

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ЗАПОРІЗЬКИЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-  
НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ім. Ю.М. Потебні**

**Кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного  
забезпечення**  
(повна назва кафедри)

**Кваліфікаційна робота**  
перший (бакалаврський)  
(рівень вищої освіти)

на тему «Розробка перетворювача напруги з високим коефіцієнтом  
енергоефективності за топологією SEPIC»

Виконав: студент (ка) III курсу, групи 6.1530-с  
спеціальності 153 Мікро- та наносистемна  
техніка

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Мікро- та наносистемна  
техніка

(код і назва освітньої програми)

Д.С. Пупирєв

(ініціали та прізвище)

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

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

Рецензент завідувач кафедри електричної  
інженерії та кіберфізичних систем ІННІ  
ім. Ю.М. Потебні ЗНУ, професор, д.т.н.,  
Коваленко В.Л.

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

Запоріжжя  
2023

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ  
ІНСТИТУТ ім. Ю.М. Потебні**

Кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
(перший (бакалаврський) рівень)

Спеціальність Мікро- та наносистемна техніка  
(назва)

Освітня програма 153 Мікро- та наносистемна техніка  
(шифр, назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ЕІСПЗ

Т.В. Критська

«15» червня 2023 року

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Пупирєву Дмитру Євгеновичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра Розробка перетворювача напруги з високим коефіцієнтом енергоефективності за топологією SEPIC

керівник кваліфікаційної роботи бакалавра Світанько М.В., к.ф.-м.н., доцент,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “29” грудня 2022 року № 1893-с

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи бакалавра 15 червня 2023 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи бакалавра Вхідна напруга до 61 В, вихідна напруга від 0.6 В, вихідні струми до 4 А, Proteus, Multisim

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Електричні перетворювачі у відновлювальних джерелах енергії 2. Розробка перетворювача напруги з високим коефіцієнтом енергоефективності за топологією SEPIC 3. Охорона праці та техногенна безпека при розробці перетворювача напруги з високим коефіцієнтом енергоефективності за топологією SEPIC

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Електричні перетворювачі постійної напруги за топологією SEPIC 2. Схема електрична принципова синхронного перетворювача 3. Моделювання роботи комутаційних стабілізаторів перетворювача напруги за топологією SEPIC

## 6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи бакалавра

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>I</i>	<i>Світанько М.В., доцент каф. ЕІСПЗ</i>	<i>29.12.2022</i>	<i>30.01.2023</i>
<i>II</i>	<i>Світанько М.В., доцент каф. ЕІСПЗ</i>	<i>29.12.2022</i>	<i>30.05.2023</i>
<i>III</i>	<i>Світанько М.В., доцент каф. ЕІСПЗ</i>	<i>29.12.2022</i>	<i>30.05.2023</i>

7. Дата видачі завдання 29.12.2022 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Примітка
<i>1.</i>	<i>Літературний огляд</i>	<i>29.12.2022 – 30.01.2023</i>	
<i>2.</i>	<i>Розрахункова частина</i>	<i>29.12.2022 – 30.05.2023</i>	
<i>3.</i>	<i>Розробка заходів із охорони праці та техногенної безпеки</i>	<i>29.12.2022 – 14.05.2023</i>	
<i>4.</i>	<i>Розробка графічної частини роботи</i>	<i>02.05.2023 – 30.05.2023</i>	
<i>5.</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>02.05.2023 – 10.06.2023</i>	
<i>6.</i>	<i>Нормоконтроль</i>	<i>02.05.2023 – 15.06.2023</i>	

Студент \_\_\_\_\_ Пупирєв Д.Є.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) \_\_\_\_\_ Світанько М.В.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ Верьовкін Л.Л.  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

## Реферат

Дипломна робота містить 67 сторінок, 34 рисунків, 40 посилань на літературу.

Об'єкт дослідження – перетворювач напруги живлення електронних пристроїв у підвищуючому та понижуючому режимах.

Мета роботи – розробка перетворювача напруги з високим коефіцієнтом енергоефективності за топологією SEPIC.

Задачі роботи: виконати математичне та схемотехнічне моделювання перетворювача напруги з високим коефіцієнтом енергоефективності за топологією SEPIC.

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

Короткий виклад результатів досліджень – виконано розрахунки перетворювача постійної напруги за топологією SEPIC, проведено схемотехнічне моделювання роботи пристрою на основі мікроконтролера та комутаційних стабілізаторів.

Результати впроваджень – система пройшла апробацію на кафедрі електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення.

Прогнозні пропозиції – рекомендується для впровадження в мікроелектронних інформаційних та енергозберігаючих технологіях.

**ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ТОПОЛОГІЯ SEPIC, ПОСТІЙНА НАПРУГА, МІКРОКОНТРОЛЕР, PROTEUS, MULTISIM.**

Дипломну роботу виконано на кафедрі електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення з 29.12.2022 р. по 15.06.2023 р.

## ЗМІСТ

	Стор.
Вступ .....	6
1. Електричні перетворювачі у відновлювальних джерелах енергії .....	7
1.1 Застосування електричних перетворювачів у відновлювальних джерелах електроенергії .....	7
1.2 Топології двонаправлених перетворювачів постійної напруги (ДППН).....	11
1.2.1 Неізолювана напівмостова топологія ДППН.....	11
1.2.2 Інвертуючий (неізолюваний зворотньоходовий) перетворювач.....	12
1.2.3 Каскадне включення понижуючого перетворювача з підвищуючим перетворювачем.....	13
1.2.4 ДППН топології Чука.....	14
1.2.5 Топологія SEPIC перетворювача постійної напруги.....	14
1.2.6 Модифікований ДППН.....	15
1.2.7 ДППН із секційними індуктивностями.....	16
1.2.8 ДППН на конденсаторах, що перемикаються.....	17
1.2.9 НДППН із зустрічним магнітозв'язком індуктивностей.....	18
1.2.10 Однофазні НДППН із допоміжними ПНН/ПНС схемами.....	19
1.3 Перспективи розвитку топологій DC-DC перетворювачів .....	20
2. Розробка перетворювача напруги з високим коефіцієнтом енергоефективності за топологією SEPIC .....	22
2.1 Моделювання структурної схеми перетворювача напруги з високим коефіцієнтом енергоефективності за топологією SEPIC .....	22
2.2 Електрична принципова схема.....	26
2.2.1 Синхронний перетворювач SEPIC .....	26
2.2.2 Опис мікросхеми LT8711.....	30
2.2.3 Моделювання теплової карти плати перетворювача SEPIC .....	34

2.3 Розробка перетворювача SEPIC на комутаційних стабілізаторах LT3957 і LT3958.....	35
2.4 Моделювання роботи комутаційних стабілізаторів LT3957 і LT3958 перетворювача напруги з високим коефіцієнтом енергоефективності за топологією SEPIC .....	44
3 Охорона праці та техногенна безпека при розробці перетворювача напруги з високим коефіцієнтом енергоефективності за топологією SEPIC .....	47
3.1 Характеристика потенційних шкідливих та небезпечних виробничих факторів .....	47
3.2 Заходи з поліпшення умов праці .....	50
3.3 Виробнича санітарія.....	52
3.4 Електробезпека.....	55
3.5 Протижежна безпека.....	57
Висновки та рекомендації.....	61
Перелік посилань.....	63

## Вступ

Проблема енергозбереження тісно переплітається з проблемами енергетики, екології, технічного переозброєння та структурної перебудови всієї економіки. Важливість енергозбереження підтверджується статусом державної політики та державними органами в усіх високорозвинутих країнах (Японія, США, Франція, Німеччина, Велика Британія тощо). Перспективним напрямком підвищення енергоефективності є розробка та впровадження нових ефективних типів перетворювачів та накопичувачів електричної енергії [1].

На протязі останніх десяти років набули популярності високочастотні DC-DC перетворювачі, які широко застосовуються в джерелах живлення електронних пристроїв і систем для керування різноманітними механізмами, що працюють від акумуляторних батарей та інших джерел постійного струму та напруги. Серед цих перетворювачів окремо виділяють перетворювачі DC-DC, виготовлені за топологією SEPIC (single-ended primary inductor converter) – це перетворювач постійного струму, вихідна напруга якого може бути більшою, меншою або дорівнювати вхідній напрузі, в залежності від коефіцієнта заповнення. Він здатний забезпечити напругу в широкому діапазоні постійного струму [2].

Отже, за допомогою перетворювачів, виготовлених за топологією SEPIC, можна реалізувати пристрої для підвищення енергоефективності широкого спектру пристроїв постійного струму.

Тому, подальше удосконалення цієї технології є досить актуальною темою.

## 1. Електричні перетворювачі у відновлювальних джерелах енергії

### 1.1 Застосування електричних перетворювачів у відновлювальних джерелах електроенергії

Портативні системи електроживлення на базі відновлювальних джерел електроенергії починають відігравати все більш значну роль у житті людей, особливо системи на базі фотоелектричних перетворювачів (ФЕП). Більшість таких систем побудовані за схемою, наведеною на рисунку 1.1, і складається з ФЕП, системи стабілізації точки максимуму потужності (СТМП), двонаправленого перетворювача постійної напруги (ДППН) та акумуляторних батарей. На ефективність роботи системи значний вплив мають система СТМП та ДППН. У той час як перша пропускає струм лише в одному напрямку – від ФЕП до навантаження або до акумуляторних батарей, ДППН може як живити навантаження від зарядженого акумулятора, так і заряджати акумулятор від ФЕП, тоді, коли живлення навантаження не потрібне. Крім того, у багатьох випадках рівні струмів зарядки та розрядки будуть сильно відрізнятися (у реальних системах – до 10 разів і більше), що ускладнює розробку ДППН з високою ефективністю у цих режимах роботи. Зазначені вище особливості – пропускання різних за величиною струмів у двох напрямках – призводять до того, що вплив ДППН на загальну ефективність системи буде суттєво більшим, а відповідно, питання вибору оптимальної топології двонаправленого перетворювача напруги для портативної системи живлення є дуже важливим [3-6].



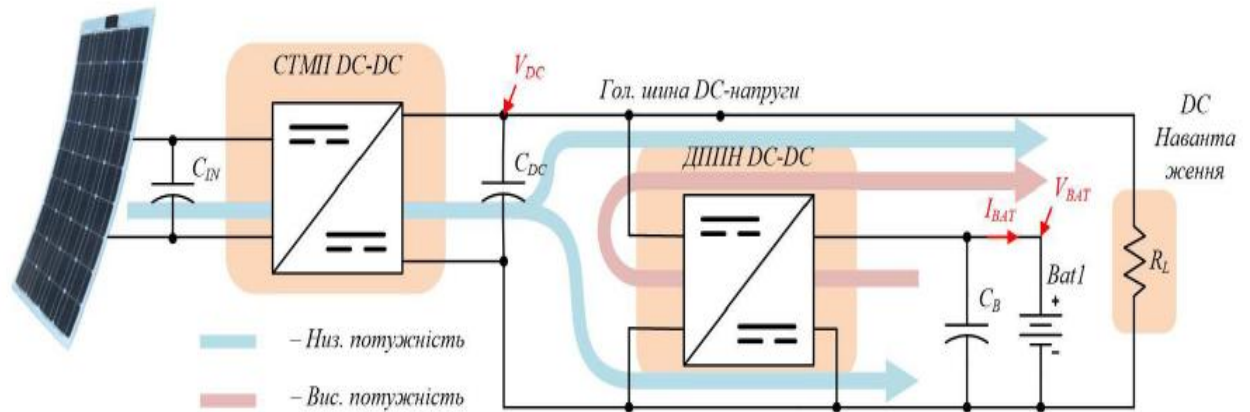


Рисунок 1.1 - Структурна схема портативного джерела живлення на базі гнучких ФЕП

Зображена система являє собою систему на базі ФЕП та не передбачає інтеграції до мережі. Проте коливання генерації електричної енергії у зв'язку зі зміною погодних умов і різких змін споживання енергії навантаженням роблять таку систему непридатною для автономної роботи як єдиного джерела живлення. Для вирішення цієї проблеми до складу портативної системи завжди входить елемент накопичення та зберігання енергії (акумуляторна батарея), що дозволяє компенсувати мінливість генерації та забезпечує стабільну вихідну потужність. Найбільш поширеними та економічно вигідними пристроями зберігання енергії в діапазонах малої та середпотужності є різні типи Li-ion акумуляторів або суперконденсатори.

Основним або допоміжним джерелом електричної енергії в багатьох портативних джерелах живлення, є фотоелектричні перетворювачі, які можуть бути жорсткими, гнучкими або напівгнучкими [7]. Враховуючи нелінійність вольт-амперної характеристики ФЕП, для забезпечення оптимального відбору потужності від неї, до складу системи живлення входить перетворювач постійної напруги зі слідкуванням за точкою максимальної потужності (ТМП). Його завданням є відбір максимальної

потужності від ФЕП за змінних умов (зміна освітленості та температури ФЕП, які впливають на положення точки максимуму потужності) та формування стабільної вихідної напруги. Цей елемент є важливим для автономної або портативної системи, оскільки саме він визначає, наскільки ефективно буде відбуватися акумуляція згенерованої енергії. Ідеальний перетворювач СТМП повинен мати ККД близький до 100 %, точно слідкувати за точкою максимальної потужності в разі зміни зовнішніх умов, і при цьому мати малі розміри, просту систему керування та низьку вартість, оскільки в деяких конфігураціях систем перетворювач СТМП встановлюють на кожну панель.

Двонаправлений перетворювач постійної напруги, як було зазначено вище, є ключовим елементом портативних систем живлення на базі фотоелектричних перетворювачів. Для більшості наявних ДППН як джерело використовується джерело струму або напруги, що підключається з одного боку [3-5, 8, 9]. На основі розміщення допоміжного накопичувача енергії (акумуляторних батарей), усі ДППН можна поділити на понижуючі та підвищуючі. У понижуючому типі накопичувач енергії розміщуються на стороні високої напруги, а у підвищуючому типі – на стороні низької напруги. Для того щоб реалізувати двонаправлений потік енергії в ДППН, перемикаючий елемент повинен проводити струм в обох напрямках Це, здебільшого, реалізується за допомогою однонаправленого силового напівпровідникового перемикача, такого як MOSFET або IGBT паралельно з діодом (або вбудованим діодом), оскільки нині силові ключі, що здатні проводити струм в обох напрямках, недоступні.

Залежно від застосування, різні типи перетворювачів можуть використовуватись як ДППН. Зазвичай виділяють два основних типи ДППН, а саме неізольовані (НДППН) та ізольовані (ІДППН) (рис. 1.2).

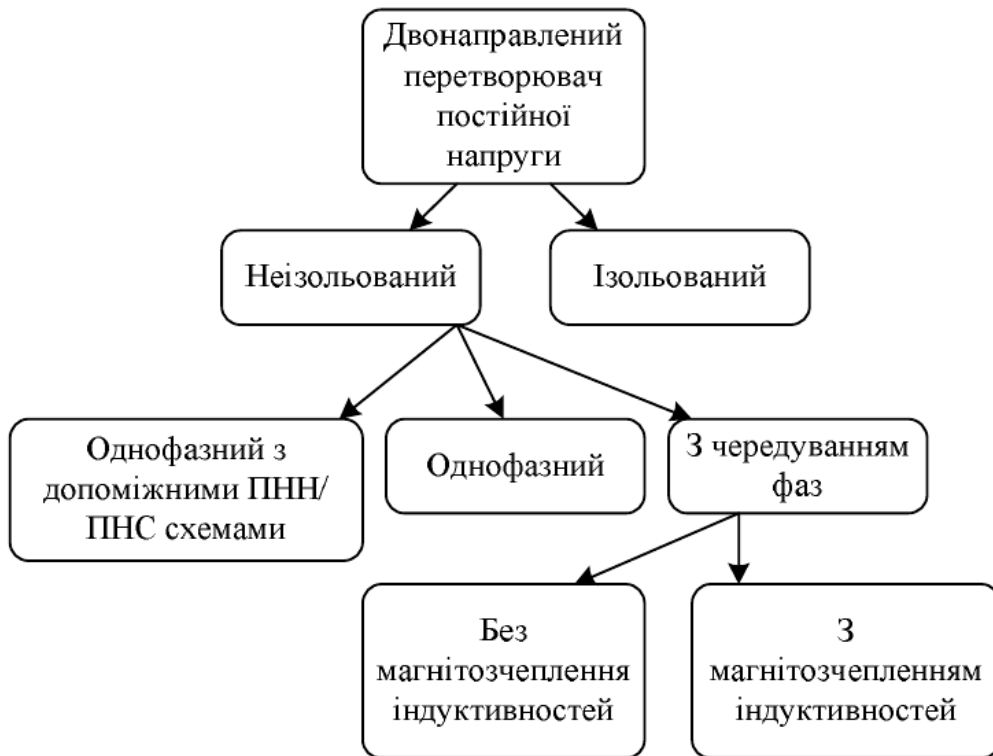


Рисунок 1.2 - Класифікація двонаправлених dc-dc перетворювачів

У безтрансформаторних неізованих системах перетворення енергії переважно використовуються підвищуючі та знижуючі dc-dc перетворювачі. Система на основі високочастотного трансформатора є розумним рішенням для отримання розв'язки між джерелом і навантаженням. Ізоляція є обов'язковою, коли потрібно мати дуже високий коефіцієнт підвищення або пониження, що важко досягти без використання трансформатора. Але для підвищення ефективності системи, зниження розмірів, ваги і вартості, неізований тип є набагато привабливішим. Отже, у системах невеликої потужності або системах живлення космічних апаратів [7–11], де вага і розмір є критичними, безтрансформаторний тип є кращим рішенням. Зважаючи на все вищезазначене, для нашого застосування більше підходять неізовані перетворювачі, на яких і буде зосереджена основна увага надалі.

