Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії _____
(повна назва)

Кафедра ___Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв _____
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти_____другий (магістерський)_____

Дослідження перспективних схем перетворювачів електричної енергії для сонячних електростанцій
(тема)

Виконав:
студент __2_ курсу, групи __ЕППм-22-1_____
_____Сідак Д.О_____
(прізвище, ініціали)

Спеціальність _____171 Електроніка_____
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми ____освітньо-професійна_____
Освітня програма Електронні прилади та пристрої_____
(повна назва освітньої програми)

Керівник ____проф. Грицунов О.В._____
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ ____Бондаренко І. М
(підпис) (прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет_____Електронної та біомедичної інженерії_____

Кафедра___Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв___

Рівень вищої освіти_____другий (магістерський)_____

Спеціальність _____171 Електроніка_____
(код і повна назва)

Освітня програма____Електронні прилади та пристрої_____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«_____»_____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові_____Сідаку Денису Олександровичу_____
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження перспективних схем перетворювачів електричної енергії для сонячних електростанцій
затверджена наказом університету від __20.11.2023 р. № 1369Ст_____
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _31_ ____12____ 2024 р.
3. Вихідні дані до роботи ___напруга навантаження $U_н$ = 103 В; Номінальний робочий струм навантаження $I_н$ = 0,43 А. Напруга на вторинній обмотці трансформатора: U_{2m} = 150 В; Струм на вторинній обмотці трансформатора I_2 = 0,43 А; Частота: f = 24 кГц. Максимальний робочий струм 1 А. Максимальна зворотна напруга 50 В. Максимальний імпульсний струм 30 А. Максимальна напруга у прямому напрямку, 25 °С 1.1 В. Максимальний постійний зворотний струм при номінальній напрузі 10 мкА. Робоча температура -65 ° С ... +175 °С.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
1. Аналітичний огляд схем та методів моделювання інверторних систем.
2. Розрахунок характеристик інверторних схем.
3. Побудова моделі схеми і отримання результатів моделювання.
Висновки

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

Перелік елементів

Презентація (слайди) - 10 шт

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів	Примітка
	Отримання завдання	21.11.2023	
	Огляд інформаційних джерел	21.11–25.11	
	Створення проекту	26.11–28.11	
	Розробка конструкції пристрою	29.11–30.11	
	Пояснювальна записка	01.12–14.12	
	Підготовка презентації	15.12–21.12	
	Рецензування, нормоконтроль	21.12–30.12	
	Здача роботи на кафедру	31.12.2023	

Дата видачі завдання 21 листопада 2023 р.

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Грицунов О.В.

(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 67 сторінок, рисунків, 3 додатки, 18 використаних джерел, 27 рисунків.

СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА, ВИСОКОЧАСТОТНЕ ЖИВЛЕННЯ, ІНВЕРТОРНА СХЕМА, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ІНВЕРТОР, ІНДУКТИВНО-ЄМНІСНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ.

Об'єктом дослідження є схеми постійного (стабілізованого) струму на основі індуктивно-ємнісного перетворювача, тобто схеми розподілу та споживання сонячної електричної енергії, що забезпечують незалежність вихідного струму від величини опору навантаження.

Мета роботи – створення моделі пристрою постійного струму на основі індуктивно ємнісного перетворювача, аналіз його роботи та порівняння результатів моделювання з розрахунковими значеннями.

У роботі було розглянуто основні схеми перетворювачів постійної напруги на змінну. Для цього була вибрана двотактна схема інвертора із середньою точкою трансформатора, що володіє підвищеною ефективністю при відносно малих значеннях напруги живлення. Проведено розрахунок силової частини та системи управління джерела живлення, вибрано елементну базу для реалізації всіх блоків пристрою. Розроблено модель розробленого пристрою у програмі MultiSim.

Інверторні схеми можуть бути застосовані у широкому спектрі галузей, автомобілебудування, фотоелектричні масиви, а також для живлення побутових предметів.

ABSTRACT

Explanatory note contains 67 pages, images, 3 applications, 18 sources of literature, 27 pictures.

SOLAR ENERGETICS, INVERTER CIRCUIT, SIMULATION MODELING, INVERTER, INDUCTIVE CAPACITIVE CONVERTER, HIGH FREQUENCY POWER SUPPLY.

The object of the study are the schemes of direct (stabilized) current on the basis of inductive-capacitive converter, schemes of distribution and consumption of solar electric energy, ensuring the independence of the output current from the value of load resistance.

The purpose of the work is to create a DC model based on an inductively capacitive converter, analyze its operation and compare the simulation results with the calculated ones.

The main schemes of DC-DC converters are considered in the work. For this, a two-stroke inverter circuit with a midpoint transformer was selected, which has increased efficiency at low values of life voltage. The calculation of the power part and the power supply control system is performed, the element base for the implementation of all device units is selected. The model of the developed device in the MultiSim program is developed.

Inverter circuits can be used in a wide range of industries, automotive, photovoltaic arrays, as well as for powering household items.

ЗМІСТ

ВСТУП 8
1 ОСНОВИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ 9
1.1 Вибір контролера 9
1.2 МРТТ контролери: переваги та недоліки 13
1.3 Послідовне й паралельне з’єднання сонячних батарей 16
2 ТИПОВІ КОНСТРУКЦІЇ ІНВЕРТОРІВ 23
2.1 Напівпровідникові інвертори 24
2.2 Індуктивно-ємнісні перетворювачі 25
2.3 Галузі застосування інверторних схем 29
3 МОДЕЛЮВАННЯ ІНВЕРТОРНИХ СХЕМ 23
3.1 Розрахунок ІЄП 24
3.2 Розрахунок трансформатора 25
3.3 Вибір транзисторів 29
3.4 Розрахунок схеми керування транзисторами 32
ВИСНОВКИ 46
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 47
Додаток А
Додаток Б
Додаток В

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АІ - автономний інвертор

ЕРС - електрорушійна сила

ЗГ - задаючий генератор

ЗІ - залежний інвертор

ІЄП - індуційно-ємнісний перетворювач

ЛЛ- люмінісцентна лампа

ПП - підсилювач потужності

АС - змінний струм

DC - постійний струм

ВСТУП

Сонячна електростанція – спеціальна інженерна конструкція, яка слугує для перетворення сонячної радіації в електричну енергію (постійний або змінний струм). Найпоширеніший тип сонячних електростанцій заснований на плоских фотоелектричних модулях монокристалічного або полікристалічного виду, які забезпечують перетворення сонячної радіації на постійний струм (DC). Залежно від схеми, що застосовується, постійний струм може інвертуватися в змінний (AC) або стабілізуватися для заряду акумуляторних батарей.

Принцип дії сонячної електростанції: сонячна радіація перетворюється на постійний електричний струм за допомогою сонячних панелей, які підключаються до контролерів заряду акумуляторів. Електрична енергія накопичується в акумуляторах вдень, коли Сонце активно, після чого може використовуватися в будь-який час для живлення споживачів постійного струму.

Сонячні електростанції бувають автономними, мережевими і гібридними. Автономна схема може застосовуватися, коли немає мережі змінного струму. Вся накопичена за світловий день електроенергія в акумуляторах використовується у вечірній та нічний час для живлення споживачів змінного струму. Правильний розрахунок потужності сонячних панелей (PV-масиву) та достатня енергоємність акумуляторів дозволяють забезпечити повну автономність об'єкта.

У мережевих електростанціях вироблений сонячними батареями постійний струм надходить на вхід сонячного інвертора, який здійснює перетворення постійного в змінний струм (DC/AC). Вихід від сонячного інвертора підключений до мережі змінного струму та споживачів електроенергії. Така схема відрізняється своєю простотою, проте конструкція має кілька особливостей. Так, електростанція працює тільки коли доступна електрична мережа змінного струму, а також напруга в мережі повинна знаходитись у робочому діапазоні інвертора. Цей вид дуже затребуваний для будинків, дач, котеджів, де пропонуються вигідні умови «зеленого» тарифу. Вдень, коли споживання електроенергії, як правило, на

мінімальному рівні, вироблена енергія передається в мережу за умовами «зеленого» тарифу. У вечірній та нічний час, коли в будинку працює основна частина споживачів, енергія надходить із мережі. Таким чином, даний вид сонячної електростанції дозволяє суттєво економити на витратах за оплату електроенергії, а якщо встановлено достатній масив сонячних батарей, домогосподарство отримуватиме прибуток за позитивну різницю виробленої та витраченої електроенергії за підсумками місяця.

Гібридна сонячна електростанція влаштована так: сонячні батареї підключені до мережевого сонячного інвертора (DC/AC). Мережа змінного струму підключається на вхід гібридного інвертора (DC/AC), а також до гібридного інвертора підключені акумуляторні батареї. Вихід мережевого сонячного інвертора та гібридного інвертора об'єднані через розподільчий щит та забезпечують електроживленням споживачів змінного струму. Застосування гібридного інвертора із зарядним пристроєм у даному типі сонячної електростанції забезпечує ряд незаперечних переваг: електростанція працює навіть за відсутності напруги в мережі змінного струму, а також в умовах нестабільні мережі. Користувачеві доступно кілька режимів роботи, які можуть гнучко налаштовуватися за бажанням та відповідно до пори року.

Хоча у сучасній електротехніці схеми постійного струму широко використовуються у випадках, коли потрібно забезпечити незалежність величини струму навантаження від значення опору навантаження джерела живлення, що формують постійний струм, діючі стандарти на передачу та розподіл електроенергії передбачають використання змінного струму частотою 50/60 Гц. Для отримання постійного за величиною змінного струму широко застосовуються індуктивно-ємнісні перетворювачі (ІЄП) через їх простоту, надійність і економічність. Однак ІЄП має свої недоліки відносно великі маса та габарити, особливо при зниженій робочій частоті. Крім того, досить складно організувати плавне регулювання вихідного струму перетворювача.

Метою даної кваліфікаційної роботи (КР) є створення моделі пристрою постійного струму на основі індуктивно ємнісного перетворювача, аналіз його роботи та порівняння результатів моделювання з розрахунковими значеннями.. Проміжною ланкою між первинним джерелом живлення (акумулятор) і ІЕП є двотактний інвертор, що перетворює постійну напругу акумулятора на змінну прямокутну, що надходить на вхід індуційно-ємнісного перетворювача. Така побудова схеми підвищує індуктивно-ємнісного перетворювача збільшує ККД пристрою за рахунок зниження втрат потужності на перемикання транзисторів, а також забезпечує перебіг постійного струму в навантаженні, що має нелінійний характер.

1 ОСНОВИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

1.1 Вибір контролера

Принцип роботи PWM контролер є по суті перемикачем, який з'єднує сонячні модулі та акумулятор. В результаті напруга сонячних модулів буде перетворена на напругу, близьку до акумулятора. MPPT контролер є більш складним (і дорогим) - він регулюватиме свою вхідну напругу для того, щоб отримати максимальну потужність від сонячних батарей, а потім перетворює цю потужність, щоб задовольнити вимогам напруги, що змінюються, як акумулятора, так і іншого навантаження. Таким чином, цей контролер по суті розділяє напруги сонячних модулів та акумулятора, і цілком допустимим прикладом може бути 12В акумулятор на одній стороні MPPT контролера і велика кількість послідовно з'єднаних сонячних модулів із загальною напругою 36В на іншій.

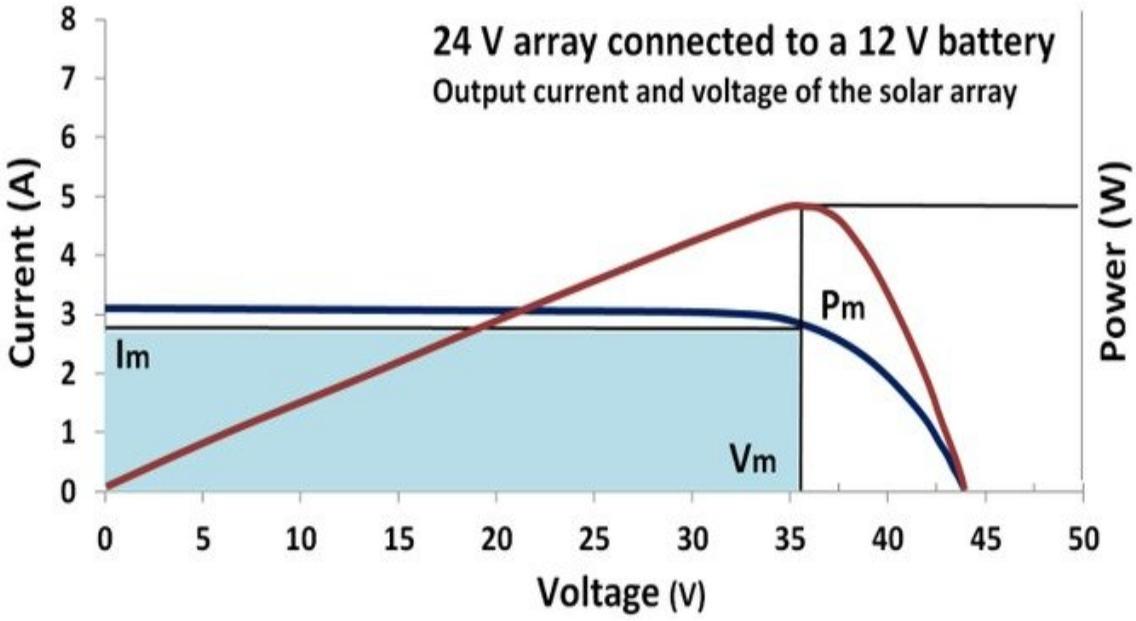


Рисунок 1.1 - Приклад з великою кількістю сонячних модулів, послідовно з'єднаними для отримання напруги 36В

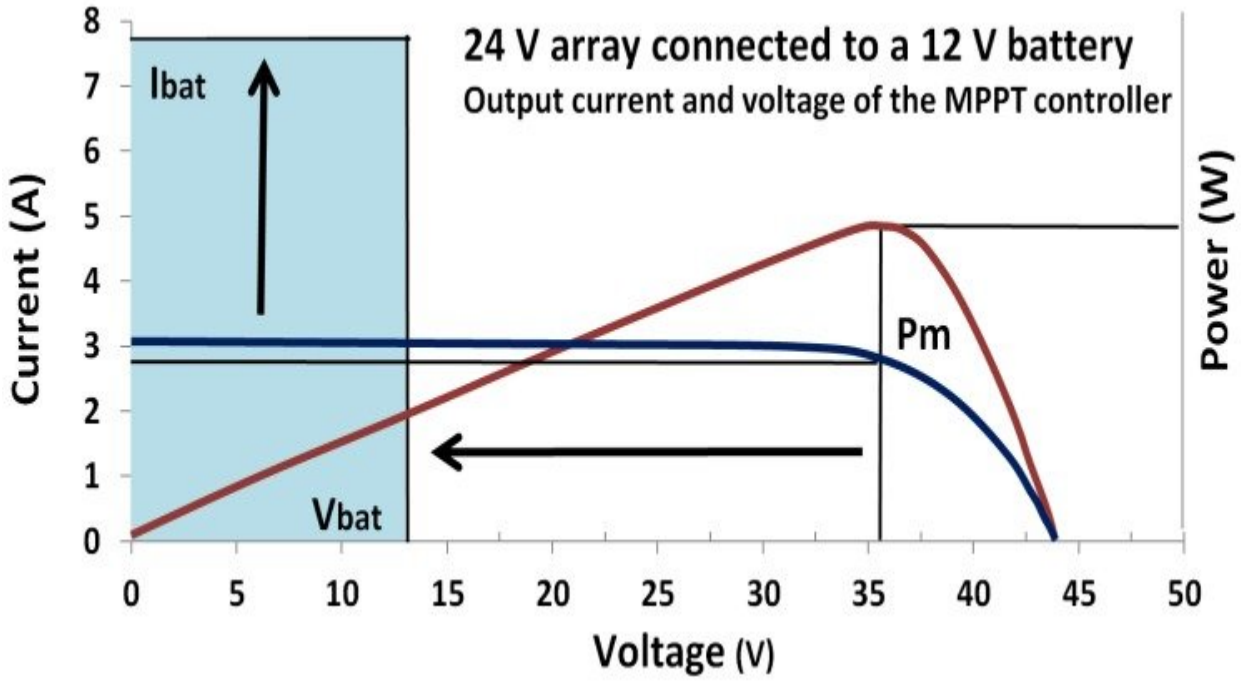


Рисунок 1.2 - Графічне відображення процесу перетворення постійного струму, що відбувається в контролері MPPT

Переваги MPPT контролера:

а) відстеження точки максимальної потужності

MPPT контролер збирає більше енергії від сонячних модулів у порівнянні з аналогом PWM. Різниця у продуктивності буде суттєва (від 10% до 45%) у випадках, коли температура сонячних модулів буде невеликою (нижчою за 45°C), або дуже високою (більше 75°C), або коли інтенсивність сонячного випромінювання дуже мала. При високих температурах або слабкому випромінюванні вихідна напруга сонячних модулів різко падатиме. Для того, щоб загальна напруга масиву сонячних модулів була достатньою щодо напруги акумулятора, необхідно збільшити кількість послідовно з'єднаних модулів;

б)нижча вартість проводів та/або менші втрати в них;

Закон Ома говорить, що втрати через опір у проводах складають Pc (Ват) = Rc * I2, де Rc - це опір матеріалу дроту. Виходячи з цієї формули площа поперечного перерізу кабелю може бути зменшена в чотири рази при подвоєнні напруги сонячних модулів. У разі заданої номінальної потужності більша кількість послідовно з'єднаних сонячних модулів призведе до збільшення вихідної напруги і зменшить вихідний струм всього масиву (P = V × I, і в цьому випадку, якщо

потужність P незмінна, то сила струму I повинна зменшуватися, а напруга V збільшуватись). У міру збільшення розмірів масиву сонячних модулів буде збільшуватися і загальна довжина проводів, що використовуються. Можливість послідовного з'єднання декількох модулів та економії завдяки використанню в цьому випадку проводів меншого перерізу, є вагомою причиною, щоб встановити MPPT контролер, як тільки загальна потужність масиву сонячних елементів буде перевищувати пару сотень ват (для акумулятора 12В), або кількох сотень ват (для акумуляторів) 24В та 48В). 3. Висновок PWM PWM контролер сонячного заряду є хорошим недорогим рішенням для невеликих сонячних батарей, температура яких в процесі експлуатації знаходиться в діапазоні від 45 до 75°C. MPPT Для того, щоб повною мірою використовувати потенціал MPPT контролера, напруга масиву сонячних модулів повинна бути суттєво вищою за напругу акумулятора. Контролер MPPT є найкращим рішенням для сонячних установок великої потужності (через нижчу вартість всієї системи завдяки меншому поперечному перерізу проводів, що використовуються). MPPT контролер також буде значно ефективнішим при низьких (нижче 45 ° C), або дуже високих (вище 75 ° C) температурах, або при слабкій інтенсивності сонячного випромінювання.

1.1 MPPT контролери: переваги та недоліки

Колись все було просто, до 12В акумулятора підключали 12В сонячний модуль і уважно стежили, щоб максимальний струм фотоконтролю не перевищував максимальний струм контролера заряду і система працювала.

На жаль, через те, що з PWM (від англ. Pulse-width modulation - широтно-імпульсна модуляція, ШІМ) контролером сонячного заряду сонячні батареї не можуть заряджати акумулятор у точці своєї максимальної потужності (maximum power point, MPP) виникають великі втрати енергії. На графіку нижче ви можете переконатися, що площа MPP (Vmpp × Impp), позначена синім, приблизно на 30% більше площі PWM (Vbatt × ~ Isc) у межах кривої IV.

