора із закритого стану у відкритий називається включенням. Процес переходу тиристора з відкритого стану закритий називається виключенням.

Коли на тиристор подано зворотну напругу, струм у ланцюгу керуючого електрода неприпустимий. У цьому випадку р-п переходи J1 та J3 змішані у зворотному напрямку, а р-п перехід J2 зміщений у прямому напрямку. Якщо через керуючий електрод протікає струм, р-п-переход J3 зміщений у напрямі. Отже, прикладена до тиристорів напруга повністю падає р-п перехіді J1. Тоді внаслідок лавинного пробію р-п перехід J1 починає проводити струм. Тиристор переходить у провідний стан. Але назад зміщений тиристор не повинен перебувати в провідному стані, отже, у цьому випадку наявність струму в електроді, що управляє, неприпустимо.

Транзистор функціонує як керований ключ. Він перебуває в провідному стані, поки через область бази протікає струм від зовнішнього джерела. Навпаки, транзистор не пропускає струм через себе без струму у базі. У випадку використання тиристора як керованого ключа, потрібно забезпечити імпульс струму від зовнішнього джерела лише для ланцюга керуючого електрода, щоб тиристор перейшов у включений стан. Тиристор замикатиметься при зменшенні струму, що протікає через нього, менше порогового значення, і він є самозапираючимся пристроєм.

Для надійного функціонування електричних ланцюгів з тиристорами особлива важлива їхня захист. Основними методами захисту ланцюгів є захист від надлишкового струму і захист від надмірної напруги.

Захист від надлишкового струму в схемі вихідного ланцюга та від надмірної напруги на вхідній мережі (зображено на рис.6.а) забезпечується за допомогою плавких запобіжників. Коли надлишковий струм перевищує допустимий рівень, запобіжник спрацьовує та відключає вихідний ланцюг. Для

захисту від надмірної напруги на вході використовується тиратрон. Тиратрон виступає у ролі нелінійного резистора з високим опором при номінальній напрузі. Коли вхідний ланцюг зазнає різкого зростання напруги, тиратрон включається і стає станом з низьким опором, спричиняючи спрацювання плавкого запобіжника на вході. Такий механізм перешкоджає перевищенню допустимої напруги на трансформаторі, тиристорі та навантаженні.

## 1.2 Основні характеристики ДВЕЖ

Вторинні джерела живлення характеризуються рядом електричних, експлуатаційних та масогабаритних параметрів, які забезпечують їхню працездатність у складі радіоелектронних комплексів. [4]

Мережі живлення мають такі електричні параметри:

- номінальна вхідна напруга первинного джерела живлення;
- межі відносної нестабільності вхідної напруги, що характеризуються межами її зміни від номінального значення:

верхня межа:

$$\delta U_{\text{ПВ}} = \frac{U_{\text{Пmax}} - U_{\text{Пном}}}{U_{\text{Пном}}} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

нижня межа:

$$U_{\text{ПН}} = \frac{U_{\text{Пном}} - U_{\text{Пmin}}}{U_{\text{Пном}}} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

де  $U_{\text{Пmax}}$  та  $U_{\text{Пmin}}$  - максимальне та мінімальне значення напруги мережі живлення

Рівень пульсацій напруги живлення на виході ДВЕЖ, що характеризує амплітуду змінної складової напруги. Рівень пульсацій також може визначатися виходячи із відношення значення амплітуди змінної складової напруги живлення до його номінального значення.

Внутрішній опір первинного джерела живлення.

Частота, можливі спотворення форми напруги живлення і можлива не симетрія по фазах мережі живлення.

Електричні параметри ІВЕЗ:

- номінальні значення вихідних напруг та струмів;
- нестабільність вихідної напруги;
- коефіцієнт стабілізації по нарузі, який показує у скільки разів зміна вхідної напруги більше зміни вихідної напруги при постійному струмі навантаження;
- номінальне значення струму, споживаного первинного джерела електроживлення. Для ДЖ, що працює в режимі навантаження, що змінюється, задаються номінальне, максимальне і мінімальне значення потужності, що споживається від первинного ДЖ;
- коефіцієнт корисної дії;
- внутрішній опір постійного струму;
- внутрішній динамічний опір;
- температурний коефіцієнт напруги;
- рівень пульсацій вихідної напруги при максимальному навантаженні.

Експлуатаційні та масогабаритні параметри ДВЕЖ:

Надійність визначається як ймовірність безвідмовної роботи протягом певного періоду часу.

Головними причинами відмов джерел живлення є не лише відмови окремих елементів, а також невірно встановлені вимоги до якості вихідної та вхідної напруги, помилки при підборі схеми та проектуванні окремих блоків, низька якість виробництва джерел живлення та неправильна експлуатація.

Час безперервної роботи вирішує питання резервування системи вторинного електроживлення з метою досягнення встановленої надійності всього комплексу радіоелектронної апаратури (РЕА).

Маса, обсяг та габаритні розміри джерела живлення визначають не лише характеристики його конструкції, а також дозволяють оцінити, яку частку маси та обсягу комплексу РЕА займають джерела живлення [5].

### 1.3 Порівняльний аналіз лінійних та імпульсних ДЖ

Усі джерела живлення (ДЖ) поділяються на лінійні та імпульсні типи. У лінійних ДЖ змінна напруга мережі живлення перетворюється трансформатором, випрямляється, піддається низькочастотній фільтрації і стабілізується [6].

На рисунку 1.7 представлена схема лінійного ДЖ з нерегульованим випрямлячем, на рисунку 1.8 - схема лінійного ДЖ з регульованим випрямлячем, а на рисунку 1.9 - схема лінійного ДЖ зі стабілізатором.

Зазначені ДЖ діляться на три категорії: нерегульовані, регульовані та стабілізовані.



Рисунок 1.7 - Структурна схема лінійного ДЖ з нерегульованим випрямлячем



Рисунок 1.8 - Структурна схема лінійного ДЖ з регульованим випрямлячем

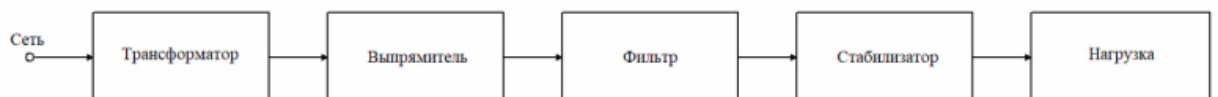


Рисунок 1.9 - Структурна схема лінійного ДЖ із стабілізатором

Характерна риса лінійних стабілізаторів напруги полягає в тому, що їхня вихідна напруга постійно нижча за рівнем не стабілізованої вхідної напруги.

Крім цього, вихідна напруга  $U_{\text{вих}}$  постійно має одну і ту ж полярність з вхідною напругою  $U_{\text{вх}}$ , а безпосередньо сам стабілізатор безперервно розсіює потужність

$$P_{\text{рас}} \approx I_{\text{вих}} \cdot (U_{\text{вх}} - U_{\text{вих}}) \quad (1.3)$$

де  $I_{\text{вих}}$  - вихідний струм.

Питома потужність подібного ДЖ не значна, це обумовлюється наявністю силового трансформатора, що працює на частоті напруги мережі, а також необхідністю застосування стабілізатора.

Спроба покращення показників ДЖ з метою збільшення їх ККД та підвищення питомої потужності призвела до розробки імпульсних ДЖ.

Структурну схему багатоканального ДЖ з індивідуальною стабілізацією наведено на рисунку 1.10, структурну схему багатоканального ДЖ з груповою стабілізацією на рисунку 1.11.

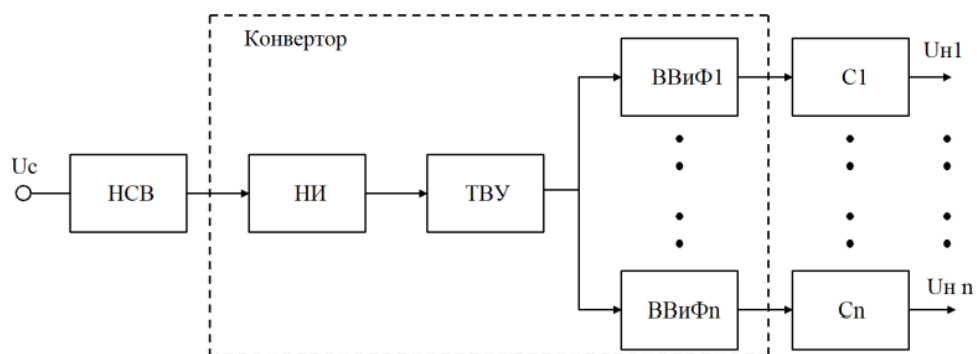


Рисунок 1.10 - Структурні схеми багатоканального ДЖ із індивідуальною стабілізацією

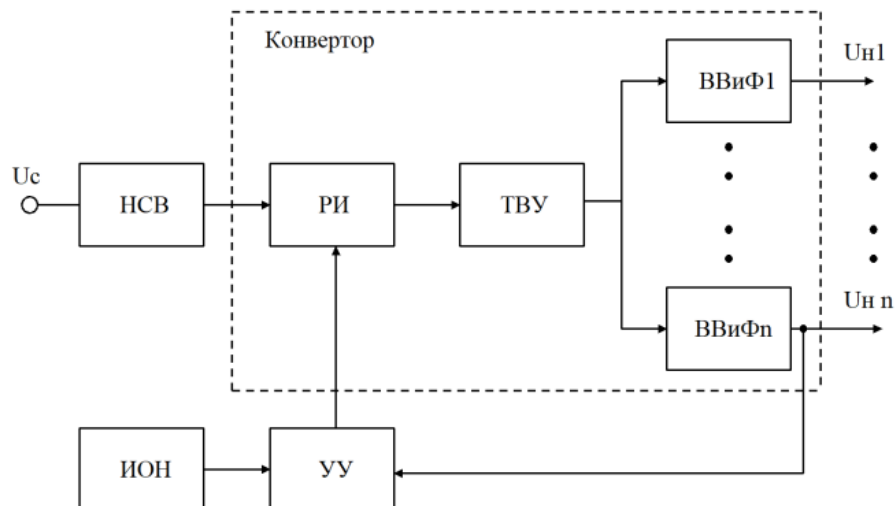


Рисунок 1.11 - Структурна схема багатоканального ДЖ із груповою стабілізацією

При забезпеченні живленням РЕА та телекомунікаційної апаратури використовуються три види імпульсних електронних пристроїв, які виконують роль джерел електроживлення: перетворювач – змінний струм/постійний струм (AC-DC перетворювач); перетворювач - постійний струм/постійний струм (DC-DC конвертор); перетворювач – постійний струм/змінний струм (DC-AC перетворювач або інвертор). Кожен з цих пристроїв має конкретні сфери застосування.

Імпульсні стабілізатори (DC-DC конвертори) відрізняються від аналогічних лінійних пристроїв тим, що вони здатні: 1) гарантувати вихідну напругу, яка перевищує рівень вхідної напруги; 2) інвертувати вхідну напругу.

Імпульсні стабілізатори (DC-DC конвертори) використовують принцип дії імпульсних джерел живлення, але вони служать для перетворення однієї постійної напруги в іншу, зазвичай, добре стабілізовану. Ці перетворювачі застосовуються там, де обладнання живиться від хімічного джерела струму або іншого незалежного джерела.

В даний час отримали широке застосування інтегральні імпульсні стабілізатори, що здійснюють перетворення та розподілу постійної напруги живлення, що надходить у систему від джерела живлення живлення або батареї.

Інше загальнопоширене використання DC-DC конверторів, перетворення напруги батареї (1,5; 3; 4,5; 9; 12; 24 В) на напругу іншого номіналу. Вихідна напруга, при цьому, досить довго може бути стійкою до помітних коливань рівня напруги батареї. Наприклад, напруга 12 В акумуляторної батареї в процесі роботи може змінюватися в діапазоні від 6 до 15 В.

Проведення порівняльного аналізу стандартних схем лінійних та імпульсних джерел живлення показує, що в більшості випадків бажано використовувати імпульсне джерело.

Незважаючи на переваги лінійних джерел живлення, таких як простота, низький рівень пульсацій вихідної напруги, високі значення стабільності по напрузі та струму, а також невеликий час відновлення номінального рівня вихідної напруги після стрибкоподібної зміни навантаження, головними

недоліками лінійних джерел є низький коефіцієнт корисної дії (ККД), значна маса та габарити.

Лінійне джерело живлення може ефективно працювати лише зі зниженим рівнем вхідної напруги. Для всіх лінійних стабілізаторів необхідно враховувати вхідну напругу, яка перевищує вихідну напругу на певне мінімальне значення, відоме як падіння напруги. Цей параметр є важливим при розрахунку продуктивності та розсіювання потужності.

Імпульсні джерела живлення знайшли широке застосування завдяки їх значно вищій питомій потужності та продуктивності. Великим плюсом імпульсних джерел є істотно великий час утримання, що вказує на той період, протягом якого їх вихідна напруга залишається в допустимих межах при зміні вхідної напруги. Ця перевага особливо актуальна в цифрових обчислювальних системах.

З урахуванням переваг імпульсних джерел живлення в порівнянні з лінійними, в подальшому буде застосовуватися імпульсне джерело живлення.

## 2 ВИБІР І ОБГРУНТУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

Проектований пристрій представляє собою стабілізований джерело живлення із складу, що включає вхідний фільтр, перетворювач напруги, випрямляч і вихідний фільтр. Цей пристрій призначений для конвертації нестабілізованої постійної напруги 110 В, яка містить комутаційні перешкоди, в стабілізовану постійну напругу  $24 \pm 1,2$  В. Джерело живлення призначене для експлуатації в діапазоні температур від мінус 50 °С до плюс 60 °С.

Імпульсні джерела живлення, у більшості випадків, генерують перешкоди у смузі частот 1...100 МГц, що може впливати на нормальне функціонування інших електронних пристроїв. З метою подолання електромагнітних перешкод на певній частоті застосовується фільтр на вході імпульсного джерела живлення.

Використання однокаскадних перетворювачів постійної напруги може призводити до ряду проблем, таких як відсутність можливості використання гальванічного зв'язку між входом та виходом та обмежені межі вихідної напруги при зміні вхідної. Ці недоліки можна вирішити за допомогою інвертора напруги, який забезпечить гальванічну ізоляцію між входом та виходом, а також можливість підвищення чи зниження змінної напруги до необхідного рівня.