Як видно з класифікації, наведеної на рисунку 1.2, основними типами неізованих перетворювачів є однофазні, однофазні з перемиканням при нульовій напрузі (ПНН) або при нульовому струмі (ПНС), і схеми з

чергуванням фаз. Варто звернути увагу, що не тільки другий тип використовує переваги м'якого перемикання або резонансних методів, для того щоб збільшити частоту комутації і досягти менших розмірів і ваги. Замість допоміжної резонансної схеми, однофазні та перетворювачі з чергуванням фаз використовують різні частоти модуляції і методи комутації, паразитні параметри компонентів як резонансні елементи, таких, наприклад, як вихідна ємність COSS транзистора.

Безперервність струму в батареї також є важливим критерієм класифікації, особливо для використання у скоалі фотоелектричних систем, оскільки вона впливає на термін служби батареї. Таким чином, можна вибрати попереднє рішення, яке підходить для виконання конкретних завдань.

## 1.2 Топології двонаправлених перетворювачів постійної напруги (ДППН)

### 1.2.1 Неізолювана напівмостова топологія ДППН

Одна з найбільш поширених – неізолювана напівмостова топологія ДППН – показана на рис. 1.3, загалом є поєднанням підвищуючого перетворювача разом із понижуючим перетворювачем, з'єднаних антипаралельно [12; 13]. Такий перетворювач може працювати як у понижуючому, так і підвищуючому синхронному режимі для передачі потужності в обох напрямках.

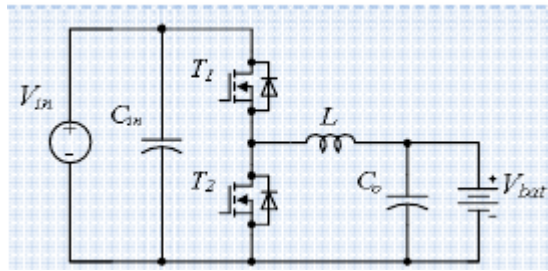


Рисунок 1.3 - Неізольована напівмостова топологія ДППІ

Двонаправлена робота схеми може бути пояснена таким чином. Під час понижуючого (прямого) режиму,  $T_1$  працює з необхідною робочою шпаруватістю, а ключ  $T_2$  завжди вимкнений, у той час як його вбудований діод проводить струм. Аналогічно в режимі підвищення (зворотному),  $T_2$  працює, а  $T_1$  завжди вимкнений.

### 1.2.2 Інвертуючий (неізольований зворотньоходовий) перетворювач

Друга двонаправлена топологія [12] являє собою інвертуючий (неізольований зворотньоходовий) перетворювач (рис. 1.4). У режимі прямої роботи  $T_1$  працює з необхідною шпаруватістю, у той час як ключ  $T_2$  підтримується весь час вимкнутим. Аналогічно, у зворотному режимі роботи, ключ  $T_2$  працює з необхідною шпаруватістю, в той час як транзистор  $T_1$  завжди вимкнений. У порівнянні з першою схемою перетворювача, в якому вихідна напруга може бути в діапазоні  $0 \dots V_{in}$  в режимі понижуючого і  $V_{bat} \dots \infty$  (ідеальний перетворювач), напруга в двонаправленому інвертуючому перетворювачі може бути  $0 \dots \infty$  в обох напрямках (ідеальний перетворювач).

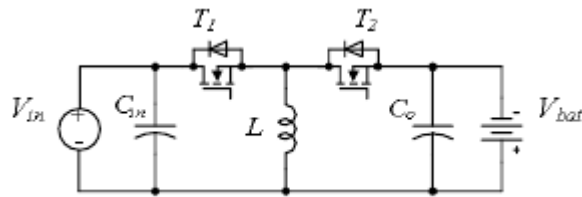


Рисунок 1.4 - Інвертуючий (неізолюваний зворотньоходовий) перетворювач

Варто зазначити, що вихідна напруга має протилежну полярність, ніж вхідна, що може бути недопустимо у багатьох випадках. Ця проблема може бути вирішена шляхом додавання додаткових транзисторів у цій конфігурації

### 1.2.3 Каскадне включення понижуючого перетворювача з підвищуючим перетворювачем

Ця топологія працює в усіх квадрантах (так званий 4-квadrантний перетворювач). Це означає, що вона здатна понижувати і підвищувати напругу в обох напрямках. Каскадні ДППН є найбільш гнучкою топологією (Рисунок 1.5) [14,15].

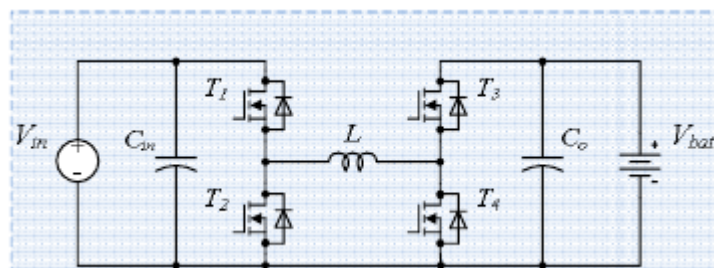


Рисунок 1.5 - Каскадне включення понижуючого перетворювача з підвищуючим перетворювачем

Але вона має кілька недоліків, зокрема збільшення кількості транзисторів, і, як наслідок, більш складна система й алгоритм керування, більш високі втрати на перемикання, викликані зворотним відновленням транзисторних діодів.

### 1.2.4 ДППН топології Чука [16,17]

Топологія є похідною від звичайного однонаправленого перетворювача Чука шляхом заміни основного діода на транзистор (рисунок 1.6).

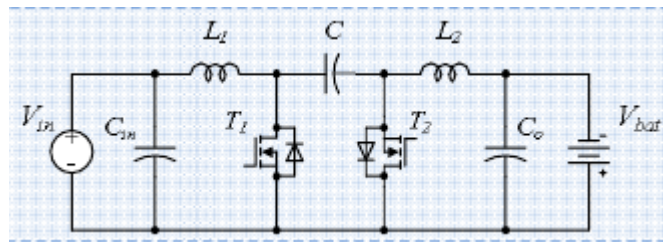


Рисунок 1.6 - ДППН топології Чука

Такий перетворювач має низький рівень пульсацій вхідного і вихідного струмів, тому двонаправлений перетворювач Чук є гарним вибором для таких застосувань, як вирівнювання заряду акумуляторів, схем заряду суперконденсаторів та ін. Індуктивності  $L1$  і  $L2$  можуть бути магнітозчеплені для зменшення пульсацій вхідного та вихідного струмів. У зв'язку з тим, що перетворювач Чука по суті є послідовним з'єднанням підвищуючої і понижуючої топології з накопичувальним конденсатором  $C$ , то вихідна напруга може бути вище або нижче, ніж вхідна, в обох напрямках. У прямому режимі роботи  $T1$  керується, а  $T2$  вимкнений і внутрішній діод  $T2$  працює як основний діод. Аналогічно, у зворотному режимі роботи  $T2$  керується, а  $T1$  вимкнений і внутрішній діод  $T1$  працює як основний діод.

### 1.2.5 Топологія SEPIC перетворювача постійної напруги

Основна електрична схема двонаправленого SEPIC перетворювача постійної напруги показана на рисунку 1.7. Перетворювач працює як звичайний перетворювач для прямого потоку потужності, і як Zeta перетворювач для зворотного потоку потужності [18,19].

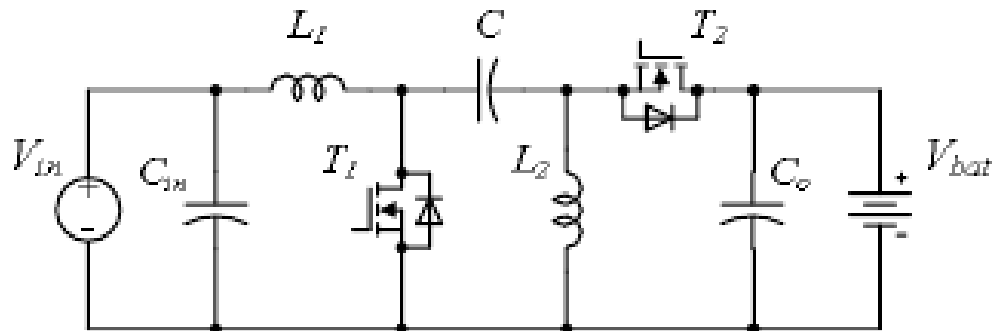


Рисунок 1.7 - Топологія SEPIC перетворювача постійної напруги

Такий перетворювач також може мати вище або нижче значення вихідної напруги порівнюючи з вхідною в обох напрямках, однак, полярність шин постійної напруги в ньому однакова. Під час прямого потоку потужності, SEPIC перетворювач діє як понижуючий перетворювач, T1 діє як керуючий ключ, а T2 вимкнений протягом усього періоду. Зворотний потік потужності розглядається як режим роботи Zeta перетворювача, який є режимом підвищення. T2 діє як керуючий силовий ключ, а T1 вимкнений протягом цього періоду. Індуктивності L1 і L2 можуть бути магнітозчеплені, щоб зменшити вихідні пульсації напруги і напругу на ключах.

### 1.2.6 Модифікований ДППН [20; 21]

Цей перетворювач використовує магнітозчеплені індуктивності з однаковою кількістю витків у первинній та вторинній сторонах. Запропонований перетворювач має такі переваги в порівнянні зі звичайним напівмостовим двонаправленим перетворювачем: вищий коефіцієнт підвищення та пониження, більш низьке середнє значення імпульсного струму при тих самих електричних параметрах (рисунок 1.8).



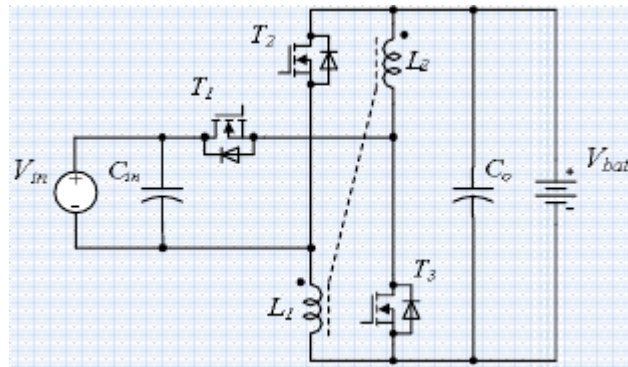


Рисунок 1.8 - Модифікований ДППН

У режимі підвищення, ШІМ сигнал використовується для одночасного керування транзисторами  $T_2$  і  $T_3$ . Перемикач  $T_1$  є синхронним випрямлячем. У понижуючому режимі, ШІМ сигнал використовується для керування перемиканням транзистора  $T_1$ , в той час як ключі  $T_2$  і  $T_3$  є синхронними випрямлячами.

### 1.2.7 ДППН із секційними індуктивностями [22; 23]

Це - традиційні топології перетворювачів доповнені додатковою індуктивністю, яка магнітозчеплена з основною індуктивністю. Завдяки магнітному зв'язку обидві обмотки знаходяться на тому ж осерді, і тому не потрібно ніяких додаткових магнітних елементів. У порівнянні зі звичайними топологіями, використання секційної індуктивності призводить до більш високого коефіцієнта перетворення, що дає змогу уникнути великих значень шпаруватості керуючого сигналу транзистора і високих пікових струмів в активних і пасивних компонентах, що дозволяє зменшити їхні розміри (рисунок 1.9).

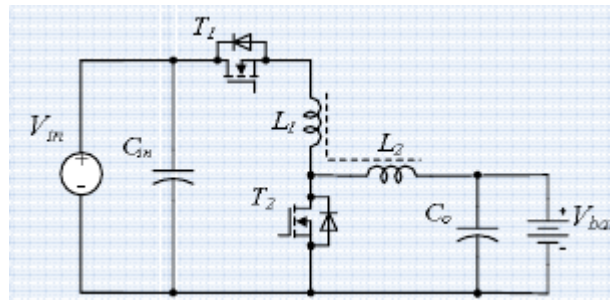


Рисунок 1.9 - ДППН із секційними індуктивностями

Варто звернути увагу, що полярність шини постійної напруги виходу перетворювача є протилежною відносно загальної землі, що може бути не допустимо в багатьох випадках.

### 1.2.8 ДППН на конденсаторах, що перемикаються [24]

Цей тип топології в основному використовується, коли потрібно реалізувати перетворювач постійної напруги за допомогою технології інтегральної схеми (ІС) (рисунок 1.10).

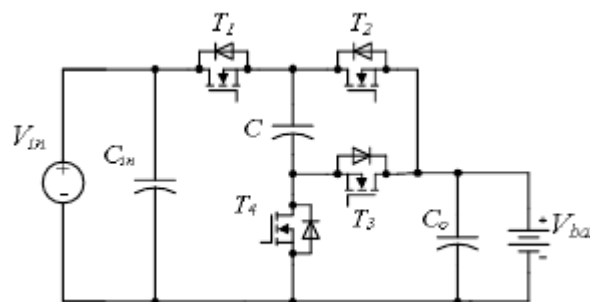


Рисунок 1.10 - ДППН на конденсаторах, що перемикаються

Оскільки для цих перетворювачів не потрібні магнітні елементи, можливості виготовлення на їх основі ІС є багатообіцяючими. Починаючи від ідеї використання ДППН на конденсаторах, що перемикаються, при проектуванні фільтрів було запропоновано багато методів експлуатації цих топологій для перетворення енергії. Кожен конденсатор у перетворювачі

зазвичай проходить через фазу заряду від джерела живлення і/або іншого конденсатора.

Проте ДППН на конденсаторах, що перемикаються, характеризуються:

- слабкою здатністю до регулювання вихідної напруги;
- їх коефіцієнт перетворення напруги визначається топологією схеми;
- високими пульсаціями вхідного струму, який призводить до електромагнітних завад (ЕМЗ).

Більшість із цих проблем можуть бути вирішені шляхом додавання схеми керування струму і схеми керування напругою, яка регулюватиме зарядну траєкторію конденсатора. Однак це збільшить складність і вартість перетворювача

### 1.2.9 НДППН із зустрічним магнітозв'язком індуктивностей [25]

Розділення струму на два шляхи за допомогою діодів  $D_1$  та  $D_2$  запобігає проходженню струму через вбудовані діоди MOSFET транзисторів (рисунок 1.11).

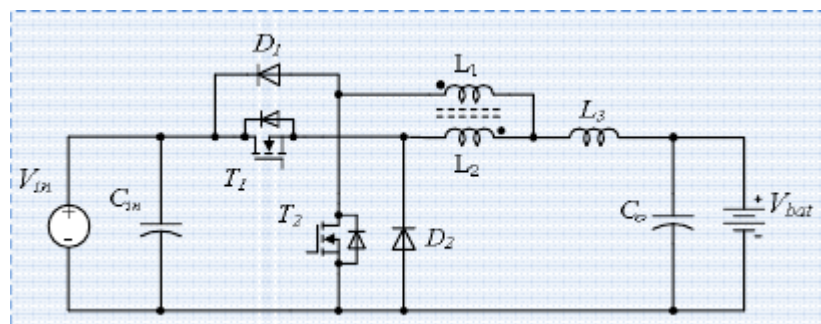


Рисунок 1.11 - НДППН із зустрічним магнітозв'язком індуктивностей

Таким чином, вирішується проблема зворотного відновлення вбудованого діода MOSFET транзистора. У режимі пониження (прямому)  $T_1$  перемикається з необхідною шпаруватістю,  $T_2$  вимкнений і  $D_1$  працює як основний діод. Подібним чином, у режимі підвищення (зворотному),  $T_2$

керується з необхідною шпаруватістю,  $T_1$  вимкнений і  $D_2$  працює як основний діод.

### 1.2.10 Однофазні НДППН із допоміжними ПНН/ПНС схемами

Для всіх перетворювачів ключовими критеріями є високий коефіцієнт корисної дії, надійність і простота керування. Через обмежену ефективність схем з жорсткою комутацією, все частіше використовуються так звані схеми м'якої комутації напівпровідників, які й застосовуються до розглянутих вище НДППН [25,26]. Методика м'якої комутації забезпечує високу ефективність за рахунок зниження втрат при перемиканні, використання менших напівпровідників і меншу масу перетворювача за рахунок менших радіаторів охолодження. Проте це робить схеми більш складними, а керування і налаштування важчим. На рисунку 1.12 показано приклад напівмостової однофазної схеми двонаправленого перетворювача із допоміжними схемами перемикання при нульовій нарузі та перемиканні при нульовому струмі.

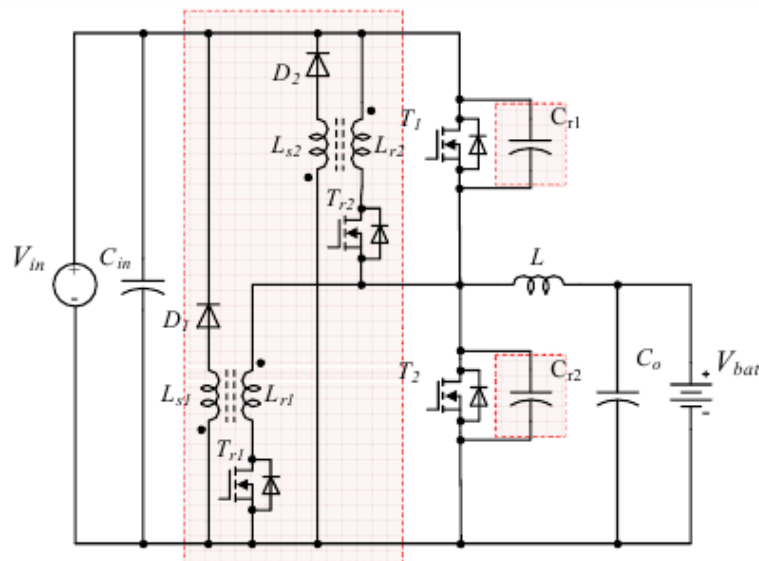


Рисунок 1.12 - Однофазний НДППН із допоміжною ПНН/ПНС схемою

Інші типи перетворювачів, такі як перетворювач Чука, перетворювач SEPIC/Zeta і перетворювач на конденсаторах, що перемикаються, також можуть мати резонансні контури і схеми м'якої комутації.