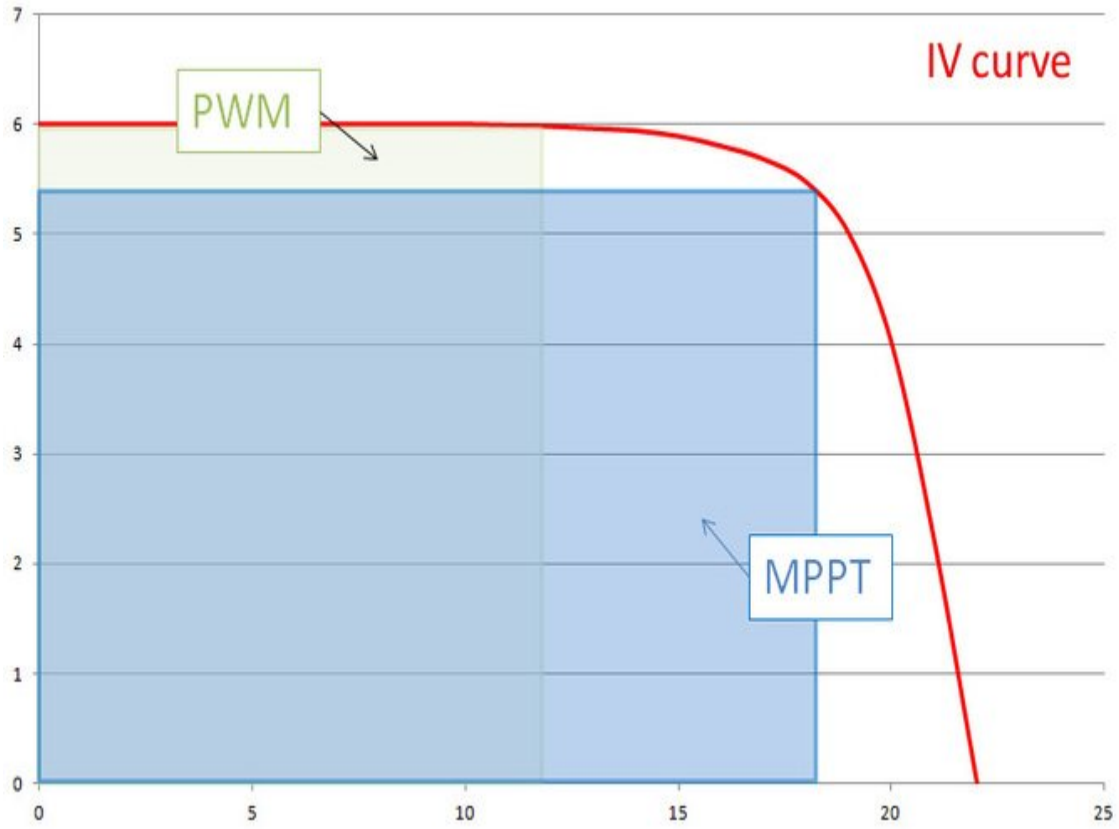


Рисунок 1.3 – Крива IV

Таким чином, використання MPPT контролера сонячного заряду, наприклад BlueSolar MPPT від компанії Victron Energy, безумовно надасть переваги.

Якщо головною вимогою є генерація певної кількості електроенергії, використання MPPT контролера дозволить заощадити на розмірах сонячної установки, так як ефективність зросте на 30% .

Якщо сонячні модулі вже встановлені, то додавання MPPT контролера просто додасть системі додаткові 30% потужності.

В обох вищезгаданих випадках споживач залишається у виграші!

Розрахунок параметрів сонячної установки можна зробити, використовуючи електричні характеристики компонентів, це допоможе перевірити їхню сумісність та безпеку спільного використання, оскільки розрахунки будуть ґрунтуватися на кількості генерованої енергії. Давайте подивимося на можливості використання електричних характеристик.

Наявність DC/DC перетворювача в контролері сонячного заряду BlueSolar MPPT робить всю систему гнучкішою щодо вхідної напруги контролера. Перше завдання, яке стоїть перед нами, полягає у пошуку відповідності між

фотовольтаїчними модулями та контролером, і тут номінальна напруга модуля, чи то 12В чи 24В, великої ролі вже не відіграє. В принципі можна використовувати будь-який модуль, якщо його параметри знаходяться в межах діапазону вхідної напруги контролера заряду.

Також ми можемо з'єднувати модулі не тільки паралельно, а й послідовно, що призведе до збільшення вхідної потужності та гнучкості всієї системи. На додаток до цього BlueSolar MPPT має функцію обмеження вхідної потужності (обмеження сили струму), що робить його ще більш унікальним і цікавим!

Тепер можна паралельно підключати сонячні модулі без необхідності заміни MPPT контролера на більш потужний. Така особливість не тільки мінімізує витрати, а й підвищує загальну генерацію всієї сонячної установки!

Крім цього, для полегшення розрахунків параметрів сонячної установки є спеціальна електронна таблиця, де вже внесено характеристики всіх контролерів Blue Solar MPPT та сонячних модулів компанії Victron Energy, так і інших виробників. З цією таблицею підбір сонячного контролера значно полегшується.

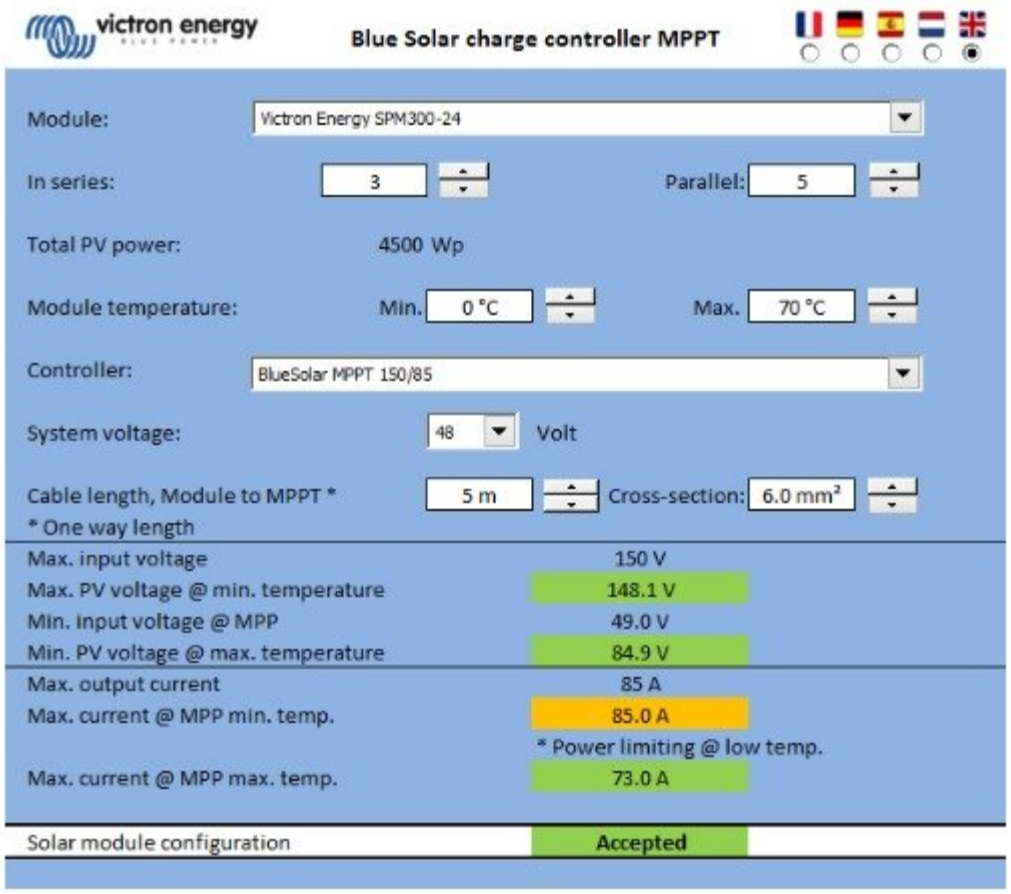


Рисунок 1.4 - Таблиця

А для тих, кому також цікаві й технічні аспекти експлуатації MPPT контролерів, далі йдуть деякі подробиці:

Перевищення діапазону вхідної напруги (як і PWM) може призвести до незворотних пошкоджень сонячного контролера.

Але також ми повинні розглянути і таку характеристику контролера MPPT, як мінімальна допустима напруга, без якого він просто не функціонуватиме. У прикладах будемо використовувати сонячний модуль SPM50-12 з напругою холостого ходу (Voc) 22,2В та напругою в точці максимальної потужності (Vmpp) 18В за стандартних умов випробувань, що передбачає наявність випромінювання потужністю 1000Вт на квадратний метр, температури 25°С показника повітряної маси 1,5. Якщо температура сонячного модуля вище або нижче 25°С, то його напруга буде зменшуватися або збільшуватися через температурний коефіцієнт, в даному випадку крок зміни становитиме -0,34% на один °С (див. опис конкретного сонячного модуля).

Припустимо, для прикладу, що у нас є три модулі SPM50-12, підключені до Blue Solar MPPT 150/70 в 48В системі, а температура навколишнього середовища -10°С; використовуємо напругу холостого ходу модулів для попередньої перевірки можливості запуску такої сонячної установки в даних температурних умовах:

Напруга, необхідна для запуску, становить 48В + 7В (див. технічний опис MPPT 150/70) = 55В. Сонячні модулі будуть виробляти 3×(22,2В+ (-0,34% від 22,2В*-35°С різниці в температурі)) = 74,5В. Отримані 74,5В вище за необхідні 55В, отже, умови дотримуються, все чудово!

Також перевіримо працездатність цієї системи в точці максимальної потужності при -10°С:

Напруга, необхідна роботи, становить 48В + 2В (дивіться технічний опис MPPT 150/70) = 50В. Сонячні модулі будуть виробляти 3*(18В+ (-0,34% від 22,2В*-35°С різниці в температурі)) = 61,9В. Отримані 61,9В вище за необхідні 50В, отже, умови дотримуються, все чудово!

Також перевіримо працездатність цієї системи в точці максимальної потужності при -10°С:

Напруга, необхідна роботи, становить 48В + 2В (дивіться технічний опис MPPT 150/70) = 50В. Сонячні модулі будуть виробляти 3*(18В+ (-0,34% від 22,2В*-35°С різниці в температурі)) = 61,9В. Отримані 61,9В вище за необхідні 50В, отже, умови дотримуються, все чудово!

авайте проведемо такі самі розрахунки, але не для холодного дня, а для дуже спекотного, коли сонячні модулі нагріються до 70°С:

Напруга для запуску становитиме ті самі 48В + 7В (дивіться технічний опис MPPT 150/70) = 55В. Сонячні модулі будуть виробляти 3•(18В+ (-0,34% від 22,2В•45°С різниці в температурі)) = 56,4В. Отримані 56,4В вище за необхідні 55В, отже, умови працездатності дотримані!

Але тепер у точці максимальної потужності напруга модулів буде нижчою за необхідний рівень:

Напруга, необхідна роботи, становить 48В + 2В (дивіться технічний опис MPPT 150/70) = 50В. Сонячні модулі будуть виробляти 3•(18В+ (-0,34% від 22,2В*45°С різниці в температурі)) = 43,8В. Отримані 43,8В нижче за необхідні 50В, отже, за такої температури MPPT контролер працювати не буде!

Знаючи ефективність DC/DC перетворювача (97,5% при 48В), можна розрахувати зарядний струм MPPT контролера до акумулятора (при -10°С, коли система показала свою працездатність). 61,9В Vmpp • 2,74А Impp/48В Напруга акумулятора * 0,975 ККД = 3,45А. Це набагато нижче 70А, отже, вся ця сила струму використовуватиметься для заряджання акумулятора.

Якщо ж розглядати конфігурацію сонячної установки, більш наближену до реалій експлуатації в домашніх автономних системах, що складається з 10 паралельно з'єднаних секцій із сонячних модулів, де кожна секція, у свою чергу, складається з 6 послідовно з'єднаних модулів, то при температурі -10°С буде наступна картина :

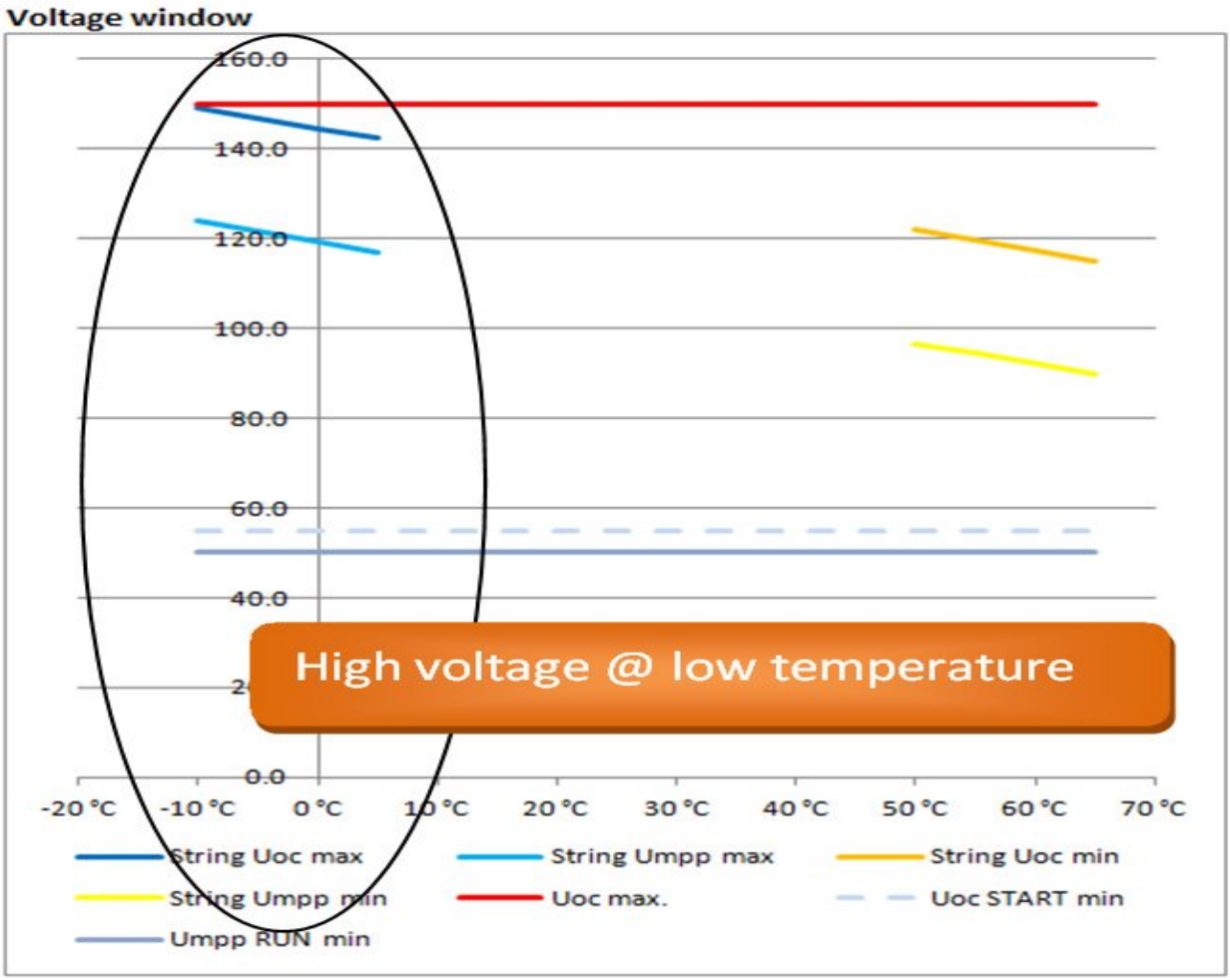


Рисунок 1.5 – Високий вольтаж, низька температура

Напруга холостого ходу Voc при -10°З перебуватиме на рівні максимуму MPPT контролера - 150В, що, як зазначалося вище, може пошкодити контролер.

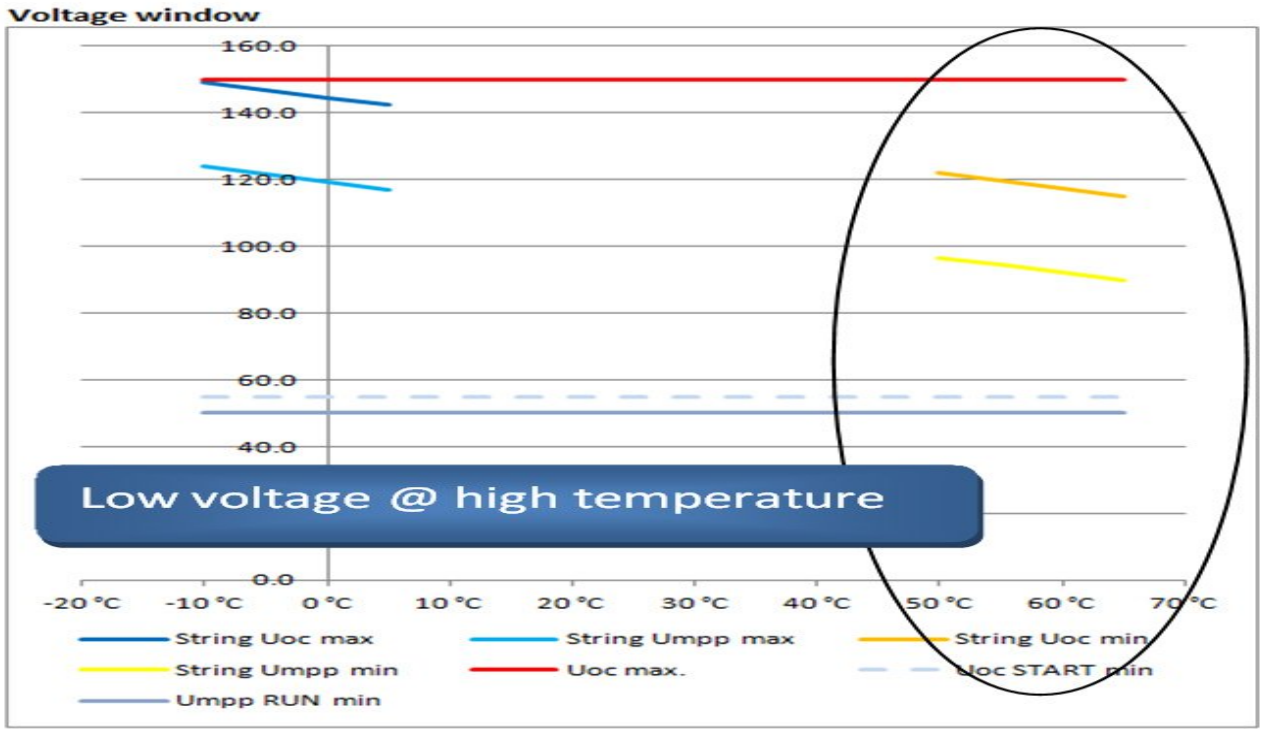


Рисунок 1.6 – Низький вольтаж, висока температура

А за високої температури сонячних модулів (70°C) система вже працюватиме нормально! Взявши таку конфігурацію з'єднання сонячних модулів як базу, тепер можна експериментувати з додаванням додаткових модулів, використовуючи для цього згадану електронну таблицю. Збільшуючи кількість паралельно з'єднаних секцій ми побачимо, що контролер почне знижувати потужність. Великою перевагою буде той факт, що для досягнення максимальної вихідної потужності контролера може вимагатися і менше випромінювання. І оскільки ціна сонячних модулів має тенденцію до зниження, ця особливість дуже цікава.