Щоб отримати постійну напругу на виході, після інвертора можна використовувати випрямляч. Важливо зауважити, що за потреби інвертор може бути використаний для зміни випрямленої вихідної напруги. Уникнення зворотної передачі енергії від вторинного ланцюга до первинного може бути забезпечено застосуванням некерованого випрямляча із середньою точкою.

Щоб згладити пульсації і обмежити швидкість наростання струму через силові транзистори інвертора, на виході перетворювача необхідно поставити фільтр.

При зміні напруги на вході відповідно зміниться напруга на виході. Щоб стабілізувати напругу на виході, і одночасно для регулювання силових ключів використовуємо схему управління з широтно-імпульсною модуляцією.

Застосування ШІМ в імпульсних ДЖ порівняно з іншими видами модуляції має ряд переваг:

- має високий ККД та оптимальну частоту перетворення;
- частота перетворення залишається незмінною;
- можливість реалізувати одночасну синхронізацію частот перетворення з безліччю імпульсних стабілізаторів напруги, що унеможливує виникнення биття частот при живленні кількох ІСН.

На рисунку 2.1 наведено структурну схему ланцюга управління з ШІМ.

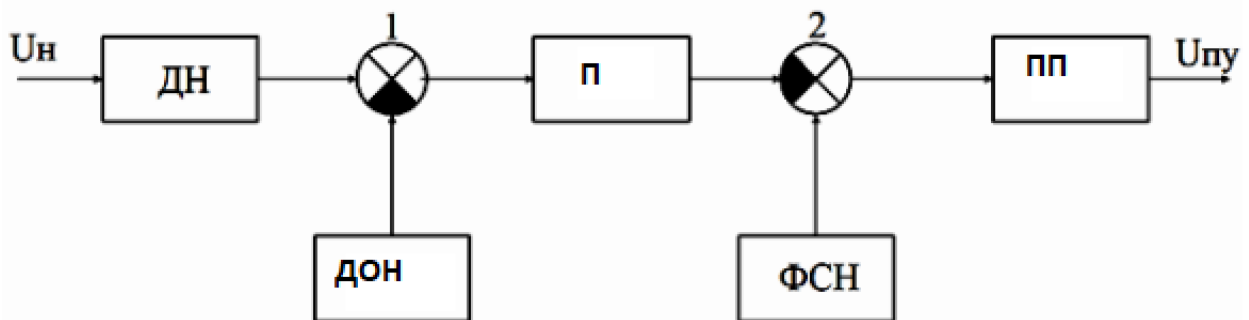


Рисунок 2.1 - Структурна схема кола управління з ШІМ

ПУ - Пороговий пристрій; ФСН – Формувач синхронізуючої напруги; 2 - Порівнюючий елемент; П - підсилювач неузгодженості; 1 - Порівнюючий елемент; ДОН - Джерело опорної напруги; ДН - Дільник напруги.

Враховуючи технічне завдання щодо необхідності захисту від перевищення вихідного струму перетворювача, пропонується використовувати схему захисту. Ця схема буде зчитувати значення вихідного струму і передавати його в схему управління, яка, в свою чергу, буде відключати широтно-імпульсне модулювання (ШІМ), регулюючи процес. З огляду на можливість швидкої зміни значень струму в ланцюгу інвертора, що може призвести до виходу з ладу силових ключів, буде впроваджена схема захисту первинного ланцюга обмотки трансформатора. Це дозволить відслідковувати струм через силові ключі та вчасно відключати схему управління.

Оскільки значення вихідного струму прямо пропорційне струму в первинному ланцюзі, збільшення вихідного струму на 10% від номінального значення призведе до аналогічного зростання струму в ланцюзі інвертора.

Для забезпечення живлення схеми управління і схеми захисту буде використано службове джерело живлення. Це джерело перетворює вхідну напругу на необхідний рівень напруги.

## 2.1 Опис роботи пристрою

За описом, пристрій починає свою роботу з постійної нестабілізованої напруги 110 В, яка надходить на вхід. Вхідний фільтр виконує кілька функцій, включаючи пропускання сигналу в потрібному діапазоні, гладження пульсацій та викидів вхідної напруги, а також пригнічення гармонійних складових і зниження рівня радіоперешкод до прийняттого рівня.

Далі сигнал подається на інвертор напруги, який перетворює постійну напругу у змінну прямокутної форми з частотою 40 кГц. Інвертор представляє собою трансформатор з комутаторами на первинній обмотці, що забезпечує гальванічну розв'язку між вхідним та вихідним контурами та підвищує перешкодозахисність та точність вимірів.

Змінна напруга формується шляхом послідовного підключення постійної напруги до вихідних клем інвертора, забезпечуючи зміну напрямку струму в обмотці. Цей процес забезпечує створення змінного струму у вторинній обмотці.

Останнім етапом є випрямлення змінного струму за допомогою випрямляючого пристрою, який використовує діоди для перетворення змінного сигналу на постійний. Діоди в цьому випрямлячі виступають як напівпровідникові прилади, пропускаючи струм в одному напрямку та блокуючи його в зворотному напрямку.

Випрямлений сигнал надходить на вихідний фільтр. Який фільтрує вихідний сигнал та забезпечує заданий рівень пульсацій на виході пристрою.

З виходу, через гальванічну розв'язку подається негативний зворотний зв'язок, яка надходить на схему управління. Вона виконана на ШІМ контролері. З його допомогою здійснює широтно-імпульсне регулювання. При зміні рівня напруги на вході схема керування змінює шпаруватість імпульсу, без зміни

частоти. Якщо вхідний сигнал збільшується, то зменшується час проходження імпульсу, відповідно при зменшенні рівня вхідної напруги час прямування імпульсу збільшується. За рахунок цього відбувається стабілізація напруги на виході, внаслідок чого досягається постійний рівень вихідного сигналу

В ДЖ вбудований захист від перевантаження струму. Якщо вихідний струм перевищує 10-20% номінального значення (30 А), спрацьовує ШІМ клапан, і керуючі імпульси припиняють подаватися зі схеми управління на силові ключі. При відсутності керуючих сигналів пристрій припиняє свою роботу, поки струм не стане меншим за гранично допустимий.

Для забезпечення живлення схеми управління і схеми захисту використовується джерело живлення, яке постачає напругу 15 В і 5 В.

## 2.2. Ескізний розрахунок пристрою

До проектування основних вузлів пристрою імпульсного джерела живлення необхідно визначити ключові параметри, які впливатимуть на вибір топології та допоможуть розрахувати необхідні значення для подальшого проектування. На рисунку 2.2 представлено ескіз ДЖ.

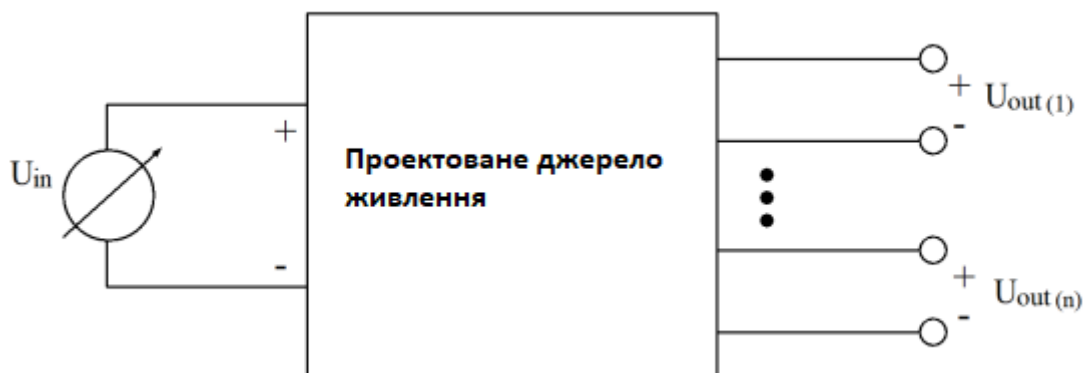


Рисунок 2.2 - Ескіз ДЖ

Розрахуємо деякі параметри:

Вихідна потужність ДЖ,  $P_{out}$ :

$$P_{out} = \sum_{m=1}^n (U_{out\ m} \cdot I_{out\ m}) \quad (2.1)$$

де  $U_{out\ m}$  вихідна напруга ДЖ;

$I_{out\ m}$  вихідний струм ДЖ.

$$P_{out} = 24 \cdot 30 = 720 \text{ Вт} \quad (2.2)$$

Вхідна потужність  $P_{in}$

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\text{ККД}} \quad (2.3)$$

Де ККД - коефіцієнт корисної дії, поставимо 0,92;

$$P_{in} = \frac{720}{0,92} = 783 \quad (2.4)$$

Середнє значення вхідних струмів,  $I_{in\ av}$

$$I_{in\ av} = \frac{P_{in}}{U_{in\ nom}} \quad (2.5)$$

номінальне значення вхідної напруги  $U_{in\ nom}$

$$I_{in\ av} = \frac{783}{110} = 7.11 \text{ А} \quad (2.6)$$

Вхідний піковий струм,  $I_{pk}$

$$I_{pk} = \frac{k \cdot P_{out}}{I_{in\ min}} \quad (2.7)$$

Де  $k$  – визначається з топології ДЖ.

$$I_{pk} = \frac{1.4 \cdot 720}{70} = 14.4 \text{ А} \quad (2.8)$$

### 2.3 Визначення топології інвертора

Одне з головних рішень, яке надалі грає величезний вплив на те, в якому середовищі може успішно функціонувати джерело, і яку потужність він може забезпечити навантаження, вибір базової топології перетворювача. Саме на цьому етапі необхідно знайти компромісне рішення між вартістю та робочими характеристиками. Кожна топологія має свої переваги і недоліки. Одна топологія може мати низьку вартість, проте видаватиме недостатню потужність. Інша може надавати потужність надміру, але її вартість буде більш дорогою. У таблиці 2.1 наведено порівняльний аналіз топологій.

Таблиця 2.1 Порівняння топологій ДЖ із ШІМ

Топологія	Діапазон потужностей, Вт	Діапазон напруг Увх, В	Ізоляція Вхід вихід	Типовий ККД, %	Відносна вартість елементів
-----------	--------------------------	------------------------	---------------------	----------------	-----------------------------

Знижувальні	0-1000	5-40	ні	78	1.0
Підвищуючі	0-150	5-40	ні	80	1.0
Інвертуючі	0-150	5-40	ні	80	1.0
Однотранзисторні прямоходові	0-150	5-500	ні	78	1.4
Зворотногоходові	0-150	5-500	ні	80	1.2
Пушпульні	100-1000	5-1000	Так	75	2.0
Напівстосові	100-500	5-1000	Так	75	2.2
Мостові	400-2000+	5-1000	так	73	2.5
Знижувальні	0-1000	5-40	ні	78	1.0
Підвищуючі	0-150	5-40	ні	80	1.0
Інвертуючі	0-150	5-40	ні	80	1.0
Однотранзисторні прямоходові	0-150	5-500	ні	78	1.4
Зворотногоходові	0-150	5-500	ні	80	1.2
Пушпульні	100-1000	5-1000	Так	75	2.0
Напівстосові	100-500	5-1000	Так	75	2.2
Мостові	400-2000+	5-1000	так	73	2.5

Головні питання, на які варто відповісти, щоб визначити топологію, є:

- Чи потрібна ізоляція між входом та виходом?
- Яка напруга з'являється на первинній обмотці трансформатора?
- Чому дорівнює пікове значення струму через силові ключі?
- Чому дорівнює максимальна напруга на силових ключах?

Трансформаторна ізоляція є невід'ємною частиною для всіх імпульсних ДЖ у яких вхідна напруга вище 40 В.

Для того щоб визначити значення пікового струму через силові ключі необхідно знати, яка напруга падає на первинній обмотці трансформатора. Чим вище значення напруги на первинній обмотці, тим нижчі пікові струми через ключі. Це тим, що необхідно підтримувати постійний рівень вихідний потужності.

При надто великій напрузі на силових ключах існує ймовірність того, що вони вийдуть за межі області стійкої роботи. Необхідно враховувати цей важливий параметр під час вибору силових ключів.

У промисловому виробництві, залежно від вихідної потужності, топологію імпульсних ДЖ розподілено таким чином, як показано на рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 - Застосування різних топологій

Виходячи з цього, щоб не ускладнювати ДЖ застосуванням між імпульсним струмовим захистом, скористаємося мостовою схемою. Вона представлена на рисунку 2.4.

Мостова схема вимагає чотири ключі, які циклічно змінюють свій стан: S1, S4 – замкнуті, S2, S3 – розімкнуті, і навпаки. На закритих ключах напруга дорівнює вхідній напругі ДЖ. До первинної обмотки трансформатора також прикладається повна вхідна напруга.

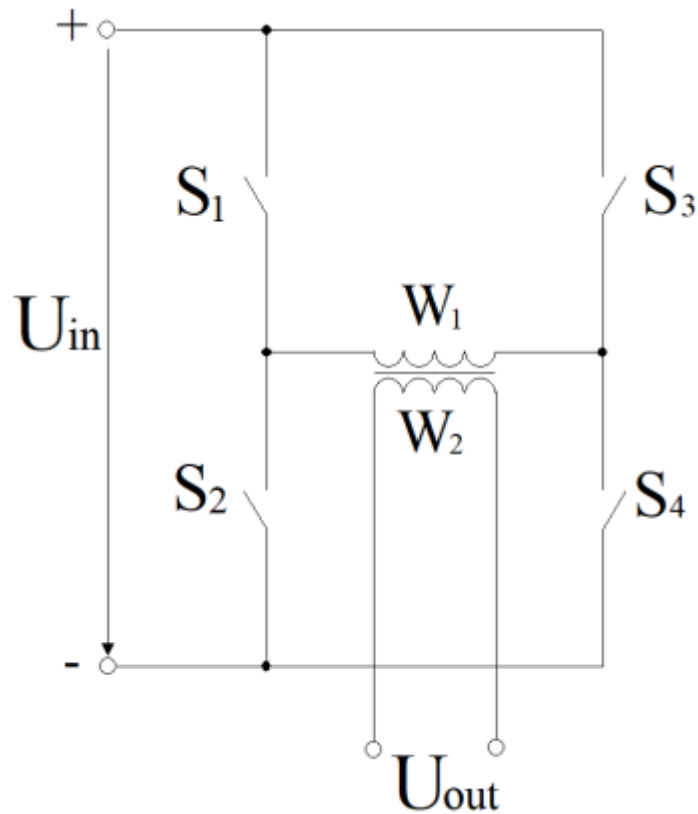


Рисунок 2.4 - Мостова схема

Кожна топологія має прогнозовані величини напруги та струму для ключа та випрямляча.