### 1.3 Перспективи розвитку топологій DC-DC перетворювачів

Останніми роками було встановлено, що концепція чергування фаз або в більш загальному плані, синхронізованого запаралелювання каскадів з відносним фазовим зсувом ( $360^\circ/n$ ), може бути успішно застосована на практиці.

Найбільш відомим прикладом застосування є схеми живлення мікропроцесорів, які здебільшого називають модулями регуляторів напруги (MPH) [28]. Однак метод чергування фаз також добре підходить для двонаправлених перетворювачів. Топологія силових перетворювачів із чергуванням має певні переваги: розщеплення струму між фазами ( $I_0/n$ ), ефект зниження пульсацій струму, більш високий ККД, більш висока питома потужність. Однією з найбільш цікавих переваг перетворювача з чергуванням фаз є забезпечення високої ефективності у широкому діапазоні потужностей (від декількох відсотків до номінальної потужності перетворювача). Крім того, шляхом поділу струму на кілька фаз, значно зменшуються втрати провідності ( $I^2R$ ).

На рисунку 1.13 показана схема найбільш поширеної двофазної топології з чередуванням фаз - напівмостова топологія [29, 30].

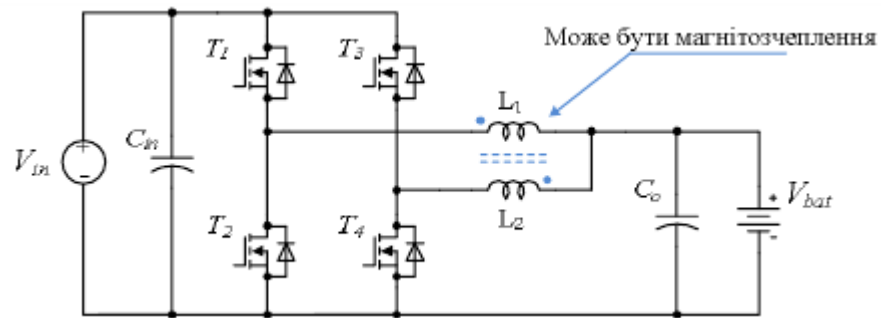


Рисунок 1.13 – Двофазна напівмостова топологія

Силві індуктивності перетворювача з чергуванням фаз також можуть бути магнітозчеплені однонаправлено або зустрічно. Зворотне магнітозчеплення зменшує пульсації струму у фазі та збільшує час перехідного процесу [31]. Слід зазначити, що кількість фаз може бути будь-яким від 2-4 до 16, або навіть 36 [32].

Отже, у підсумку обираємо для подальшої розробки схему перетворювача, виконаного за топологією SEPIC, як найбільш універсального та простого у використанні.

Тому, метою роботи є розробка перетворювача напруги з високим коефіцієнтом енергоефективності за топологією SEPIC.

Для досягнення поставленої мети в роботі потрібно виконати наступний комплекс завдань:

- 1) проаналізувати стан розвитку перетворювальних DC-DC систем та схеми їх практичного застосування;
- 2) розробити структурну схему перетворювача напруги з можливістю підвищення енергоефективності за топологією SEPIC;
- 3) провести моделювання роботи основних структурних елементів перетворювача за допомогою сучасних САПР;
- 5) розробити заходи з охорони праці та техногенної безпеки робіт, що планується виконати.

## 2. Розробка перетворювача напруги з високим коефіцієнтом енергоефективності за топологією SEPIC

### 2.1 Моделювання структурної схеми перетворювача напруги з високим коефіцієнтом енергоефективності за топологією SEPIC

Розробку перетворювача за топологією SEPIC у роботі розпочато із моделювання прототипної схеми, представленої у роботі [24]. На рисунку 2.1 представлено схему прототипу SEPIC перетворювача.

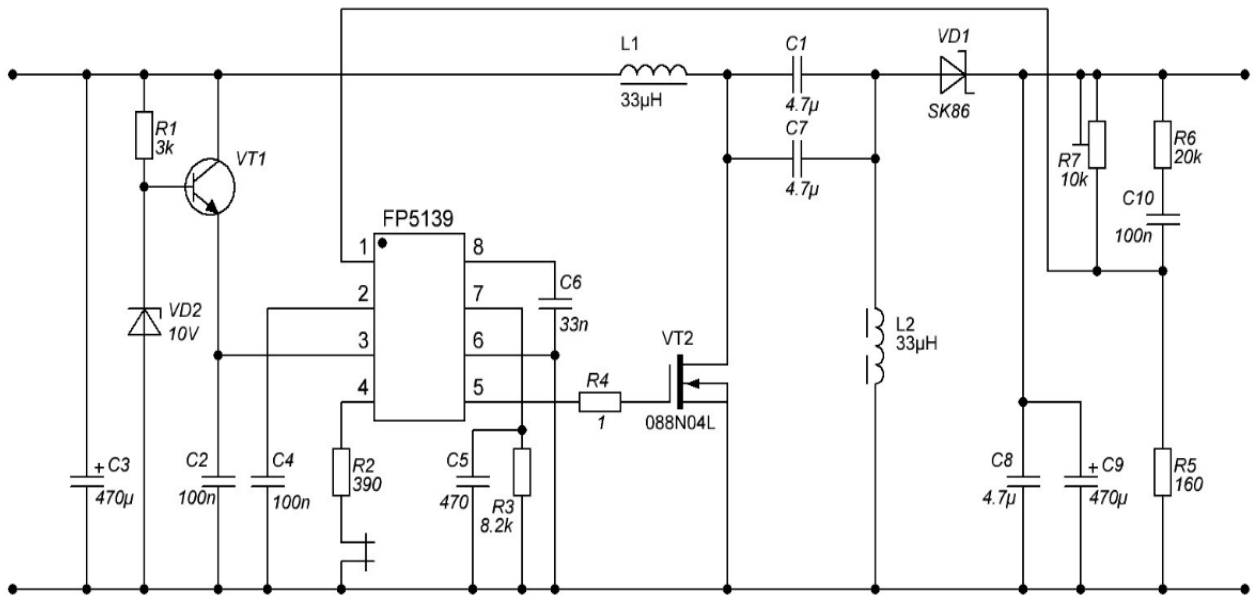


Рисунок 2.1 - Схема прототипу SEPIC перетворювача

На базі цієї схеми було запропоновано загальну для даного типу перетворювачів структурну схему (рисунок 2.2).

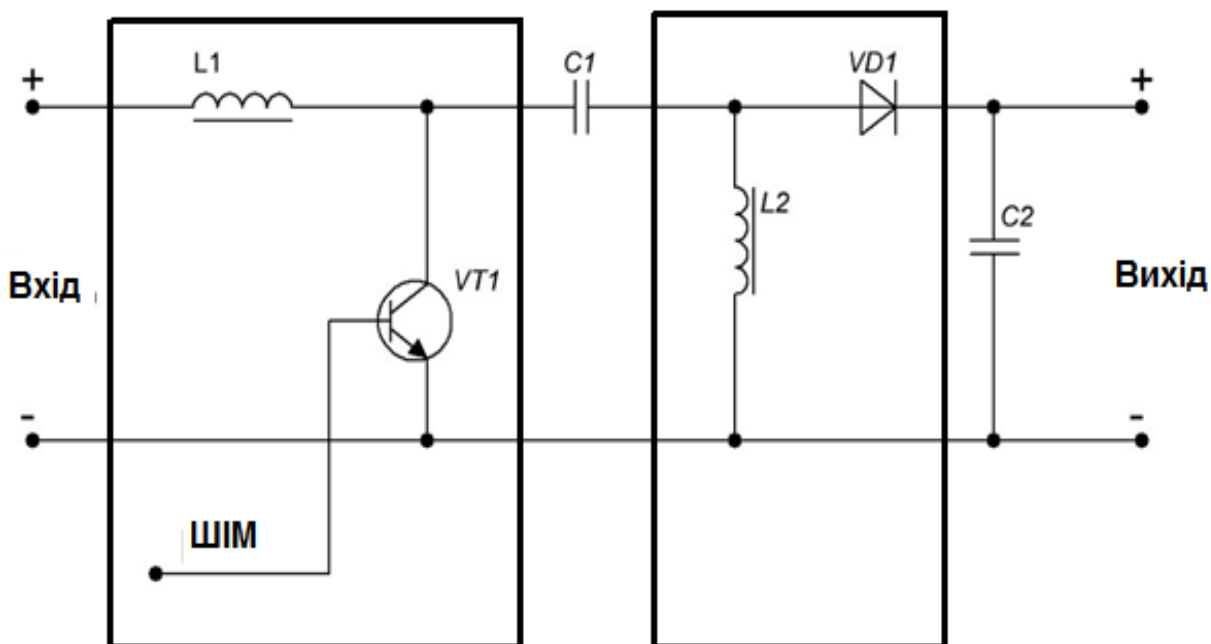


Рисунок 2.1 – Структурна схема SEPIC перетворювача

На вході схеми передбачається встановлення силового ключа. Приймається те, що на початку дослідження силовий ключ замкнутий. Коли ключ замкнутий, вхідна індуктивність заряджається від джерела, а друга індуктивність заряджається від конденсатора, вихідний конденсатор на цей час забезпечує струм навантаження. У цей час енергія в навантаження не надходить, полярності струмів у котушках та напруги на конденсаторах позначені на схемі. Той факт, що обидві індуктивності,  $L1$  і  $L2$  при замкнутому ключі відключені від навантаження, ускладнює регульовальні характеристики.

Коли ключ розімкнено, перша індуктивність заряджає конденсатор  $C1$ , а також підтримує струм у навантаженні, як показано на схемі. Друга індуктивність у цей час також приєднана до навантаження. Схема працює за рахунок взаємного перекачування енергії між компонентами, що дозволяє як підвищувати напругу, так і знижувати її.





У процесі моделювання було помічено, що чим вище вхідна напруга, то нижче ККД. Наприклад, при вихідному 15 В ККД склав для вхідного 20 В 80%, а для 26 В всього 62%. Причому що вище вихідне, то ККД ще менше. При 20 В вихідної напруги було отримано вхідний струм більше 2 А та ККД нижче 40%. Викликається це швидше за все тим, що індуктивності починають входити в режим насичення. SEPIC звичайно може працювати в широкому діапазоні напруги, але оптимальний діапазон все-таки прив'язаний до застосованих компонентів і не можна охопити все. Експерименти показали, що чим нижча вхідна напруга, тим вище можна підняти вхідну напругу. При 27 В на вході достатньо для отримання 10 В на виході.

Отже, початкові дослідження загальної структурної схеми перетворювача на критичних режимах показали, що:

1. Перетворювач працює і забезпечує ККД вище ніж у комбінації підвищувач + знижуючий перетворювач.
2. Характеристики схеми на критичних режимах дозволяють отримати струм 3 А, потужність 25 Вт.
3. Дроселі потрібно розраховувати на більший струм, а транзистор треба додатково охолоджувати.
4. Схема містить стабілізатор живлення ШІМ контролера, завдяки чому вхідна напруга може бути збільшена вище 15 В.
5. При певній комбінації вхідної та вихідної напруги відбувається пробій силового транзистора.

У загальному підсумку можна зазначити, що така схема може бути використана для живлення пристроїв з невеликим споживаним струмом у широкому діапазоні вхідної напруги, але для потужних пристроїв не вигідна через перегрівання.

Тому, у подальшій розробці було запропоновано удосконалення схеми прототипу.

## 2.2 Електрична принципова схема

### 2.2.1 Синхронний перетворювач SEPIC

Для покращення параметрів перетворювача запропоновано використати контролер DC/DC-перетворювача серії LT8711, який підтримує знижувальну, підвищуючу, SEPIC, ZETA та асинхронну знижувально-підвищуючу топологію. Компанія Analog Devices випускає безліч мікросхем синхронних перетворювачів і регуляторів, що підвищують і підвищують, але синхронна топологія SEPIC зустрічається досить рідко. Тим не менш, топологія SEPIC (single-ended primary-inductor converter – перетворювач з несиметрично навантаженою первинною індуктивністю) затребувана, оскільки вона підтримує стабільний рівень вихідної напруги, навіть при значному відхиленні вхідної напруги нижче або вище за цей рівень [32].

Ця особливість топології може бути незамінна в автомобільній електроніці, особливо при холодному пуску і скиданні навантаження, а також у промислових додатках, що характеризуються протяжними лініями живлення і важкою перешкодовою обстановкою. За допомогою топології можна підвищити надійність нафтового та газового обладнання, використовуючи перетворювачі SEPIC для живлення критичних навантажень від декількох різних джерел. При виході з ладу одного джерела живлення перетворювач SEPIC може підтримувати навантаження, використовуючи інший, навіть якщо його вихідна напруга має інший рівень.

Опис та принцип роботи схеми

На рисунку 2.4 показана схема синхронного перетворювача SEPIC, керуючого передачею енергії, який складається з:

- Двох незв'язаних дроселів L1 та L2.

- N-канального перемикаючого MOSFET MN1, керованого виведенням BG.
- Двох синхронних P-каналних MOSFET MP1 та MP2, керованих виведенням TG.
- Розв'язуючих конденсаторів C1, C2 та C3.
- Вхідних та вихідних фільтрів [32].

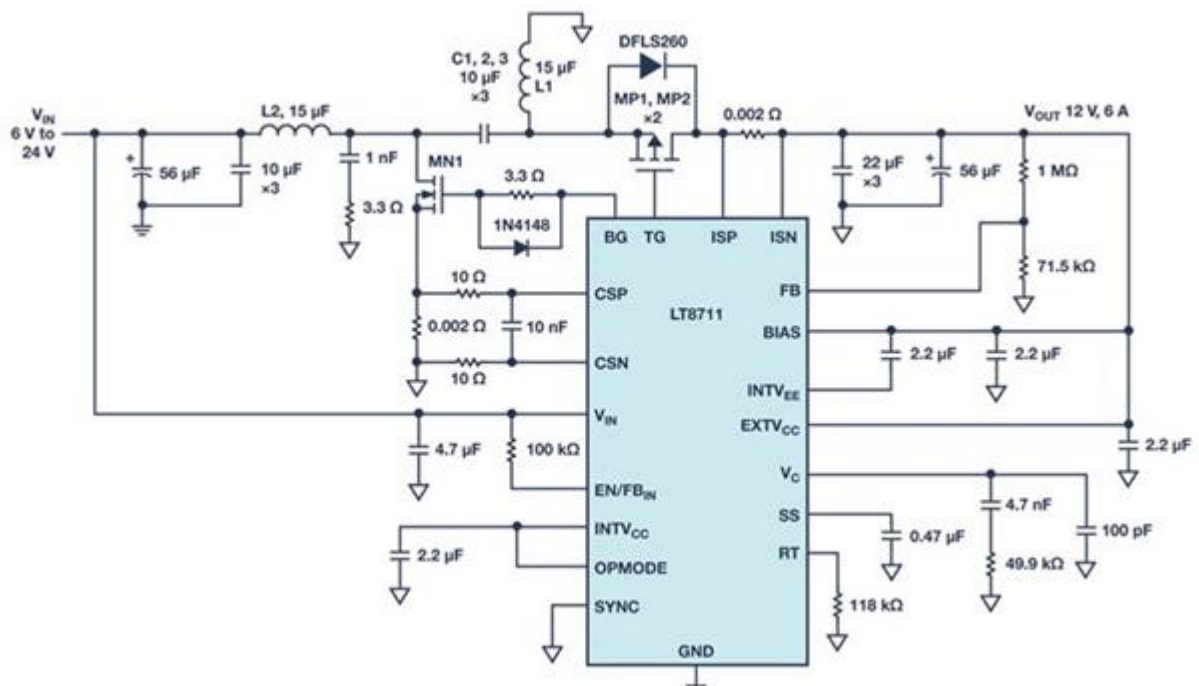


Рисунок 2.4 - Електрична схема LT8711 для SEPIC та знижувальних пристроїв

На рисунку 2.5 зображена залежність ККД перетворювача від струму навантаження при вхідній напрузі 14 В. Синхронна схема забезпечує високий ККД, що досягає піку 93.4%. Рисунки 2.6 та 2.7 дозволяють оцінити високу якість стабілізації виходу при провалах та кидках вхідної напруги.