1.2 Послідовне й паралельне з’єднання сонячних батарей

Усього існує три схеми з'єднання сонячних панелей, які можуть застосовуватися: паралельне, послідовне та паралельно-послідовне. Залежно від потужності сонячної електростанції та напруги постійного струму може застосовуватись одна з вибраних схем. Зупинимося докладніше на кожній та опишемо принцип роботи.

Паралельне з'єднання сонячних панелей

Дана схема підходить для тих випадків, коли необхідно залишити напругу на одному рівні, але підвищити потужність сонячного масиву PV. Наведемо приклад на двох сонячних панелях потужність 100В з напругою 12В. З'єднання відбувається шляхом підключення позитивних сполук до однієї групи, а негативних висновків – до другої групи. Таким чином, напруга залишається незмінною 12В, а потужність зростає до 200 Вт.

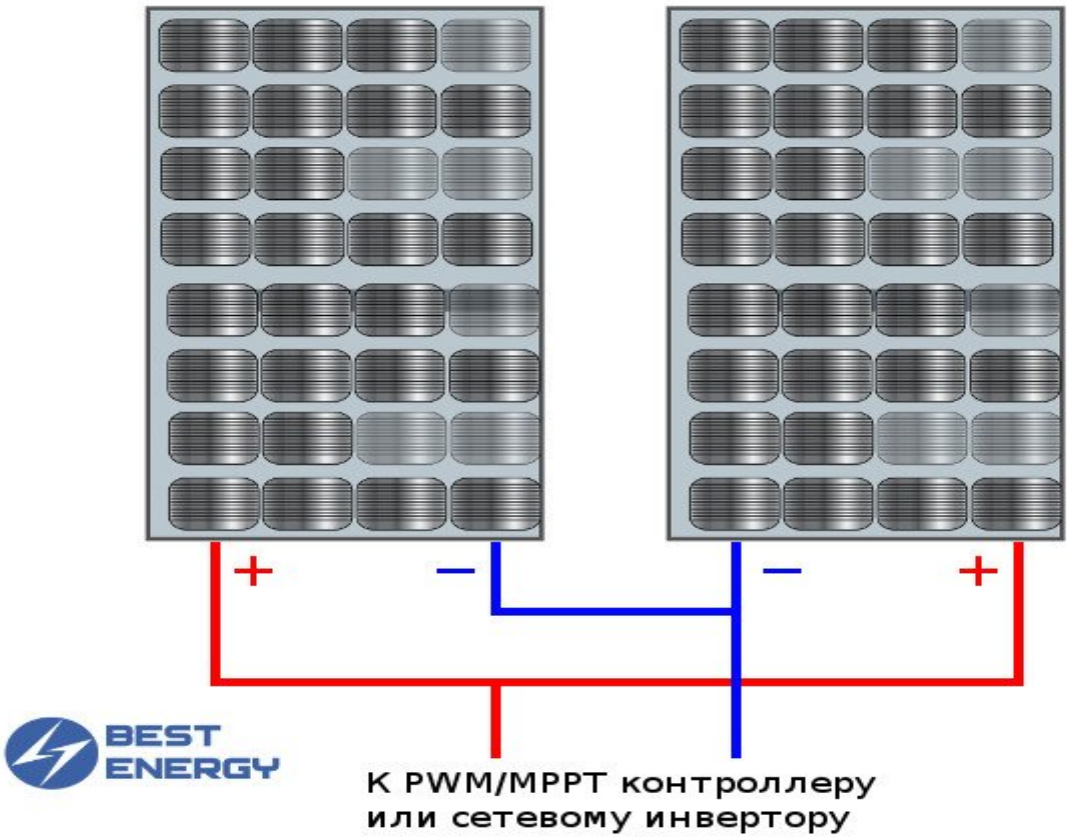


Рисунок 1.7 - Паралельне з'єднання сонячних панелей (12В 200Вт)

Послідовне з'єднання сонячних панелей

Послідовне з'єднання застосовується у тих ситуаціях, коли необхідно підняти рівень напруги, але зафіксувати потужність одному рівні. На схемі відображено з'єднання двох сонячних панелей потужністю 100Вт з напругою 12В, коли в результаті отримуємо сонячний масив PV 24В 100Вт.

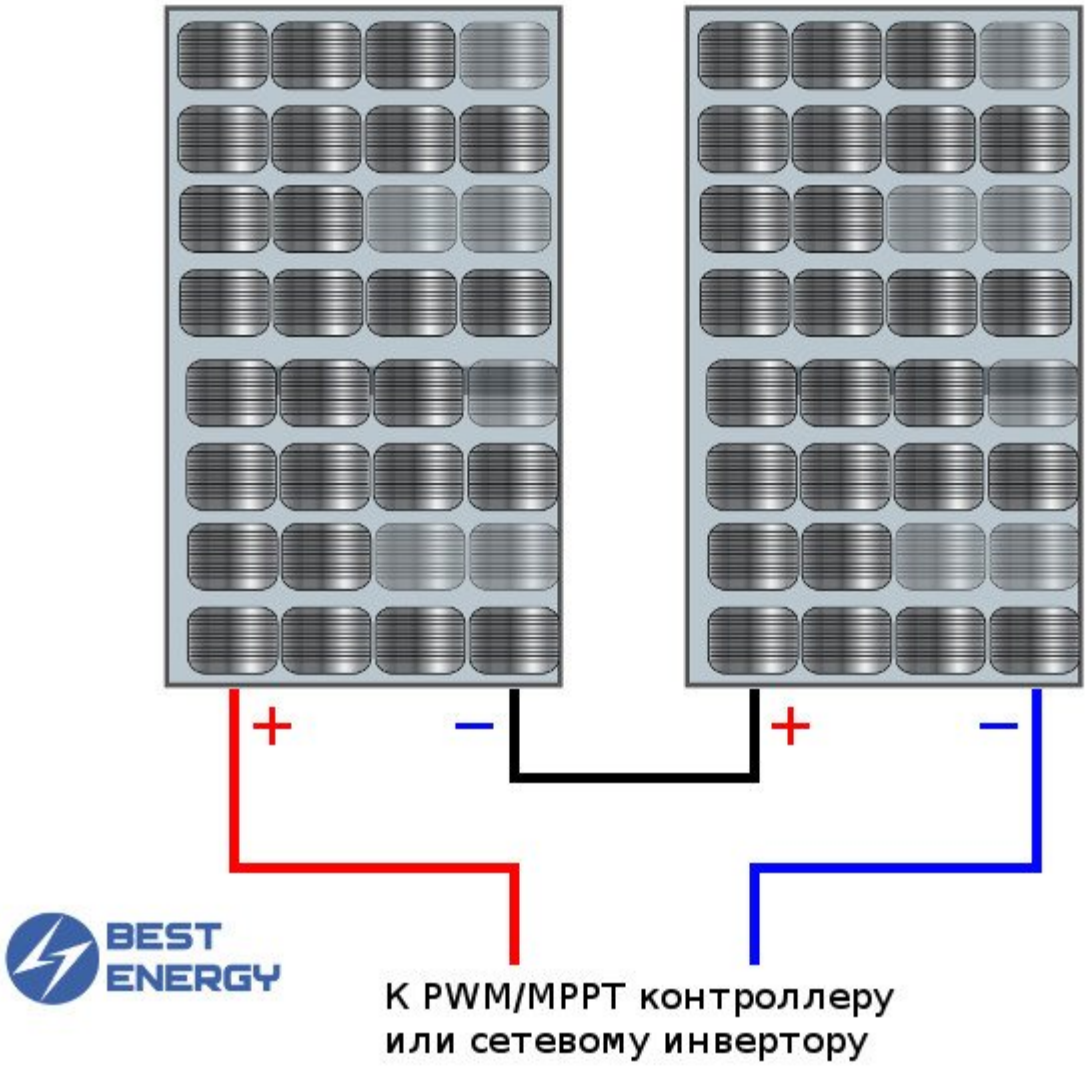


Рисунок 1.8 - Послідовне з'єднання сонячних панелей (24В 100Вт)

Паралельно-послідовне з'єднання сонячних панелей

Складнішою схемою з'єднання сонячних батарей буде паралельно-послідовний тип. Найчастіше подібна схема застосовується щодо потужних сонячних масивів. Застосування цієї схеми дає можливість підняти номінальну напругу з'єднаних панелей, так і збільшити потужність. На прикладі показано, як можна поєднати чотири панелі з напругою 12В і потужністю 100Вт. Після з'єднання отримуємо сонячний PV-масив з напругою 24В та потужністю 200Вт.

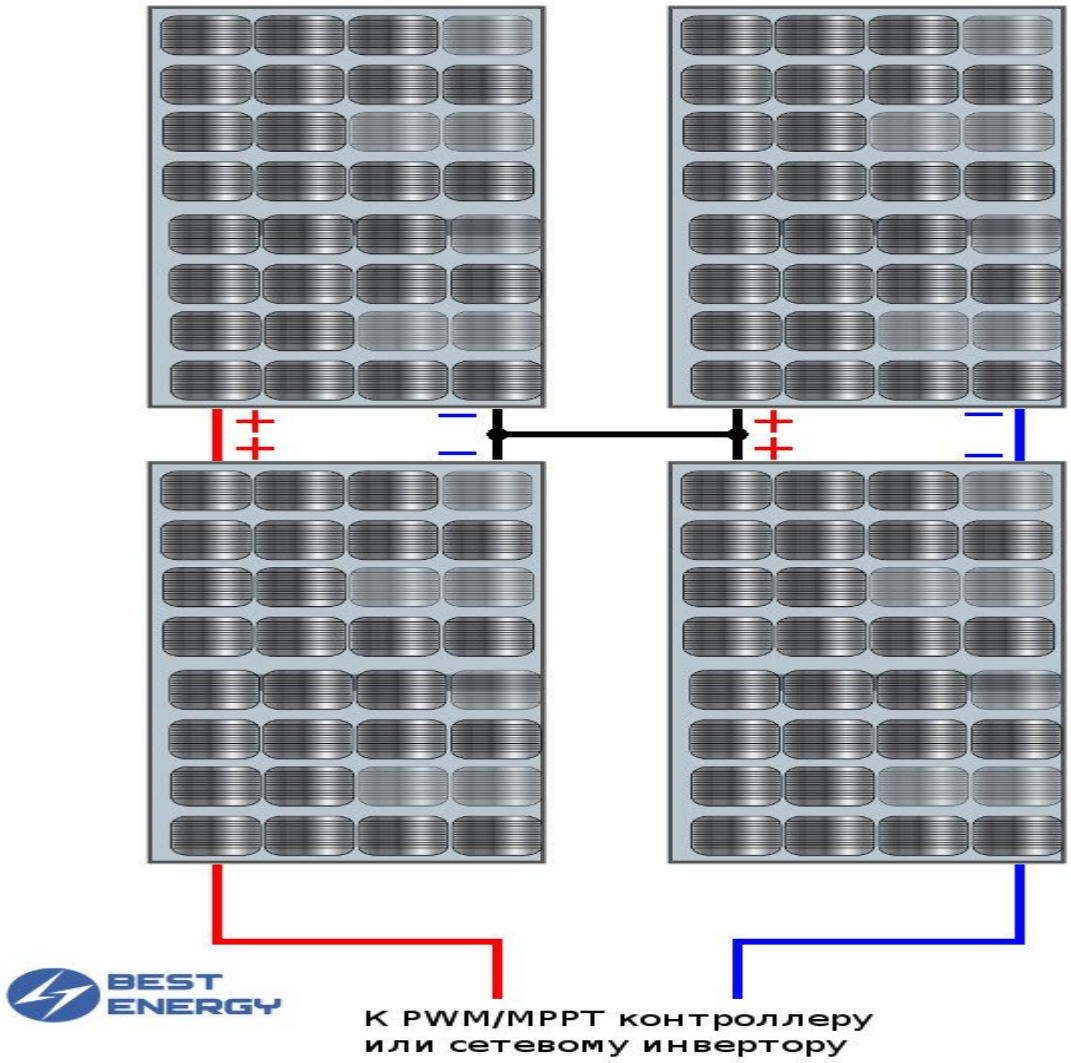


Рисунок 1.9 - Паралельно-послідовне з'єднання сонячних панелей (24В 200Вт)

З'єднання сонячних батарей різної потужності.

Коли потрібно з'єднати разом сонячні батареї різної потужності, може застосовуватися дві вищеописані схеми: паралельна і послідовна. Однак необхідно враховувати можливості MPPT-контролера. Так, щоб підключити батареї паралельно, максимальний вихідний струм повинен відповідати струму MPPT-контролера і навпаки, для з'єднання різних за потужністю сонячних модулів послідовно, MPPT-контролер обов'язково повинен мати більшу робочу напругу, ніж сума напруги холостого ходу двох модулів.

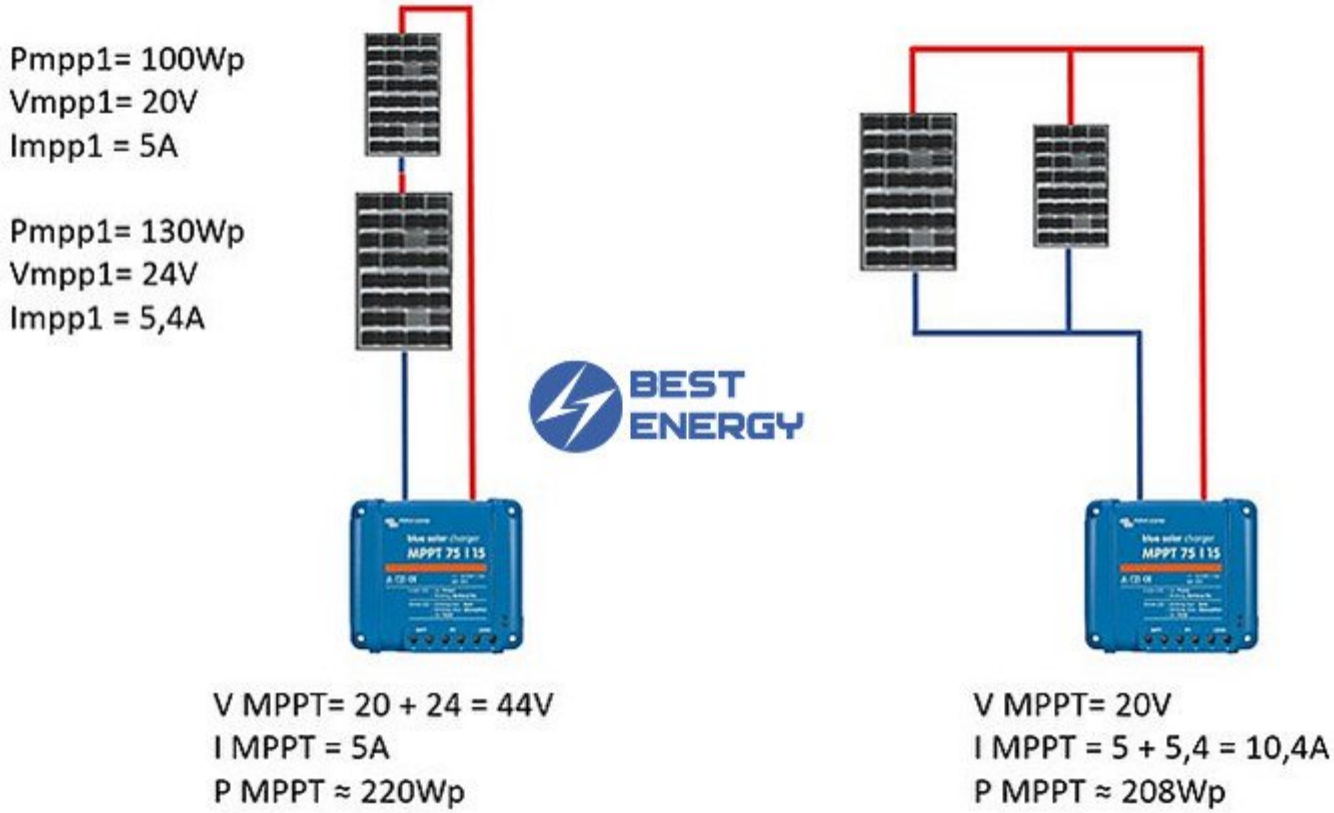


Рисунок 1.10 - Паралельне та послідовне з'єднання сонячних панелей різної потужності

Як видно з наведених розрахунків, продуктивність вища на 5,5% при послідовному з'єднанні. Рекомендуємо використати цей варіант.

З'єднання сонячних батарей різної потужності дещо знижує продуктивність MPPT-контролера і утруднює пошук точки максимальної потужності, але така система також буде нормально працювати при необхідності.

2 ТИПОВІ КОНСТРУКЦІЇ ІНВЕРТОРІВ

2.1 Напівпровідникові інвертори

У сучасних умовах все частіше користуються компактними пристроями, що використовують напівпровідникові елементи, замість масивних приладів, прикладом цього є інвертори. Завданням інвертора є перетворення енергії постійного струму (з акумулятора) на змінний струм, зазвичай синусоїдального або прямокутного сигналу з напругою 220 В та частотою 50 Гц. З точки зору непрофесіонала, інвертор - це пристрій, який змінює постійний струм (ПС) на змінний струм (ЗС). Він включає в себе інверторний міст, систему управління та фільтрний ланцюг. Іншими словами, інвертор - це генератор, який регулярно змінює напругу, і може регулювати частоту та величину напруги; його форма може бути синусоїдальною, близькою до синусоїдальної або імпульсною.

До характеристик інверторів можна віднести:

- високий коефіцієнт ефективності та швидкий старт;
- надійність і безпека: пристрій обладнаний захисними функціями від короткого замикання, перевантаження, високої та низької напруги та перегріву;
- відмінні фізичні властивості, включаючи алюмінієвий корпус для ефективного розсіювання тепла, стійкість до тертя та впливу зовнішніх сил; адаптивність та стабільність під навантаженням;
- прийнятний рівень гармонік у вихідному сигналі та відсутність пульсації для інших споживачів енергії.

Перетворювач виводить напругу змінного струму енергосистеми на стабільний постійний струм 12В, тоді як інвертор перетворює вихідну напругу 12В постійного струму джерела живлення на високочастотний, високовольтний змінний струм. Обидві частини також використовують широкий діапазон імпульсів і технологію модуляції ширини імпульсів (ШІМ).

Основною частиною є вбудований контролер ШІМ, який використовує мікросхему TL5001. Діапазон робочої напруги TL5001 становить 3,6 - 40 В, і містить в собі підсилювач помилки, регулятор, генератор, генератор ШІМ з

контролем мертвої зони, ланцюг захисту від низької напруги та схему захисту від короткого замикання.

Інвертори споживають енергію при роботі, тому їх вхідна потужність більша за вихідну. Коефіцієнт корисності (ККД) інвертора визначається як відношення вихідної потужності до вхідної потужності. Наприклад, якщо інвертор витрачає 100 Вт постійного струму і генерує 90 Вт змінного струму, його ККД становить 90%.

Щодо принципу дії, інвертори поділяються на:

- автономні інвертори (АІ), які підключають струм до мережі на стороні змінного струму, не підключаючись безпосередньо до навантаження;
- залежні інвертори (ЗІ), що дозволяють струму безпосередньо підключатися до навантаження, не підключаючись до мережі на стороні змінного струму.

Існують три типи автономних інверторів:

- інвертори напруги (АІН);
- інвертори струму.