Напруга на закритому силовому ключі дорівнює напрузі на вході ДЖ. Слід взяти його із запасом щоб передбачити можливі стрибки напруги на вході. Враховуючи, що максимальна напруга на вході може досягати 140 В, то робочу напругу на закритому силовому транзисторі необхідно вибирати в межах 250-300 В. Струм через транзистор,  $I_D$  у свою чергу визначатиметься за формулою:

$$I_D = \frac{1.2 \cdot P_{out}}{U_{in \min}} \quad (2.9)$$

Де  $U_{in \min}$  – мінімальна вхідна напруга на вході ДЖ.

$$I_D = \frac{1.2 \cdot 720}{70} = 13 \text{ A} \quad (2.10)$$

З огляду на можливі стрибки напруги слід взяти струм із двократним запасом  $I_D = 25 \text{ A}$ .

Для використання в ролі випрямляча застосовуються діоди або діодні зборки. З метою запобігання виходу з ладу, зворотна напруга на діодах повинна

бути не меншою, ніж подвійна вихідна напруга. Згідно з технічним завданням, вихідна напруга складає 24 В, отже, зворотна напруга діода повинна перевищувати 50 В. Мінімальний прямий струм через діод не повинен бути меншим за вихідне значення струму, яке складає 30 А.

Проведемо аналіз втрат для силових транзисторів та випрямляча, враховуючи обрану топологію ДЖ. З цією метою можна приблизно розрахувати втрати на силових ключах та випрямлячі. Інформацію про втрати можна використовувати для визначення необхідних напівпровідників для тепловідведення та розміру радіатора, щоб створити оптимальні умови для нормального функціонування схеми.

Щоб визначити втрати для кожного ключа,  $P_{loos\ ckt}$  скористаємося формулою:

$$P_{loos\ ckt} = P_{in} \cdot (1 - \text{КПД}) \cdot P\% \cdot 0.25 \quad (2.11)$$

Де  $P\%$  оцінний відсоток загальних втрат, для бруківки схеми становить 0.4.

$$P_{loos\ ckt} = 783 \cdot (1 - 0.92) \cdot 0.4 \cdot 0.25 = 6.2\text{Вт} \quad (2.12)$$

Щоб визначити втрати всередині кожного випрямляча в імпульсному ДЖ скористаємося співвідношенням:

$$P_r = P_{in} \cdot (1 - \text{КПД}) \cdot P\% \quad (2.13)$$

Де  $P_r$ - втрати на діоді;

$$P_r = 783 \cdot (1 - 0.92) \cdot 0.5 = 31\text{Вт} \quad (2.14)$$

Нині існує великий вибір контролерів із широтно — імпульсним регулюванням. На початковому етапі проектування ДЖ необхідно визначити функціональні можливості мікросхеми. У разі необхідні особливості контролера:

- двухтактне управління потужними швидкодіючими ключами;
- робота у пристроях із зворотним зв'язком по напрузі;
- невелика затримка проходження сигналу;
- захист при перевищенні струму;
- захист від зниженої напруги;

- функція м'якого запуску для обмеження стрибків струмів через силові ключі при їх перемиканні.

Для ефективного управління потужними силовими транзисторами використовують драйвери. Це мікросхеми управління, які взаємодіють із різними контролерами та логічними схемами, забезпечуючи координацію з силовими транзисторами. Вихідні каскади драйверів повинні мати високу ємнісну стійкість, яка є характерною для затворних ланцюгів транзисторів. Струм вихідного каскаду повинен коливатися від 0,5 до 2 А або навіть більше.

Для ефективного управління виведенням транзисторів, драйвер бажано мати два входи і два виходи, щоб передавати вхідні сигнали з мінімальними затримками поширення, а також забезпечувати мінімальний час наростання та спаду фронту. Напруга по шині VOFFSET повинна бути не менше 250-300 В. Крім того, драйвер повинен бути стійким до негативних викидів напруги під час перехідних процесів.

### 3. ВИБІР, ОБГРУНТУВАННЯ І РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ВУЗЛІВ ПРИСТРОЮ

Серцем будь-якого перетворювача є трансформатор. Перш ніж розпочати розрахунок трансформатора, необхідно визначитися зі схемою вихідного випрямляча.

#### 3.1 Випрямляч

У преобразувачах енергії використовується випрямляч, який може бути пасивним, з використанням напівпровідникових діодів, або синхронним, коли разом із пасивним випрямлячем використовуються потужні МОП-транзистори паралельно. Синхронне випрямлення дозволяє підвищити ККД перетворювача, але при цьому зростають витрати. Оскільки вихідний струм складає 30 А, втрати на транзисторах будуть порівнянні з втратами на діодах.

В якості випрямляча використовується двонапівперіодний випрямляч за схемою із загальною точкою. Схему такого випрямляча можна побачити на рисунку 3.1.

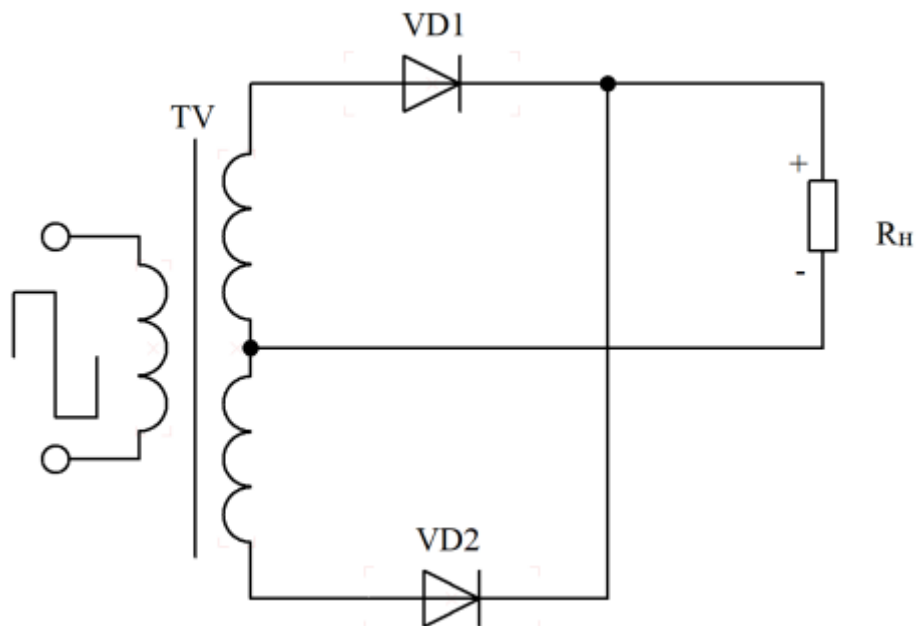


Рисунок 3.1 - Двонапівперіодний випрямляч із середньою точкою

Для простоти монтажу та збереження місця на платі при розведенні, застосуємо здвоєний діод із загальним катодом.

Критерії вибору:

- зворотна напруга має бути не менше 100 В;
- пряме падіння напруги на діоді порядку 0.8;
- прямий струм через діод 40-50 А

Всі ці характеристики мають діодне складання на діодах шоттки DSA90C200HB, фірми IXYS. Яка виконана у корпусі TO247.

Його основні характеристики:

- максимальна зворотна напруга 200 Ст.
- зворотний струм 900 мкА
- пряме падіння напруга 0.86;
- середній прямий струм 45 А;
- повне розсіювання енергії 275 Вт;
- робоча температура  $-55..+150^{\circ}\text{C}$

### 3.2 Розрахунок трансформатора

Щоб приступити до розрахунку трансформатора потрібно визначитися з формою сердечника, а також його матеріалом.

Вихідні дані для розрахунку трансформатора:

- напруга на первинній обмотці,  $U_1 = 110 \text{ В}$ ;
- вихідна напруга,  $U_{\text{вих}} = 24 \text{ В}$ ;
- струм навантаження,  $I_H = 30 \text{ А}$ ;
- частота перетворення,  $f = 40 \text{ кГц}$ ;
- матеріал осердя N87 EPCOS[7];
- тип сердечника - кільцевий;
- максимальна індукція,  $B_m = 0.219 \text{ Тл}$ ;
- перегрів трансформатора,  $\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$

Порядок розрахунку трансформатора:

1. Розрахувати вихідну потужність трансформатора  $P_H$ , Вт:

$$P_H = (U_{\text{вих}} + k_1 \cdot U_{\text{пр}}) \cdot I_H \quad (3.1)$$

де  $U_{\text{вих}}$  - вихідна напруга;

$k_1$  коефіцієнт, що залежить від схеми випрямляча, у цьому випадку дорівнює 2.

$I_H$  – струм навантаження;

$U_{\text{пр}}$  – пряме падіння напруги на одному діоді випрямляча, 1;

$$P_H = (24 + 2) \cdot 30 = 780 \text{ Вт} \quad (3.2)$$

2. Визначити потужність трансформатора  $P_T$ , ВА:

$$P_T = P_H \cdot \left( \frac{1}{\eta} + \sqrt{2} \right) \quad (3.3)$$

Де  $\eta$  - ККД трансформатора, задається 98%;

$$P_T = 780 \cdot \left( \frac{1}{0.98} + \sqrt{2} \right) = 1900 \text{ ВА} \quad (3.4)$$

3. Визначити твір  $S_c S_0$  для вибору типорозміру осердя:

$$S_c \cdot S_0 > \left( \frac{P_T \cdot 10^4}{4 \cdot K_\phi \cdot B_m \cdot f \cdot j \cdot K_i} \right)^{\frac{1}{1+y}} \quad (3.5)$$

Де  $K_\phi$  – Коефіцієнт форми струму

$B_m$  – максимальна індукція для нормальної роботи на частоті 40 кГц  
максимальна індукція 0,2 Тл;

$S_c$  – площа перерізу сердечника  $\text{см}^2$ ;

$S_0$  - площа вікна сердечника  $\text{см}^2$ ;

$K_i$  - Коефіцієнт заповнення вікна, рекомендований 0,3;

$j$  – щільність струму, задаємося значенням 5 А/ $\text{см}^2$ ;

$y$  – безрозмірний показник ступеня для даного типу сердечника  $y = 0,12$ ;

$$S_c \cdot S_0 > \left( \frac{1900 \cdot 10^4}{4 \cdot 0.7 \cdot 0.2 \cdot 40000 \cdot 500 \cdot 0.3} \right)^{\frac{1}{1+0.12}} = 7.2 \text{ см}^4; \quad (3.6)$$

4. Використовуючи довідкові дані, вибрати стандартний осердя відповідного розміру:

З довідника [8] вибираємо сердечник R 50.0/30.0/20.0, ферит N87 Epcos.

Дані:

$$S_c = 1.96 \text{ см}^2, S_0 = 6.38 \text{ см}^2, l_{\text{ср.л}} = 12 \text{ см}, V_c = 23.562 \text{ см}^3$$

Теплова поверхня для кільцевого осердя визначається співвідношенням:

$$S_T = 2 \cdot \left( \pi \cdot \left( \frac{5}{2} \right)^2 - S_0 \right) + l_{\text{ср.л}} \cdot 2 + 2 \frac{\pi \cdot 3}{2} \cdot 2 = 69.4 \text{ см}^2 \quad (3.7)$$

5. Визначити  $w_1$  – число витків первинної обмотки:

$$w_1 = \frac{U_1 \cdot 10^4}{4 \cdot K_\phi \cdot B_m \cdot f \cdot S_c} = 26 \quad (3.8)$$

6. Визначити первинний струм  $I_1$ , А:

$$I_1 = \frac{P_H}{U_{\text{вх}} \cdot \eta} = 7.23 \text{ А} \quad (3.9)$$

7. Визначити перетин дроту SM.ПР1, первинної обмотки:

$$S_{\text{м.пр1}} = \frac{k_2 \cdot I_1}{j} \quad (3.10)$$

де  $k_2$  – коефіцієнт, що враховує виконання первинної обмотки, для даної схеми  $k_2 = 1$ ;

$$S_{\text{м.пр1}} = \frac{1 \cdot 7.23}{5} = 1.446 \text{ мм}^2 \quad (3.11)$$

8. Вибрати діаметр дроту первинної обмотки:

Як обмотувальний дроту візьмемо ПЕТВ-2, діаметром  $d_{\text{м,ст1}} = 0.6 \text{ мм}$  з кількістю жил  $n = 5$ .

Питомий опір  $\rho_1 = 112 \text{ мкОм/см}$

9. Визначити опір  $R_1$ , первинної обмотки:

$$R_1 = l_{\text{ср.л}} \cdot w_1 \cdot \rho_1 = 0.033 \text{ Ом} \quad (3.12)$$

10. Визначити втрати у меді  $P_1$ , первинної обмотки:

$$P_{\text{м1}} = I_1^2 \cdot R_1 = 1.7 \text{ Вт} \quad (3.13)$$

11. Визначити  $w_2$  – число витків вторинної обмотки:

$$w_2 = \frac{w_1 \cdot U_{w2}}{U_1} = 10 \quad (3.14)$$

де  $U_{w2}$  визначається як:

$$U_{w2} = U_{\text{вих}} + k_1 \cdot U_{\text{пр}} = 26 \text{ В} \quad (3.15)$$

12. Визначити перетин дроту SM.ПР2, вторинної обмотки

$$S_{\text{м.пр2}} = \frac{k_4 \cdot I_H}{j} = 4.3 \text{ мм}^2 \quad (3.16)$$

Де  $k_4$  коефіцієнт враховує побудову вторинної обмотки для даної схеми та дорівнює  $\frac{1}{\sqrt{2}}$

13. Вибрати діаметр дроту вторинної обмотки:

В якості обмотувального дроту візьмемо ПЕТВ-2, діаметром  $d_{м,ст2}=0,6\text{мм}$  із кількістю жил  $n=15$ .