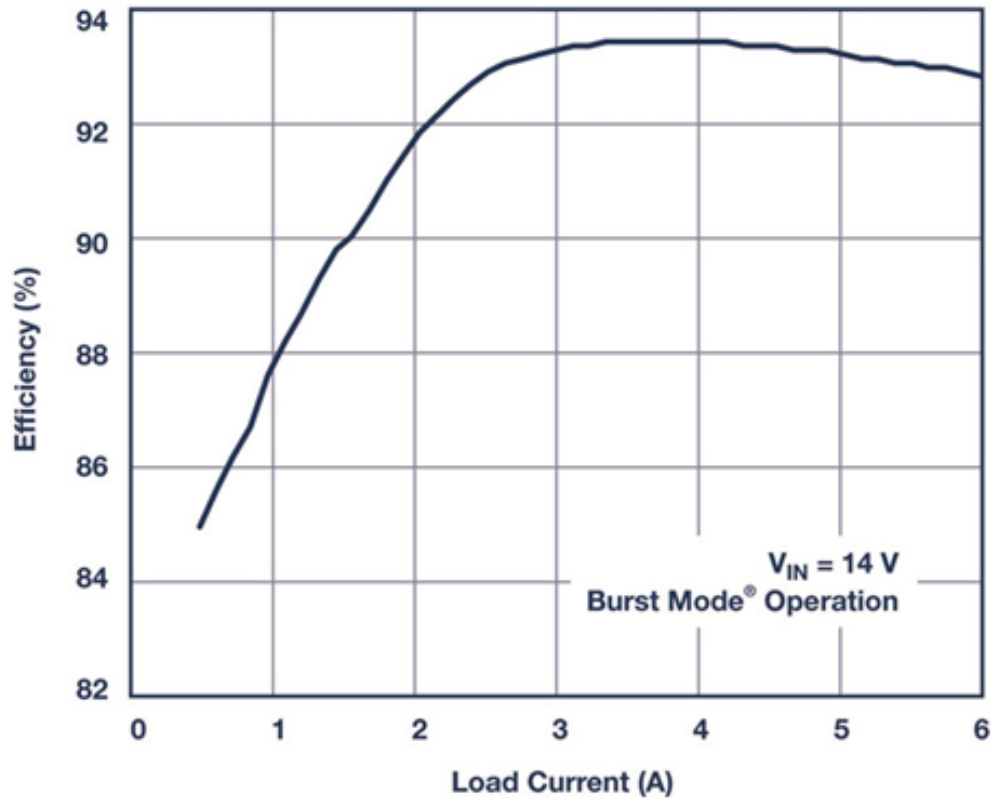


Рисунок 2.5 - Залежність ККД від струму навантаження перетворювача SEPIC на основі мікросхеми LT8711

За основу було взято стандартну демонстраційну схему DC2493A, перероблену для збільшення вихідного струму з 4 А до 6 А. MOSFET MN1 і MP1, а також дросель L2 були замінені компонентами, показаними на рисунку 2.4.

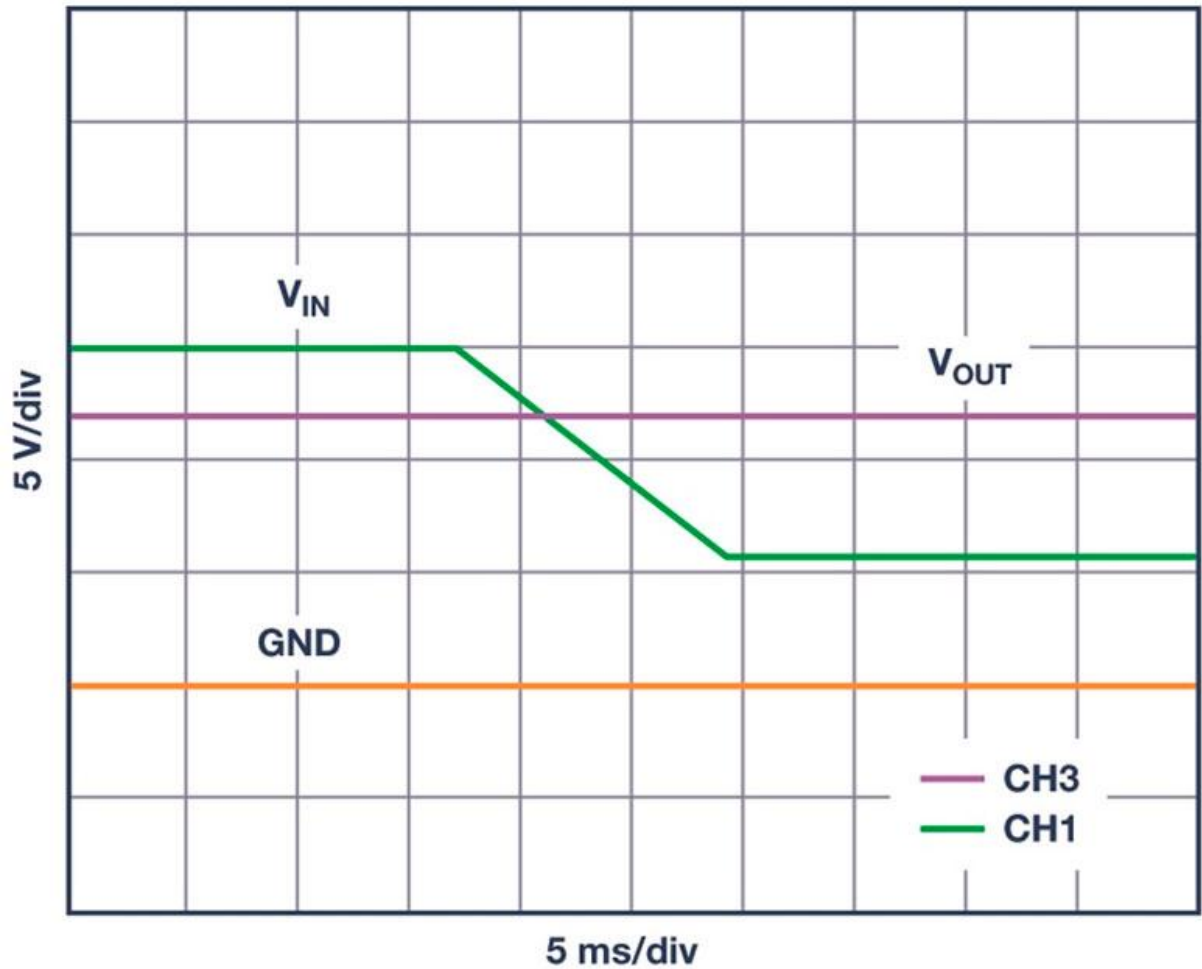


Рисунок 2.6 - Моделювання ситуації холодного запуску

Напруга шини  $V_{IN}$  просідає від 15 до 6 В, проте напруга  $V_{OUT}$  залишається стабільним і рівним 12 В.

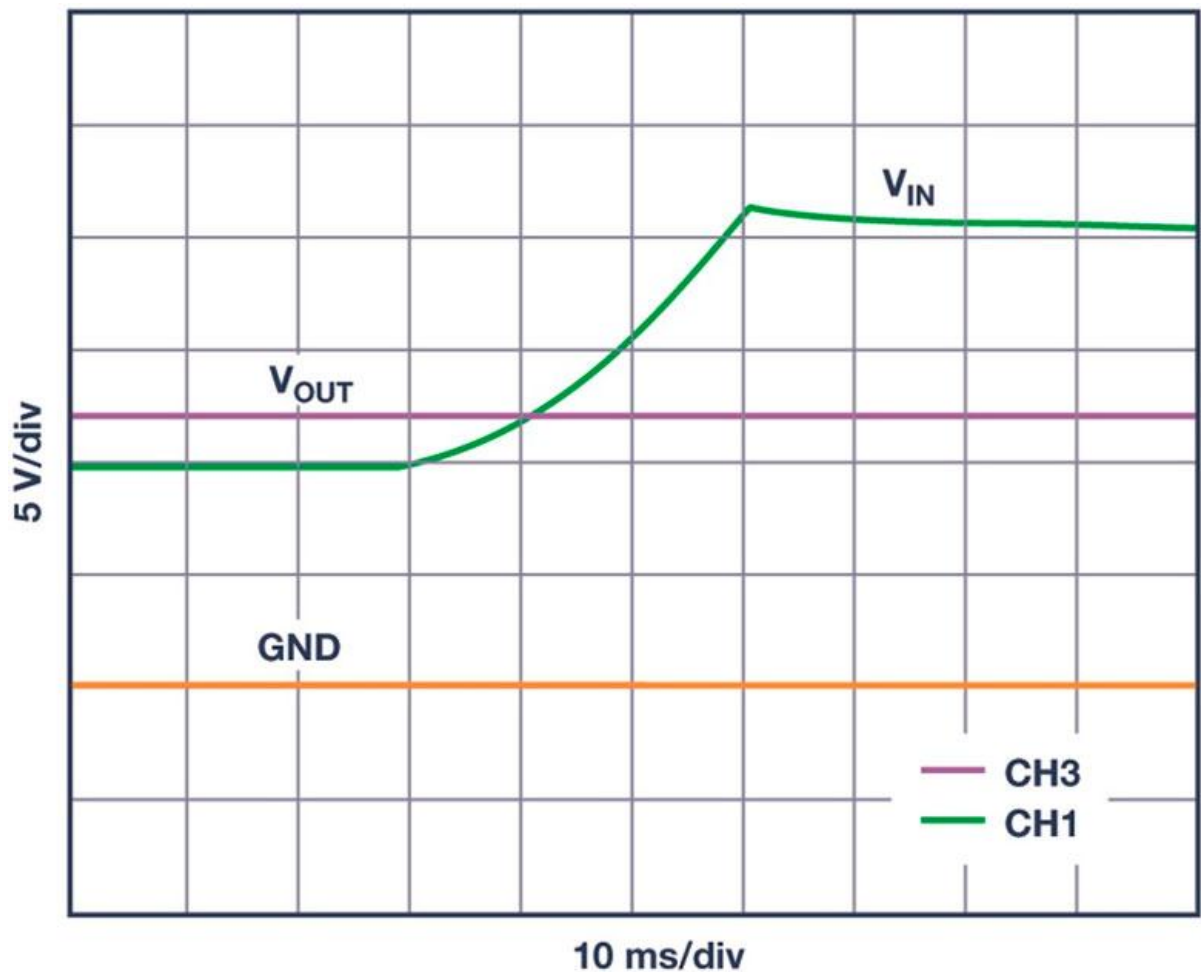


Рисунок 2.7 - Моделювання скидання навантаження

Напруга шини  $V_{IN}$  збільшується від 10 до 20 В, але стабілізація  $V_{OUT}$  не порушується.

### 2.2.2 Опис мікросхеми LT8711

LT8711 – це універсальний і гнучкий контролер, призначений для використання в понижувальних, підвищуючих, SEPIC, ZETA та асинхронних перетворювачах, що понижують-підвищують [32]. Зокрема, синхронний перетворювач SEPIC може використовуватися для ефективного перетворення

вхідних напруг, які можуть бути вищими і нижчими за потрібну вихідну напругу, що особливо важливо для використання у автомобільній промисловості та у системах енергетичної галузі.

LT8711 працює в діапазоні вхідних напруг від 4.5 до 42 В, стабілізуючи вихідну напругу, що залежить від вибору номіналів зовнішніх компонентів. Без навантаження мікросхема продовжує регулювати вихідну напругу, споживаючи при цьому всього 15 мкА і збільшуючи час роботи пристроїв з батарейним живленням. Режим генерації пачок Burst Mode забезпечує високий ККД за дуже легких навантажень, підтримуючи низький рівень пульсацій вихідної напруги. У конфігурації синхронного понижуючого перетворювача LT8711 може працювати з коефіцієнтом заповнення 100%, що є дуже корисною можливістю у випадках, коли пристрій повинен живитися від батареї.

LT8711 працює в діапазоні вхідних напруг від 4.5 до 42 В, стабілізуючи вихідну напругу, що залежить від вибору номіналів зовнішніх компонентів. Без навантаження мікросхема продовжує регулювати вихідну напругу, споживаючи при цьому всього 15 мкА і збільшуючи час роботи пристроїв з батарейним живленням. Режим генерації пачок Burst Mode забезпечує високий ККД за дуже легких навантажень, підтримуючи низький рівень пульсацій вихідної напруги. У конфігурації синхронного понижуючого перетворювача LT8711 може працювати з коефіцієнтом заповнення 100%, що є дуже корисною можливістю у випадках, коли пристрій повинен живитися від батареї. На рисунку 2.8 представлено залежність ККД від струму навантаження.



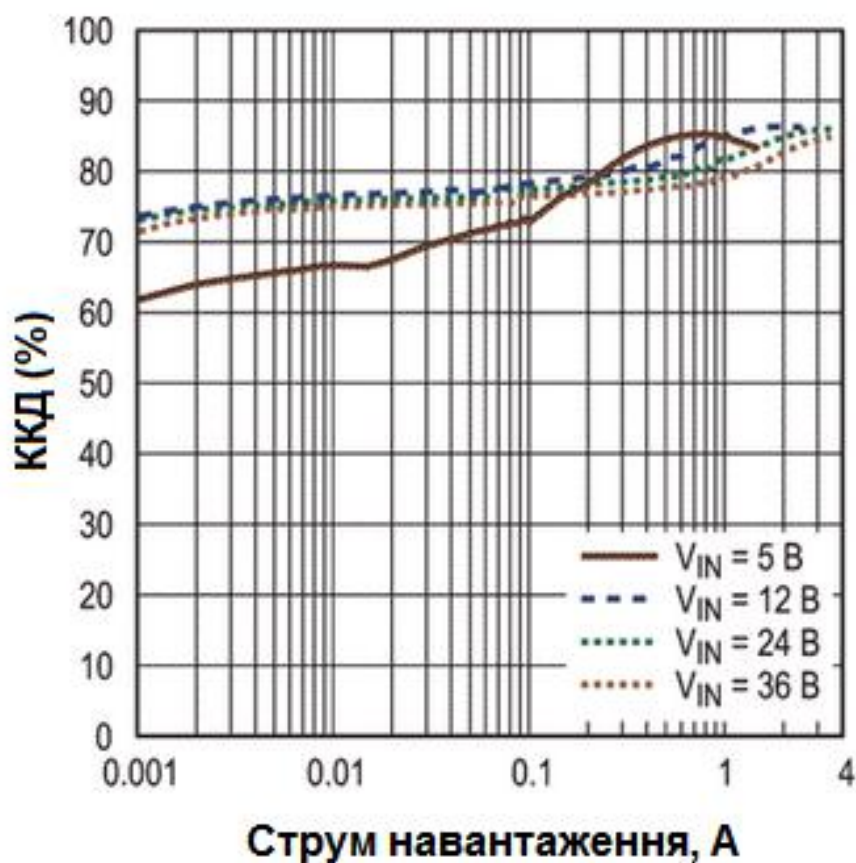


Рисунок 2.8 - Залежність ККД від струму навантаження перетворювача LT8711

LT8711 випускається у 20 вивідному корпусі TSSOP та у 20 вивідному корпусі QFN розміром 3 мм × 4 мм (рисунок 2.9). Мікросхема пропонується у версіях для розширеного та промислового діапазонів робочих температур переходу від  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

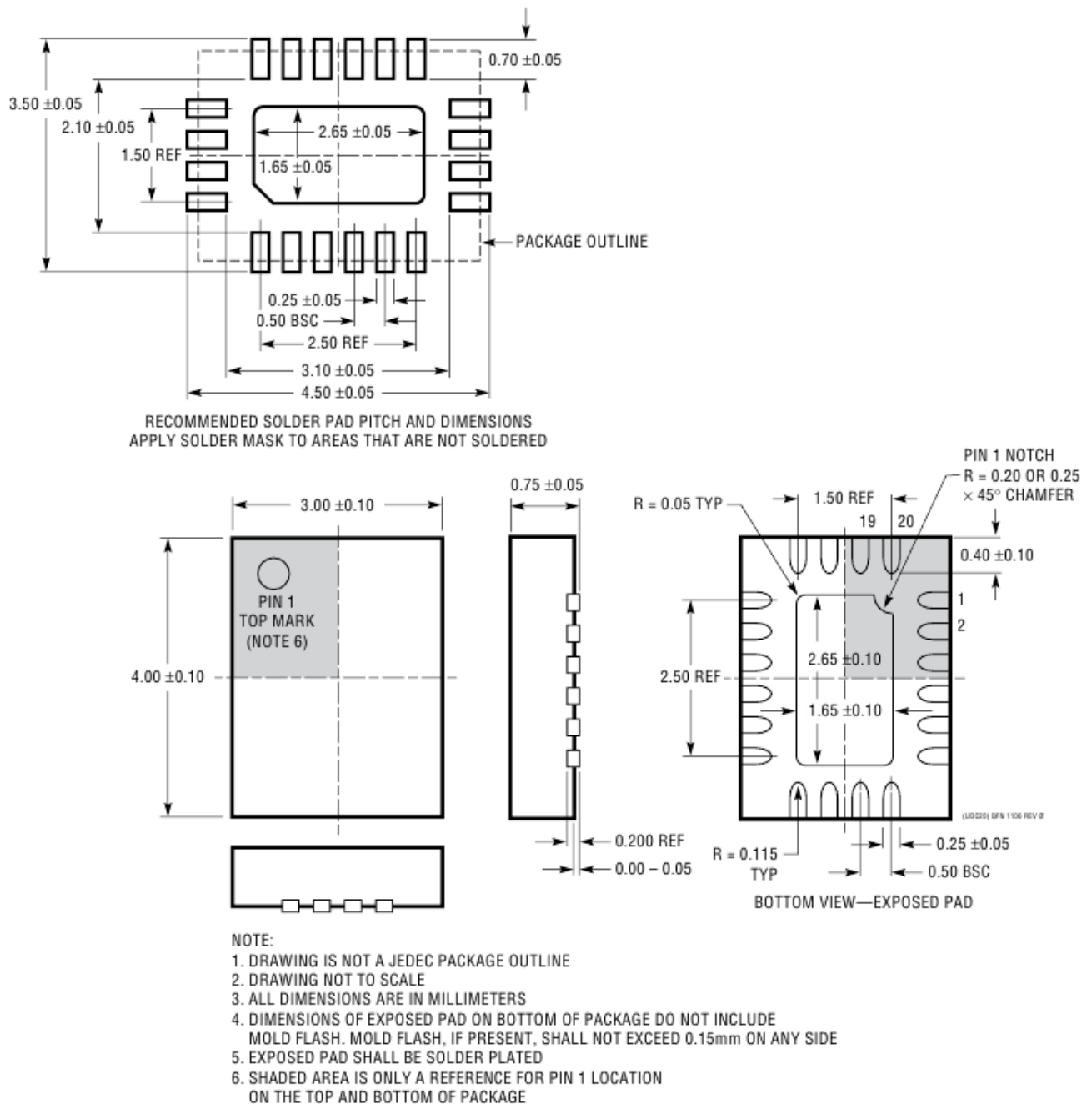


Рисунок 2.9 – Корпус перетворювача LT8711

Узагальнення основних характеристик LT8711

1. Підтримувані синхронні топології перетворювача: знижувальний, підвищуючий, SEPIC та ZETA;
2. Асинхронна знижувально-підвищуюча топологія;
3. Широкий діапазон вхідних напруг від 4.5 до 42 В;

4. Малошумний режим генерації пачок;
5. Низький струм споживання (15 мкА) у режимі генерації пачок;
6. Коефіцієнт заповнення до 100% зміни понижуючого перетворювача;
7. Функція стабілізації вхідної напруги для високоімпедансних джерел;
8. 2-амперні драйвери затворів;
9. Регульовані параметри м'якого запуску;
10. Робоча частота, що програмується від 100 кГц до 750 кГц;
11. Можливість синхронізації від зовнішнього генератора;
12. 20-вивідні корпуси TSSOP та QFN розміром 3 мм × 4 мм.