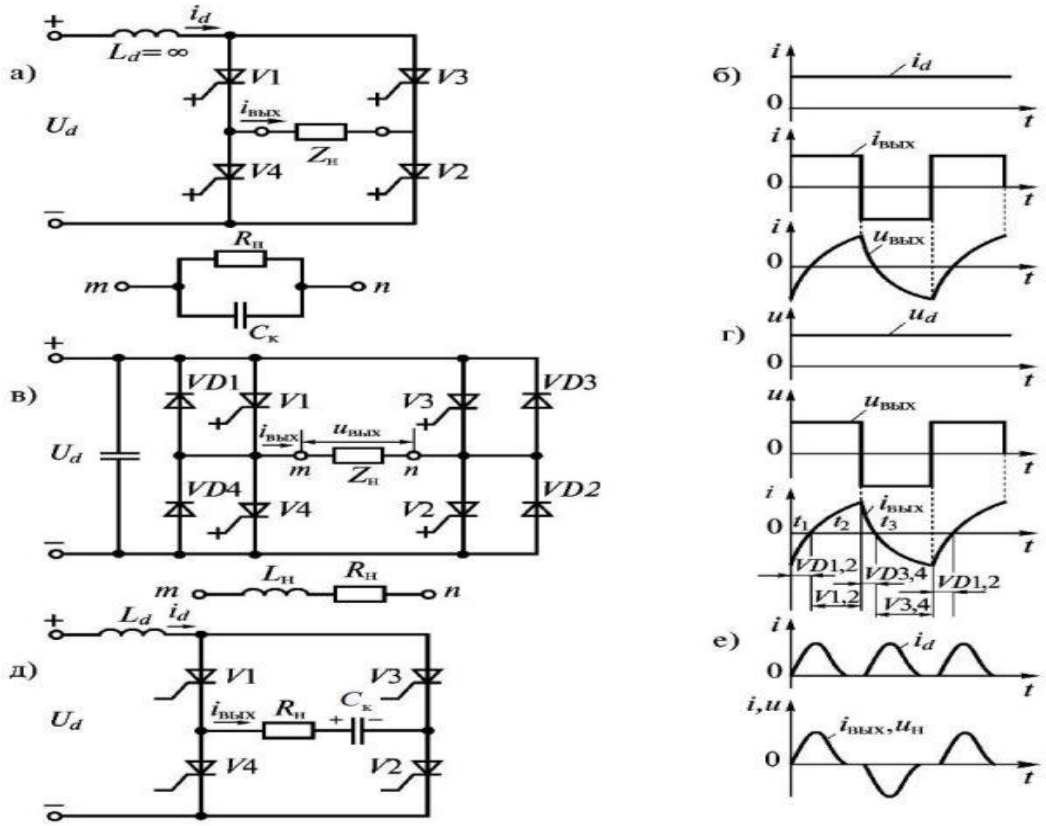
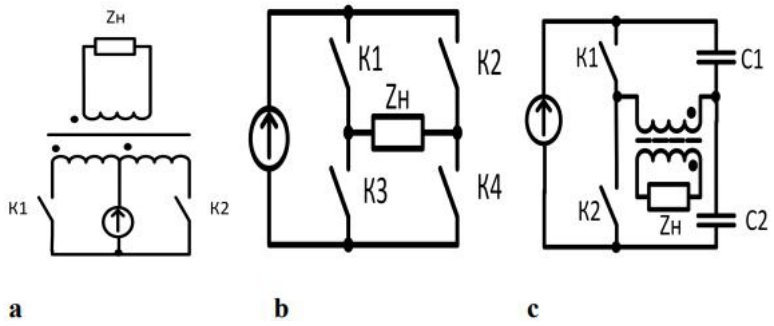


Рисунок 2.1 Опис принципових схем ідеальних автономних інверторів струму (а), напруги (в) та резонансного (д), а також графічні ілюстрації, які демонструють їхню роботу в діаграмах напруги та струму

Залежно від методу управління ключовими елементами виділяють два основних типи інверторних схем: керовані перетворювачі та перетворювачі з самозбудженням (автогенераторні схеми).

У першому випадку введено спеціальні системи управління для керованих елементів. Навпаки, напівпровідникові ключі в автогенераторних схемах керуються через позитивний зворотний зв'язок за струмом або напругою. Інвертори напруги можуть мати різноманітні конфігурації (див. Рисунок 2.2):

- двотактний інвертор;
- мостовий інвертор;
- напівмостовий інвертор.



a)-двотактний; b) - мостовий; c)-напівмостовий

Рисунок 2.2 – Принципові схеми інверторів напруги

Схема двотактного інвертора (рисунок 2.2-а) відрізняється тим, що джерело постійної напруги підключено до середньої точки трансформатора. Таким чином, для кожного напівперіоду напруги на виході працює один ключ та одна напівобмотка трансформатора. В цій схемі досягається максимальний ККД і низький рівень пульсацій завдяки зменшенню струму в первинній обмотці. Однак недоліком цієї схеми є те, що напруга на замкненому ключі досягає значення 2Uжив.

У мостовому інверторі (рисунок 1.3-b) ключі працюють по діагоналі (К1, К4) та (К2, К3). Напруга на ключах не перевищує напруги живлення (Uжив).

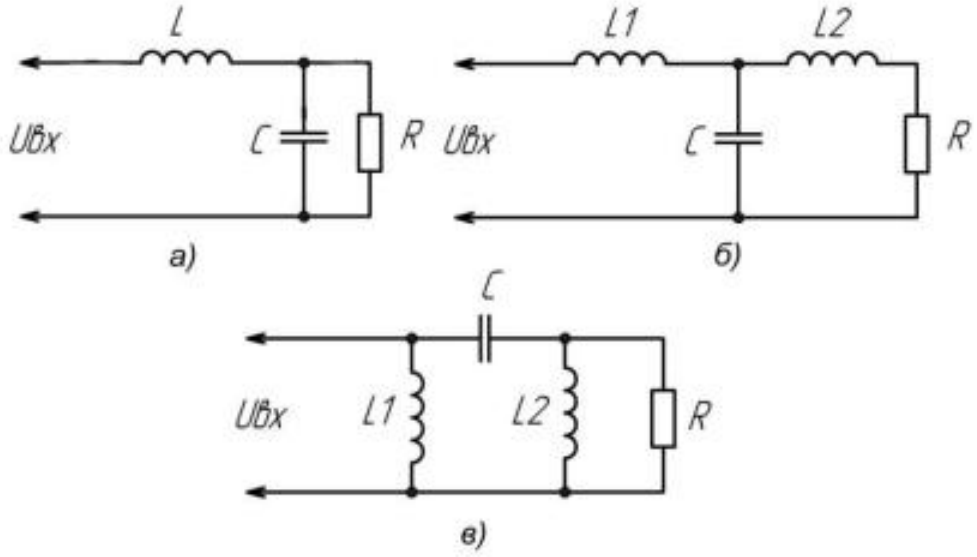
У напівмостового інвертора (рисунок 1.3-c) замість ключових елементів однієї стійки (К2, К4) використовуються конденсатори С1 та С2. При цьому напруга на первинній обмотці трансформатора не перевищує значення Uжив/2.

.

Для виконання інвертування буде використана схема індуктивно-ємнісного перетворювача через простоту реалізації та максимальний коефіцієнт корисної дії (ККД), яка буде розглянута в наступному розділі. У цій схемі в якості ключових елементів будуть використовуватися польові транзистори. Згідно з технічним завданням, напруга джерела живлення становить 12 В, а напруга живлення споживача, відповідно до довідкових даних, перевищує 100 В. Для досягнення необхідного рівня напруги на виході інвертора буде використовуватися підвищуючий трансформатор напруги.

2.2 Індуктивно-ємнісні перетворювачі

Схеми постійного струму знаходять широке застосування в таких галузях техніки, як електроенергетика, електропостачання, вимірювальна та обчислювальна техніка, світлотехніка та інші. Найвищою ефективністю в цьому випадку відзначаються системи постійного струму, побудовані на основі індуктивно-ємнісних перетворювачів. Основу їхньої роботи становить явище електричного резонансу, оскільки цей тип перетворювачів представляє собою послідовність коливальних контурів. Існують різні форми індуктивно-ємнісних перетворювачів, в залежності від кількості та способу підключення реактивних елементів - Г-подібна, Т-подібна, П-подібна, а також їхньої послідовності..



а) Г-подібна, б) Т-подібна, в) U-подібна

Рисунок 2.3 – Типова схема індуктивно-ємнісного перетворювача

Дані перетворювачі широко використовуються для живлення та утримання дугового розряду. Вольт-амперна характеристика електричної дуги має знижувальний відрізок, тобто має негативний динамічний опір, що підтверджує необхідність застосування систем постійного струму.

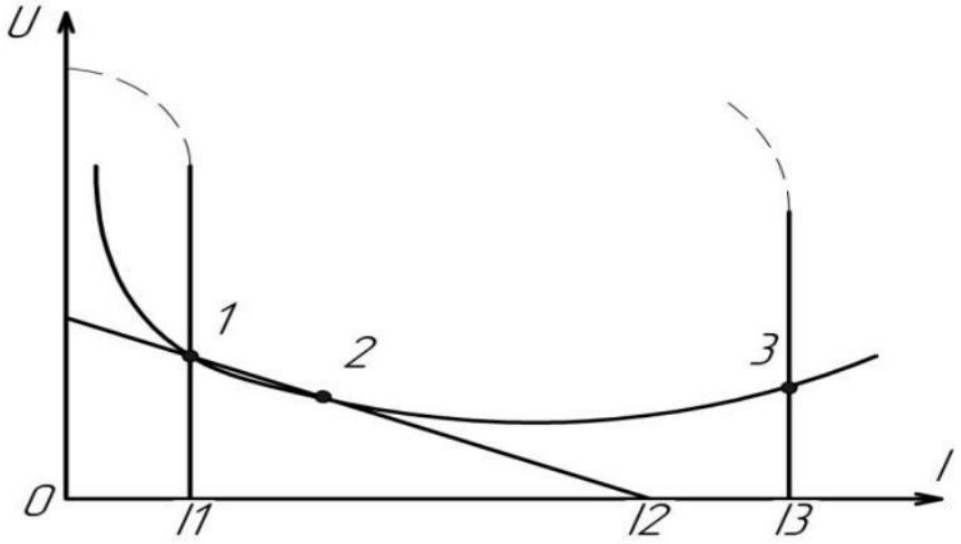


Рисунок 2.4 – ВАХ дугового розряду та джерел живлення, що пояснюють застосування джерел постійного струму для живлення пристроїв на основі дугового розряду

Індуктивно-ємнісні перетворювачі широко використовуються в електротехніці через такі переваги:

- висока експлуатаційна надійність: Конструктивна простота сприяє високій надійності в роботі.
- висока енергетична ефективність: Визначається високим коефіцієнтом корисної дії (ККД) та коефіцієнтом потужності.
- широкий діапазон робочих параметрів: Мають високий діапазон робочих струмів, напруг та частот.
- можливість поєднання різних схем в одному пристрої: Забезпечує гнучкість та універсальність застосування.
- здатність паралельної роботи та регулювання: Блоки індуктивно-ємнісних перетворювачів можуть працювати паралельно на різних струмах та потужностях, що створює сприятливі умови для регулювання.
- можливість реверсивного перетворення: Дозволяє змінювати напрямок енергопередачі.
- компенсація реактивної потужності: Здатність трансформувати фазовий кут на протилежний дозволяє компенсувати реактивну потужність.
- практична безінерційність: Забезпечує швидке реагування на зміни параметрів системи.

Проведемо аналіз Г-подібного індуктивно-ємнісного перетворювача з передуключеною індуктивністю та доведемо, що цей перетворювач є системою постійного струму.

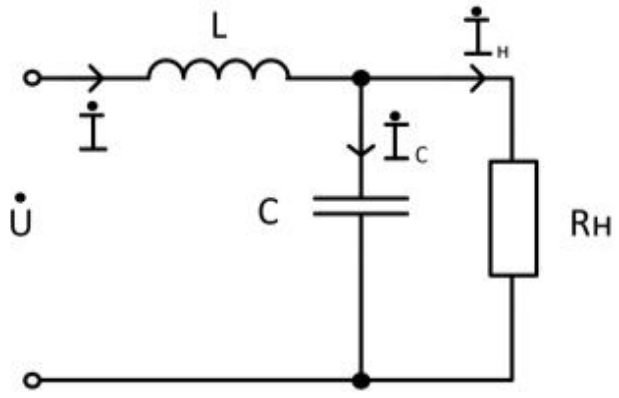


Рисунок 2.5 – Схема ІЄП

Нехай на вході діє напруга Ú=Um·sin·ωt і виконується умова нормальної роботи ІЄП – умова резонансу (ω2·LC=1), тоді справедливо:

$$\dot{I}_{вх} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}_{вх}} = \frac{\dot{U}}{j\omega_0 L - \frac{j\omega_0 L R_н}{R_н - j\omega_0 L}} = \frac{\dot{U}}{\omega_0 L}\left(\frac{R_н}{\omega_0 L} - j\right) \qquad (2.1)$$

$$\dot{Ic} = \frac{\dot{U} \cdot \dot{R_н}}{\omega_0^2 L^2} \tag{2.2}$$

$$\dot{Iн} = -j\frac{\dot{U}}{\omega_0 L} \tag{2.3}$$

де Івх- вхідний струм;

U - вхідна напруга;

Zвх - еквівалентний вхідний опір;

Rн - опір навантаження;.

Ic - струм, що протікає через конденсатор; Ін - струм на навантаженні;

L - індуктивність дроселя ω0: резонансна частота змінного струму.

Таким чином, амплітудне значення струму навантаження:

$$Iнm = \frac{Um}{\omega_0 L} \tag{2.4}$$

З формули (2.3) виходить, що реактивна складова вхідного струму ІЕП є струмом навантаження, який визначається лише параметрами коливального контуру.

2.3 Галузі застосування інверторних схем

Розглянуті раніше перетворювачі мають обмеження в практичному використанні. Зокрема, наявність гальванічного зв'язку між входом та виходом не дозволяє їх використовувати там, де потрібна гальванічна роздільність. Іншим обмеженням є те, що при заданому діапазоні зміни вхідної напруги живлення можливий діапазон зміни вихідної напруги обмежений.

Ці недоліки можна усунути, доповнивши їх пристроєм, що виконує роль трансформатора постійної напруги (ТПН). Ідеальний ТПН має передавати постійну напругу з постійним коефіцієнтом трансформації, забезпечувати високий ступінь ізоляції між первинною та вторинною ланцюгами та давати можливість побудови системи перетворення енергії з кількома входами чи виходами.

На рисунку 2.6 наведено функціональну схему найбільш широко використовуваного ТПН.

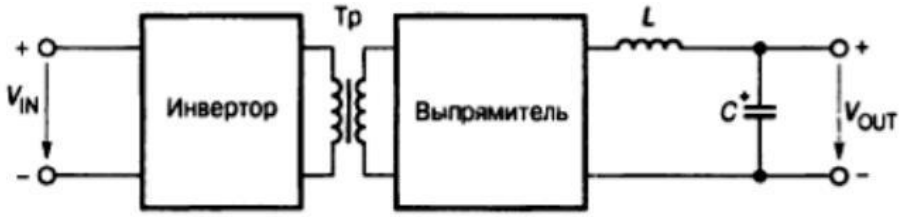


Рисунок 2.6 – Функціональна схема ТПН

Функції окремих ланок ТПН є очевидними. Інвертор перетворює вхідну постійну напругу на змінну напругу прямокутної форми високої частоти. Трансформатор (Тр) забезпечує підвищення або зниження змінної напруги та гальванічний поділ первинного та вторинного ланцюгів. Випрямляч знову перетворює змінну напругу на постійну.

Найскладнішим вузлом ТПН, що багато в чому визначає його властивості, є інвертор. Термін "інвертор" використовується для позначення перетворювачів постійного струму в змінний. Сімейство інверторів досить широке і включає пристрої різного призначення, розраховані на передачу потужності від часток вата до багатьох мегават.

.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ІНВЕРТОРНИХ СХЕМ

На основі огляду літератури проведено порівняльний аналіз та обрано принципову схему проектованого пристрою (Рисунок 3.1).

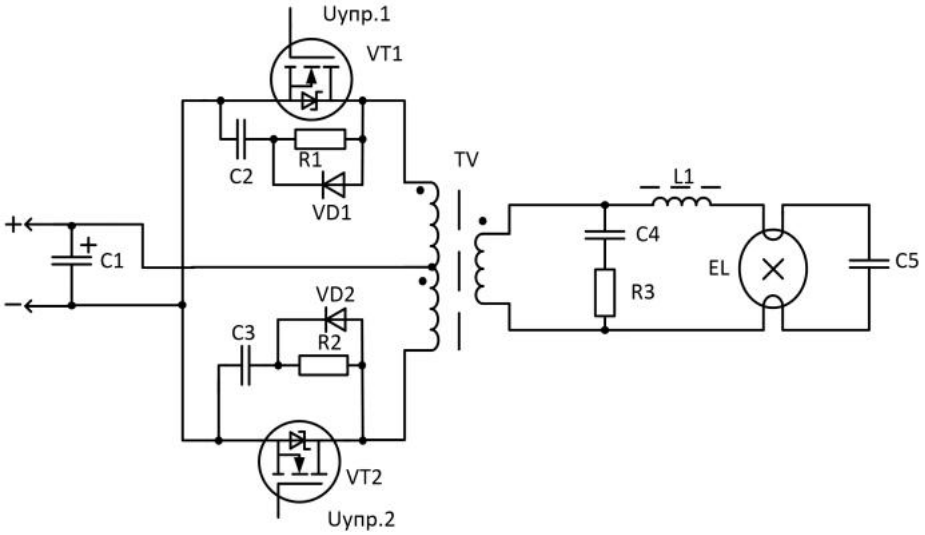


Рисунок 3.1 - Принципова схема перетворювача

Найбільш універсальними схемами напівпровідникових інверторів є схеми керованих транзисторних або тиристорних інверторів: мостова, напівмостова та з середньою точкою трансформатора. Головною перевагою таких схем є конструктивна простота. У схемі пристрою, завдання інвертування вхідної постійної напруги, виконує двотактний інвертор, що працює на транзисторах VT1 та VT2.

З метою зниження динамічних втрат при вимиканні силових транзисторів, в схему додатково введені RCD-ланцюги, що демпфують елементи R1-C2-VD1 та R2-C3-VD2.

У пристроях, де потрібне отримання стабільного струму високої частоти, активно використовується спільне включення однофазних індуктивно-ємнісних перетворювачів та напівпровідникових інверторів. Однак прямокутна форма вихідного сигналу інвертора обумовлює ряд особливостей, які необхідно враховувати при розрахунку інвертора та індуктивно-ємнісного перетворювача.

Дослідження показали, що найкращими показниками при живленні від джерел сигналу з великим вмістом вищих гармонік володіють перетворювачі, виконані за Г-подібною схемою Бушеро з передвключеною індуктивністю.

Схема пристрою працює наступним чином: у момент подачі напруги живлення транзистори закриті, напруга на колекторах дорівнює напрузі живлення. Після подачі керуючої напруги Uупр1, сформованої системою управління транзисторами, транзистор VT1 відмикається, і через колекторний ланцюг VT1 протікає струм, що індукує ЕРС в одній з напівобмоток трансформатора TV. Цей струм призводить до індукції ЕРС в обмотках трансформатора TV. Далі, транзистор VT1 замикається, а транзистор VT2 відчиняється, індукуючи ЕРС іншої полярності в іншій обмотці трансформатора TV. Потім транзистор VT2 замикається і весь цей процес періодично повторюється. Частота роботи пристрою задається імпульсним генератором керуючих сигналів і вибирається рівною резонансній частоті коливального контура, підключеного до вторинної обмотки трансформатора.