Питомий опір  $\rho_2=4\text{ мкОм/див.}$

14. Визначити опір  $R_2$ , вторинної обмотки:

$$R_2 = l_{ср.л} \cdot w_2 \cdot \rho_2 = 0.0006\text{ Ом} \quad (3.17)$$

15. Визначити втрати в меді  $P_{M2}$ , вторинної обмотки:

$$P_{M2} = I_2^2 \cdot R_1 = 0.45\text{ Вт} \quad (3.18)$$

16. Визначити загальні втрати у міді  $\Delta P_M$ ;

$$\Delta P_M = P_{M1} + P_{M2} = 2.15\text{ Вт} \quad (3.19)$$

17. Визначити втрати у сердечнику використовуючи графік питомих втрат для вибраного матеріалу на рисунку 3.2

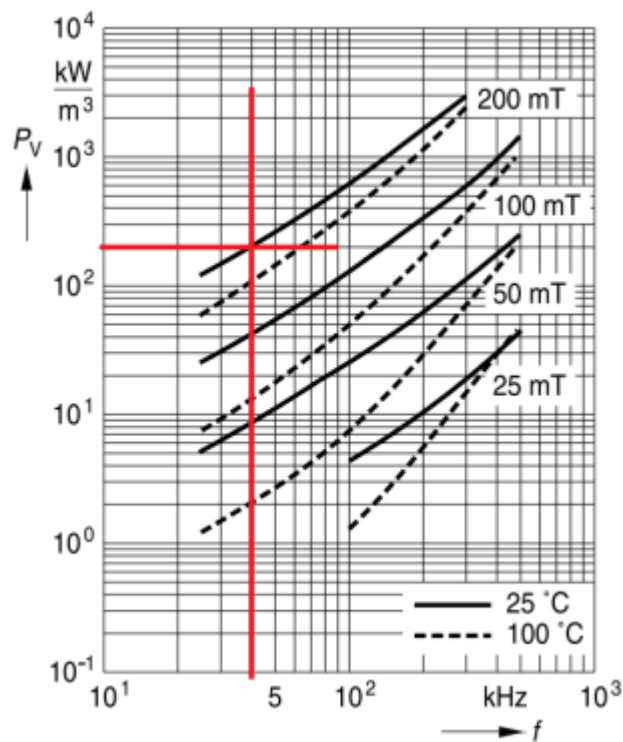


Рисунок 3.2 - Графік питомих втрат магнітопроводу

$$P_{уд} = \frac{200\text{кВт}}{\text{м}^3} = 0.02\text{Вт/м}^2 \quad (3.20)$$

18. Визначити втрати в осерді  $P_c$ ;

$$P_c = P_{уд} \cdot V_c = 0.47\text{Вт} \quad (3.21)$$

19. Визначити сумарні втрати у трансформаторі  $\Delta P_T$ :

$$\Delta P_T = \Delta P_M + P_c = 2.62 \text{ Вт} \quad (3.22)$$

20. Визначити перегрів поверхні  $\Delta T$ :

$$\Delta T = \frac{\Delta P_c}{K_T \cdot S_T} = 32 \text{ градуси по Цельсію} \quad (3.23)$$

Як ключ використовується потужний польовий МОП транзистор. Він має високу швидкодію і активно застосовується в ДЖ потужність до 1 кВт і частотах в десятки та сотні кГц.

Критерії вибору:

- напруга на закритому силовому транзисторі 250-300 В;
- струм через транзистор 30 А;
- низький опір відкритого каналу транзистора;
- висока швидкодія.

З усіх існуючих транзисторів варто приділити особливу увагу IRFP4332PbF, що виробляється компанією Infineon Technologies.[9] Він має характеристики:

- робоча напруга на закритому транзисторі 300;
- опір відкритого каналу 29 мОм;
- напруга затвор-витік  $\pm 30$  В;
- постійний струм стоку при 25 ° С дорівнює 57 А, при 100 ° С - 40 А;
- струм пульсації 230 А;
- робоча температура -40.. +175 °С.

Транзистори виконані у корпусі ТО – 247.

### 3.3 Вихідний фільтр

Вихідний фільтр використовується для перетворення прямокутних випрямлених сигналів у вихідний постійний струм. Оскільки у схемі ДЖ застосовується мостовий перетворювач з трансформатором, пульсації напруги на його виході можуть бути значними. Для забезпечення визначеного рівня

пульсацій на виході ДЖ використовується LC фільтр. Схему цього фільтра можна побачити на рисунку 3.3.

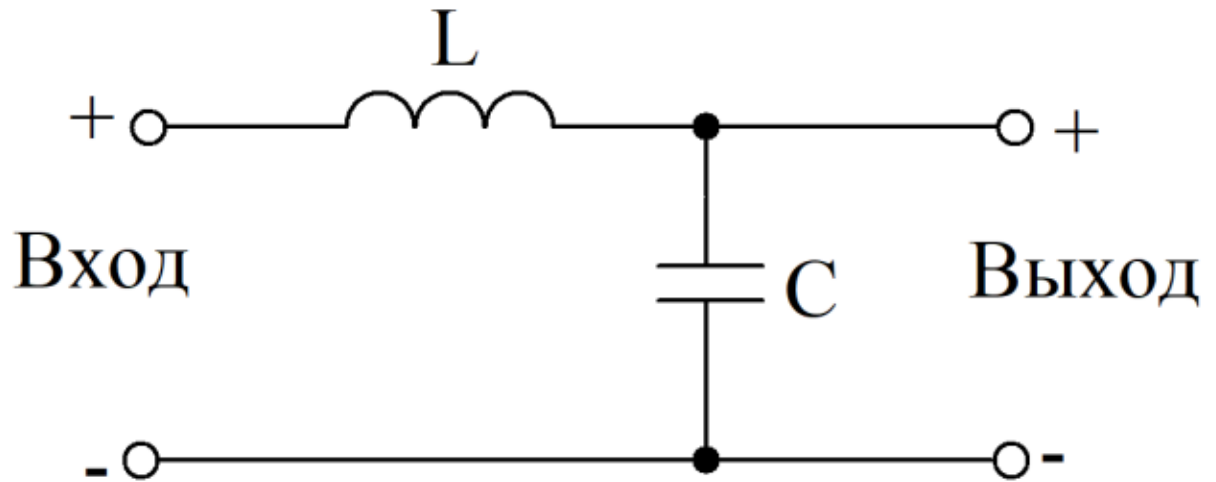


Рисунок 3.3 - Вихідний LC фільтр

Індуктивності дроселя,  $L$  визначається виходячи з умов безперервного струму. Пульсації вихідної напруги залежать від випрямляча та числа фаз.

$$L \geq \frac{(U_{вхmax} - U_{вих}) \cdot (1 - \gamma_{min})}{1.4 \cdot I_{min} \cdot p \cdot f} = 38 \text{ мкГн} \quad (3.24)$$

Де:  $U_{вхmax}$  – максимальне значення напруги після випрямляча;

$U_{вих}$  - вихідна напруга;

$\gamma_{min}$  – мінімальне значення коефіцієнта заповнення імпульсів;

$I_{min}$  – мінімальне значення струму навантаження, що приймається рівним

$I_{min} = I_{min} = (0,1 \div 0,2) I_n$ .

$p$  - пульсність схеми випрямлення:

$$p = m \cdot a$$

Де  $m$  - число фаз випрямляча,  $m = 2$ ;

$a$  - коефіцієнт випрямляча,  $a = 2$ .

Вихідні дані для розрахунку:

-  $L = 40$  мкГн;

- постійний струм  $I = 30$  А;

- амплітуда пульсацій струму,  $\Delta I / 2 = 3$  А;

- частота пульсацій  $f = 40$  кГц;

- кільцевий сердечник, матеріал 60 $\mu$  KoollMu Magnetics [10].

- перегрів  $\Delta T = 50$  °С.

Порядок розрахунку:

1. Визначити необхідну енергію дроселя  $W_3$ :

$$W_3 = \frac{L \cdot I_m^2}{2} = 0.022 \text{ Дж} \quad (3.25)$$

Де  $I_m$  - максимальний струм:

$$I_m = I + \frac{\Delta I}{2} \quad (3.26)$$

2. Визначити коефіцієнт форми струму  $K_\phi$ :

$$K_\phi = \frac{I_m}{I_d} \quad (3.27)$$

де  $I_d$  - діючий струм в обмотці:

3. Визначити необхідний добуток перерізу сердечника на переріз вікна  $S_c \cdot S_0$

$$S_c \cdot S_0 = \left( \frac{2 \cdot W_3 \cdot 10^4}{B_m \cdot K_i \cdot j \cdot K_\phi} \right)^{\frac{1}{1+\gamma}} = 6.7 \text{ см}^4 \quad (3.28)$$

де  $K_i$  - Коефіцієнт заповнення вікна, приймаємо рівним 0,3;

$j$  – щільність струму, що приймає 500 А/см<sup>2</sup>;

Індукція насичення  $B_s$  для цього матеріалу становить 1Тл, максимальну індукцію  $B_m$  виберемо рівною 0,5 Тл.

Зі стандартного ряду виберемо кільцевий сердечник R46,7×28,7×15,2

Дані магнітопроводу:

- площа вікна,  $S_0 = 6,1$  см<sup>2</sup>;

- площа перерізу,  $S_c = 1,35$  см<sup>2</sup>;

- довжина середньої лінії,  $l_{CP} = 11,6$  см;

- об'єм сердечника,  $V_c = 15,6$  см<sup>3</sup>;

- індуктивність на один виток,  $A_L = 86$  нГн/в

4. Визначимо необхідну кількість витків  $w$ :

$$w = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = 22 \quad (3.29)$$

5. Розрахувати переріз проводу:

$$S_m = \frac{I_d}{j} = 6 \text{ мм}^2 \quad (3.30)$$

6. Вибрати діаметр дроту із таблиці стандартних провідників.

$$d = \sqrt{\frac{S_m \cdot 4}{\pi}} = 2.7 \text{ мм} \quad (3.31)$$

Як обмотувальний дроти візьмемо ПЕТВ-2, з діаметром дроту  $d = 0,6$  мм, діаметр з ізоляцією  $d_{із} = 0,676$ .

Оскільки необхідний діаметр ізольованого дроту 2,7 мм занадто великий, а зменшити його не можна, через збільшення щільності струму в обмотці, виконаємо намотування сімнадцятьма проводами  $n=17$ .

Питомий опір дроту для даного перерізу:

$$\rho = 0,00007 \text{ Ом/див.}$$

7. Визначити опір обмотки:

$$R = l_{\text{ср}} \cdot w \cdot \rho = 0.00007 = 0.0017 \text{ Ом} \quad (3.32)$$

8. Визначити втрати в меді,  $P_m$ :

$$P_m = I_d^2 \cdot R = 1.5 \text{ Вт} \quad (3.33)$$

9. Розрахувати амплітуду змінної складової індукції в осерді,  $V_{\text{пер}}$ :

$$V_{\text{пер}} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot \Delta I \cdot w \cdot 10^2}{l_{\text{ср}} \cdot 2} = 0.042 \text{ Тл} \quad (3.34)$$

Де  $\mu$  - Магнітна проникність сердечника,  $\mu = 60$ ;

$\mu_0$  - постійна магнітна проникність,  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$

10. Визначити постійну складову індукції в осерді,  $V_{\text{пост}}$

$$V_{\text{пост}} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot I \cdot w \cdot 10^2}{l_{\text{ср}}} = 0.56 \text{ Тл} \quad (3.35)$$

11. Визначити максимальне значення індукції в осерді,  $V_m$ :

$$V_m = V_{\text{пер}} + V_{\text{пост}} = 0.62 \text{ Тл} \quad (3.36)$$

12. Визначити втрати в осерді,  $P_c$ :

$$P_c = P_{\text{уд}} \cdot V_c = 0.6 \text{ Вт} \quad (3.37)$$

де  $P_{\text{уд}}$  - питомі втрати у сердечника, визначимо питомі втрати за допомогою графіка питомих втрат [11], який наведено на рисунку 3.4.

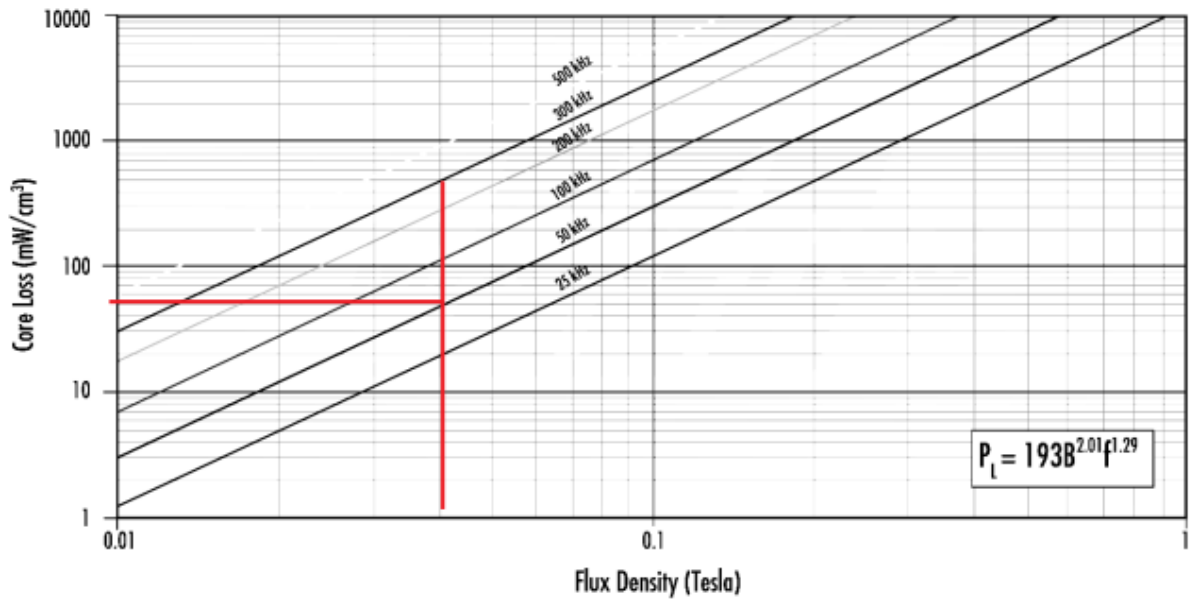


Рисунок 3.4 - Графік питомих втрат магнітопроводу

Руд = 40 мВт/см<sup>3</sup>.

13. Розрахувати сумарні втрати у дроселі  $\Delta P$ :

$$\Delta P = P_M + P_C = 2.1 \text{ Вт} \quad (3.38)$$

14. Визначити сумарну поверхню дроселя,  $S_T$ :

$$S_T = 2 \cdot (\pi \cdot \left(\frac{4.7}{2}\right)^2 - S_0) + l_{\text{ср.л}} \cdot 1.6 + 2 \frac{\pi \cdot 2.6}{2} \cdot 1.6 = 59.7 \text{ см}^2 \quad (3.39)$$

15. Визначити, перегрів дроселя:

$$\Delta T = \frac{\Delta P}{K_T \cdot S_T} = 29^\circ \text{C} \quad (3.40)$$

де  $K_T$  - коефіцієнт тепловіддачі при природному охолодженні

### 3.4 Розрахунок ємності конденсатора вихідного фільтра

Місткість конденсатора вихідного фільтра визначає амплітуду пульсацій вихідної напруги. Вона визначається виходячи з формули:

$$C \geq \frac{I_{\text{out max}} \cdot (1 - \gamma_{\text{min}})}{f \cdot \Delta U_{P-P}} = 390 \text{ мкФ} \quad (3.41)$$

де  $C$  - ємність конденсатора;

$I_{\text{out max}}$  - номінальний вихідний струм;

$\gamma_{\text{min}}$  - мінімальне значення коефіцієнта заповнення імпульсів;

$\Delta U_{p-p}$  - бажана величина розмаху пульсації.