### 2.2.3 Моделювання теплової карти плати перетворювача SEPIC

На рисунку 2.10 показана тепла карта її плати. LTspice модель для аналогічного рішення доступна на сайті [analog.com](http://analog.com). Детальні рекомендації щодо вибору компонентів для силового ланцюга SEPIC можна знайти у специфікації LT8711.

Схема розташування компонентів та тепла карта демонстраційної плати DC2493A ( $V_{IN} = 14\text{ В}$ ,  $V_{OUT} = 12\text{ В}/6\text{ А}$ ). Найгарячішим компонентом із температурою  $77\text{ °C}$  є транзистор MN1.

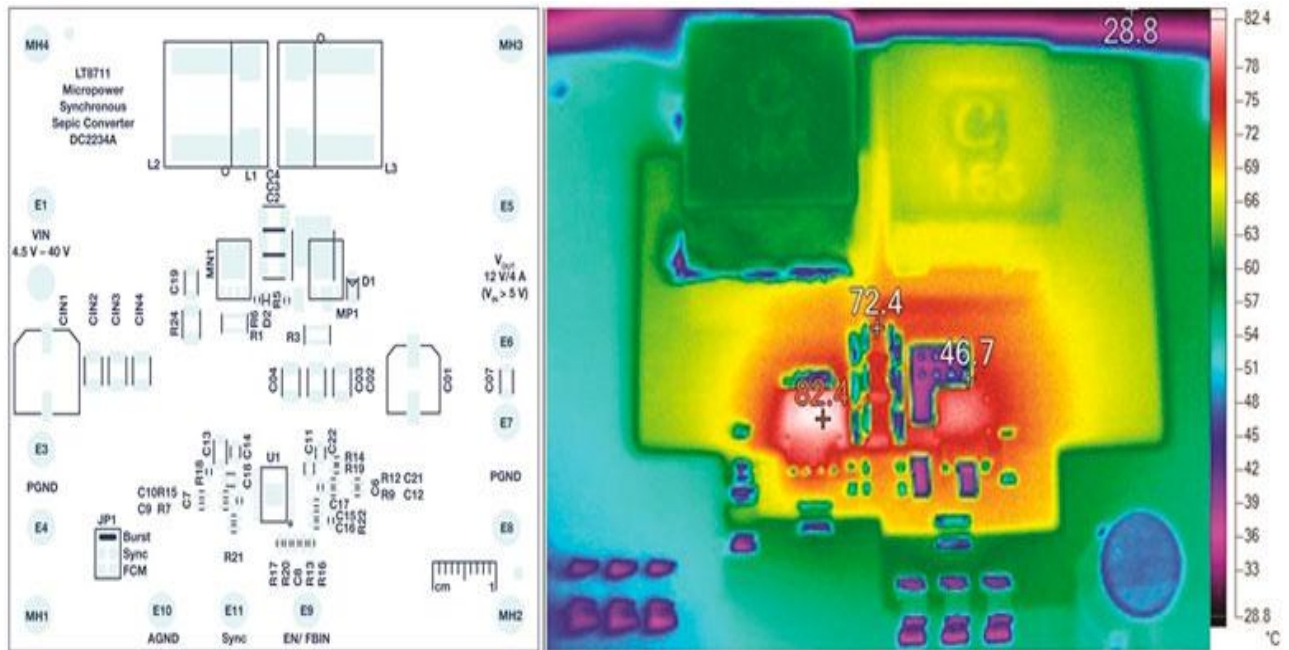


Рисунок 2.10 - Схема розташування компонентів та теплова карта демонстраційної плати DC2493A ( $V_{IN} = 14\text{ V}$ ,  $V_{OUT} = 12\text{ V}/6\text{ A}$ )

Найгарячішим компонентом із температурою  $77\text{ }^{\circ}\text{C}$  є транзистор MN1.

### 2.3 Розробка перетворювача SEPIC на комутаційних стабілізаторах LT3957 і LT3958

Також пропонується паралельно розробити перетворювач SEPIC на комутаційних стабілізаторах LT3957 і LT3958.

LT3957 і LT3958 - це потужні монолітні комутаційні стабілізатори, які можуть генерувати позитивний або негативний вихід з широкого діапазону вхідних напруг. LT3957 працює в діапазоні вхідних напруг від  $3\text{ V}$

до 40 В, що робить його придатним для всього, від портативної електроніки до автомобільних та промислових застосувань. LT3958 розширює вхідну напругу до 80 В для високовольтних телекомунікаційних джерел. Обидва виробляють високу потужність завдяки невеликій площі, як показано на рисунку 2.11.

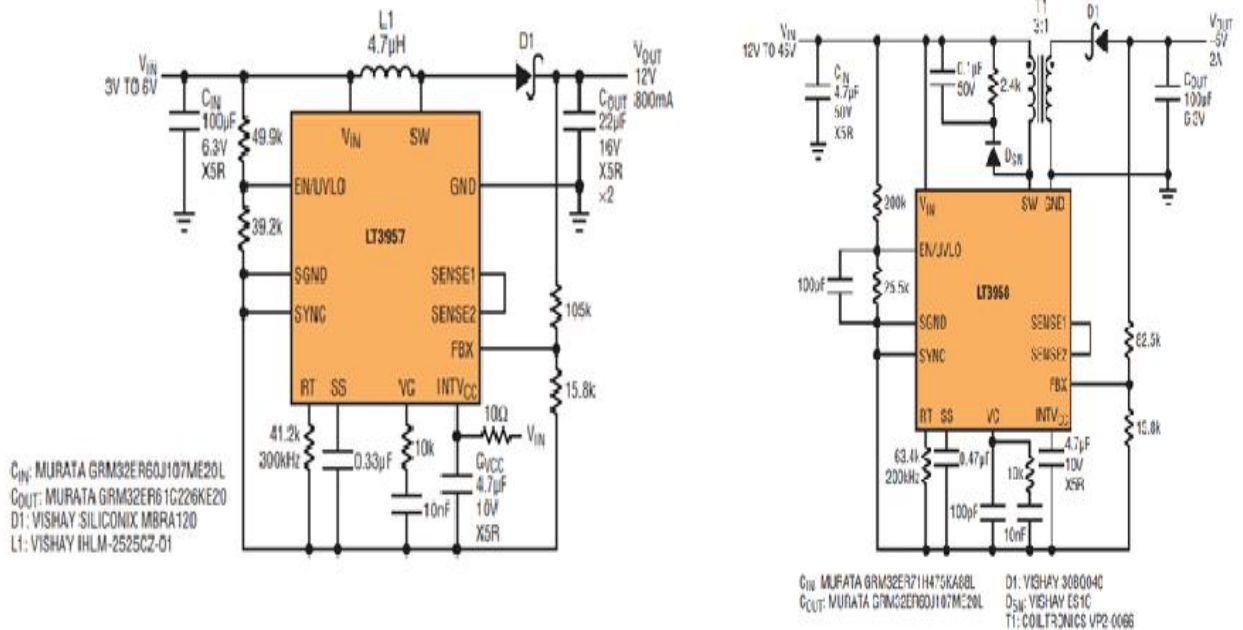


Рисунок 2.11 - Комутаційні стабілізатори LT3957 і LT3958

Ці універсальні комутаційні регулятори можна налаштувати як підвищувальний, зворотний, SEPIC або інвертуючий перетворювач. LT3957 і LT3958 оснащені міцним N-канальним силовим МОП-транзистором з низькою стороною, розрахованим на 5 А/40 В і 3.5 А/80 В відповідно. Нова архітектура контактів FBX забезпечує точний регульований позитивний або негативний вихід за допомогою простого резисторного дільника. Ці мікросхеми також включають плавний пуск, частоту згортання, блокування вхідної мінімальної напруги, регульовану частоту та синхронне перемикування. Особливості Інтегруючи силовий MOSFET і LDO в матрицю, LT3957 і LT3958 спрощують конструкцію перетворювача, зменшують розмір рішення і знижують вартість у порівнянні з немонолітними рішеннями. LT3957 має

вбудований перемикач N-MOSFET 40 В/30 мОм з внутрішньо запрограмованим обмеженням струму 5.9 А (типовий). LT3958 має вбудований перемикач N-MOSFET 84 В/90 мОм з внутрішньо запрограмованим обмеженням струму 4 А (типовий). Кожна мікросхема має внутрішній високовольтний LDO, що дозволяє живити LT3957 від джерела живлення до 40 В, а для LT3958 — до 80 В. LT3957 і LT3958 використовують схему керування режимом постійної частоти та пікового струму, забезпечуючи швидку перехідну характеристику та легко стабілізований контур зворотного зв'язку на змінних входах і виходах. Частоту перемикання можна запрограмувати в діапазоні від 100 кГц до 1 МГц за допомогою одного зовнішнього резистора, що дозволяє дизайнерам оптимізувати розмір компонентів і параметри продуктивності, такі як мінімальний/максимальний робочий цикл і ефективність. В основі кожного з LT3957 і LT3958 є пара підсилювачів помилок зворотного зв'язку: один регулює позитивний вихід, а інший — негативний. Коли перетворювач запускається, вихідна напруга змінюється як позитивний, так і негативний залежно від вибраної топології. Відповідний підсилювач помилок безперешкодно бере на себе управління зворотним зв'язком, а інший стає неактивним. Таким чином, ці частини можуть автоматично регулюватися до потрібної вихідної напруги в різних топологіях перетворювача. LT3957 і LT3958 містять кілька функцій для обмеження пікових струмів перемикання та перевищення вихідної напруги під час запуску або відновлення після несправності. Напруга на виводі SS модулює піковий струм перемикання, таким чином дозволяючи вихідному конденсатору поступово заряджатися до свого кінцевого значення, не даючи струму перемикання досягти межі струму. Вибір конденсатора на контакті SS визначає час запуску/перезапуску. Функція згортання частоти зменшує частоту перемикання, коли напруга FBX близька до 0 В, щоб гарантувати, що ІС зберігає контроль над струмом перемикання. Функція захисту від перенапруги захищає як позитивний, так і негативний вихідні перетворювачі

від надмірного перевищення вихідної напруги. Внутрішній перемикач живлення вимикається негайно, коли напруга на контакті FBX перевищує позитивну регульовану напругу на 8% (типова) або негативну регульовану напругу на 11% (типова). Підвищувальний перетворювач на вхід 3 В–6 В, вихід на вихід 12 В. Щоб забезпечити мінімальну робочу напругу 3 В, падіння напруги на внутрішньому LDO усувається шляхом підключення контакту INTVCC безпосередньо до контакту VIN через резистор 10 Ом (враховуючи, що максимальна робоча напруга VIN 6 В нижче максимальної напруги INTVCC 8 В). Ефективність перетворювача LT3957 представлена на рисунку 2.12. Ефективність перетворювача LT3958 представлена на рисунку 2.13.

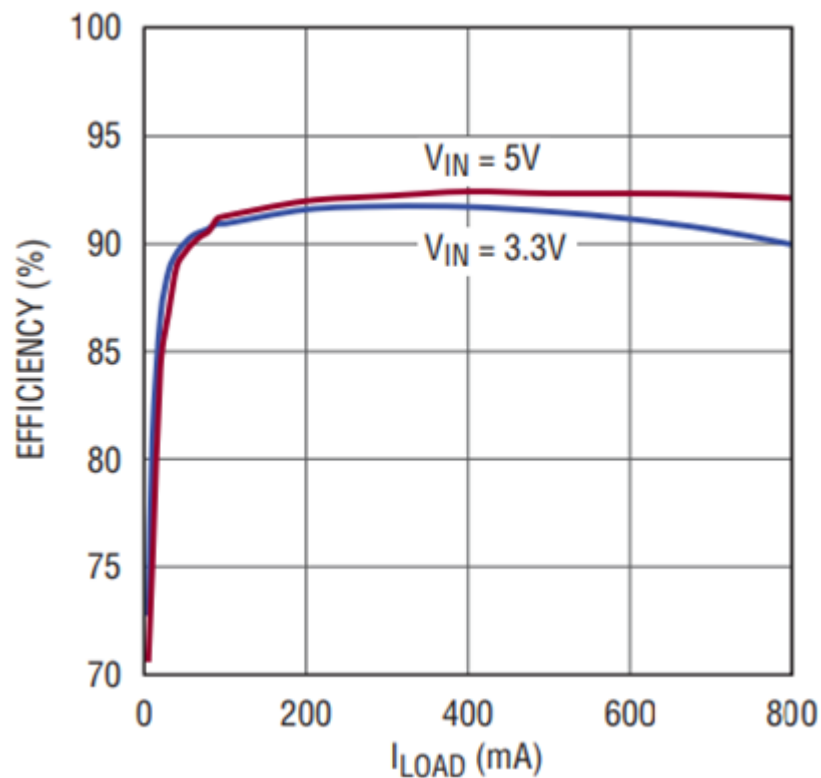


Рисунок 2.12 - Ефективність перетворювача LT3957

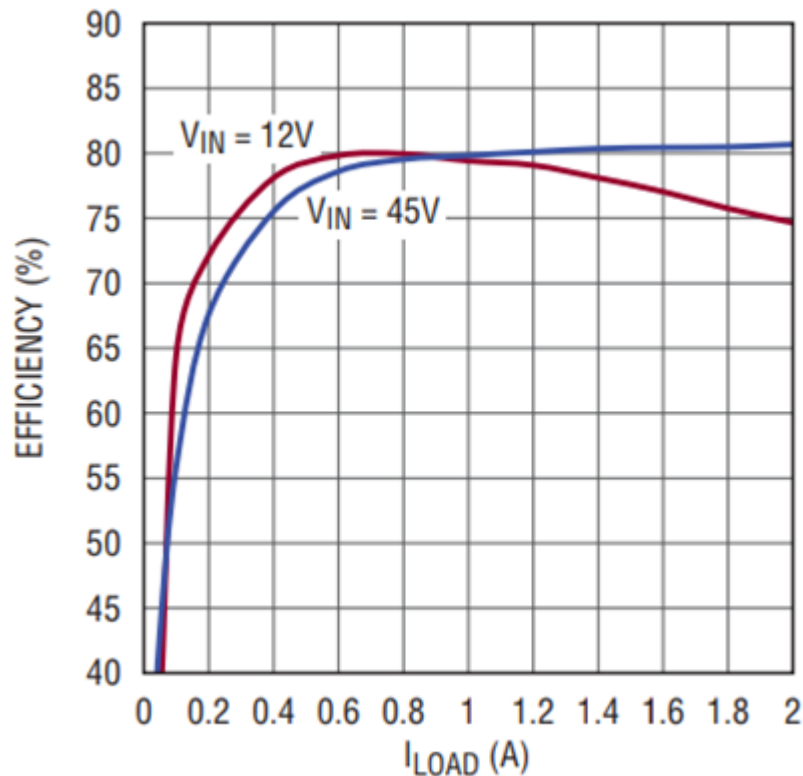


Рисунок 2.12 - Ефективність перетворювача LT3958

Поворотний перетворювач 12–45 В на вхід, –5 В на вихід LT3957 або LT3958 можна налаштувати як зворотний перетворювач для застосувань, де перетворювачі мають кілька виходів, ізольовані виходи або високу вхідну/вихідну напругу коефіцієнти перетворення. Перетворювач зворотного зв'язку має дуже низьку кількість частин для кількох виходів, а при розумному виборі коефіцієнта витків трансформатора він може мати високі коефіцієнти перетворення вихідної/вхідної напруги з бажаним робочим циклом. Функція згортання частоти LT3957 і LT3958 забезпечує надійний захист від короткого замикання на виході. Функція FBX кожної інтегральної мікросхеми дозволяє зворотному конвертеру легко виробляти позитивні або негативні виходи. На рисунку 2.13 показано LT3958 у зворотному перетворювачі, який працює від входу 12 В до 45 В і забезпечує вихід від 2 А до –5 В.