Паралельно з вторинною обмоткою трансформатора включений струмообмежувальний дросель L, який утворює разонансний контур з конденсатором C5. При появі напруги на вторинній обмотці трансформатора TV в контурі L, C5 та EL з'являється напруга ударного збудження, якого цілком достатньо для запалення ЛЛ. Після запалення добротність контуру падає за рахунок шунтування лампою конденсатора C5. Структурну схему формувача сигналів управління наведено на Рисунку 3.2.

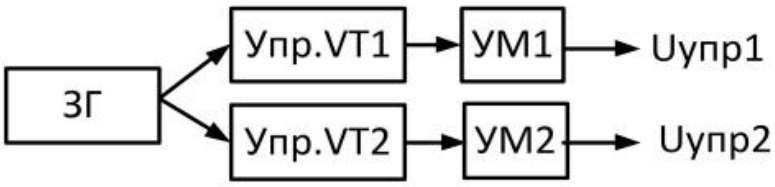


Рисунок 3.2 - Структурна схема формувача сигналів управління

Система управління транзисторами включає в себе наступні блоки:

- ЗГ – Задаючий генератор: Генератор, необхідний для тактування формувача.
- упр.VT1 і Упр.VT2 – Формувачі сигналу управління: Блоки, що формують сигнал управління для кожного транзистора з необхідними параметрами.
- УМ1 та УМ2 – Підсилювачі потужності: Підсилювачі, які збільшують сигнал керування до необхідного рівня для управління транзисторами.
- драйвер силових транзисторів (УМ): Блок, який використовується як драйвер для управління силовими транзисторами.

Схема задаючого генератора використовує схему генератора на логічних елементах через простоту реалізації і дешевизну.

Принципова схема системи управління транзисторами містить ці блоки та взаємодії між ними. Вона дозволяє формувати та підсилювати сигнали управління для ефективного керування транзисторами у ваших інверторах.

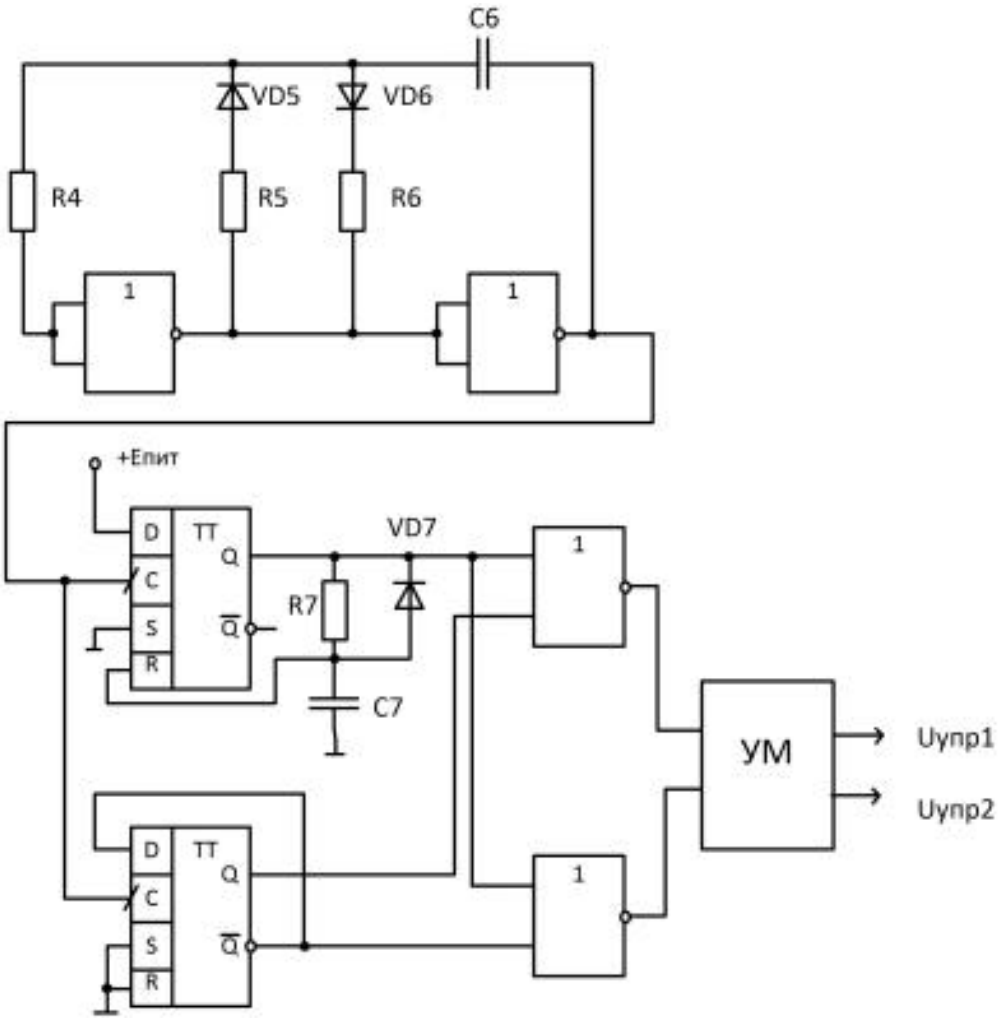
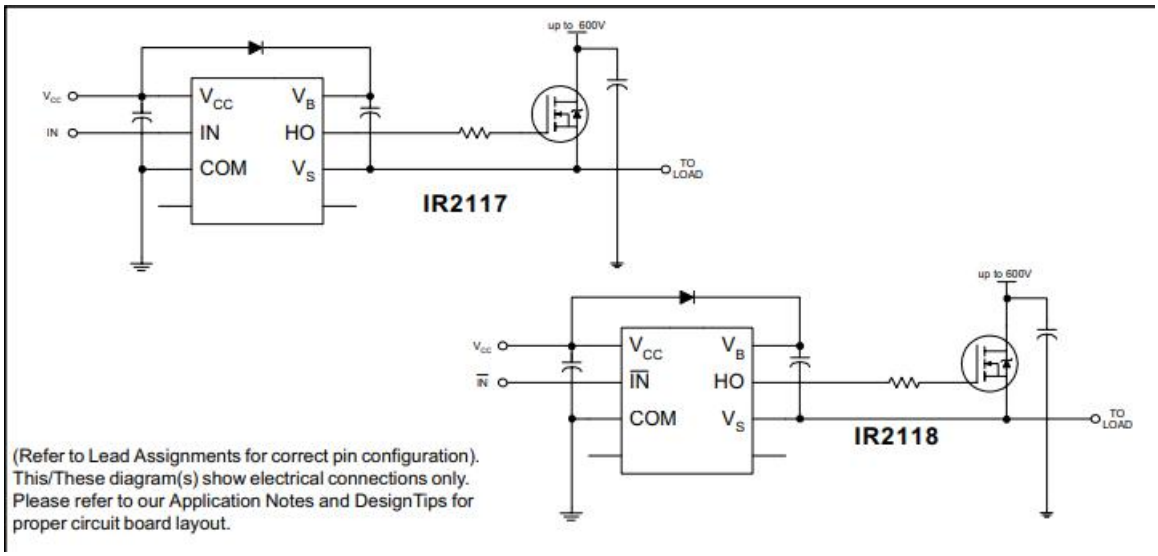


Рисунок 3.3 – Принципова схема системи управління

Драйвер – це підсилювач потужності, спроектований для безпосереднього керування ключем живлення перетворювача. Його основні функції включають посилення керуючого сигналу залежно від потужності та напруги, а також забезпечення потенційної ізоляції, якщо це необхідно.

В якості драйвера використовується мікросхема IR2117 з наступними параметрами: Ця мікросхема є ефективним засобом керування ключем живлення та може відповідати вимогам вашої системи.



V_{OFFSET}	600V max.
I_O+/-	200 mA / 420 mA
V_{OUT}	10 - 20V
$t_{on/off}$ (typ.)	125 & 105 ns

Рисунок 3.4 - Блок-схема IR2117 І його таблиця параметрів

Схема підключення драйвера до транзистора наведено Рисунку 3.5.

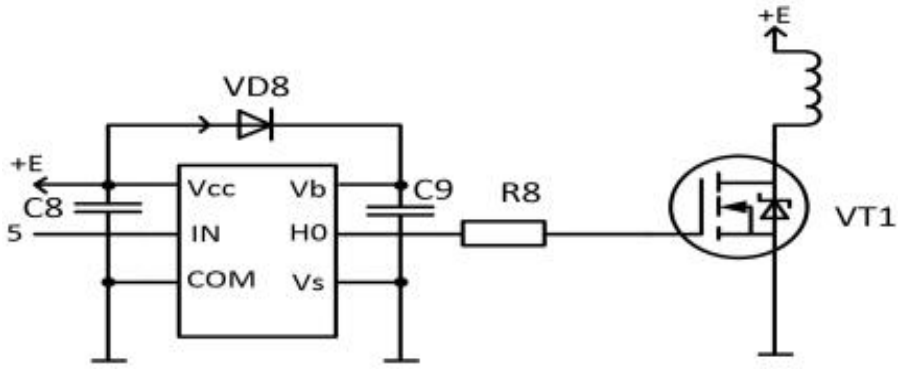


Рисунок 3.5 – Схема підключення драйвера до транзистора

Symbol	Definition		Min.	Max.	Units
V_B	High side floating supply voltage		-0.3	625	V
V_S	High side floating supply offset voltage		V_B - 25	V_B + 0.3	
V_{HO}	High side floating output voltage		V_S - 0.3	V_B + 0.3	
V_{CC}	Logic supply voltage		-0.3	25	
V_{IN}	Logic input voltage		-0.3	V_{CC} + 0.3	
dV_s/dt	Allowable offset supply voltage transient (figure 2)		—	50	V/ns
P_D	Package power dissipation @ $T_A \leq +25°C$	(8 lead PDIP)	—	1.0	W
		(8 lead SOIC)	—	0.625	
Rth_{JA}	Thermal resistance, junction to ambient	(8 lead PDIP)	—	125	°C/W
		(8 lead SOIC)	—	200	
T_J	Junction temperature		—	150	°C
T_S	Storage temperature		-55	150	
T_L	Lead temperature (soldering, 10 seconds)		—	300	

Рисунок 3.6 - Функціональна схема контактів IR2117

Для забезпечення оптимальної роботи MOSFET та IGBT у вихідному вузлі накопичувача важливо враховувати наступні вимоги:

- керування затвором: MOSFET та IGBT керуються напругою, і для швидкого увімкнення транзистора необхідно вводити відповідний заряд у його схему затвора.
- динамічні характеристики: Швидкість перезарядки паразитної ємності транзистора визначає динамічні характеристики перемикача. Мінімізація часу перемикання досягається введенням імпульсного струму керування для

ефективного заряджання конденсатора затвора, що зменшує час перемикання.

- послідовні резистори в затворі: Використання послідовних резисторів в затворі обмежує поточну швидкість наростання і допомагає зменшити динамічний шум.

Навантаженням є люмінесцентна лампа, і для оптимальної роботи системи слід враховувати її параметри, такі як наведені в таблиці 3.1. Це допоможе визначити оптимальні характеристики транзисторів та керуючих елементів для ефективного використання системи у вашому застосуванні.

Таблиця 3.1 - Технічні характеристики лампи ЛБ-40

Напруга живлення, 220 або 127
Потужність, Вт 40
Світловий потік, лм 2800
Колірна температура, К 3500
Індекс кольору (RA або CRI) 60-69%
Ресурс, год 10000

Необхідно зробити розрахунок принципової схеми за такими даними:

- напруга живлення Ежив = 12 В;
- частота перетворення f = 24 кГц;
- номінальна робоча напруга лампи Uл = 103 В;
- номінальний робочий струм лампи Iл = 0,43 А.

3.1 Розрахунок ІЄП

В якості ІЄП використовується Г-подібна схема, як зображено на рисунку 15.

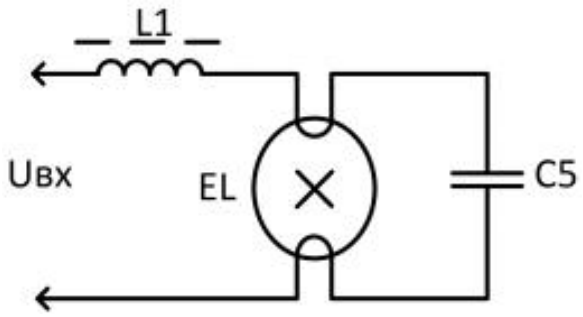


Рисунок 3.7 – Схема ІЄП

Опір лампи в режимі роботи:

a. $$R_л = \frac{U_л}{I_л} = \frac{103B}{0,43A} = 239,53\ Ом \quad (3.4)$$

Амплітудне значення струму лампи:

b. Форма струму, що протікає через лампу, у робочому режимі близька до синусоїдальної.

a. $$I_{лт} = I_л \cdot \sqrt{2} = 0,43A \cdot \sqrt{2} = 0,608A \quad (3.5)$$

Розрахунок дроселя L:

Амплітуда струму через лампу визначається формулою.

$$I_{лт} = \frac{U_{вхт}}{\omega_0 L} \tag{3.6}$$

Виразимо L і знайдемо її величину:

$$L = \frac{U_{вхт}}{\omega_0 I_{лт}} = \frac{150B}{2 \cdot \pi \cdot 24 \times 10^3 Гц \cdot 0,608A} = 1,636\ мГн \tag{3.7}$$

Дросель, що розраховується працює на частоті 24 кГц, тому як матеріал для сердечника виберемо Мо-пермаллой[13] Максимальна енергія, що запасається в дроселі:

$$W_{L\max} = \frac{L \cdot I_{L\max}^2}{2} = \frac{1,636 \times 10^{-3} Гн \cdot 0,608^2 A^2}{2} = 0,302\ мДж \tag{3.8}$$

Для Мо-пермалою МП140 [5]:

$$W_{уд} = 0,5 \cdot \triangle B \cdot \triangle H = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 2400 = 480\ Дж/м^3 \tag{3.9}$$

Необхідний обсяг магнітопроводу:

$$V_{магн} = \frac{W_{\max}}{W_{уд}} = \frac{0,302 \times 10^{-3} Дж}{480 Дж/м^3} = 629 \times 10^{-9}\ м^3 \tag{3.10}$$

Необхідна кількість кілець К36×25×7,5

$$V_{магн} = 3,641\ см^3 = 3,641 \times 10^{-6}\ м^3$$

.

Параметри сердечника К36×25×7,5 [5]

D=36 мм	$S_0 = 4,908\ см^2$	$S_c \cdot S_o = 1,865\ см^4$
d=25 мм	$S_c = 0,38\ см^2$	$V_c = 3,641\ см^3$
h=7,5 мм	$l_c = 9,58\ см$	

Кількість витків:

$$W = \frac{\sqrt{l_{ср} \cdot L \cdot \triangle H}}{S_c \cdot \triangle B} = \frac{\sqrt{95,8 \times 10^{-3} м \cdot 1,636 \times 10^{-3}\ Гн \cdot 2400}}{0,38 \times 10^{-4} м^2 \cdot 0,4\ Тл} = 158 \tag{2.11}$$

Розрахунок конденсатора С5:

$$C = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_0^2 \cdot L} = 26,88\ нФ \tag{2.12}$$

Вибираємо з довідника конденсатор С5:

С5: К15-5-Н70-0,015 мкФ×3 $кВ \pm 10\%$

В результаті розрахунку схеми індуктивно-ємнісного перетворювача отримали вихідні параметри трансформатора: U2m = 150 В, I2 = 0,43 А.

3.2 Розрахунок трансформатора

Напруга на первинній обмотці трансформатора:

$$U_{1m} = U_{пит} - U_{DS} = 12B - 2B = 10\,B \quad ; \tag{3.13}$$

- напруга на вторинній обмотці трансформатора: U2m = 150 В;
- струм на вторинній обмотці трансформатора I2 = 0,43 А;
- частота: f = 24 кГц

Потрібно вибрати ферит як матеріал сердечника. З посилання нам необхідно вибрати ферит 2000НМ1 з наступними параметрами:

$$\Delta B = 0,2Тл - магнитная\ индукция;$$
$$\mu = 2000 - магнитная\ проницаемость\ феррита;$$
$$j = 4A/мм^2 - плотность\ тока\ в\ обмотках;$$
$$K_{ст} = 1 - коэффициент\ заполнения\ стали;$$
$$K_{0к} = 0,3 - коэффициент\ заполнения\ окна\ медью;$$
$$\eta = 0,9 - коэффициент\ полезного\ действия;$$
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ Гн/м - магнитная\ проницаемость\ вакуума.$$

- коефіцієнт трансформації:

$$n = \frac{U_{2m}}{U_{1m}} = \frac{150\ B}{10\ B} = 15 \tag{3.14}$$

- . Амплітуда струму, що протікає у вторинній обмотці:

$$I_{2m} = 0,43A \bullet \sqrt{2} = 0,608\ A \tag{3.15}$$

- Амплітуда струму первинної обмотки:

$$I_{1m} = I_{2m} \bullet n = 0,608 \bullet 15\ A = 9,12\ A \tag{3.14}$$

- Визначаємо потужність:

$$P_н = P_2 = U_2 \bullet I_2 = 150\ B \bullet 0,43\ A = 64,5\ Вт \tag{3.15}$$

(3.16)

$$S_o \bullet S_{cm} = \frac{2 \bullet 64,5\ Вт \bullet \sqrt{0,5}}{0,2\ Тл \bullet 4 \times 10^6\ \frac{А}{м^2} \bullet 24 \bullet 10^3\ Гц \bullet 0,3 \bullet 1 \bullet 0,9} = 17,5958\ м^4 = 17595,8\ мм^4$$

(3.17)

Вибір сердечника.

З довідника вибираємо сердечник: К45×28×8 . Вибраний сердечник є кільцевим із прямокутним поперечним перерізом.

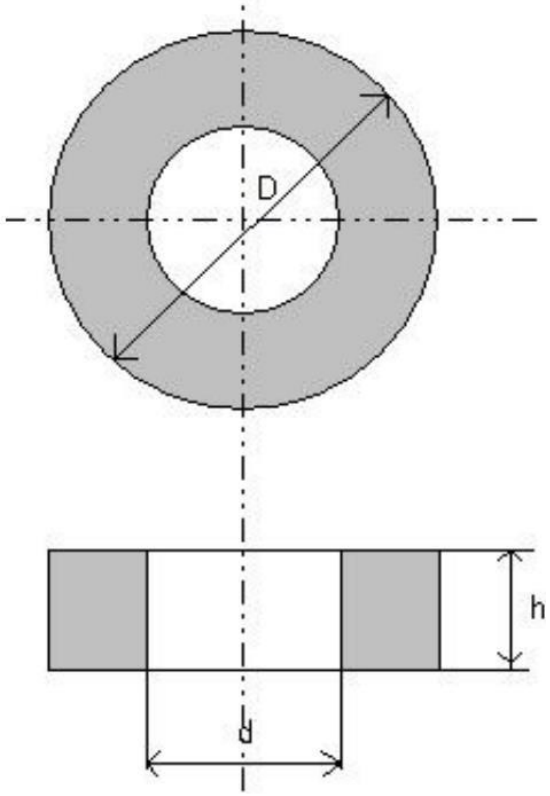


Рисунок 3.8 – Кільцевий сердечник

Цей сердечник має такі параметри:

$S_o = 6{,}158 \times 10^{-4}\ м^2$

$S_{ст} = 6{,}8 \times 10^{-5}\ м^2$

$D = 45\ мм$

$d = 28\ мм$

$h = 8\ мм$

$l_{срн} = 114{,}61\ мм = 114{,}61 \times 10^{-3} м$

Розраховуємо кількість витків первинної та вторинної обмоток:

$$W_1 = \frac{U_{1m} \bullet t_u}{\triangle B \bullet S_{ст} \bullet K_{ст}} = \frac{10\ B \bullet 2{,}083 \times 10^{-5}\ с}{0{,}2\ Тл \bullet 204 \times 10^{-6}\ м^2} \cong 5 \quad (3.18)$$

$$W_2 = W_1 \bullet n = 75 \quad (3.19)$$

Щоб зменшити кількість обертів, ми використовуємо три ядра типу 2000NM1. К45×28×8.