Для правильного вибору конденсатора необхідно враховувати струм пульсацій, який протікає через конденсатор і повинен перевищувати максимально допустимий рівень. Цей струм проходить через послідовний еквівалентний опір ESR та через еквівалентну послідовну індуктивність ESL конденсатора. Велике значення ESR може призвести до нагрівання конденсатора, що скорочує його термін служби та додає додаткові напругові пульсації. У свою чергу, індуктивність ESL додає різкі зміни та сплески.

При виборі конденсатора слід враховувати ці фактори, тому рекомендується обирати тип з низьким ESR. Також слід дотримуватися гранично допустимого струму через конденсатор. Для уникнення струмового навантаження застосовують паралельне підключення кількох конденсаторів. Виробники конденсаторів вказують гранично допустимі діючі значення струму  $I_d$ . Для визначення кількості конденсаторів  $n$ , з'єднаних паралельно, можна скористатися формулою[12]:

$$n = \frac{I_{rms}}{0.7 \cdot I_d} = 2.86 \quad (3.42)$$

Де  $I_{rms}$  - діюче значення струму через конденсатори для наближеної оцінки використовують формулу:

$$I_{rms} \approx I_{ripple} \cdot 0.33 \quad (3.43)$$

Де  $I_{ripple}$  - розмах пульсацій струму конденсатора:

$$I_{ripple} = \frac{2 \cdot \Delta I_{out}}{\gamma_{min}} \quad (3.44)$$

Як вихідний конденсатор виберемо B41851A7687M, ємність 680мкФ[13], він має малим значення ESR, і достатнім струмом пульсацій 825 мА.

### 3.5 Вибір ШІМ контролера

Нами був обраний ШІМ контролер UC2825DW фірми Texas Instruments [14].

Особливості:

- сумісні режими роботи з струму та напруги;
- частота роботи до 1 МГц;
- затримка проходження сигналу 50 нс;
- максимальний вихідний струм 1.5 А
- підсилювач сигналу неузгодженості з широкою смугою пропускання;
- м'який старт;
- секція зниженої напруги з гістерезисом;
- низький стартовий струм 1.1 мА.

ШИМ-контролер UC2825DW оптимізований для високочастотної роботи до 1 МГц. Він забезпечує мінімальний час проходження через компаратори та логічну схему при максимальній пропускну здатності та великій швидкості наростання вихідної напруги підсилювача сигналу помилки. Цей контролер розроблений для використання в режимі широтно-імпульсної модуляції з керуванням струмом і напругою. Схема захисту включає компаратор обмеження струму з одним вольтовим порогом, TTL-сумісний порт завершення роботи і виведення м'якого запуску. При зниженні напруги секція блокування з гістерезисом 800 мВ забезпечує низький стартовий струм. На рисунку 3.5 показана структурна схема контролера.

Опис висновків ШИМ контролера:

- INV - інвертуючий вхід підсилювача сигналу помилки;
- NI - не інвертує вхід підсилювача сигналу помилки;
- E/AOUT – вихід підсилювача сигналу помилки, що інвертує вхід ШИМ компаратора;
- CLOCK – вхід/вихід синхронізації;
- Rt - висновок підключення резистора, що задає час;
- Ct - висновок підключення конденсатора, що задає час;
- RAMP – не інвертуючий вхід ШИМ компаратора;
- SOFTSTART - виведення м'якого запуску;
- Ilim - виведення обмеження струму;
- GND - загальний висновок;

- OUT A – вихід А;
- PWRGND – загальний висновок емітерів вихідного каскаду;
- Vc - виведення колекторів вихідного каскаду;
- OUT B - вихід Б;
- Vcc - виведення харчування;
- Vref - вихід джерела опорної напруги 5.1

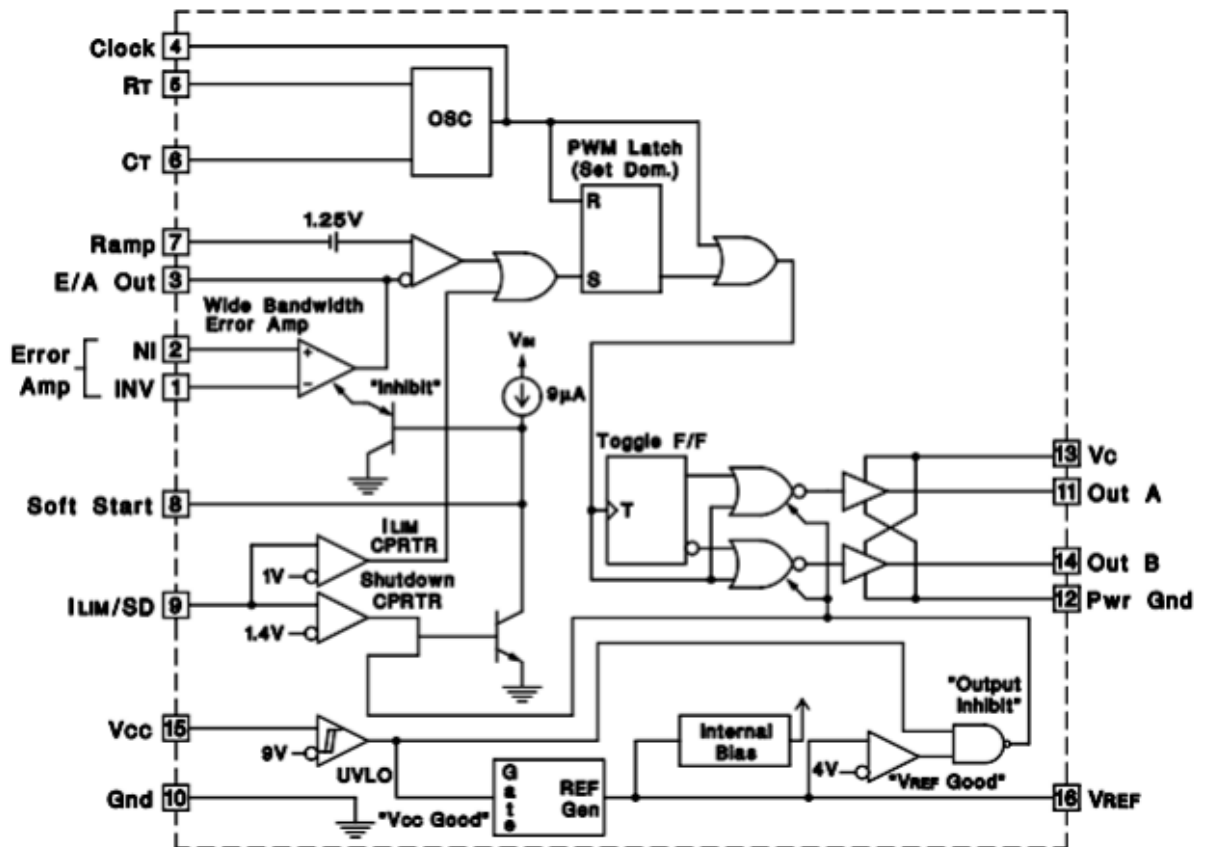


Рисунок 3.5 - Структурна схема ШИМ контролера UC2825DW

Максимально допустимі параметри:

- струм живлення 30 В, контакти 13, 15;
- вихідний постійний струм 0.5, імпульсний 2В, контакти 11, 14;
- вхідна напруга контактів 1, 2, 7 -0.3..7;
- вхідна напруга контактів 8, 9 -0.3..6;
- вхідний струм 4 контакту -5 мА;
- вихідний струм 3 контакту 5 мА
- розсіювана потужність 1 Вт;
- струм споживання 8 виведення 20 мА;



Для забезпечення стабільної напруги живлення використовуємо сигнал ОС, який отримуємо безпосередньо з контактів живлячого навантаження. Також забезпечуємо гальванічну ізоляцію ланцюга зворотного зв'язку, застосовуючи оптичну розв'язку. Використовуємо транзисторну оптопару VT1 (PS2501L-1)[15] для надійної стабілізації вихідної напруги та гальванічної ізоляції.

В якості прецизійного датчика напруги навантаження використовуємо регульований стабілізатор напруги VD1 (TL431) від фірми Texas Instruments. Напруга стабілізації цього стабілізатора залежить від напруги на його електроді. Якщо напруга на керуючому електроді менше 2,5 В, стабілізатор залишається закритим, пропускаючи лише невеликий струм, достатній для спалаху світлодіода. Резистор R4 використовується для обмеження струму через світлодіод. При перевищенні напруги на керуючому електроді 2,5 В струм через світлодіод збільшується, транзистор оптопари відкривається, і схема управління отримує інформацію про зміну напруги навантаження.

Значення опору струму обмежуючого резистора R4:

$$R_4 = \frac{U_{\pi} - U_F - U_{VD}}{I_F} = 2033 \text{ Ом} \quad (3.45)$$

Де  $U_{\pi}$  - напруга живлення, 24 В;

$U_F$  - падіння напруги на діоді, 1,17 В;

$U_{VD}$  – напруга на відкритому стабілізаторі, 2,5 В;

$I_F$  - необхідний струм для світлодіода, 10 мА;

Резистор повинен розсіювати потужність  $P_4$  не менше ніж:

$$P_4 = I_4^2 \cdot R_4 = 0.002 \text{ Вт} \quad (3.46)$$

Де  $I_4^2$  - Струм через резистор  $R_4$ ;

Найближчий номінал із ряду E24, E6, E12  $R_4=2$  кОм.

Як резистора виберемо SMD резистор RC1206JR-072KL, потужністю 0,25 Вт і напруга 200 В, з допустимим відхиленням 5% [16].

Розмір напруги, у якому загоряється сигналізатор, визначається дільником на опорах R1, R2, R3.

$$U_{\pi} = U_{REF} \cdot \left( \frac{R_2}{R_1 + R_3} + 1 \right) \quad (3.47)$$

Де  $U_{REF}$ - опорна напруга на стабілізаторі VD1, 2,5;

Задамося опір резистора  $R_2 = 10$  кОм, а  $R_3 = 100$  Ом:

$$R_1 = \frac{R_2}{\frac{U_{\pi}}{U_{REF}} - 1} - R_3 = 11527 \text{ Ом} \quad (3.48)$$

Потужність  $P_1$  на резисторі  $R_1$ :

$$P_1 = \frac{U_{REF}^2}{R_1} = 0.003 \text{ Вт} \quad (3.49)$$

В якості резистора  $R_1$  виберемо відстрочний резистор 3296W-1-203LF номіналом 20 кОм потужністю 0,5 Вт

$$P_2 = \frac{(U_{\pi} - U_{REF})^2}{R_2} = 0.00215 \text{ Вт} \quad (3.50)$$

З ряду E24, E6, E12 виберемо резистор номіналом  $R_2=10$  кОм, товстоплівковий резистор RC1206JR-0710KL номінальною потужністю 0,25 Вт і напругою 200 В, з допустимим відхиленням 5%

Резистор  $R_3$  вибирається за аналогією, RC1206JR-07100RL номіналом 100 Ом, потужністю 0,25 Вт

Конденсатор  $C_2$  резистор  $R_5$  - частотно-задаючі елементи генератора імпульсів ШІМ. Мертвий час генератора, що визначає динамічний діапазон контролера, залежить від номіналу конденсатора  $C_2$ , у нашому випадку мертвий час дорівнює 0,1 мкс. На рисунку. 3.7 показано графік залежності значення мертвого часу від значення ємності конденсатора  $C_1$

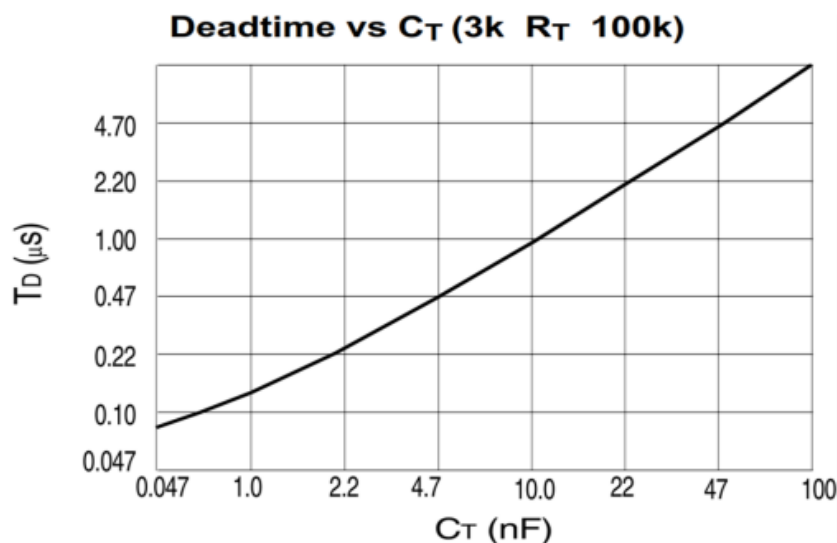


Рисунок 3.7 - Графік залежності значення мертвого часу від значення ємності конденсатора  $C_1$

о технічної документації на ШІМ контролер, на виведенні конденсатора, що час задає, максимальна напруга 6 В.

Найближчий номінал із ряду E24, E6, E12  $C2 = 10$  нФ, CC1206JRX7R9BB103 багат шаровий керамічний конденсатор поверхневого монтажу з допустимим відхиленням 5%, номінальна напруга постійного струму 50 В.

Часодавчий резистор R1 визначає струм заряду часзадаючої ємності C2, отже, частоту проходження імпульсів. Цей ДЖ працює на частоті 40 кГц. На рисунку 3.8 наведено графік залежності значення опору резистора R5 від частоти.