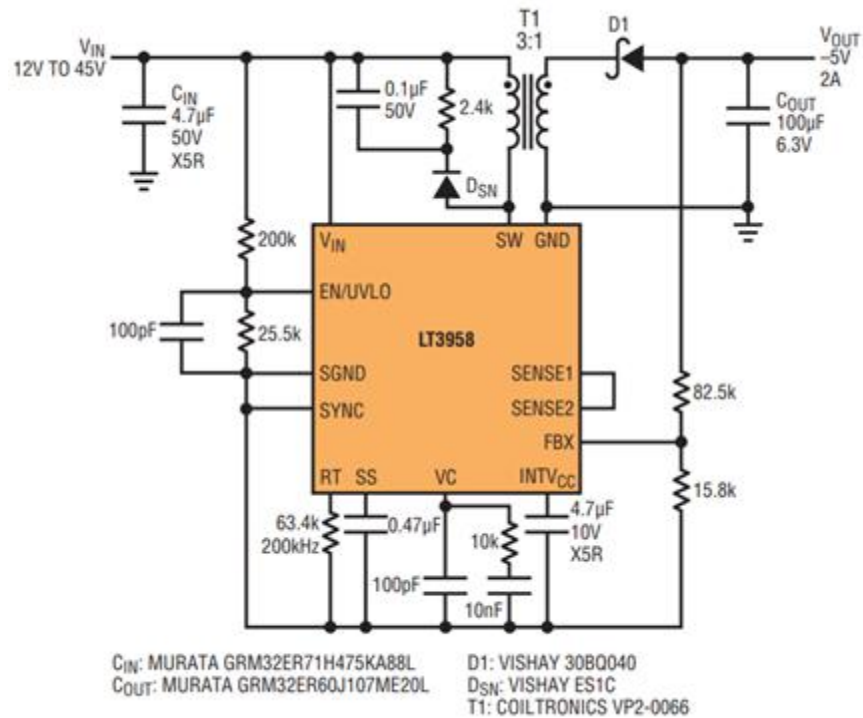


Рисунок 2.13 - LT3958 у зворотному перетворювачі

Перетворювач SEPIC на вхід 9 В–36 В, вихід на вихід 24 В представлено на рисунку 2.14. Показано LT3958 у перетворювачі SEPIC з входу 9 В на 36 В і виходу 24 В. Ця топологія дозволяє на вході бути вищим, рівним або нижчим за бажану вихідну напругу. У перетворювачі SEPIC не існує шляху постійного струму між входом і виходом, що є перевагою для додатків, які вимагають від'єднання виходу від джерела входу, коли ланцюг вимикається. Ця конструкція може витримувати невизначений режим короткого замикання на виході завдяки своїй топології та функції згортання частоти. На рисунку 2.15 показана ефективність цього перетворювача при різних вхідних напругах.

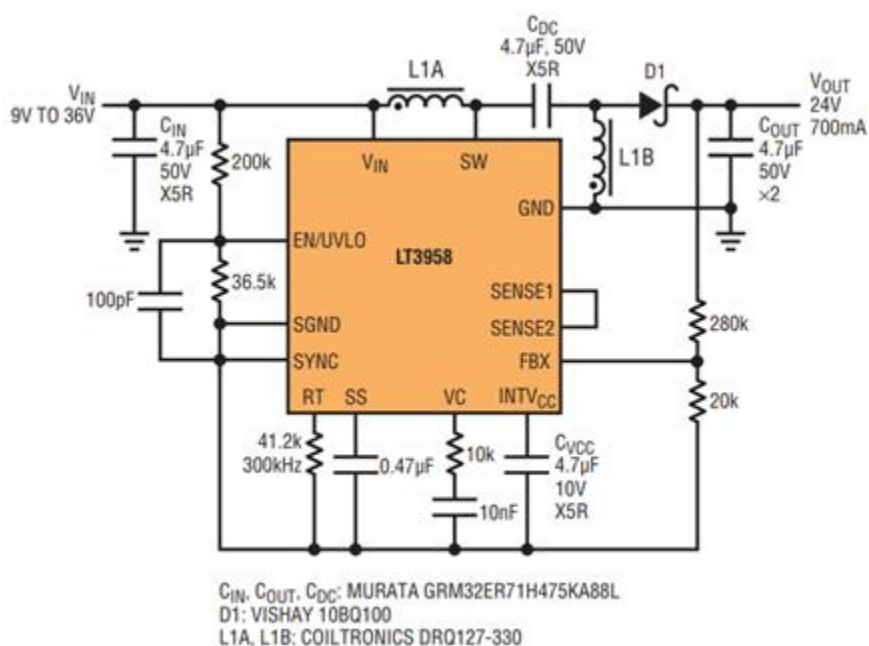


Рисунок 2.14 - LT3958 у перетворювачі SEPIC з входу 9 В на 36 В і виходу 24 В

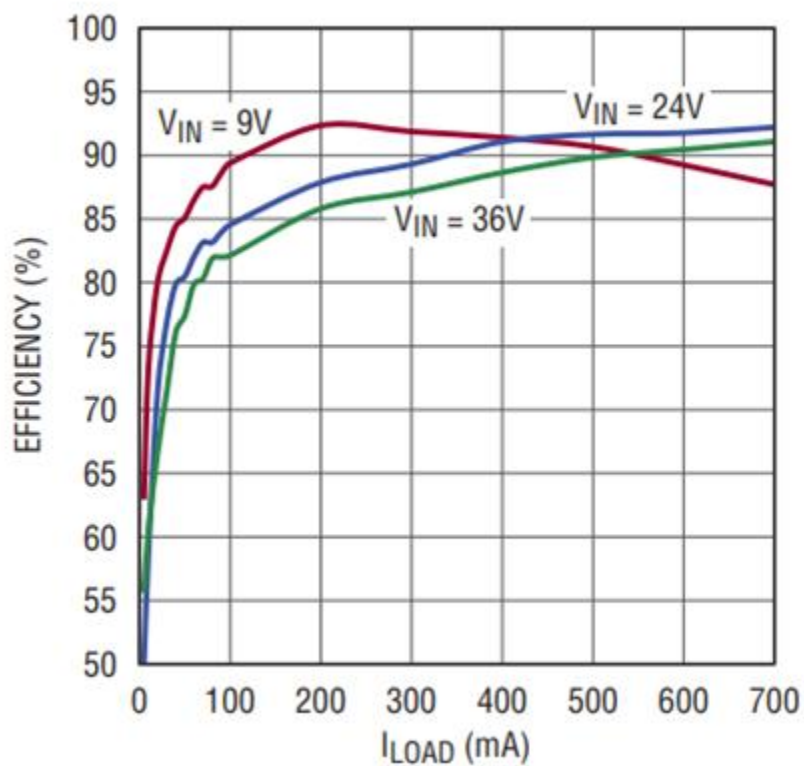


Рисунок 2.15 – Ефективність перетворювача SEPIC на LT3958

На рисунку 2.16 показаний інвертуючий перетворювач 4 В–15 В на вході та виході –5 В, який використовує LT3957 як перемикаючий регулятор. На рисунку 2.17 показана ефективність цього перетворювача при різних входніх напругах.

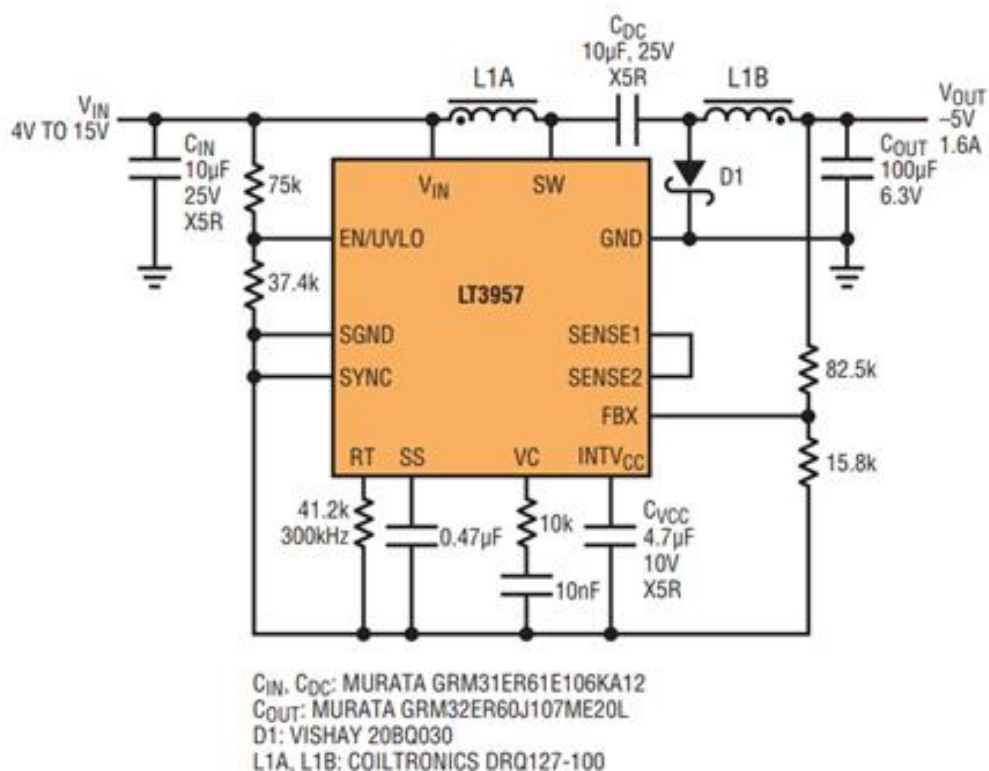


Рисунок 2.16 - Інвертуючий перетворювач 4 В–15 В на вході та виході –5 В, який використовує LT3957 як перемикаючий регулятор

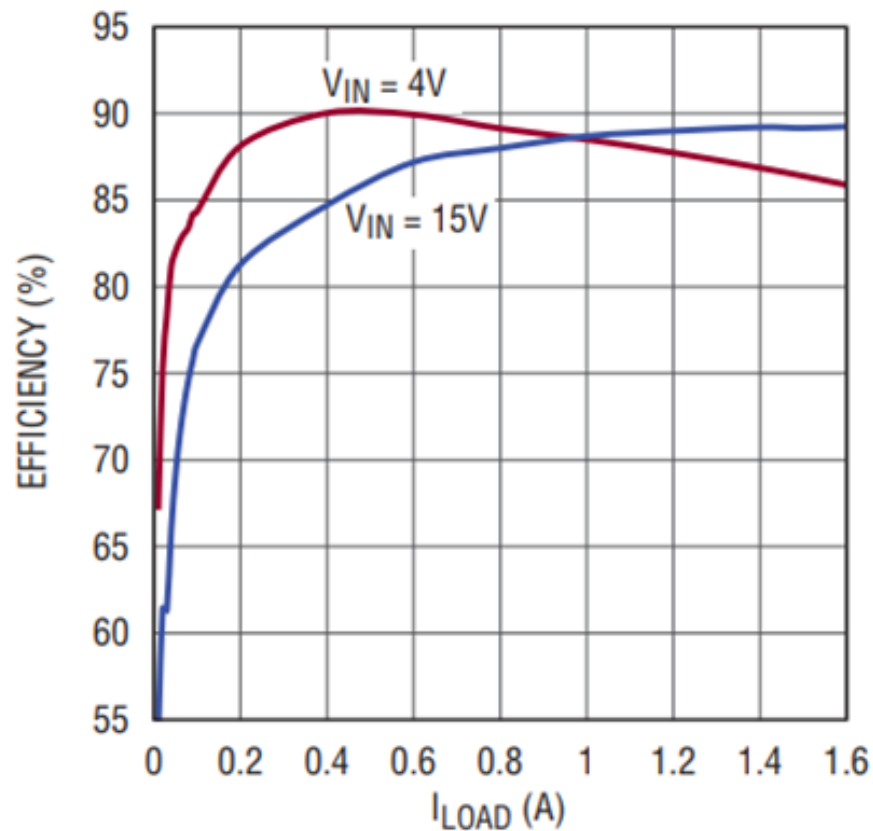


Рисунок 2.17 – Ефективність перетворювача на LT3957 при різних вхідних напругах

Отже, LT3957 і LT3958 – це універсальні монолітні комутаційні стабілізатори, які можна налаштувати як підвищувальний, зворотний, SEPIC або інвертуючий перетворювач, що приймає широкий діапазон вхідних напруг. Завдяки інтеграції силового MOSFET і LDO вони значно спрощують конструкцію перетворювача, зменшують розмір рішення та знижують витрати. Ці мікросхеми також пропонують низький струм відключення, плавний пуск, згортання частоти, вхідний UVLO, регульовану частоту та синхронізацію. Поєднання цих функцій робить LT3957 і LT3958 придатними для різноманітних застосувань, починаючи від портативної електроніки з акумуляторами до автомобільних, промислових і телекомунікаційних джерел живлення.

## 2.4 Моделювання роботи комутаційних стабілізаторів LT3957 і LT3958 перетворювача напруги з високим коефіцієнтом енергоефективності за топологією SEPIC

У роботі було проведено моделювання роботи комутаційних стабілізаторів LT3957 і LT3958 перетворювача напруги з високим коефіцієнтом енергоефективності за топологією SEPIC за допомогою редактора Proteus [34-37].

Схема пристроїв у редакторі Proteus представлена на рисунку 2.19.

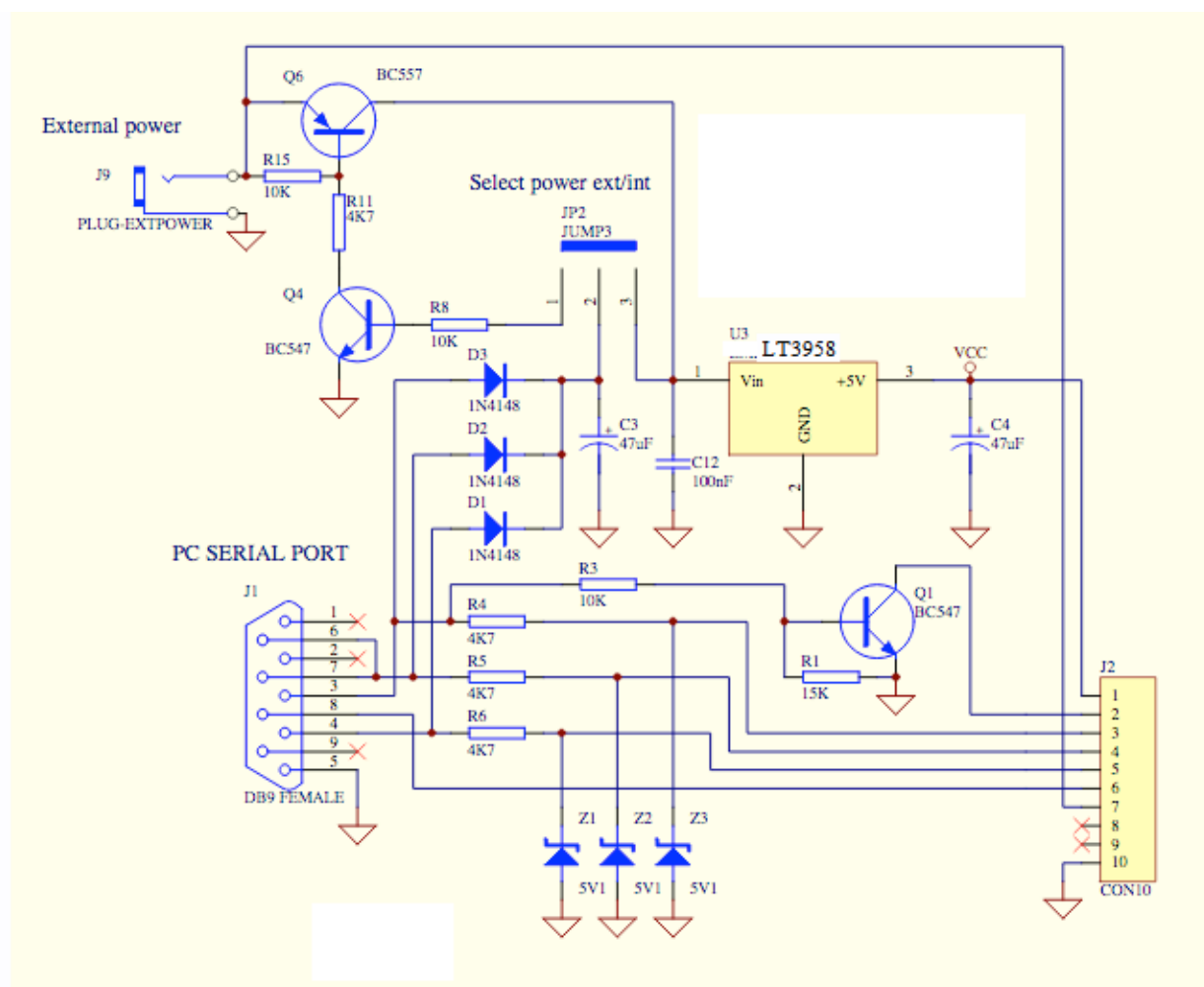


Рисунок 2.19 – Схема комутаційних стабілізаторів LT3957 і LT3958 перетворювача SEPIC у редакторі Proteus

На рисунку 2.20 представлено епюру функціювання стабілізаторів LT3957 і LT3958 перетворювача SEPIC у редакторі Proteus.