Зробимо розрахунок та вибір дротів первинної та вторинної обмоток:

$$S_1 = \frac{I_1}{j} = 1{,}61\ мм^2 \quad (3.20)$$

$$D_1 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \bullet S_1} = 1{,}4\ мм \quad (3.22)$$

$$S_2 = \frac{I_2}{j} = 0{,}107\ мм^2 \quad (3.21)$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \bullet S_2} = 0{,}369\ мм \quad (3.23)$$

З довідника вибираємо дроти ПЕВ-2:

$S_1 = 2{,}269\ мм^2$ $\quad D_1 = 1{,}7\ мм$

$S_2 = 0{,}385\ мм^2$ $\quad D_2 = 0{,}7\ мм$

Перевірка Кок:

$$K_{ок} = \frac{W_1 \bullet S_1 + W_2 \bullet S_2}{S_{ок}} = \frac{(5 \bullet 2{,}269 м^2 + 75 \bullet 0{,}385 м^2) \times 10^{-6}}{6{,}158 \times 10^{-4} м^2} = 0{,}065 < 0{,}3 \quad (3.24)$$

З формули (23) можна дізнатися, що отриманий коефіцієнт заповнення не перевищує 0,3, що доводить правильність розрахунку і вибору матеріалів.

Розрахунок індуктивності намагнічування:

$$L_\mu = \frac{\mu_0 \bullet \mu \bullet S_{ст} \bullet W_1^2}{l_{срн}} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \bullet 2000 \bullet 204 \times 10^{-5} м^2 \bullet 5^2}{114{,}61 \times 10^{-3}\ м} = 1{,}18\ мГн \quad (3.25)$$

Розрахунок індуктивності розсіювання:

$$L_s = \frac{\mu_0 \bullet l_в \bullet W_1^2}{l_{срн}} (\Delta_{из} + \frac{D_1 + D_2}{3}) = 1,27 \text{ мкГн} \quad (3.26)$$

$$l_B = \left(\frac{D}{2} + h\right) + \left(\frac{D-d}{2} + h\right) = 38,5 + 24,5 = 63 \text{ мм} \quad (3.27)$$

Розрахунок паразитної ємності:

$$C_{12} = \frac{\varepsilon_0 \bullet \varepsilon \bullet l_{срн} \bullet l_в}{\Delta_{из}} = \frac{8,85 \times 10^{-12} \bullet 4 \bullet 114,61 \times 10^{-3} \bullet 40 \times 10^{-3}}{0,08 \times 10^{-3}} = 1,335 \times 10^{-9} \text{ Ф} \quad (3.28)$$

$$C_п = \frac{C_{12}}{3}(n-1)^2 = 4,953 \times 10^{-8} \text{ Ф} \quad (3.29)$$

3.3 Вибір транзисторів

Вибір транзистора для використання у вашому випрямлячі важливо здійснювати на основі вимог до системи. У зазначеному описі, ви вказали на переваги польових транзисторів (MOSFET) і їх здатність працювати при низьких струмах та напругах, а також легкість інтеграції в інтегральні схеми.

Якщо у вашому випадку важливі низькі струми, низькі напруги і ефективна інтеграція в інтегральні схеми, то MOSFET може бути оптимальним вибором. Однак важливо також врахувати інші параметри транзистора, такі як максимальний струм, максимальна напруга, опір у відкритому стані (Rds(on) для MOSFET), і можливість відводу тепла.

При виборі транзистора важливо також враховувати теплові умови та можливості відводу тепла. Якщо ви працюєте з великими струмами, може знадобитися додаткове охолодження для забезпечення нормального тепловідведення.

Перед вибором конкретного транзистора рекомендується вивчити технічні характеристики кількох моделей, що відповідають вашим вимогам, і порівняти їх параметри для забезпечення оптимального вибору.

Переваги MOSFET-транзисторів порівняно з біполярними транзисторами дійсно відображають ключові переваги MOSFET. Ось кілька конкретних переваг MOSFET:

- високий коефіцієнт посилення струму (токопідсилювальний коефіцієнт): MOSFET має великий коефіцієнт посилення струму, що означає, що вони в змозі постачати великі струми на виході при невеликому керуючому струмі.
- мінімальна потужність управління: MOSFET можуть працювати при дуже малих значеннях керуючої потужності, що полегшує розробку інтерфейсу управління.
- висока швидкість перемикання: MOSFET мають високу швидкість перемикання, що дозволяє ефективним чином працювати на високих частотах.
- мінімальна затримка вимикання: Завдяки високій швидкості перемикання MOSFET, їхня затримка вимикання (turn-off delay) є мінімальною, що сприяє ефективній роботі в системах реального часу.
- проста схема управління: Управління MOSFET може бути здійснене простим керуючим сигналом, що полегшує схему управління.
- збільшення вихідної потужності: MOSFET дозволяють реалізовувати пристрої з великою вихідною потужністю через їх високий коефіцієнт посилення струму та ефективну роботу на високих частотах.
- стійкість до імпульсних напруг: MOSFET можуть витримувати значні імпульсні напруги.

Ці переваги роблять MOSFET популярними для використання в сучасних електронних схемах та пристроях.

$$I_{dsдоп} \geq I_{ds} = 9{,}12\,A;$$
$$U_{ds\max доп} \geq 2 \cdot Un = 24\ B;$$
$$f \geq f_{раб} = 24\ кГц.$$

Цим параметрам відповідає транзистор IRF530PBF. Технічні параметри цього транзистора наведено нижче.

Технічні параметри IRF530PBF:

Input Capacitance	C_{iss}	V_{GS} = 0 V,	-	670	-	pF
Output Capacitance	C_{oss}	V_{DS} = 25 V,	-	250	-	
Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}	f = 1.0 MHz, see fig. 5	-	60	-	
Total Gate Charge	Q_g	V_{GS} = 10 V; I_D = 14 A, V_{DS} = 80 V, see fig. 6 and 13[b]	-	-	26	nC
Gate-Source Charge	Q_{gs}		-	-	5.5	
Gate-Drain Charge	Q_{gd}		-	-	11	
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	V_{DD} = 50 V, I_D = 14 A, R_g = 12 Ω, R_D = 3.6 Ω, see fig. 10[b]	-	10	-	ns
Rise Time	t_r		-	34	-	
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$		-	23	-	
Fall Time	t_f		-	24	-	
Internal Drain Inductance	L_D	Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact	-	4.5	-	nH
Internal Source Inductance	L_S		-	7.5	-	

Рисунок 3.9 – Технічні параметри IRF530PBF

Щоб захистити транзистор, ми використовуватимемо буферну схему. Ця схема може зменшити амплітуду перехідної технологічної напруги, яка виникає, коли силовий напівпровідниковий елемент у перетворювачі перемикає імпульсну напругу. Крім того, буфер може зменшити динамічні втрати вимикача живлення.

При цьому ланцюги снабберів змінюють траєкторію перемикання силового

елемента: ємність знижує швидкість наростання напруги, індуктивність – наростання струму.

Величина Сдф визначається за формулою [8]:

$$C_{\partial\phi} = \frac{I_{ds}^2 L_s}{(U_{выбр} - U_{zands})^2} = \frac{9{,}12\,A^2 \cdot 1{,}24\times10^{-6}\,Гн}{(50\ B - 24\ B)^2} = 0{,}0167\times10^{-6}\ Ф = 16{,}7\ нФ \quad (3.30)$$

де Ids - струм сток-витік транзистора;

Ls - індуктивність розсіювання трансформатора;

Uвибр - величина викиду, Uzands - напруга на замкненому транзисторі.

З довідника[18] виберемо конденсатор Сдф К10-17б-м1500-0,022 мкФ

$$Rд \geq \sqrt{\frac{L_s}{C_{\partial\phi}}} = \sqrt{\frac{1{,}24\times10^{-6}}{0{,}0167\times10^{-6}}} = 4\ Ом \quad \text{Возьмем} \quad Rд = 56\ \text{Ом}. \quad (3.31)$$

Розрахунок потужності:

$$P_{Rд} = \frac{C_{\partial\phi}U^2}{2}\cdot f = \frac{22\ нФ\cdot 24^2\ B^2}{2}\cdot 24\times10^3\ Гц = 0{,}1\ мВт \quad (3.32)$$

.

Обираємо з довідника [9] резистор Rд С1-4-0,062-56 Ом±5%.

Обираємо діод 1N4001 з параметрами [10]:

Таблиця 3.1 – Параметри діода 1N4001

Параметр	Значення
1	2
Виробник	MASTER INSTRUMENT CORPORATION (MIC)
Корпус	DO41
Тип діода	Випрямний діод
Структура	Diode
Схема з'єднання діодів	Одиночний
Максимальний робочий струм	1 А
Максимальна зворотна напруга	50 В
Спосіб монтажу	Пайка в отвори
Швидкодія	Стандартна
Максимальний імпульсний струм	30 А
Максимальна напруга у прямому напрямку, 25 °C	1,1 В

Продовження таблиці 3.1

1	2
Максимальний постійний зворотний струм при номінальній напрузі, 25 °С	10 мкА
Робоча температура	-65 ° С ... +175 ° С

Виберемо фільтруючий конденсатор С1 = К50-35-1000 мкФ 63 В з параметрами [18]:

Таблиця 3.2 – Параметри фільтруючого конденсатора

Тип	К50-35
Робоча напруга, В	63
Номінальна ємність, мкФ	1000
Допуск номінальної ємності, %	20

Параметри елементів, що подавляють високочастотні коливання, Давиденко Н.Ю. у статті «люмінесцентні лампи» рекомендують вибрати С4: К73-17-2200пФ□63В та R3: С2-23-2-470 Ом□5%.

3.4 Розрахунок схеми керування транзисторами

Задаючий генератор (ЗГ), наведений на рисунку 17, виконаний на логічних елементах АБО-НЕ. При виборі сімейства логічних мікросхем враховувалася величина напруги живлення. Напруга живлення по ТЗ дорівнює 12В, отже, доцільніше вибирати логічні мікросхеми КМОП технології. Мікросхема К561ЛЕ5 містить по чотири двовходові базові елементи АБО-НЕ.

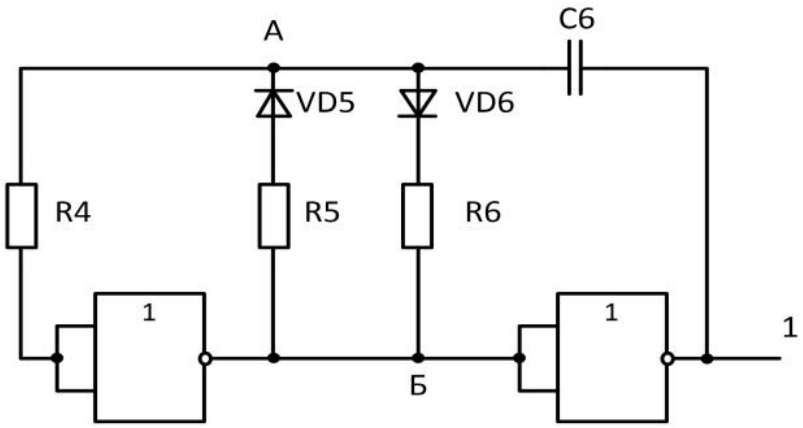


Рисунок 3.10 – Принципова схема ЗГ

Період ЗГ визначається за умови, що він працює на подвоєній частоті, ніж сам перетворювач.

$$T = 2 \cdot \frac{1}{f} = 8.333 \times 10^{-5} c$$

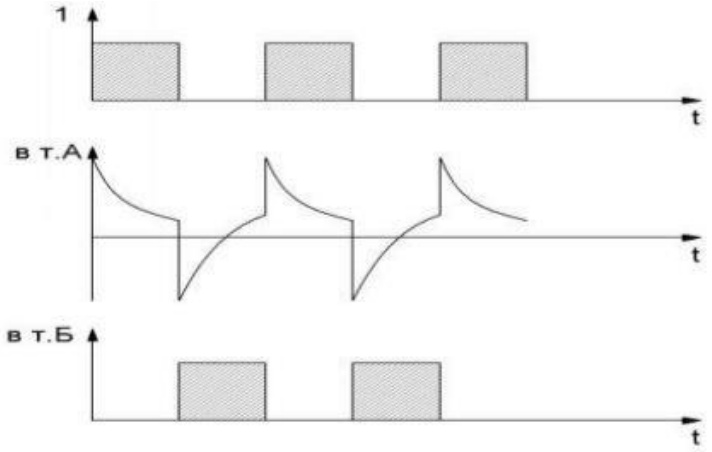


Рисунок 3.11 – Діаграма роботи ЗГ

Для ЗГ період роботи Т визначається за такою формулою:

$$T \cong 2.2RC \tag{3.33}$$

Виберемо С6 із ряду Е12 рівним $4{,}7 \times 10^{-9}$ Ф , тоді

$$R_{5,6} = \frac{T}{2.2 \cdot C6} = 8.059 \times 10^{3}\ Ом \tag{3.34}$$

Виберемо з ряду Е24 R5 та R6 рівними 8,2 кОм. Резистор R4 вибирається з умови $2R_5 \leq R_4 \leq 10R_5$. Виберемо із ряду Е24 R4 рівними 47 кОм.

Для регулювання частоти використовуватимемо підстроювальні резистори R10 і R11. І розділимо номінали резисторів R5 та R6.

С6: К10-17б-4700 пФ□50В ;

R5,R6: С1-4-0,5-4,7 КОм□5%;

R4: С1-4-0,5-47 КОм□5% ;

R10,R11: 3296X-1-103LF.

Для забезпечення затримки між сигналами управління і щоб вони були однаковими за часом, необхідна схема формувача імпульсів рисунок 21.

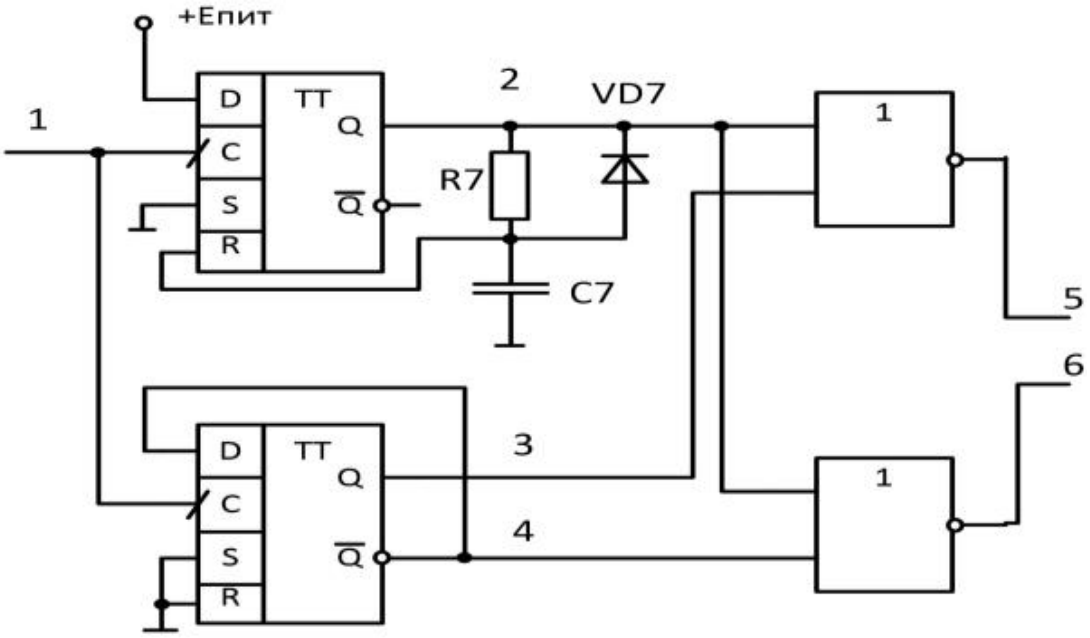


Рисунок 3.11 – Принципова схема формувача імпульсів

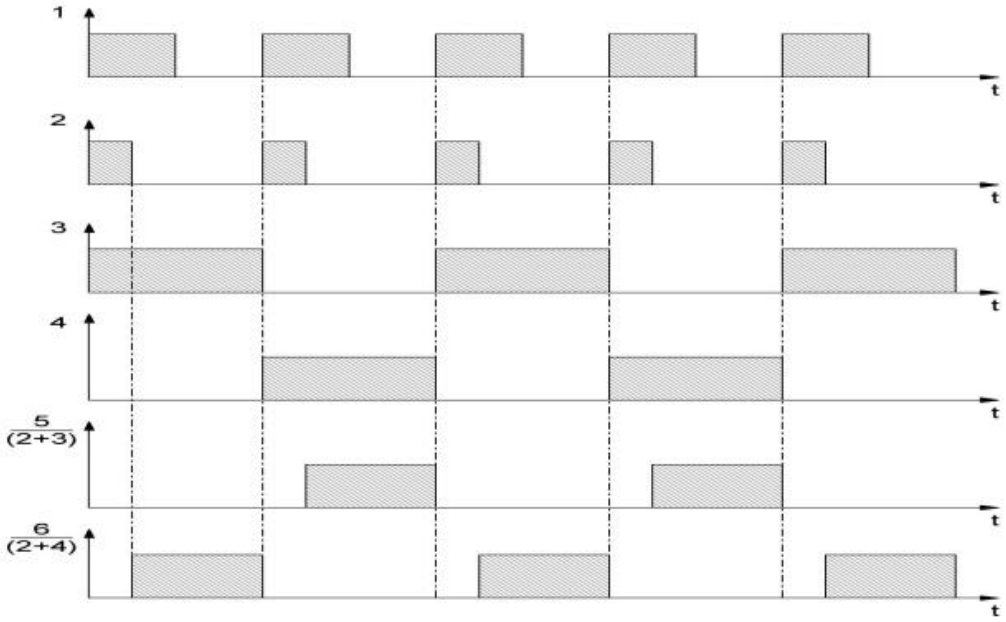


Рисунок 3.12 – Діаграми роботи формувача

Ланцюг з R7 та C7 необхідний для забезпечення затримки між перемиканнями транзисторів. Час затримки визначається наступним чином tзад=-R7C7ln(0,5). Візьмемо величину затримки, що дорівнює ¼ T, де T-період перемикання ключів.

Виберемо C7 із ряду E12 рівним 4,7×10-9 Ф, тоді

$$R_7 = \frac{t_{зад}}{-C_7 \ln(0.5)} = \frac{1\times10^{-5} c}{-4.7\times10^{-9}\cdot\ln(0.5)} = 3.07\ кОм \quad (3.35)$$

Виберемо із ряду E24 R7 рівним 3 кОм. Для регулювання затримки використовуємо підстроювальний резистор R12 послідовно з R7. C7:

К10-17б-4700 пФ□50В

R7: С1-4-0,5-1 кОм□5%.

R12: 3296X-1-502LF

Виберемо діод 1N5817 із параметрами:

Гранична пряма напруга становить від 0,45 до 0,60В, гранична зворотна напруга - від 20В до 40В. Середній прямий струм дорівнює 1А, граничний зворотний струм – 1мА.

Як драйвер будемо використовувати мікросхему IR2117.

Схема підключення драйвера до транзистора наведена на Рисунку 3.10.