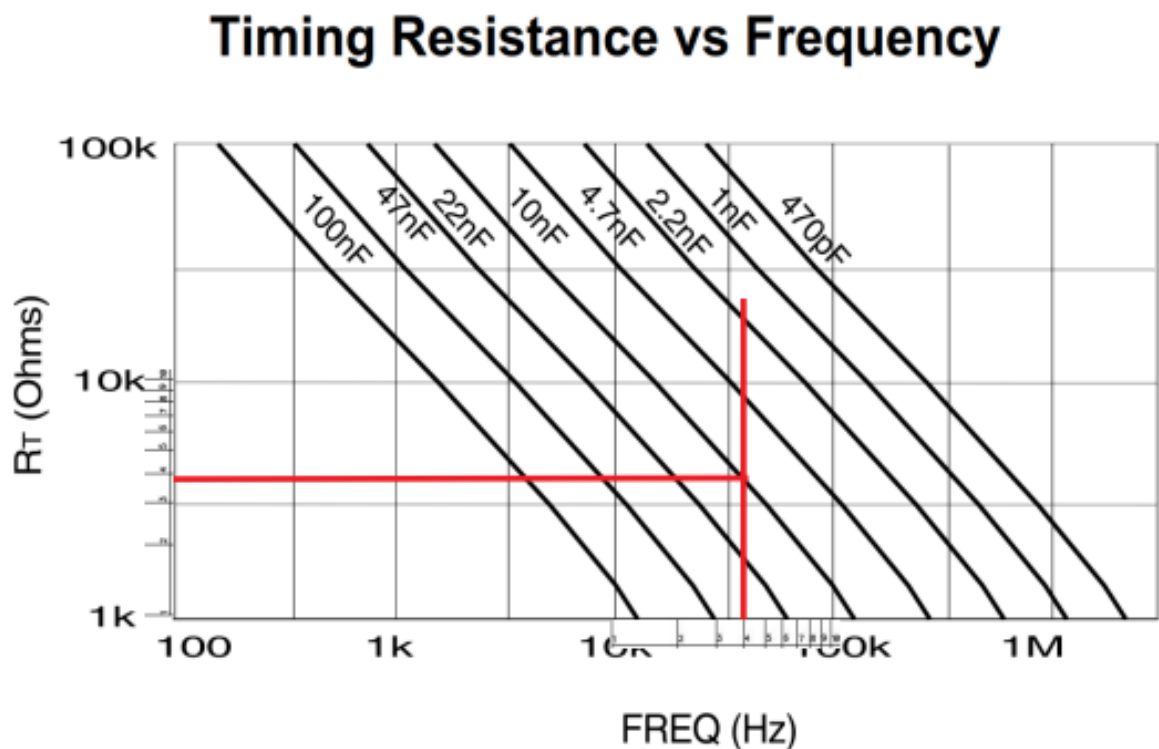


Рисунок 3.8 - Графік залежності значення опору резистора R5 від частоти

Найближчий номінал із ряду E24, E6, E12  $R5 = 3,9$  кОм, RC1206JR-073K9L товстошліткові резистори – для поверхневого монтажу з допустимим відхиленням 5%.

Конденсатор C1 – це м'який конденсатор запуску, виробник рекомендує вибирати даний конденсатор номіналом  $C1 = 0,01$  мкФ.

По входу живлення мікросхеми +15 В та опорної напруги подається на 2 вивід мікросхеми, ставляться конденсатори номіналом  $C3=0,1$  мкФ,  $C4=0,1$  мкФ.

Струмообмежуючий резистор  $R7 = 1$  кОм, вибраний з умови рекомендацій виробника ШІМ контролера.

### 3.6 Вибір мікросхеми драйвера керування

На сьогоднішній день на ринку представлено безліч драйверних мікросхем. З цього розмаїття, було обрано мікросхема компанії IXYS - IX2113B[18], яка найбільше задовольняє технічному умові проєктованого ИП.

Вона являє собою схему в інтегральному виконанні, здатну керувати високошвидкісними МОП і потужними транзисторами IGBT, які витримують падіння напруга на закритому каналі до 600 В. Драйвер формує два незалежних рівня, низький і високий, кожен з яких здатний подавати на затвор транзистора струм рівний 2 .

Мікросхема виконана у шістнадцяти вивідному корпусі SOIC. Розпинування представлено рисунок 3.9.

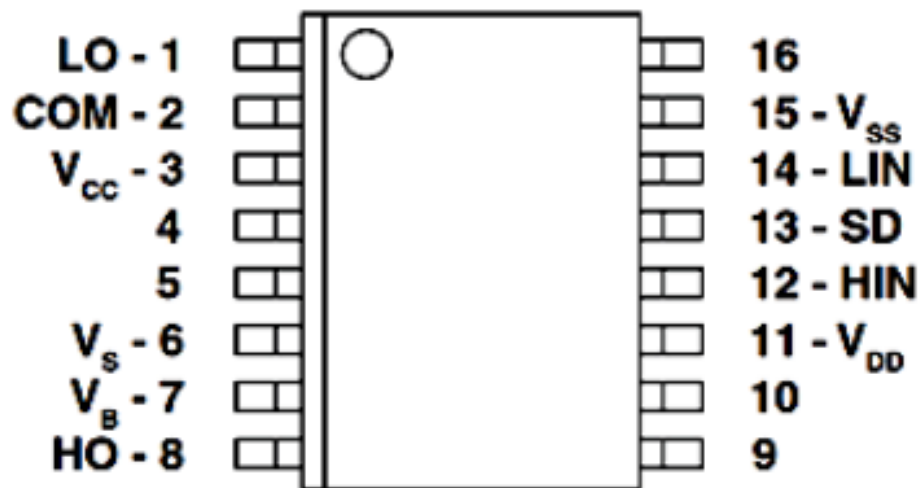


Рисунок 3.9 – Розпинування драйвера управління

Опис виводів наведено у таблиці 3.1

Таблиця 3.1 Опис виводів мікросхеми драйвера

Номер контакту	Ім'я контакту	Опис контакту
----------------	---------------	---------------

1	LO	Вихід низької сторони драйвера
2	COM	Повернення низької сторони
3	Vcc	Живлення низької сторони

Продовження таблиці 3.1

Номер контакту	Ім'я контакту	Опис контакту
4	–	Не описується
5	–	Не описується
6	Vs	Повернення плаваючого живлення високого боку
7	Vb	Плаваючі живлення високого боку
8	HO	Вихід високої сторони драйвера
9	–	Не описується
10	–	Не описується
11	Vdd	Живлення логіки
12	HIN	Логічний вхід для високої сторони драйвера
13	SD	Логічний вхід для завершення роботи
14	LIN	Логічний вхід для низької сторони драйвера
15	Vss	Земля логіки
16	–	Не описується

Електрична принципова схема включення драйвера управління представлена рисунку 3.10

Вхідним сигналом служить сигнал, що подається з ШІМ контролера. Вихідні напруги драйвера, керують «верхнім» та «нижнім» силовими транзисторами. У драйвері вжито заходів щодо забезпечення необхідних керуючих рівнів.

Конденсатори C1 і C4, що фільтрують, ставляться по живленню мікросхеми. Виробник рекомендує розташовувати їх якомога ближче до живильних висновків. Номінали фільтруючих конденсаторів  $C1 = 0,1 \text{ мкФ}$   $C4 = 0,1 \text{ мкф}$ .

Конденсатор C2 та діод VD1 – бустрепний каскад. Його завдання забезпечити харчування каскаду, керуючого верхнім ключем.

Мінімальне значення ємність безтрепетного конденсатора C2 визначається з співвідношення:

$$C_2 \geq \frac{2 \cdot \left( 2 \cdot Q_G + \frac{I_{qbs}}{f} + Q_{ts} \right)}{U_{cc} - U_f} = 460 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} \quad (3.51)$$

де  $Q_G$  - заряд затвора силового транзистора, 100 нКл;

$I_{qbs}$  - струм споживання вихідного каскаду драйверної мікросхеми у статичному режимі, 187 мкА;

$Q_{ts}$  - циклічна зміна заряду драйвера, 5 нКл;

$U_{cc}$  - напруга живлення схеми управління, 15 В;

$U_f$  - падіння напруги на бустрепному діоді, 1,25 В;

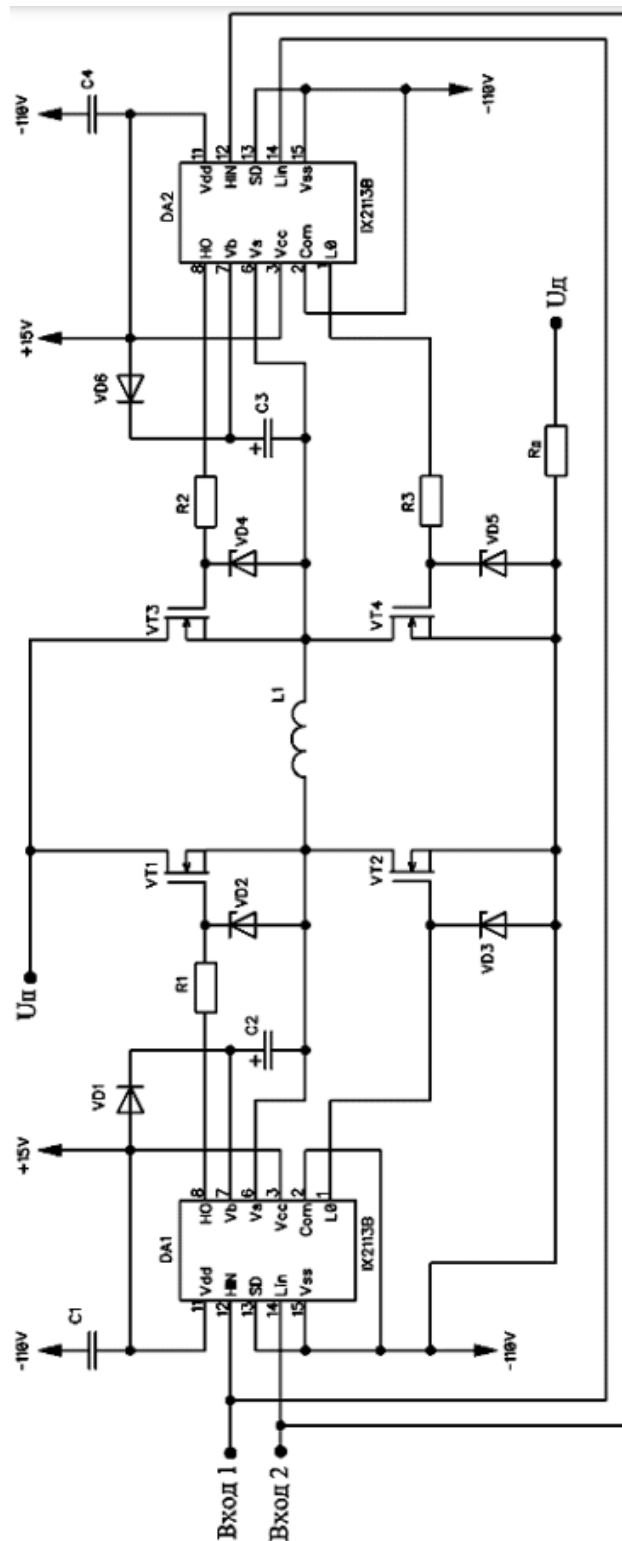


Рисунок 3.10 - Електрична принципова схема включення драйвера

Отримане значення бутстрепної ємності мінімальне. Щоб мінімізувати ризик від ненадійної роботи схеми, розробники рекомендують збільшити отриману ємність у 15...20 разів.

$$C_2 = 460 \cdot 10^{-9} \cdot 20 = 9.5 \text{ мкФ} \quad (3.52)$$

Як конденсатор виберемо танталовий конденсатор T491C106K025AT, на 10 мкФ, з малим витоком.

Діод VD1 повинен витримувати зворотну напругу більш ніж 170 В. Крім того, час зворотного відновлення діода не повинен перевищувати 100 нС. Для виконання цієї умови підходить діод EGP10F, фірми виробника ON Semiconductor.

Резистори R1 – R4, резистори затвори, забезпечують захист драйвера, від явища заціпки. Величина резисторів не повинна бути надто великою, щоб не відбулося мимовільного відкриття силового транзистора  $R1=R2=R3=R4=10\text{ Ом}$ .

Стабілітрони VD2 – VD5 забезпечують захист затворів транзисторів від перенапруги. Як стабілітрони були використані MM3Z18VT1G, компанії ON Semiconductor, з напругою стабілізації 18 Ст.

## 4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КЛЮЧОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІНВЕРТОРА З НАСТУПНИМ ВИПРЯМЛЕННЯМ

Метою моделювання пристрою є перевірка теоретичних розрахунків шляхом вимірювання електричних параметрів та порівняння їх зі заявленими у ТЗ. Крім того, модель служить для наочної демонстрації управління ключовими елементами за допомогою ШІМ.

В якості середовища моделювання використано програму LTspiceXVII, яка є простим і точним інструментом для моделювання схем і повністю безкоштовною. Однією з цікавих особливостей програми є можливість експорту результатів симуляції в аудіофайл формату wav, який можна прослухати. На рисунку 4.1 представлено головне вікно програми LTspice.

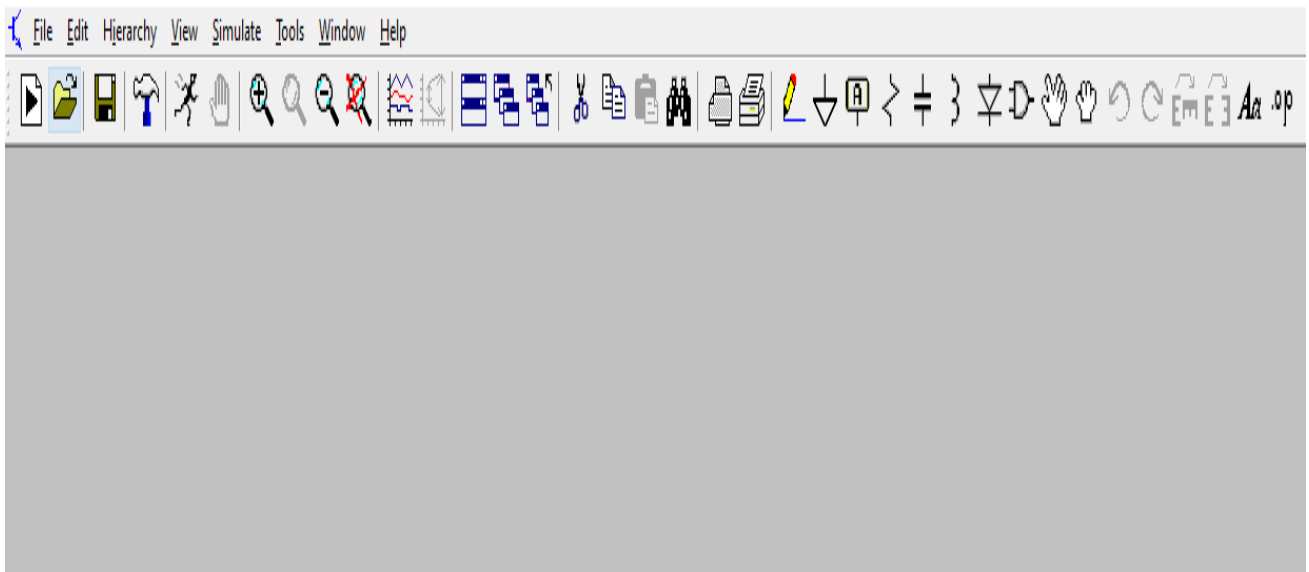


Рисунок 4.1 - Головне вікно програми LTspice

В результаті було складено модель ключових елементів інвертора з наступним випрямленням, яка наведена на рисунку 4.2.