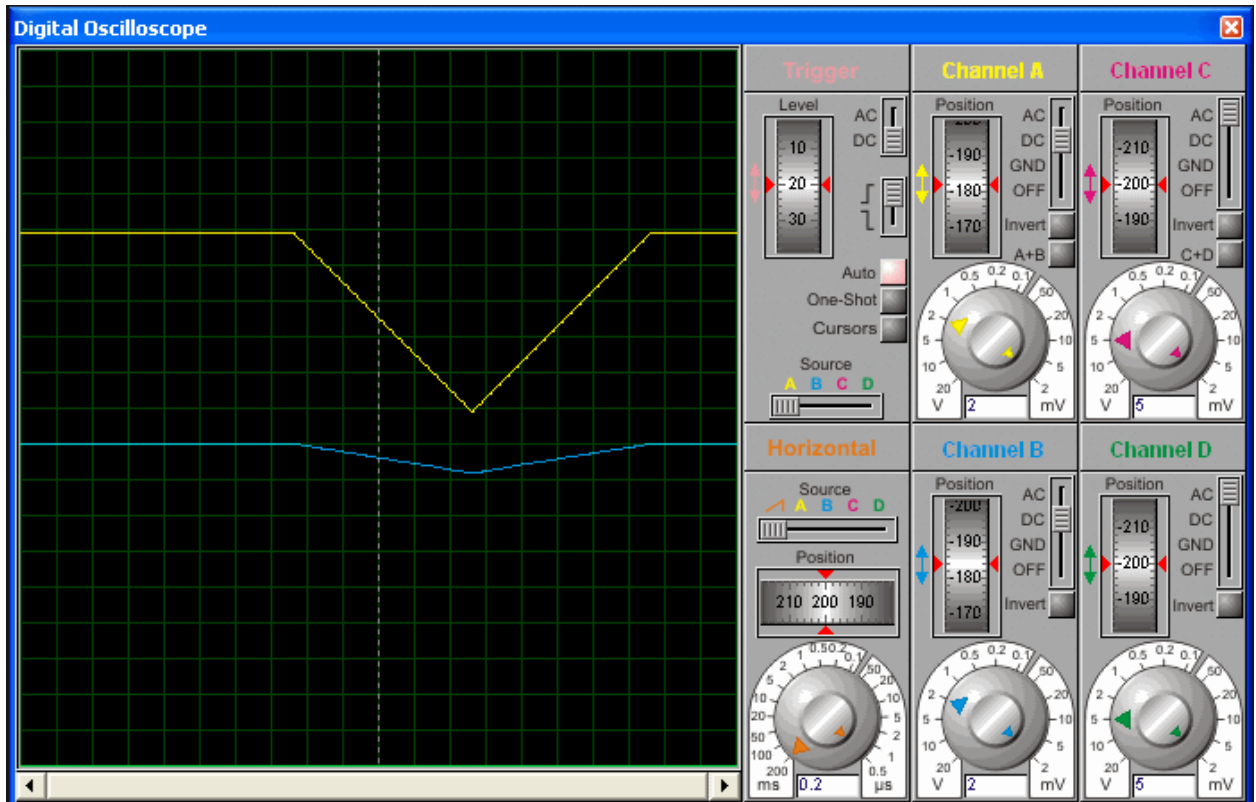


Рисунок 2.20 – Функціювання стабілізаторів LT3957 і LT3958 перетворювача SEPIC у редакторі Proteus

Як видно із представлених епюр, розрахункові дані добре співпадають із результатами моделювання.

Отже, за результатами розділу можна зробити наступні висновки:

1) початкові дослідження загальної структурної схеми перетворювача на критичних режимах показали, що схема у загальному вигляді може бути використана для живлення пристроїв з невеликим споживаним струмом у широкому діапазоні вхідної напруги, але для потужних пристроїв не вигідна через перегрівання;

2) у якості удосконалення схеми перетворювача за топологією SEPIC було обрано два напрямки: 1) використання контролера DC/DC-перетворювача серії LT8711; 2) розробити перетворювач SEPIC на комутаційних стабілізаторах LT3957 і LT3958;

3) LT8711 – це універсальний і гнучкий контролер, призначений для використання в понижувальних, підвищуючи SEPIC перетворювачах. Зокрема, синхронний перетворювач SEPIC може використовуватися для ефективного перетворення вхідних напруг, які можуть бути вищими і нижчими за потрібну вихідну напругу, що особливо важливо для використання у автомобільній промисловості та у системах енергетичної галузі.;

4) LT3957 і LT3958 – це універсальні монолітні комутаційні стабілізатори, які можна налаштувати як підвищувальний, зворотний, SEPIC або інвертуючий перетворювач, що приймає широкий діапазон вхідних напруг;

5) розрахункові дані добре співпадають із результатами моделювання.

### 3. Охорона праці та техногенна безпека при розробці перетворювача напруги з високим коефіцієнтом енергоефективності за топологією SEPIC

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

Роботи по розробці системи проводяться в лабораторії комп'ютерної техніки кафедри ЕІСПЗ ІННІ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ ЗНУ (далі – лабораторія).

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори стандартом ГОСТ 12.0.003-74 поділяються на фізичні, хімічні, біологічні й психофізіологічні. Останні за характером впливу на людину підрозділяються на фізичні й нервово-психічні перевантаження, а інші - на конкретні небезпечні й шкідливі виробничі фактори. До небезпечних виробничих факторів відносяться фактори, вплив яких призводить до травм, до шкідливих – фактори, які спричиняють захворювання [38-40].

В процесі роботи в лабораторії на працівника можуть впливати такі небезпечні й шкідливі виробничі фактори:

- падаючі вироби техніки, інструмент і матеріали під час роботи;
- ударна хвиля (вибух посудини, що працює під тиском пари рідини);
- струмені газів і рідин, що стікають, із посудин і трубопроводів під тиском;
- підвищене ковзання (через зледеніння, зволоження й замаслювання поверхонь, по яких переміщується робочий персонал);
- підвищені запыленість й загазованість повітря;
- підвищена чи знижена температура поверхонь техніки, обладнання й матеріалів;
- підвищена чи знижена температура, вологість і рухомість повітря;
- підвищений рівень шуму, вібрації, ультра- та інфразвука;



- підвищена напруга в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини;
- підвищений рівень статичної електрики;
- гострі кромки, задирки й шорсткість на поверхнях обладнання й інструментів;
- відсутність чи нестача природного світла;
- недостатня освітленість робочої зони;
- знижена контрастність об'єктів в порівнянні з фоном;
- підвищена пульсація світлового потоку;
- підвищений рівень ультрафіолетової й інфрачервоної радіації;
- хімічні речовини (токсичні, подразнюючі, сенсibiliзуючі, канцерогенні, мутагенні, що впливають на репродуктивну функцію людини);
- хімічні речовини, що проникають в організм через органи дихання, шлунково-кишковий тракт, шкірні покриви і слизові оболонки;
- перевантаження (статичні й динамічні) і нервово-психічні чинники (емоційні перевантаження, перенапруга аналізаторів, розумова перенапруга, монотонність праці).

Рівні небезпечних і шкідливих виробничих факторів не повинні перевищувати гранично допустимих значень, встановлених у санітарних нормах, правилах і нормативно-технічній документації.

Розглянемо більш детально небезпечні та шкідливі фактори, які характерні для підприємств, що спеціалізуються на виготовленні приладів мікро- та наноелектроніки.

Небезпечні фактори:

1. Балони з киснем. Обладнання, яке працює під тиском, повинне мати запобіжні пристрої, які не допускають підвищення тиску в обладнанні вище дозволеного.
2. Печі. Всі гарячі частини обладнання, трубопроводів, посудин, дотик до яких може викликати опіки, повинні мати теплову ізоляцію.

3. Електричне виробниче обладнання. Рухомі частини виробничого обладнання, до яких можливий доступ працюючих, повинні мати механічні захисні огорожі. Огородження, дверцята і кришки повинні бути забезпечені пристроями для надійного утримання їх в закритому (робочому) положенні і в разі необхідності заблоковані для їх відключення при знятті огороження. Всі електродвигуни, щити, оболонки кабелів повинні мати надійні заземлення, приєднані до стаціонарного корпусу заземлення. При виконанні ремонтних робіт на обертових механізмах кабелі живлення повинні бути від'єднані і на них має бути накладене переносне заземлення [38-40].

Шкідливі фактори:

1. Підвищений рівень шуму. Шум має шкідливий вплив на організм людини. При його тривалому впливі знижується гострота слуху, змінюється кров'яний тиск, послаблюється увага, погіршується зір, відбувається зміна в дихальних центрах, порушується координація руху. Інтенсивний шум є причиною порушень роботи серцево-судинної системи, нормальної функції шлунку та ряду інших порушень в організмі людини. Оскільки шкідлива дія шуму залежить і від його частотного складу, поріг буде неоднаковим для різних шумів. Пороги шкідливої дії шуму приймаються за нормативи шуму, тобто за гранично допустимі рівні шуму на виробництві. В якості таких згідно з ГОСТ 12.1.003-83\* ССБТ прийняті наступні нормативи: для низькочастотного шуму граничні значення - 90-100дБ, для середньо частотного шуму - 85-90дБ, а для високочастотного - 75-85 дБ. Для надійного контролю правильності вимірювання параметрів шуму введено додатковий критерій для судження про те, чи не перевищує шум допустимих рівнів. Таким критерієм є чіткість сприйняття мовлення, виголошеного з нормальною гучністю в працюючому цеху на відстані 1,5 м від випробуваного. Гарною розбірливістю (і, як наслідок, допустимим рівнем шуму) вважається правильне повторення не менше 40 з 50 багатозначних чисел (22, 44, 78 і т. д.).

2. У повітрі робочої зони можливий підвищений вміст шкідливих речовин, таких як кислоти, основи та розчинники. Їх концентрацію у повітрі значно зменшує вентиляція та спеціальні витяжки, або витяжні шафи.

Основні методи боротьби з пилом:

- зволоження водою до допустимих меж;
- вентиляційний пристрій, що уловлює пил від місць утворення з очищенням повітря перед викидом в атмосферу;
- застосування засобів індивідуального захисту (спецодяг, респіратори, захисні окуляри).

### 3.2 Заходи з поліпшення умов праці

Задля безпечної роботи у лабораторії співробітники повинні мати шапочку (для підтримання достатньої чистоти виробництва), респіратори та протигази (для уникнення впливу шкідливих парів на організм), халати та фартухи, резинові рукавиці (для електроізоляції) та кислотостійкі рукавиці.

На роботах із шкідливими та небезпечними умовами праці згідно зі ст.8 Закону України «Про охорону праці» робітникам видається безоплатно за встановленими нормами спеціальний одяг, спеціальне взуття та інші засоби індивідуального захисту, а також мийні та знешкоджуючі засоби:

- халат бавовняний (білий або світлих тонів), ГОСТ 12.4.103-83;
- ковпак (шапочка, косинка) бавовняний (білий або світлих тонів), ГОСТ 12.4.011-89;
- взуття шкіряне (тапочки), ГОСТ 12.4.137-2001;
- рукавички хірургічні гумові, ГОСТ 3-88;
- рукавички гумові, ГОСТ 12.4.103-83;
- нарукавники поліетиленові;
- протигаз фільтруючий, ГОСТ 12.4.121-83;
- коробки фільтруючі марки „Г”, ГОСТ 12.4.122-83;

- мило туалетне, ГОСТ 28546-90;
- рушники (серветки) з паперу (одноразового використання);
- рушник із бавовняної тканини [38-40].

Вимоги безпеки перед початком роботи:

1. Привести в порядок спецодяг. Робочий одяг не повинний мати звисаючих кінців, чи кінців, що розвіваються, має бути наглухо застебнутий, звисаючі кінці косинок, хусток мають бути підібрані, манжети рукавів повинні щільно обхоплювати руки біля кистей. Волосся має бути закрито щільно облягаючим головним убором. Робота в легкому взутті (тапочках, босоніжках) не допускається. Перевірити і одягти засоби індивідуального захисту. Покласти власний одяг у шкафчик.

2. Впевнитись в тому, що освітлення (загальне чи місцеве) забезпечує чітку видимість поділок на контрольно-вимірювальних приладах, а також поверхонь деталей, що оброблюються.

3. Впевнитись у повній працездатності робочого устаткування.

Задля підтримання рівня безпеки на виробництві під час виконання робіт забороняється:

1. Працювати з незакріпленими деталями.
2. Чистити устаткування під час його роботи;
3. Працювати на несправному устаткуванні, з несправним інструментом, самотійно виконувати його ремонт.
4. Знімати загороджувальні щитки на частинах устаткування, що рухаються.
5. Працювати з інструментом, правила експлуатації якого невідомі.
6. Працювати з інструментом і на устаткуванні, застосування якого не передбачено технологічним процесом.
7. Працювати без необхідних засобів індивідуального захисту.
8. Користуватися для виконання виробничих процесів протипожежним інвентарем із протипожежних стендів.
9. Чистити робочий одяг стисненим повітрям.

10. Одягатися, роздягатися, митися на робочому місці.

З метою підвищення безпеки роботи на виробництві проводиться ретельний контроль працездатності та справності вентиляцій, печей та іншого робочого обладнання, яке знаходиться в експлуатації. Проте на будь-якому виробництві можливі надзвичайні випадки. Вимагається припинити роботу в наступних випадках:

1. Виявлення несправності устаткування і інструмента;
2. Припинення подачі електроенергії;
3. Відключення загального чи місцевого освітлення;
4. Відключення систем загальнообмінної чи місцевої витяжної вентиляції;
5. Пошкодження засобів індивідуального захисту;
6. Погіршення самопочуття;
7. Одержання травми [38-40].

### 3.3 Виробнича санітарія

Згідно ГОСТ 12.1.005-88, роботи на виробництві належать до категорій:

– Іб(легка) – робота виконується сидячи, стоячи або в русі з незначними фізичними навантаженнями – 140-174 Вт.

– Іа (середньої тяжкості) – робота виконується в русі при переміщенні вантажів до 1кг або сидячи чи стоячи з фізичними навантаженнями – 175-232 Вт.

Важливим показником, який впливає на здоров'я людей, що працюють у лабораторії, є мікроклімат. Мікроклімат лабораторії не відповідає усім діючим нормам. Показниками, які характеризують мікроклімат, є:

– температура повітря (контролюється за допомогою гігроскопічного психрометра). У теплу пору року температура перевищує допустиму через

непрацездатність ряду вентиляційних пристроїв. Зростання температури вище допустимих значень негативно впливає на продуктивність праці людини. У холодну пору року температура повітря робочої зони знаходиться у межах оптимальних значень (18-23°C).

- швидкість руху повітря знаходиться у межах норми (0,1-0,2м/с).
- відносна вологість повітря у виробничих приміщеннях нижче оптимального значення влітку та дещо перевищує допустиме значення відносної вологості у холодну пору року (75-77%).
- інтенсивність теплового випромінювання працюючого від нагрітих поверхонь технологічного обладнання, освітлювальних приладів, інсоляції на постійних і тимчасових робочих місцях не повинна перевищувати 35 Вт/м при опроміненні 50% поверхні тіла та більше, 70 Вт/м при опроміненні 25-50% поверхні тіла та 70 Вт/м при розмірах опромінюваної поверхні не більше 25% поверхні тіла. Джерелом теплового випромінювання є печі. Інтенсивність теплового випромінювання на виробництві перевищує норми через відсутність якісної теплоізоляції [38-40].

Мета обладнання приміщення системою вентиляції залежить від конкретних умов. У різних цехах для різних етапів виробництва приладів використовуються системи вентиляції для різних цілей:

- виведення надлишків тепла, тобто підтримання припустимої температури повітря.
- виведення шкідливих речовин, тобто підтримання гранично припустимих концентрацій цих речовин у повітрі робочої зони.
- виведення залишків вологи, тобто підтримання припустимої відносної вологості повітря.

У теплу пору року гостро постає питання кондиціонування повітря. Через нестачу кондиціонерів місцевого призначення температура робочих зон перевищує допустиму норму, а відносна вологість нижче бажаного рівня, що може впливати як на працездатність, так і на здоров'я персоналу.

Зорові роботи у приміщенні об'єкту належать до класу найвищої точності (найменший розмір об'єкта менше 0,15мм). Природне освітлення робочих місць здійснюється через віконні прорізи, що відповідає боковому освітленню. Норма бокового освітлення для даного класу робіт – 3,5%. Фактичні значення бокового освітлення відповідають нормі (4%).

Згідно ДБН В.2.5-28-2006 норма освітленості робочих місць при комбінованому штучному освітленні для зорових робіт найвищої точності становить 2000 лк. Фактичне значення освітленості робочих місць при штучному освітленні відповідає нормі.

В основу точкового методу розрахунку розрахунку освітленості покладене рівняння, яке пов'язує освітленість та силу світла:

$$E = \frac{I_{\alpha} \cdot \cos^3 \alpha \cdot \mu}{k \cdot h_p^2} \quad (3.1)$$

Площа приміщення – 100 м<sup>2</sup>, висота – 5м освітлюється 4 світильниками типу РСП113-400 з лампами ДРЛ потужністю 400Вт. Світильники розміщені по кутам квадрата зі стороною 5м. Висота підвісу світильників над робочою поверхнею  $h_p=4,5$ м. Нормована освітленість в контрольній точці А рівна 250 лк.

1. Знаходимо  $\operatorname{tg} \alpha = d/h$ ,  $\alpha = \arctg d/h$   $\cos^3 \alpha$ :  $\alpha = 37^\circ$ ,  $\cos^3 \alpha = 0,49$

2. Визначаємо  $I_{\alpha}$  за кривою сили світла світильників РСП13 (ДРЛ) при умовній лампі зі світловим потоком  $\Phi_{\text{л}} = 1000$  лм. Знаходимо силу світла  $I_{\alpha}$  при  $\alpha = 37^\circ$  (інтерполюючи між значеннями сили світла для кута):  $\alpha = 35^\circ$  та  $45^\circ$ ,  $I_{\alpha 1000} = 214$  кд.