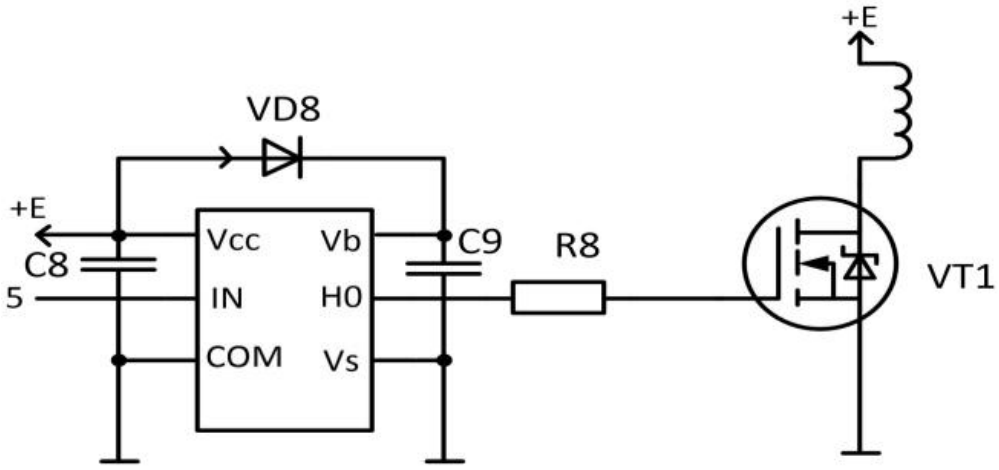


Рисунок 3.13 – Схема підключення драйвера до транзистора

З довідника виберемо конденсатори С8 и С9: К10-17б-0,022мкФ□50 В□□10%

В якості діода VD8 буде використовуватися діод Шоттки 1N5817. Максимальний вихідний струм драйвера IR2117 складає 500 мА. Отже,

можна визначити мінімальний опір резистора R8:

$$R_{8\min} = \frac{U_{вых}}{I_{выхт}} = \frac{12\ B}{500\ мА} = 24\ Ом \qquad (3.36)$$

Візьмемо резистор із опором 30 Ом.

$$P_{R8} = \frac{U^2_{вых}}{R_8} = \frac{(12B \cdot \sqrt{0,5})^2}{30\ Ом} = 2,4\ Вт \qquad (3.37)$$

Виберемо із довідника резистор R8: С2-23-2-30 Ом□5%.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Для оцінки проведеного дослідження ми використовували програмне забезпечення MultiSim для схемотехнічного моделювання розробленого джерела живлення. Модель включала електронні компоненти з бібліотеки програми, параметри яких відповідали розрахунковим значенням. Результати експерименту з моделювання дозволили перевірити правильність роботи схеми.

MultiSim дозволяє конструювати принципові електричні схеми з використанням бібліотеки електронних компонентів і проводити аналіз побудованих схем у часовій та частотній областях, використовуючи multisim-директиви, які може вводити користувач.

Змодельована схема пристрою у програмному середовищі MultiSim представлена на рисунку 3.14.

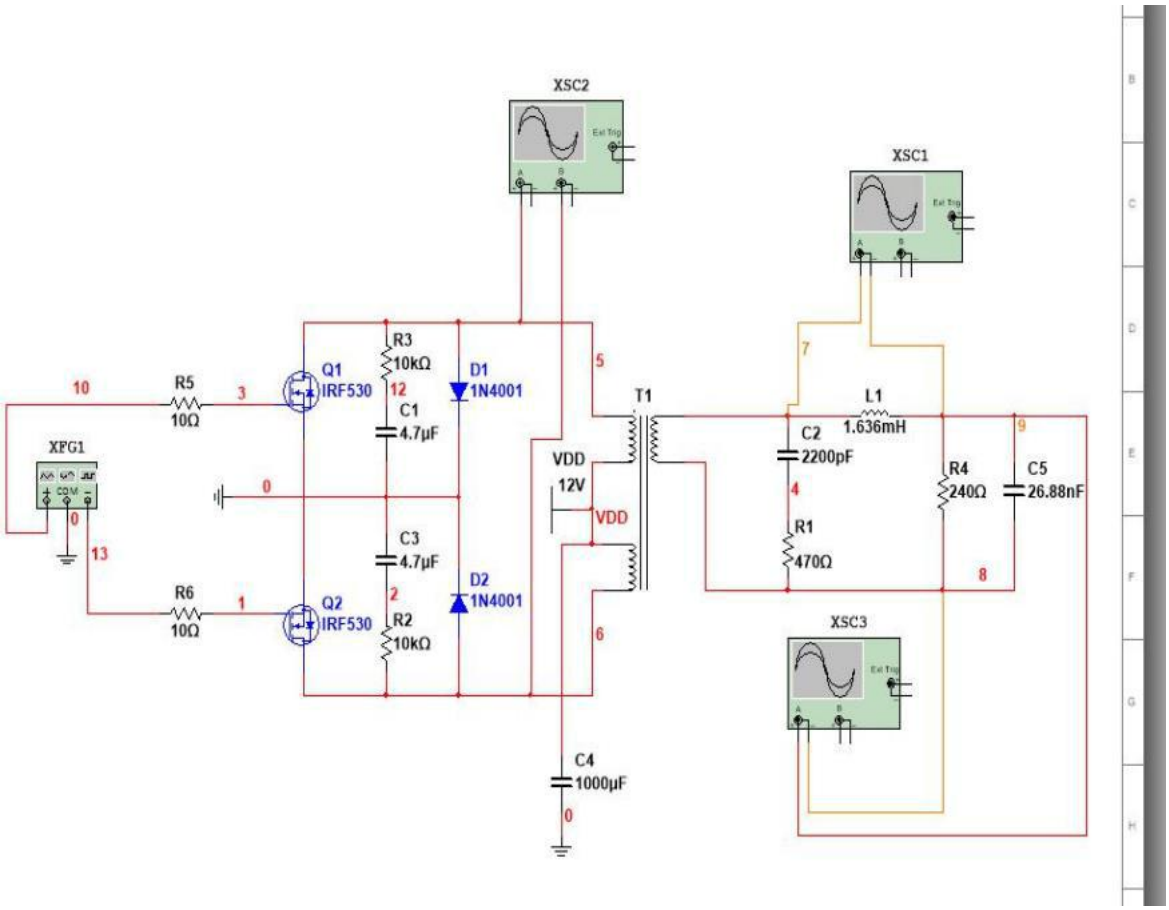


Рисунок 3.14 – Модель силової частини джерела живлення

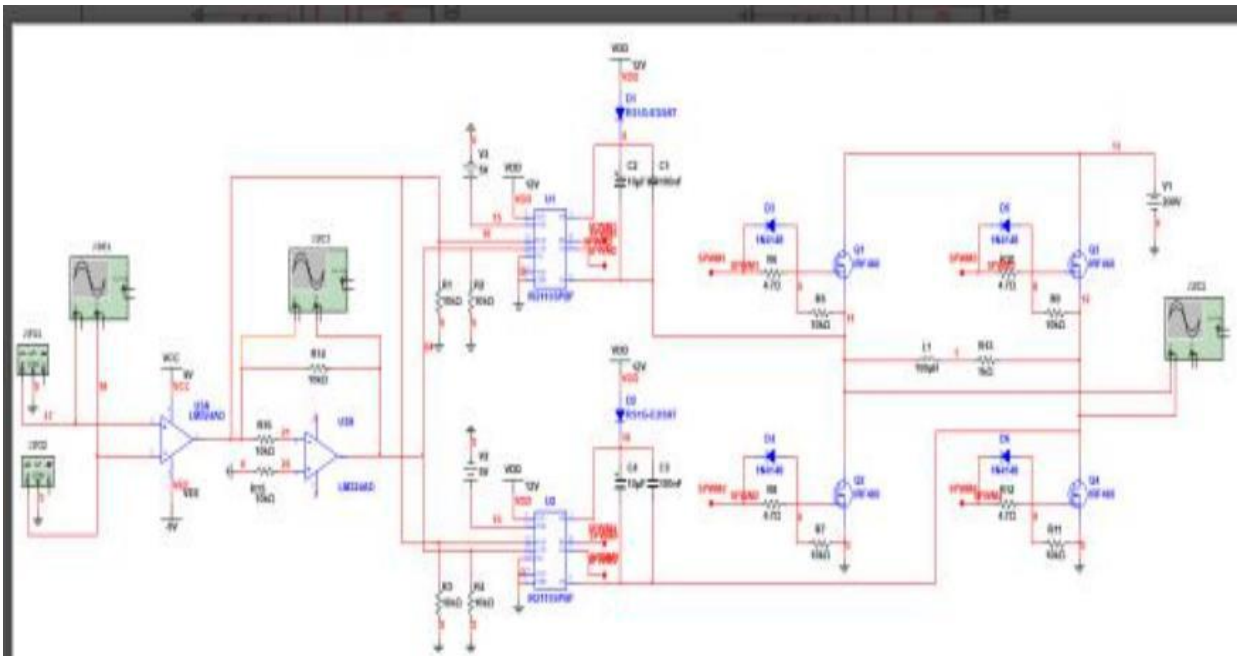


Рисунок 3.15 – Схема моделювання системи керування

Усі параметри електронних компонентів схеми відповідають розрахованим. Нижче на малюнках представлені діаграми струмів та напруг у ключових вузлах схеми, що доводять працездатність спроектованого пристрою.

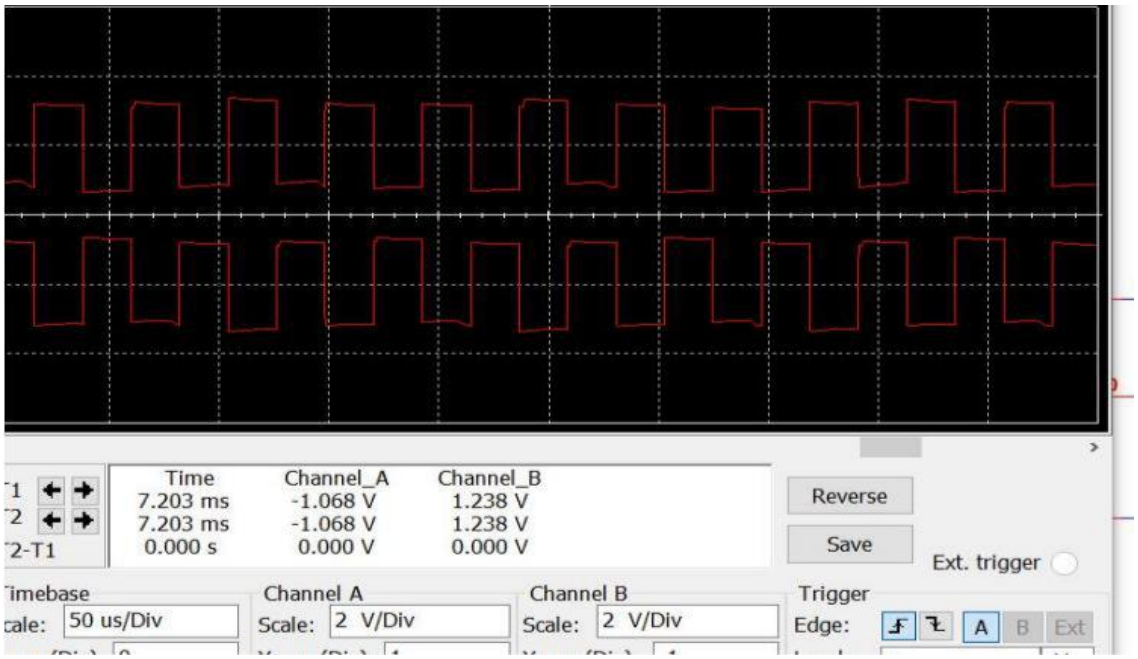


Рисунок 3.16 – 1 канал: – сигнал керування VT1; 2 канал: – сигнал керування VT2

Scale=50us/Div

Висновок вірно відображає результати дослідження. Згідно з діаграмою форми сигналу, частота змінного струму складає 24,35 кГц, і резонансна частота відповідає вимогам. Крім того, з діаграм видно, що транзистори перемикаються по черзі, що свідчить про двотактну роботу схеми. Ці результати підтверджують коректну роботу розробленого джерела живлення.

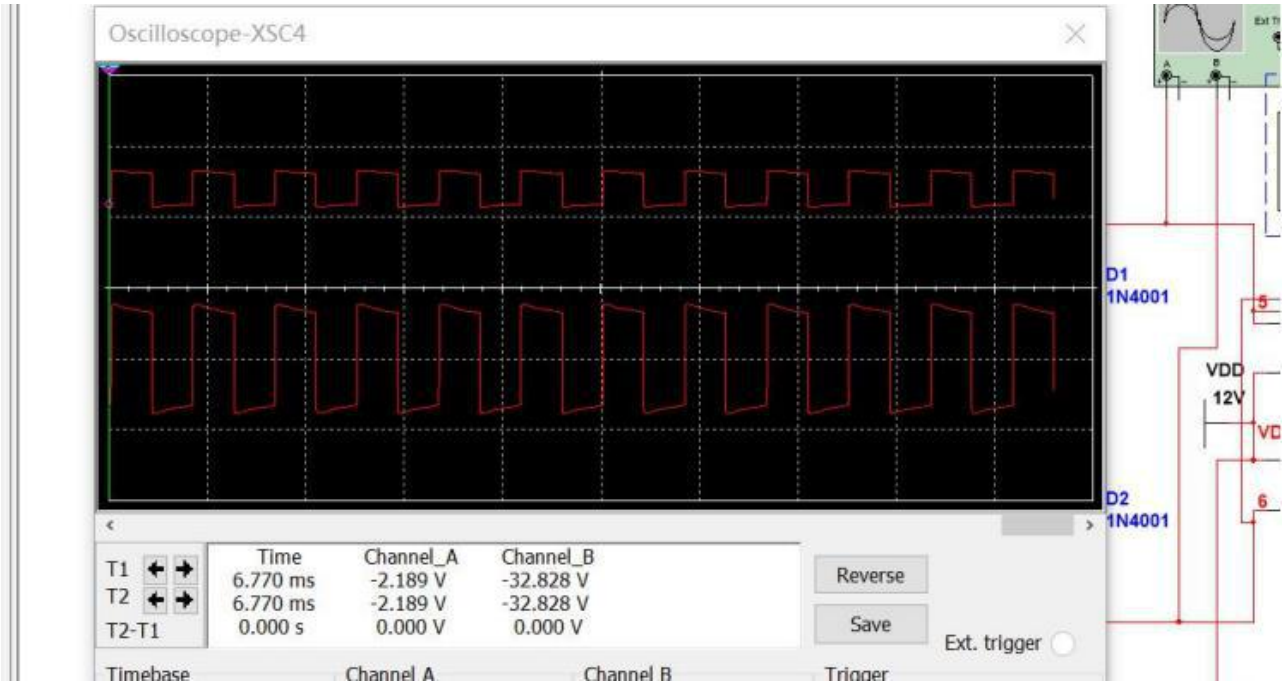


Рисунок 3.16 – Напруга на обмотках трансформатора Uw1 та Uw2

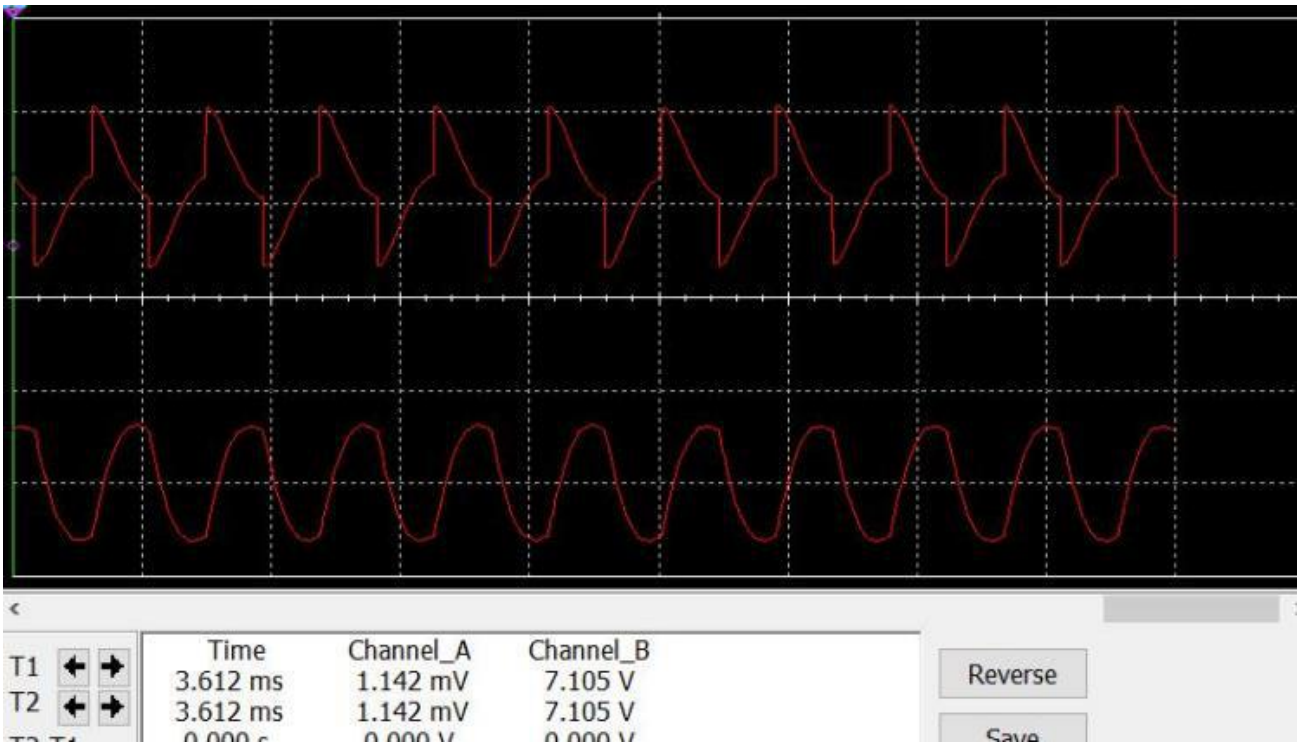


Рисунок 3.17 - Напруга на дроселі L1 і струм, що протікає через дросель. Перший – це напруга, а другий – струм

Рисунок 3.18 – Напруга та струм на навантаженні RH. Перший – це напруга, а другий – струм.