Як ключові елементи і випрямлячі були обрані реальні моделі транзисторів і діодів, які є аналогами реальних елементів.

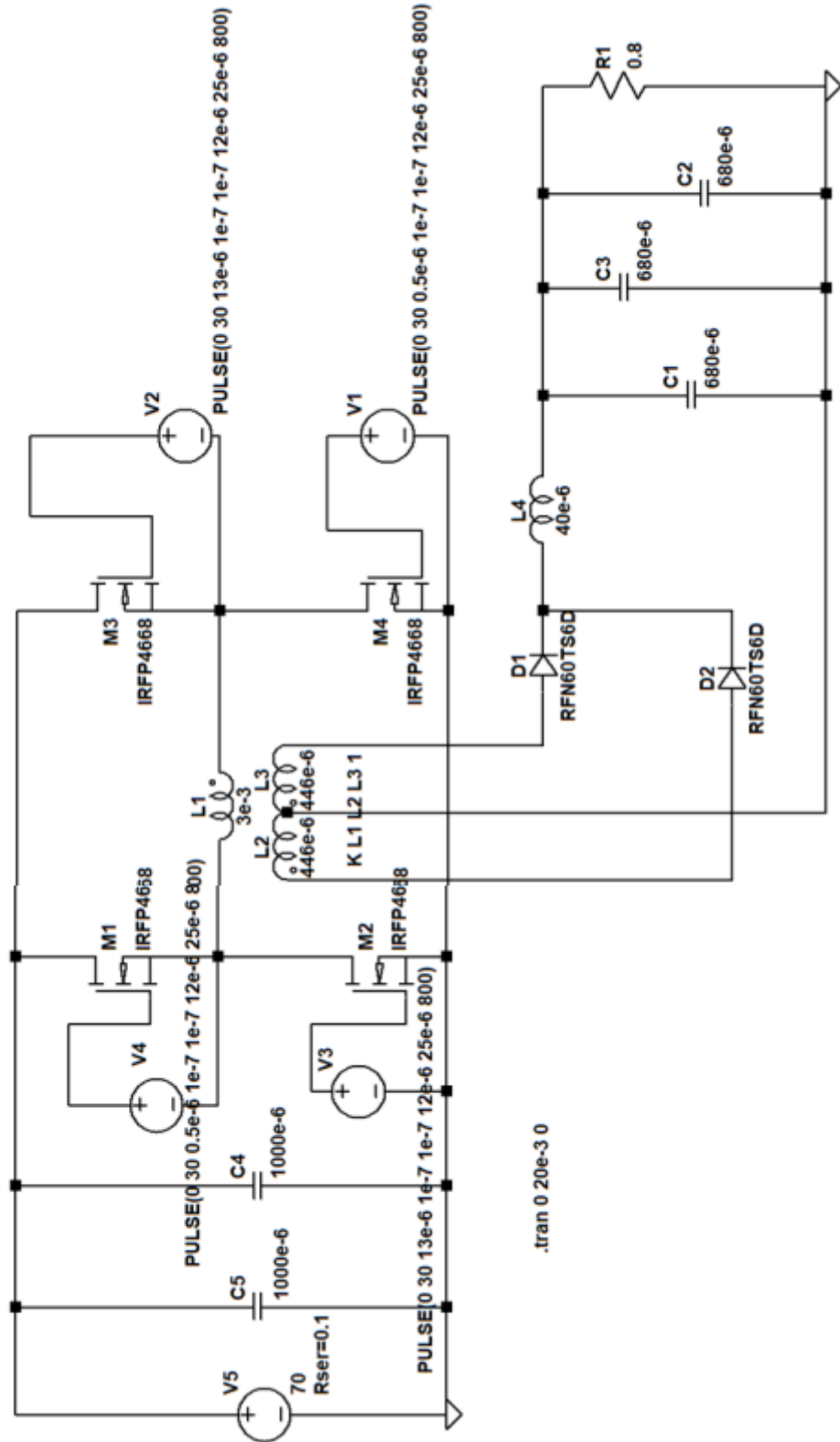


Рисунок 4.2 - Модель ключових елементів інвертора, з наступним

Індуктивності первинної обмотки трансформатора L1 і вторинних обмоток L1 і L3 були розраховані за допомогою формули:

$$L = n^2 \cdot A_L$$

Де  $A_L$  – значення індуктивності на один виток, для даного матеріалу осердя  $A_L = 4460$  нГн,

$$L_1 = 26^2 \cdot 4460 = 3 \text{ мГн} \quad (4.1)$$

$$L_2 = L_3 = 10^2 \cdot 4460 = 446 \text{ мГн} \quad (4.2)$$

Для керування силовими транзисторами використовуються імпульсні генератори, що задають час перемикання та тривалість імпульсу.

При мінімальній вхідній напрузі  $U_{вх}(\text{min}) = 70$  В, визначається максимальна тривалість імпульсу  $t_{ON} = 12$  мкс. Осцилограми вихідної напруги представлено рисунку 4.3, струмів наведено рисунку 4.4. Амплітуда напруги пульсацій на виході наведено рисунку 4.5.

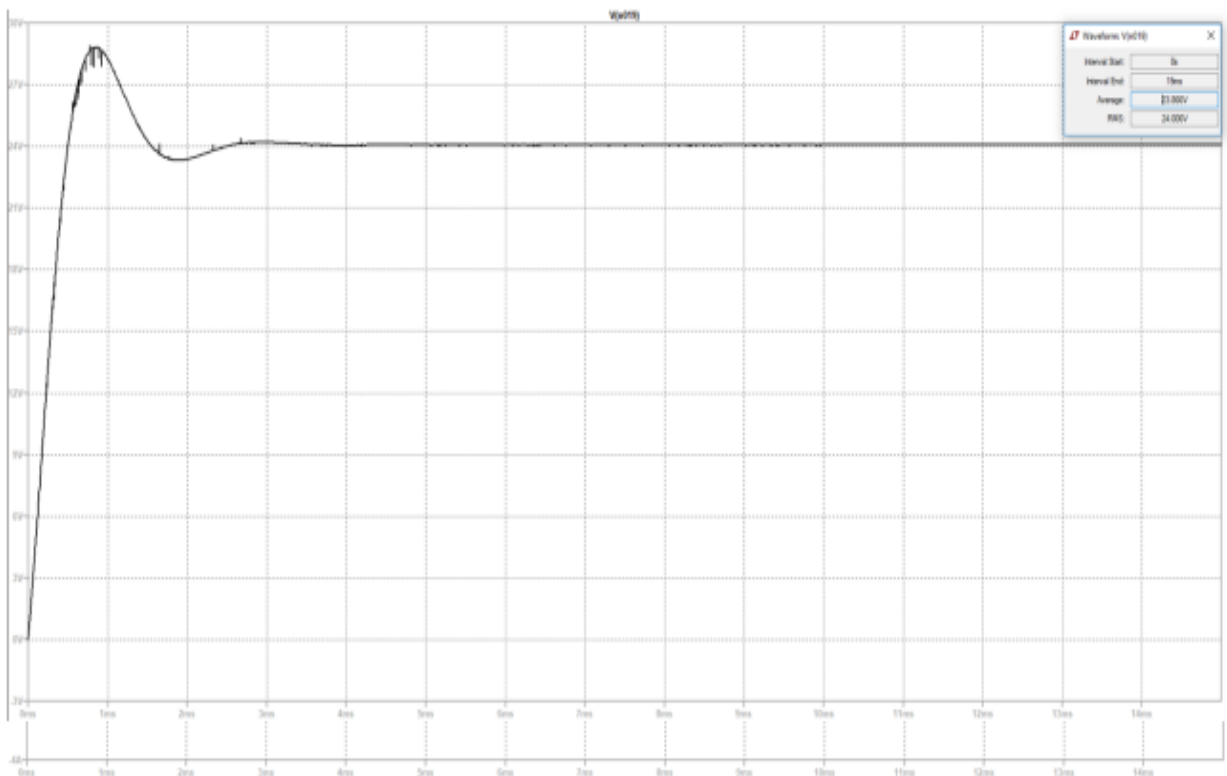


Рисунок 4.3 - Осцилограма вихідної напруги при  $U_{вх}(\text{min}) = 70$  В

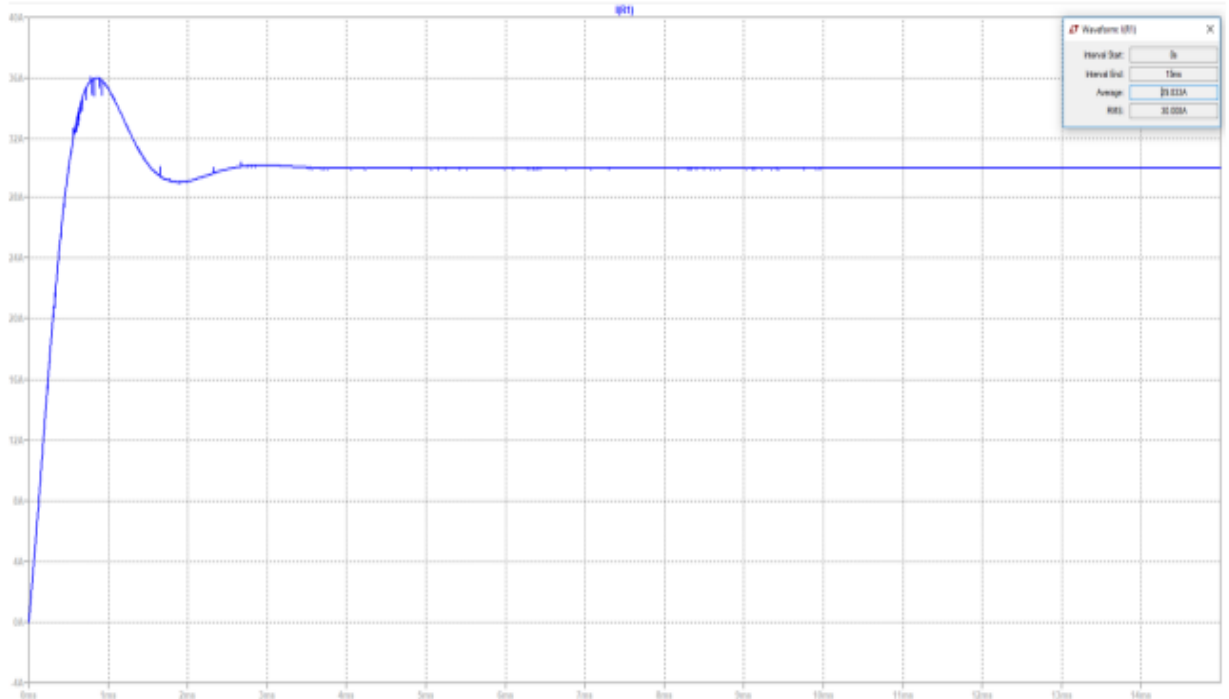


Рисунок 4.4 - Осцилограма вихідного струму при  $U_{вх}(\min) = 70 \text{ В}$

Як видно з графіків вихідна напруга та вихідний струм відповідають заданим у ТЗ.

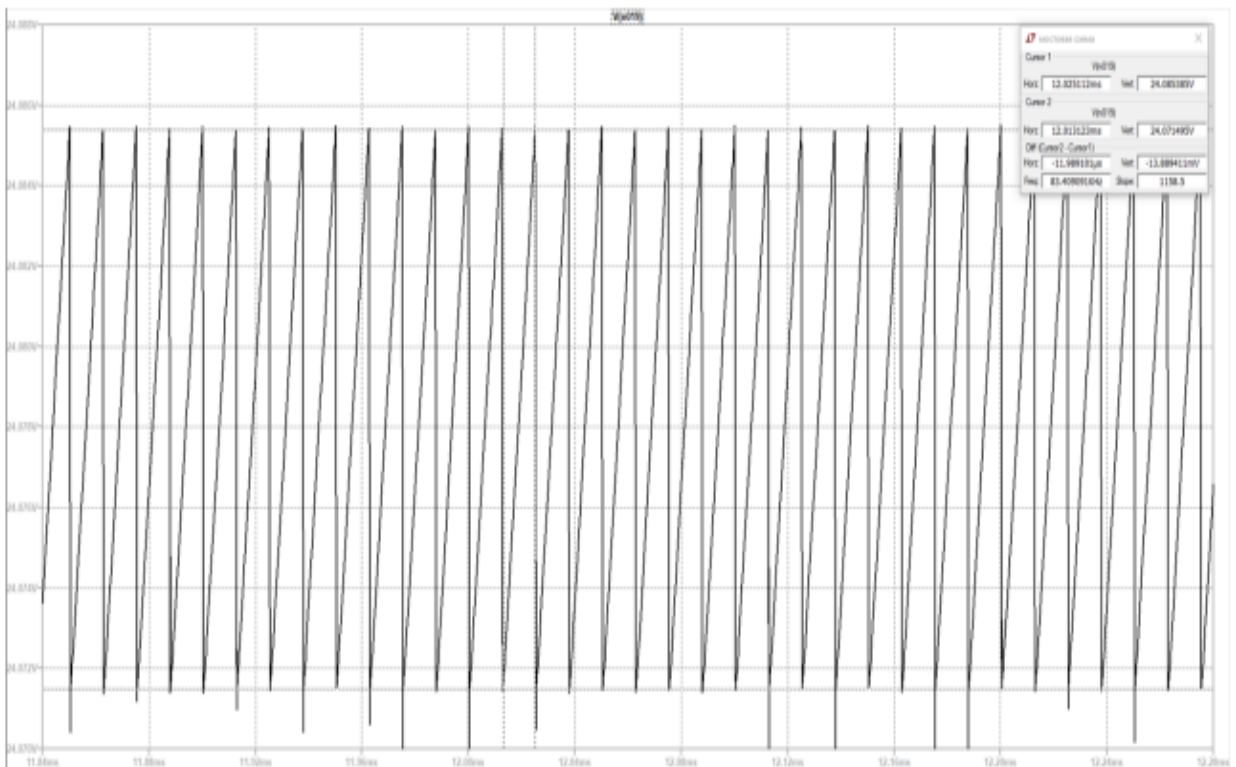


Рисунок 4.5 - Амплітуда напруги пульсацій на виході при  $U_{вх}(\min) = 70 \text{ В}$

Розмах пульсації напруги на виході становлять 14 мВ.