Світловий потік установленної у світильнику лампи ДРЛ потужністю 400Вт рівний 19000 лм. Тому:

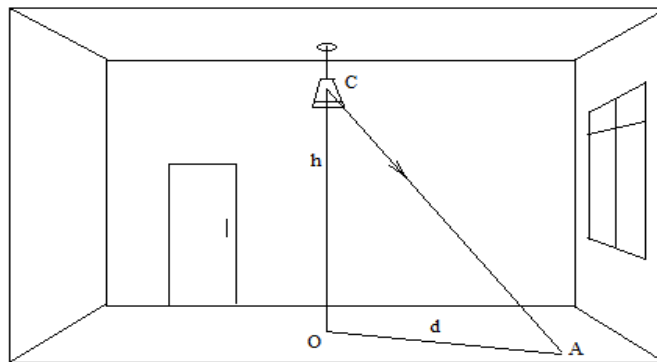
$$I_{\alpha} = 214 \frac{19000}{1000} = 214 \cdot 19 = 4066 \text{ [кд]} \quad (3.2)$$

3. Розраховуємо освітленість від одного світильника в горизонтальній площині в контрольній точці А (рис.3.1). Приймаючи коефіцієнт запасу  $k = 1,5$  для одного світильника і  $\mu = 1,05$  отримаємо:

$$E_A = \frac{I_\alpha \cos^3 \alpha \times \mu}{k \times h_p^2} = \frac{4066 \times 0,49 \times 1,05}{1,5 \times 4,5^2} = 68,8 [\text{лк}] \quad (3.3)$$

Оскільки в розрахунковій точці кожен із 4 світильників створює однакову освітленість, то сумарна горизонтальна освітленість в точці А складатиме:

$$\sum E_A = 4 \cdot 68,8 = 275,2 [\text{лк}] \quad (3.4)$$



С - світильник, О - проекція світильника на розрахункову площину,  
А – контрольна точка

Рисунок 3.1 – Розрахунок освітлення точковим методом

Фактична освітленість перевищує нормовану приблизно на 10%, що знаходиться в допустимих межах.

### 3.4 Електробезпека

Експлуатація такого устаткування повинна проводитися відповідно до інструкцій, правил і норм безпеки, вимог охорони праці та ін. Електричне обладнання повинне своєчасно проходити технічне планове обслуговування, ремонт, профілактичні випробування та інші види обслуговування, що забезпечують його справну роботу.

До роботи на електричному обладнанні допускаються особи, які мають необхідну групу електробезпеки, пройшли медичний огляд і не мають



протипоказань за станом здоров'я, що пройшли інструктаж з правил експлуатації і техніки безпеки. У компанії обов'язково повинні проводитися інструктажі з охорони праці та техніки безпеки для всього електротехнічного і неелектротехнічного персоналу, крім того, для всіх працівників повинні бути розроблені відповідні інструкції. Персонал, що працює з електричним обладнанням, повинен бути забезпечений засобами електрозахисту і спецодягом, а самі електричні установки - укомплектовані засобами захисту і всім необхідним для пожежогасіння.

Перевірку дотримання даних вимог підприємствами проводять органи енергонагляду, державної інспекції праці та ін.

Заходи попередження ураження людей електрострумом включають огорожу і ізоляцію будь-яких частин електричного обладнання та установок, що знаходяться під напругою. Також на підприємствах повинно бути організовано, де це можливо і де необхідно відповідно до правил і норм, застосування малої напруги. Обов'язковою мірою є заземлення або занулення всіх металевих конструкцій і кабелів, а також використання засобів індивідуального та колективного електрозахисту. Також до організаційних заходів відносяться заходи по допуску до роботи з електрикою і нагляду під час роботи фахівців на електроустановках.

Заземленню або зануленню підлягають такі конструкції і елементи:

- металеві корпуси технічних засобів і обладнання;
- електроприводи;
- вторинні обмотки трансформаторів;
- каркаси щитів управління, шаф та ін.;
- пересувні електричні установки та обладнання;
- інші кабельні та металеві конструкції.

Заземлення та занулення повинні проходити інструментальну перевірку відразу після монтажу, при експлуатації - не рідше 1 разу на рік, а також після проведеного ремонту.

Забезпечення заходів електробезпеки на підприємстві регламентується Міжгалузевими правилами охорони праці, Правилами улаштування електроустановок та іншими нормативними актами, затвердженими державними органами [38-40].

### 3.5 Пожежна безпека

Співробітники, відповідальні за забезпечення пожежної безпеки приміщень призначаються директором ІННІ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ ЗНУ.

Особи, призначені за заявою, є відповідальними за забезпечення пожежної безпеки приміщень або ділянок території.

Відповідальні за пожежну безпеку зобов'язані в кінці робочого дня проводити щоденний огляд закріплених за ними об'єктів.

При огляді слід контролювати прибирання приміщень:

- корзини для збору відходів повинні бути пустими;
- електроприлади, що знаходяться в приміщенні знеструмлені, штепсельні вилки витягнуті з електричних розеток;
- вікна закриті і зафіксовані;
- проходи та виходи із приміщень вільні та обладнані знаками охоронної безпеки та планами евакуації;
- електричне освітлення, за виключенням чергового освітлення відключене;
- вхідні двері закриті;
- автоматична сигналізація включена і функціонує;
- первинні засоби пожежогасіння повинні знаходитися в спеціально відведених місцях і доступ до них повинний залишатися вільним.

Якщо при огляді виявлено порушення дійсних правил, слід негайно повідомляти про порушення, що пред'являються відповідальним за запобіжну безпеку або керівнику установи.

Для запобігання виникненню пожеж від електричного струму, висвітлення, нагріву струмоведучих частин, дугового розряду та ін. необхідно дотримуватися "Правила техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів", інструкції по експлуатації електричних приладів. Всі приміщення повинні бути забезпечені первинними засобами пожежогасіння відповідно до норм і правил пожежної безпеки. Засоби пожежотушіння повинні розміщатися в пожежних шафах і обов'язково позначені відповідним знаком пожежної безпеки. Всі наявні первинні засоби пожежогасіння повинні постійно утримуватися в справному стані і регулярно, відповідно до технічних умов експлуатації, випробовуватися на придатність до використання [38-40].

Співробітники установи зобов'язані виконувати правила пожежної безпеки.

Для запобігання пожежі в приміщеннях будівлі забороняється:

- використовувати нагрівальні електроприлади для опалення приміщень;
- приготування та розігрівання їжі поза спеціально відведеними місцями, узгоджених з Державною протиповітряною службою;
- використовувати електричні прилади, споживана потужність яких перевищує допустиму потужність електромережі;
- залишати без нагляду будь-які прилади та пристрої, що знаходяться під напругою;
- підключати електроприлади без стандартних штепсельних роз'ємів;
- використовувати несправні електричні вимикачі, розетки, штепсельні роз'єми з розбитими корпусами, обгорілі і контактами;
- з'єднання, які нагріваються в місцях контакту;
- світильники без колпаків;
- здійснювати монтаж мереж без дотримання вимог "Правил пристроїв електроустановок";

– використовувати для захисту електромережі некалібровані плавкі вставки або автоматичні вимикачі, струм спрацьовування яких перевищує максимально допустиме значення для електромережі.

Всі перемикання та ремонтні роботи в електромережах повинні виконуватися спеціалістами, що мають допуск до роботи та групу електричної безпеки не нижче третьої.

Підключати до електричних мереж несправні електроприлади заборонено.

Забороняється:

– виконувати нагрів труб опалення, водопостачання та каналізації паяльними лампами або іншим способом із застосуванням відкритого вогню. Нагрівання слід виконувати - гарячою водою, паром, розігрітим піском або іншими пожежобезпечними способами;

– зберігати ємності з горючими, легкозаймистими рідинами, балони з горючими газами, горючі предмети та матеріали на шляхах евакуації, а саме в коридорах, на сходових клітках, у вестибюлі, в тамбурах евакуаційних виходів, а також в підвалах, на горищах, в технічних приміщеннях електрощитових, в вентиляційних камерах;

– зберігати на місцях проведення ремонтних і реконструкційних робіт пиломатеріали в кількості, що перевищує добову потребу, по залишати закінчення робочого дня легкозаймисті відходи;

– захаращувати шляхи евакуації меблями, матеріалами, обладнанням коридорів, сходові клітки, вестибюлі, тамбури евакуаційних виходів з будинку, доступ до первинного засобів пожежогасіння, електророзподільні щити і пристрої, що вимикають;

– закривати на важко відкривані засуви двері евакуаційних виходів в період перебування в будівлі людей;

– проводити перепланування і перепрофілювання приміщень, зводити на території різного роду споруди та прибудови без дотримання

протипожежних вимог і без узгодження з органами державного пожежного нагляду;

– використовувати наявні засоби пожежогасіння не за прямим призначенням [38-40].

## Висновки та рекомендації

Отже, за результатами роботи можна зробити наступні висновки:

1) початкові дослідження загальної структурної схеми перетворювача на критичних режимах показали, що схема у загальному вигляді може бути використана для живлення пристроїв з невеликим споживаним струмом у широкому діапазоні вхідної напруги, але для потужних пристроїв не вигідна через перегрівання;

2) у якості удосконалення схеми перетворювача за топологією SEPIC було обрано два напрямки: 1) використання контролера DC/DC-перетворювача серії LT8711; 2) розробити перетворювач SEPIC на комутаційних стабілізаторах LT3957 і LT3958;

3) LT8711 – це універсальний і гнучкий контролер, призначений для використання в понижувальних, підвищуючи SEPIC перетворювачах. Зокрема, синхронний перетворювач SEPIC може використовуватися для ефективного перетворення вхідних напруг, які можуть бути вищими і нижчими за потрібну вихідну напругу, що особливо важливо для використання у автомобільній промисловості та у системах енергетичної галузі.;

4) LT3957 і LT3958 – це універсальні монолітні комутаційні стабілізатори, які можна налаштувати як підвищувальний, зворотний, SEPIC або інвертуючий перетворювач, що приймає широкий діапазон вхідних напруг;

5) результати моделювання в середовищі Proteus добре співпадають із розрахунковими даними.

Як рекомендації щодо розроблюваного пристрою можна відмітити наступне:

1) пристрій може бути використаний в подальших розробках систем живлення пристроїв інформаційної електроніки та енергозберігаючих систем;

2) макетний варіант пристрою може бути використаний в лабораторному практикумі та при проведенні практичних занять кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення.

## Перелік посилань

1. Мовчан А. М., Петренко О. М. Розробка перетворювача на основі топології SEPIC для енергозберігаючого електроприводу / Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІ (20-22 травня 2015р., Харків) / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків, НТУ «ХПІ». – 108 С.
2. Dr. D. Anto Sahaya Dhas, Dr. G. Justin Sunil Dhas, and Anand. K Interleaved Sepic Converters for AC-DC Front-End Converter Application // (ICIET'2016) August 5-6, 2016, page 1-6.
3. Chiu H.-J., Lin L.-W. A. (2006). Bidirectional DC–DC Converter for Fuel Cell Electric Vehicle Driving System. IEEE Transactions on Power Electronics, 21 (4), 950–958.
4. Chen, G., Xu, D., Lee, Y.-S. (2002). A family of soft-switching phase-shift bidirectional DC-DC converters: synthesis, analysis, and experiment. Proceedings of the Power Conversion Conference (PCC 2002), pp. 1–6.
5. Fan, H., Xu, D. (2004). A family of PWM plus phase-shift bidirectional DC-DC converters. IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC 2004), pp. 1–8.
6. Dawood N.B. Review of Different DC to DC Converters Based for Renewable Energy Applications. International Research Journal of Engineering and Technology, (2016). 3 (3), 46–50.
7. Veligorskyi O., Khomenko M., Chakirov R., Vagapov Y. (2018) Performance analysis of a wearable photovoltaic system. IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES), pp. 376–381.



8. Zhang J., Lai J.-S., Yu W. (2007). High-Power Density Design of a Soft-Switching High-Power Bidirectional dc–dc Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22 (4), 1145–1153.

9. Zhang J., Lai J.-S., Yu W. (2008). Bidirectional DC-DC converter modeling and unified controller with digital implementation. 23rd IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2008), pp. 1–8.

10. Matsuo H., Lin W., Kurokawa F., Shigemizu T. (2004). Characteristics of the multiple-input DC-DC converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51 (3), 625–631.

11. Kim I.-D., Paeng S.-H., Ahn J.-W., Nho E.-C., Ko J.-S. (2007). New Bidirectional ZVS PWM Sepic/Zeta DC-DC Converter. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1–8.

12. Caricchi F., Crescimbinì F., Noia G., Pirolo D. (1994). Experimental study of a bidirectional DC-DC converter for the DC link voltage control and the regenerative braking in PM motor drives devoted to electrical vehicles. 9th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 1994), pp. 381–386.

13. Kang T., Kim C., Suh Y., Park H. (2012). A design and control of bi-directional non-isolated DC-DC converter for rapid electric vehicle charging system. 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2012), pp. 14–21.

14. Tank S.B., Manavar K., Adroja N. (2015). Non-Isolated Bi-directional DC-DC Converters for Plug-In Hybrid Electric Vehicle Charge Station Application. *Emerging Trends in Computer & Electrical Engineering (ETCEE 2015)*, pp. 1–9.

15. Waffler S., Kolar J.W. (2010). Comparative Evaluation of Soft-Switching Concepts for Bi-directional Buck+Boost Dc-Dc Converters. *The 2010 International Power Electronics Conference*, pp. 1856–1865.

16. Dawood N.B. (2016). Review of Different DC to DC Converters Based for Renewable Energy Applications. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 3 (3), 46–50.
17. Mohammadi M.R., Farzanehfard H. (2011). A new bidirectional ZVS-PWM Cuk converter with active clamp. 19th Iranian Conference on Electrical Engineering, pp. 1–6.
18. Denny D.C., Shahin M. (2015). Analysis of bidirectional SEPIC/Zeta converter with coupled inductor. *International Conference on Advancements in Power and Energy (TAP Energy 2015)*, pp. 103–108.
19. Kim I.-D., Lee Y.-H., Min B.-H., Nho E.-C. (2007). Design of bidirectional PWM Sepic/Zeta DC-DC converter. 7th International Conference on Power Electronics, pp. 614–619.
20. Gurralla S.R., Lakshmi K.V. (2010). A Novel Bidirectional DC-DC Converter with Battery Protection. *International Journal of Modern Engineering Research*, 2(6), 4261–4265.
21. Yang L.-S., Liang T.-J. (2013). Analysis and Implementation of a Novel Bidirectional DC–DC Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(1), 422–434.
22. Ye Y., Cheng K.W., Liu J., Xu C. (2013). Bidirectional tapped-inductor-based buck-boost convertor and its circuit application. 5th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA 2013), pp. 1–7.
23. Gitau M.N., Mwaniki F.M., Hofsajer I.W. (2013). Analysis and Design of a Single-Phase Tapped-Coupled-Inductor Boost DC-DC Converter. *Journal of Power Electronics*, 13 (4), 636–646.
24. Chung H.S., Ioinovici A., Cheung W.-L. (2003). Generalized structure of bi-directional switched-capacitor DC/DC converters. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 50 (6), 743–753.

25. Wu H., Lu J., Shi W., Xing Y. (2012). Nonisolated Bidirectional DC–DC Converters With Negative-Coupled Inductor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27 (5), 2231–223.
26. Das P., Mousavi S.A., Moschopoulos G. (2010). Analysis and Design of a Nonisolated Bidirectional ZVS-PWM DC–DC Converter With Coupled Inductors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25 (10), 2630–2641.
27. Jung D.-Y., Hwang S.-H., Ji Y.-H., Lee J.-H. (2012). Soft-Switching Bidirectional DC/DC Converter with a LC Series Resonant Circuit. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(4), 1680–1690.
28. Garinto D. (2007). Multi-interleaved zero-ripple VRM to power future microprocessors. *European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 1–6.
29. Yang Y., Ma J., Ho C.N., Zou Y. (2015). A New Coupled-Inductor Structure for Interleaving Bidirectional DC-DC Converters. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3 (3), 841–849.
30. Huang X., Lee F.C., Li Q., Du W. (2015). High-Frequency High-Efficiency GaN-Based Interleaved CRM Bidirectional Buck/Boost Converter with Inverse Coupled Inductor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31 (6), 4343–4352.
31. Li J., Sullivan C. R., Schultz A. (2002). Coupled-inductor design optimization for fast-response low-voltage DC-DC converters. *17th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2002)*, pp. 1–6.
32. Garcia O., Zumel P., Castro A., Cobos A. (2006). Automotive DC-DC bidirectional converter made with many interleaved buck stages. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21 (3), 578–586.
33. LT, LTC, LTM, Linear Technology, Burst Mode and the Linear logo are registered trademarks of Analog Devices <https://www.analog.com/en/products/lt8711.html> (дата звернення: 26.04.2023).

34. Верьовкін Л.Л. Функціональні вузли мікропроцесорних систем. Методичні рекомендації до лабораторних занять для здобувачів вищої освіти першого бакалаврського рівня за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікро- та наносистемна техніка».

35. Верьовкін Л.Л. Функціональні вузли мікропроцесорних систем. Методичні рекомендації до практичних занять для здобувачів вищої освіти першого бакалаврського рівня за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікро- та наносистемна техніка». Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 45 с.

36. Верьовкін Л.Л. Цифрові логічні автомати. Методичні рекомендації до практичних занять для здобувачів вищої освіти першого бакалаврського рівня за спеціальністю 153 «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікро- та наносистемна техніка». Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 36 с.

37. Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Proteus VSM. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів курсу "Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами". Медвідь В. Р., Пісьціо В. П., Тернопіль: ТНТУ, 2018 26 с.

38. Бегун В. В., Науменко І. М. Безпека життєдіяльності : Навч. посібник. Київ : МОНУ, 2004. – 328 с.

39. Охорона праці. Методичні вказівки до проведення практичних занять та виконання контрольних робіт для студентів ЗДІА інженерних спеціальностей / Укл. В. Г. Рижков Запоріжжя, 2005. 43 с.

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