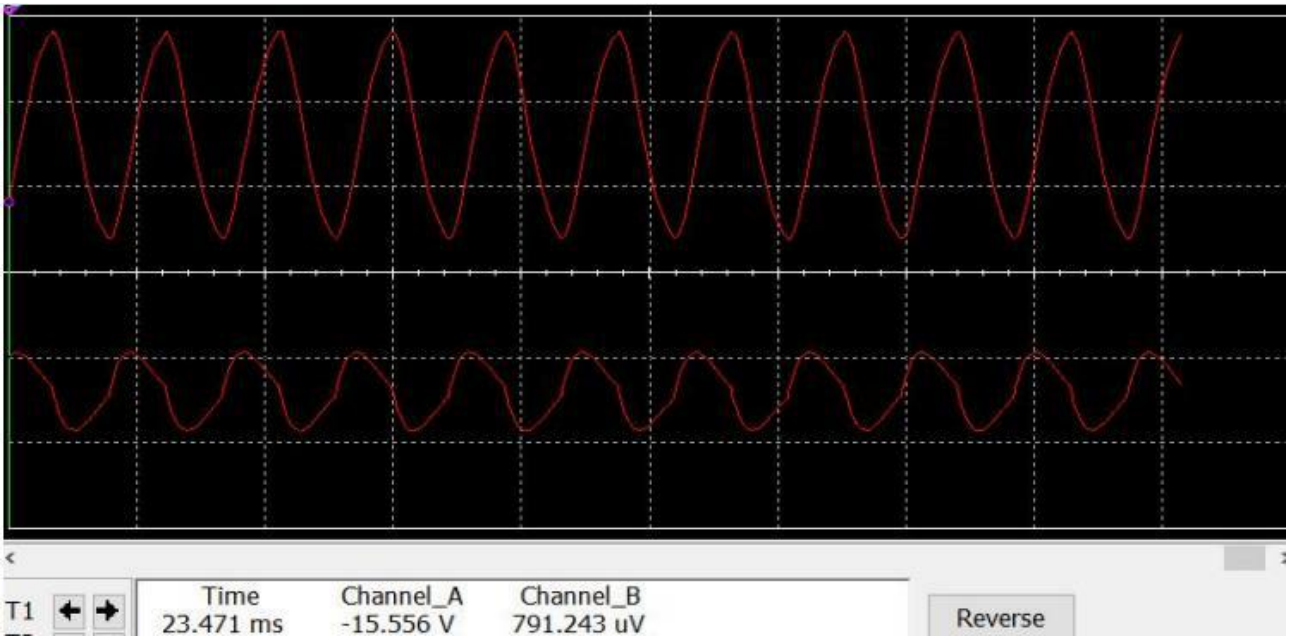


Рисунок 3.19 –Напруга та струм конденсатора С5 напруги та струму. Перший – це напруга, а другий – струм

Спостереження з осцилограм дозволяють зробити висновок, що транзистори працюють у ключовому режимі. На виході інвертора зображена практично прямокутна напруга, що підтверджує правильність роботи інвертора. Діаграми також доводять працездатність демпфуючого ланцюга, оскільки високочастотні піки струму вторинної обмотки замикаються саме тут.

Вочевидь, змодельована схема є повноцінною та працездатною. Напруга на виході інвертора має майже ідеальну прямокутну форму з необхідною амплітудою 150 В. Синусоїдальна форма струму в навантаженні та його фазовий зсув на 90 градусів підтверджують працездатність індуктивно-ємнісного перетворювача на резонансній частоті. Вивчення стабільності струму навантаження допомагає підтвердити коректну роботу всієї системи.

.

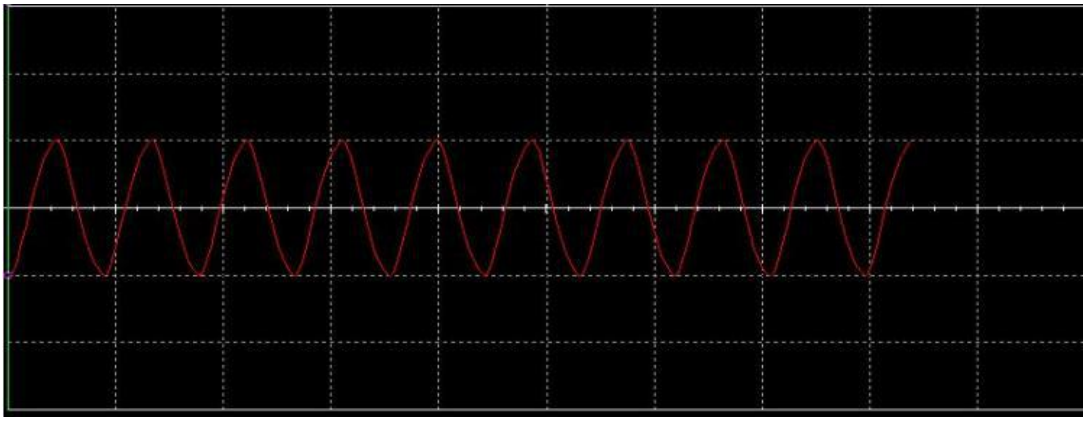


Рисунок 3.20 - Форма хвилі струму, навантаження 240 Ом

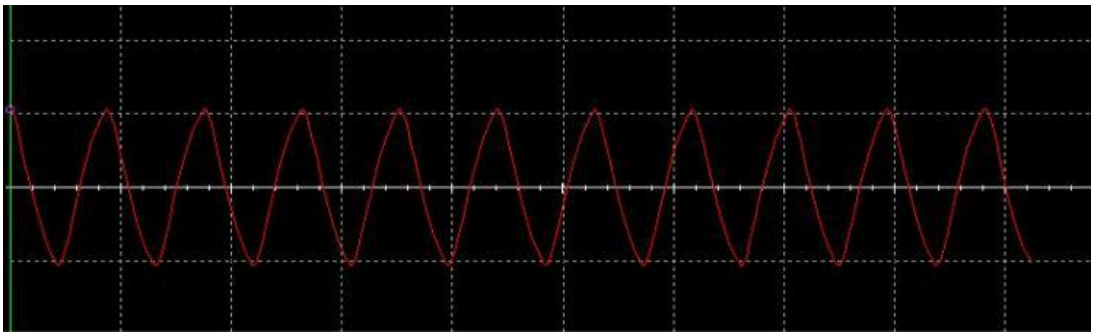


Рисунок 3.21 - Форма хвилі струму, навантаження 120 Ом

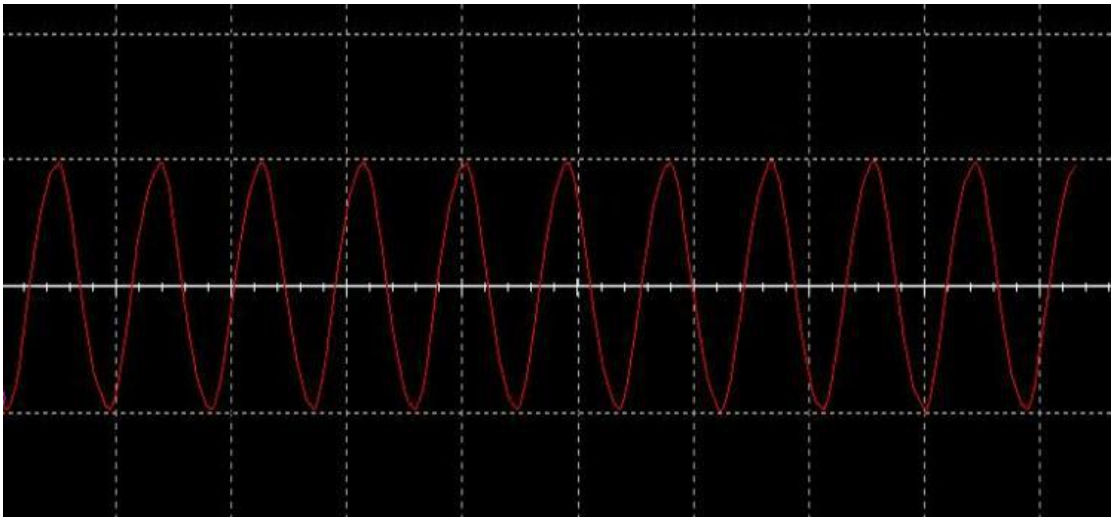


Рисунок 3.22 - Форма хвилі струму, навантаження 360 Ом

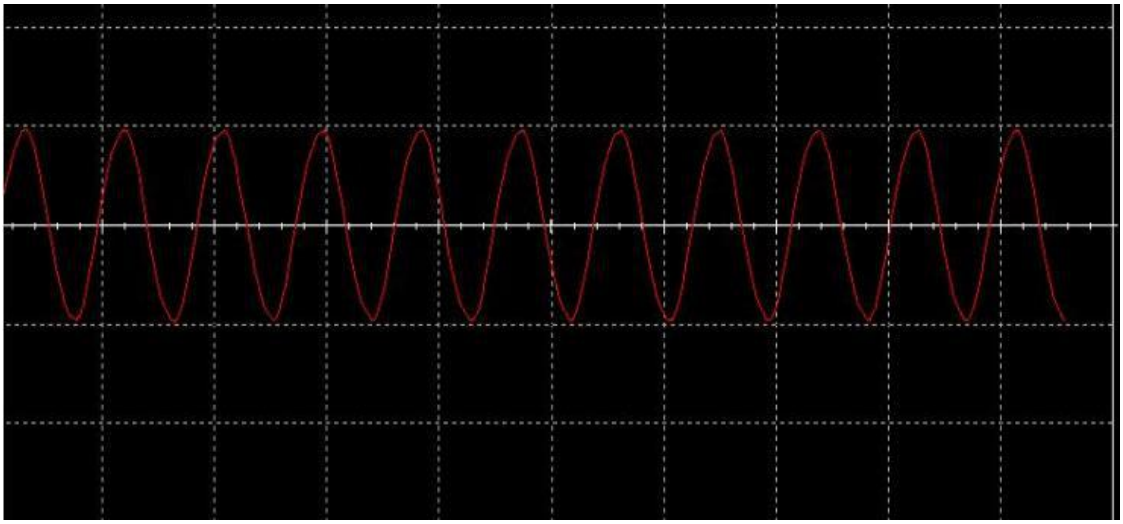


Рисунок 3.23 - Форма хвилі струму, навантаження 480 Ом

Таблиця 3.1 - Нижче наведено залежність максимального значення струму через навантаження від величини навантаження

$R_{Н}$ /ом	40	80	120	160	200	240
$I_{Н}$ /А	0.432	0.431	0.430	0.431	0.430	0.430
$R_{Н}$ /ом	280	320	360	400	440	480
$I_{Н}$ /А	0.430	0.430	0.429	0.429	0.430	0.430

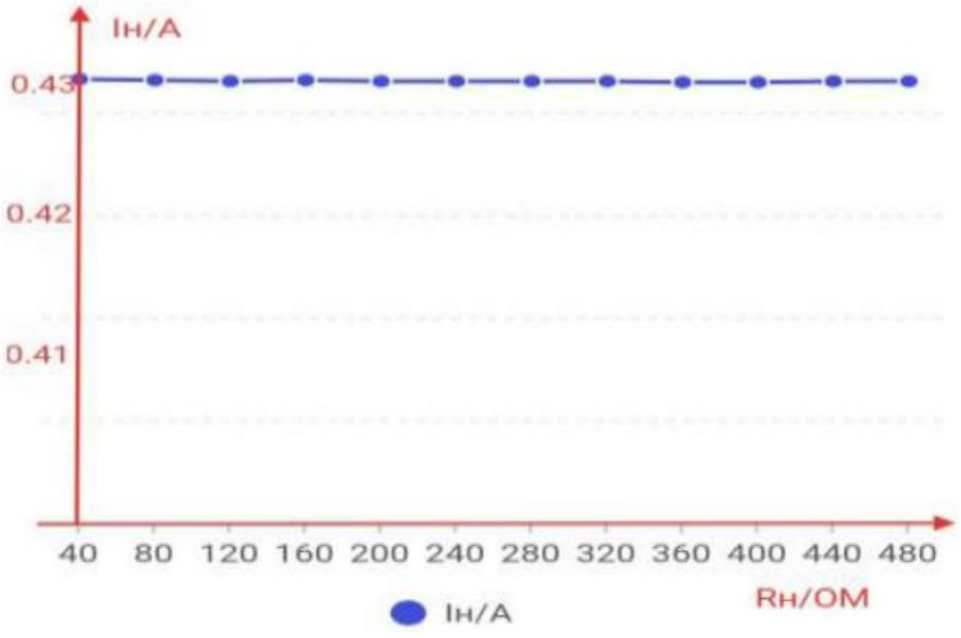


Рисунок 3.24 – Графік залежності струму від опору навантаження Ін = F (Rн)

З наведених вище результатів експерименту видно, що опір резистора не впливає на струм навантаження, тобто. струм навантаження стабільний.

Таблиця 3.2 - Залежність напруги на навантаженні від величини опору навантаження, тобто. Uн = f(Rн).

$R_{Н}$ /ом	40	80	120	160	200	240
$U_{Нm}$ /в	24.5	48.8	73.4	97.3	121.6	146.4
$U_{Н=}$ $U_{нm}\div\sqrt{2}$	17.32	34.51	51.90	68.8	85.98	103.5
$R_{Н}$ /ом	280	320	360	400	440	480
$U_{Нm}$ /в	170	194.6	220	243.4	268.6	291.8
$U_{Н=}$ $U_{нm}\div\sqrt{2}$	120.2	137.6	155.56	172.11	189.93	206.33

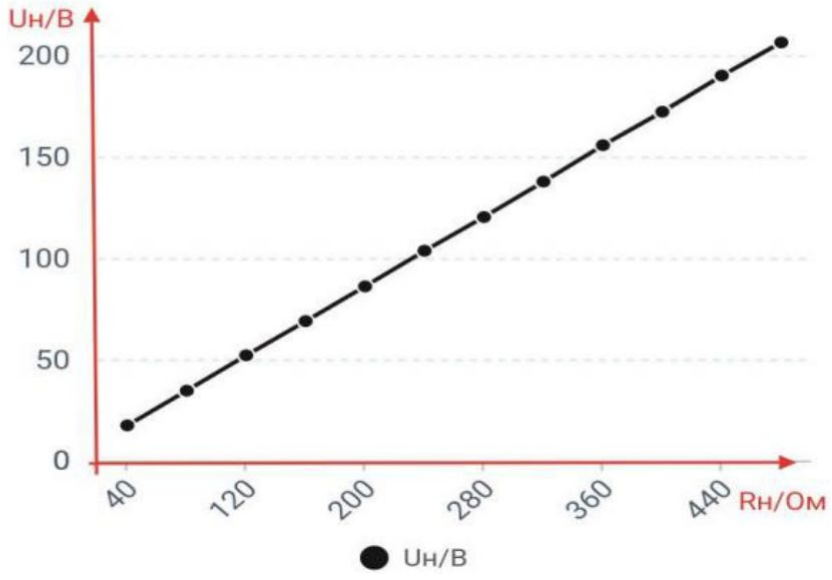


Рисунок 3.25 - Графік залежності напруги на навантаженні від величини опору навантаження Uн = f(Rн)

ВИСНОВКИ

«Зелений» тариф – це державна програма, яка бере свій початок у 2009 році. Основне завдання програми полягає у придбанні у приватних та юридичних осіб електроенергії, виробленої за допомогою альтернативних джерел: сонячних електростанцій, вітрогенераторів, міні-гідроелектростанцій та геотермальних джерел. Мета програми – стимулювати приватні домогосподарства та підприємців України використовувати поновлювані джерела енергії, тим самим знизити споживання традиційних енергоносіїв у вигляді вугілля, нафти та газу.

Реалізація «зеленого» тарифу передбачає викуп у власників альтернативних джерел електроенергії надлишку виробленої ними енергії, приведеного до стандарту енергорозподілу в Україні (380/220 В, 50 Гц). З цією метою власниками електростанцій мають бути застосовані сучасні ефективні перетворювачі електричної енергії.

У кваліфікаційній роботі проведено огляд літератури, у якому розглянуто основні схемотехнічні рішення перетворювачів постійної напруги на змінну, виявлено їх переваги та недоліки. Для перетворення постійної напруги акумулятора в змінну прямокутну вибрана двотактна схема інвертора із середньою точкою трансформатора, що володіє підвищеною ефективністю при відносно малих значеннях напруги живлення. Як пристрій, що стабілізує змінний струм нелінійного навантаження, використаний Г-подібний індуктивно-ємнісний перетворювач, що ефективно працює при прямокутній формі вхідної напруги на підвищених робочих частотах. Складено структурну та принципову схеми проектованого джерела живлення.

Проведено розрахунок силової частини та системи управління джерела живлення, вибрано елементну базу для реалізації всіх блоків пристрою.

Розроблено модель розробленого пристрою у програмі MultiSim, проведено налаштування моделі, проведено цикл експериментальних досліджень при різних опорах навантаження.

Порівняльний аналіз даних, отриманих під час розрахунків та моделювання, виявив якісний та кількісний збіг результатів дослідження, що

свідчить про адекватність моделі та справедливості виконаних розрахунків. Параметри розробленого джерела відповідають вимогам технічного завдання. Розроблені схеми й методики їх розрахунку можуть знайти застосування на підприємствах «зеленої» енергетики.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Глебов Б.А. Блокинг-генераторы на транзисторах. М., «Энергия», 1972. – 104 с.:ил.

2. Принципы построения и оптимизации схем индуктивно-емкостных преобразователей / Волков И.В., Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П. – Киев: Наук. думка, 1981. – 176 с.

3. Bilotserkivska A., Bondarenko I., Gritsunov A., Babychenko O., Sviderska L., Vasianovych A. Decomposition of EM Potential in Partial Modes of Irregular Electrodynamic Systems // Proc. 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW-2022). – Ukraine. – 2022. – P. 263-268.

4. Резисторы: Справочник / В. В. Дубровский, Д. М. Иванов, Н. Я. Протусевич др.; Под ред. И. И. Четверткова и В. М. Терехова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.: ил.

5. Справочник по электрическим конденсаторам / М. Н. Дьяконов, В. И. Карабанов, В. И. Пресняков и др.; Под общ.ред. И. И. Четверткова и В. Ф. Смирнова. – М.: Радио и связь, 1983. – 576 с.: ил.

6. Ферритовые кольцевые сердечники [Электронный ресурс] / Завод «Магнетон». URL: http://www.magneton.ru/cat.php?id=134.

7. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания / А. Н. Горский, Ю. С. Русин, Н. Р. Иванов, Л. А. Сергеева. — Москва: Радио и связь, 1988. — 174 с.

8. Транзисторы для аппаратуры широкого применения: Справочник / К. М. Брежнева, Е. И. Гантман, Т. И. Давыдова и др. Под ред. Б. Л. Перельмана. – М.: Радио и связь, 1981. – 656 с., ил.

9. Сердечники МП140 [Электронный ресурс]/ БАЛТЭЛЕКТРОНКОМПЛЕКТ URL: http://bec36.ru/p61226749-mp140-k10h6h3.html.

10. Драйверы MOSFET и IGBT [Электронный ресурс]/ Платан URL: http://www.platan.ua/cgi-bin/qweryv.pl/0w900024.html.

11. Churyumov G., Nannan W., Gritsunov A. Electron Cloud Build-Up in a Cold Cathode Magnetron at the Front of Anode Impulse // Proc. 17th IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2019) – Busan (South Korea). – 2019. – P. 1-2.

12. Semenets V.V., Kopot M.A., Gritsunov A.V., Bondarenko I.N., Lyashenko V.V., Yunusov E.E. Design and simulation of a pulse microwave-pumped laser // Telecommunications and Radio Engineering. – 2020. – V. 79. – No. 4. – P. 271-281.

13. Провод ПЭВ-2 [Электронный ресурс] / Cable.UK. URL: http://cable.uk/cable/group-pev_2.php, free. – lang. eang.

14. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания / А. Н. Горский, Ю. С. Русин, Н. Р. Иванов, Л. А. Сергеева. — Москва: Радио и связь, 1988. — 174 с.

15. Резисторы: Справочник / В. В. Дубровский, Д. М. Иванов, Н. Я. Протусевич и др.; Под ред. И. И. Четверткова и В. М. Терехова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.: ил.

16. Сердечники МП140 [Электронный ресурс] URL: http://bec36.ua/p61226749-mp140-k10h6h3.html.

17. Справочник по электрическим конденсаторам / М. Н. Дьяконов, В. И. Карабанов, В. И. Пресняков и др.; Под общ.ред. И. И. Четверткова и В. Ф. Смирнова. – М.: Радио и связь, 1983. – 576 с.: ил.

18. Транзисторы MOSFET [Электронный ресурс]/ Платан URL: http://www.platan.ru/cgi-bin/qweryv.pl/0w204.html, свободный. – Яз. рус