При максимальній вхідній напрузі  $U_{вх(max)} = 140$  В, визначається мінімальна тривалість імпульсу  $t_{ON} = 6$  мкс. Осцилограми вихідної напруги представлено рисунку 4.6, струмів наведено рисунку 4.7. Амплітуда напруги пульсацій на виході наведено рисунку 4.8.

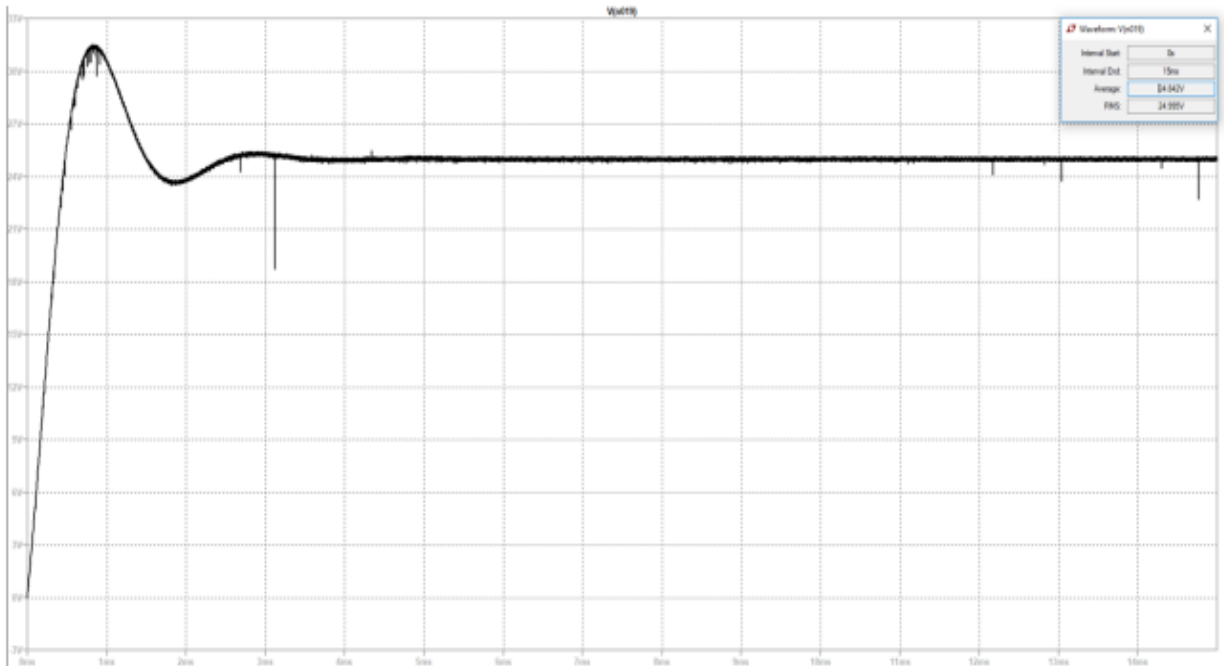


Рисунок 4.6 - Осцилограма вихідної напруги при  $U_{вх(max)} = 140$  В

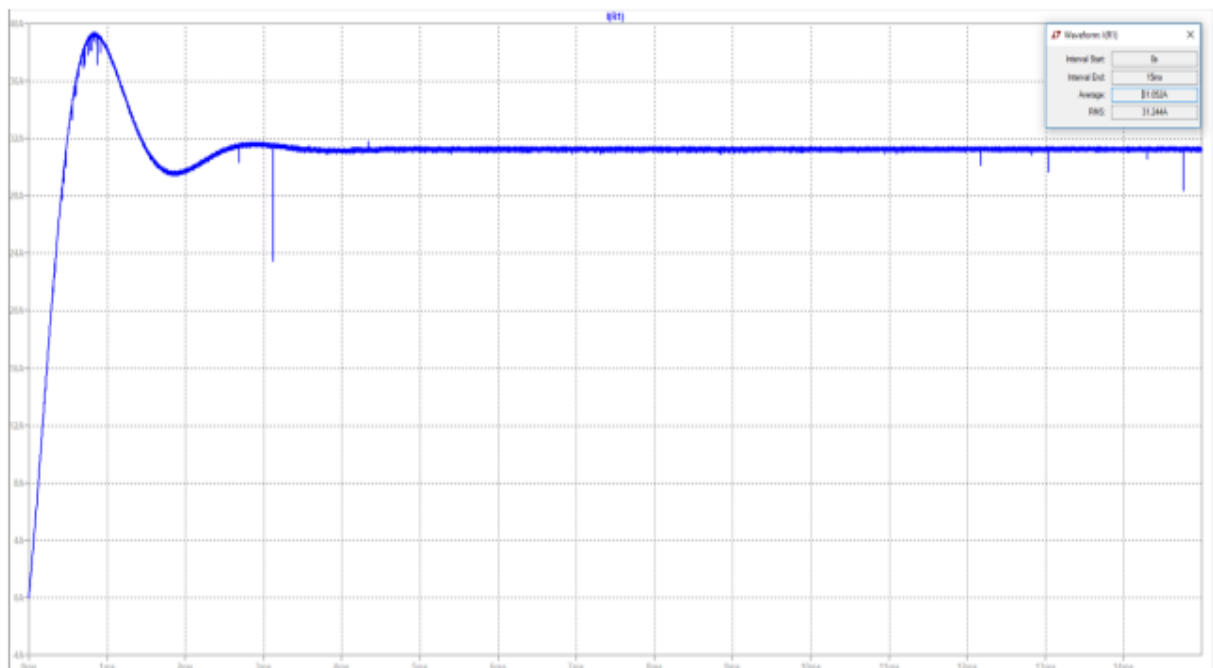


Рисунок 4.7 - Осцилограма вихідного струму при  $U_{вх(max)} = 140$  В

При  $U_{вх(max)} = 140$  вихідна напруга перевищила задане значення на 4%, а вихідний струм на 3%. Це може бути обумовлено не врахованими паразитними параметрами, а також ідеальністю моделі.

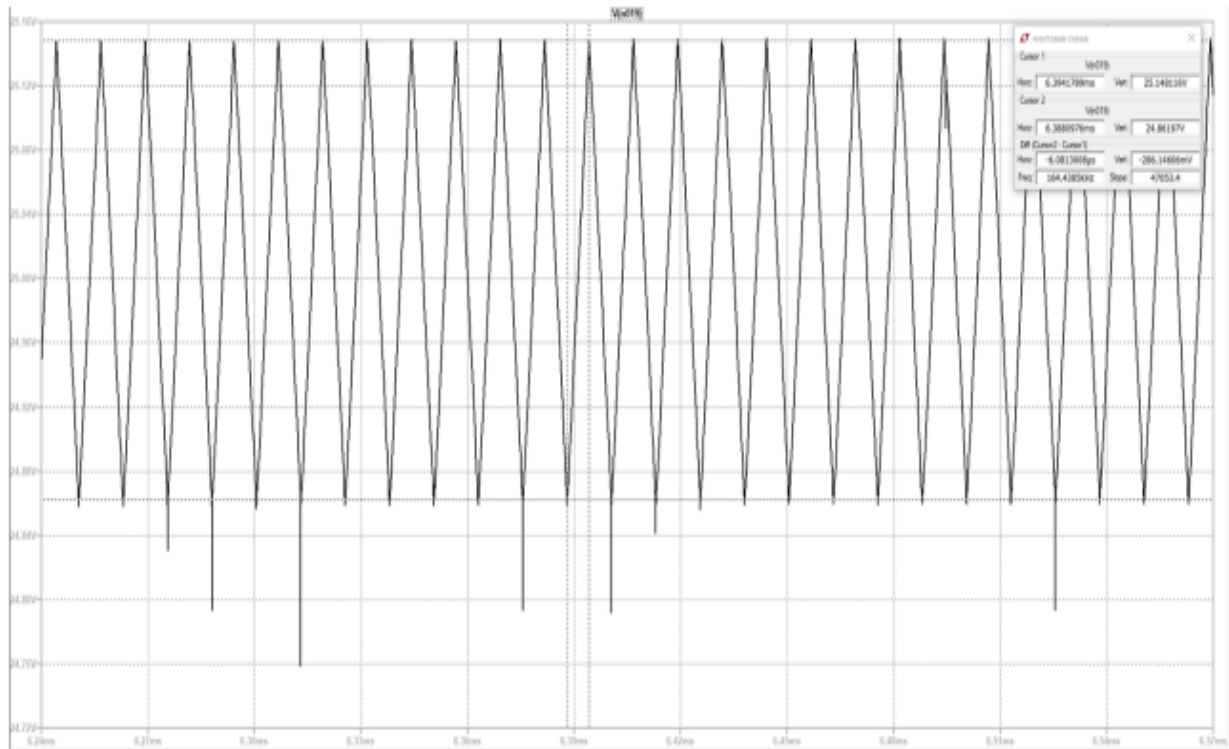


Рисунок 4.8 – Амплітуда напруги пульсацій на виході при  $U_{вх(max)} = 140$  В

З графіка видно, що при  $U_{вх(max)} = 140$ , розмах пульсацій вихідної напруги становить 287 мВ.

Результати моделювання практично повністю відповідають параметрам, заданим у ТЗ. Розбіжності вихідного струму та напруги при максимальній вхідній напрузі пояснюються неврахованими в моделі електричними параметрами, які є в реальній схемі.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломного проекту було розроблено лабораторне джерело електроживлення, яке є імпульсним джерелом з живленням на частоті перетворення 40 кГц. Розроблений пристрій повністю відповідає технічному завданню, зокрема завдяки використанню імпульсного трансформатора з високою напругою ізоляції та транзисторного оптрона, що забезпечує гальванічну розв'язку між вихідним та вхідним сигналами. Це має велике значення, оскільки використання пристрою передбачає прямий контакт з тілом людини.

Серед основних переваг розробленого лабораторного джерела електроживлення варто відзначити його компактні габарити, високий коефіцієнт корисної дії (ККД), низький рівень пульсації напруги на виході пристрою та широкий діапазон вхідних напруг.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Браун М. Источники питания. Расчет и конструирование.: Пер. с англ. – К.: "МК-Пресс", 2007. - 288 с., ил.
2. Higgins, N. V. Thermal detectors feel the heat of light / N. V. Higgins // Laser Focus World. – 1994. - № 11. - P. 65 - 70.
3. Кочетков А.В. Влияние режима работы силовых каналов понижающего типа на выходные пульсации многофазных импульсных преобразователей постоянного напряжения / А.В. Кочетков // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2011, № 1 – С. 133-136.
4. Кадацкий А.Ф. Пульсации токов импульсных преобразователей постоянного напряжения модульной структуры с граничным режимом функционирования с силовыми каналами инвертирующего типа / А.Ф. Кадацкий, А.П. Русу, Т.Н. Ерыкалина // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2013, № 2 – С. 47-61.
5. Ревко А.С. Широтно-импульсная модуляция в квазирезонансных преобразователях / А. С. Ревко, Д. М. Брика // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 5. – 2006. – С. 125-128.
6. Martin, J. E. Design considerations for the construction of an absolute radiation detector at the NPL / J. E. Martin, P. R. Haycocks // Metrologia. - 1998. - V. 35. - № 4. - P. 229 – 233.
7. Справочник по приемникам оптического излучения. / В. А. Волков, В. К. Вялов, Л. Г. Гассанов и др. ; под ред. Л. З. Криксунова Л. С. Кременчугского. – К. : Техніка, 1985. – 216 с.
8. Gardner, J. L. A four–element transmission trap detector / J. L. Gardner // Metrologia. - 1995. - V. 32. - № 6. – P. 469 - 472.
9. Fox, N. P. Improved Near–Infrared Detectors / N. P. Fox // Metrologia. – 1993. – V. 30. - № 4. – P. 321 – 325.

10. A new high ultraviolet sensitivity FTO-GaP Schottky photodiode fabricated by spray pyrolysis / A. Malik, A. Seco, E. Fortunator et al. // *Semicond. Sci. and Technol.* – 1998. – V. 13. - P. 102 - 107.
11. Підвищення якості імпульсних джерел живлення РЕА. / М. І. Хіль, Д. Г. Єгоров, О. В. Шевченко *Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля №17(188) – 2012. – С. 228-233.*
12. Метод оперативного тестування імпульсних трансформаторів комп'ютерної техніки / С. М. Цирульник, Б. Андерсон, В. І. Роптанов // *Вінницький національний технічний університет. 2018.*
13. Імпульсний лабораторний блок живлення на базі мікросхеми TL494 із стабілізацією струму та напруги. / О. Д. Майданський Д. П. Проценко // *Вінницький національний технічний університет. 2018.*
14. Єрмоменко Є.І. лабораторна установка для дослідження широтноімпульсного перетворювача напруги / Єрмоменко Є.І., магістрант, Димко С.С., асистент НТУУ «КПІ», кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу // *2015.*
15. Tambo H., Yamada A., Fons P., Shibata H., Matsubara K., Iwata et al. *Appl. Phys. Lett.* - 84.- 22.- 4412.-2004.
16. Мироненко П.С. Стенд для перевірки працездатності низькочастотних інерціальних модулів / П.С. Мироненко, О.М. Павловський // *Вісник НТУУ «КПІ» Серія «Приладобудування» - 2018.-№56 (2), с. 7-13*
17. Мироненко П.С. Комплекс спеціалізованого стендового обладнання для контролю характеристик низькочастотних акселерометрів / П.С. Мироненко, О.М. Павловський // *Вісник НТУУ «КПІ» Серія «Приладобудування» - 2019.-№57 (21), с. 14-19*
18. .The basics of active power factor correction [Електроний ресурс] / LAZAR's power factor correction guide – 2013, 2017 Lazar Rozenblat. All rights reserved. Режим доступу: <http://www.powerfactor.us/active.html>