

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Радіотехнічний факультет
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 621.344.572

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Є.А. Нелін
(ініціали, прізвище)

“10” 12 2019 р.

Магістерська дисертація

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка
за освітньою програмою (спеціалізацією) Інтелектуальні технології
мікросистемної радіоелектронної техніки (код і назва спеціальності)

на тему: Зворотняходний перетворювач з тризмуром
та осцилятором

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи Р1-81м17
(шифр групи)

Арсенюк Дмитро Олександр
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник проф. д.т.н. проф. Зичковський Ю.Ф.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з охорони праці к.т.н., доцент Каштанов С.Ф.
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент доцент каф. РТ ПС к.т.н. доц. Ніздродий В.О.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Факультет (інститут) радіотехнічний факультет
(повна назва)

Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною
програмою

За спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка

За освітньою програмою (спеціалізацією) Інтелектуальні технології
мікросистемної радіоелектронної техніки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

С. А. Нелін
(підпис) (ініціали, прізвище)

02 вересня 2019р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Арсенюк Дмитро Олександрович
прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації

Зворотнаходовий перетворювач з
транзисторної на основі мікропроцесора

науковий керівник дисертації

Зінковський Юрій Францевич, прор., д.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «12» листопада 2019р. № 3881-С

2. Строк подання студентом дисертації

12 грудня 2019р.

3. Об'єкт дослідження

Синтезний блок зворотного зв'язку
за допомогою зворотнаходового перетворювача з транзисторної
на основі мікропроцесора

4. Предмет дослідження (вихідні дані для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) Вихідні характеристики
блоку публікації, характеристики роботи публікації

5. Перелік завдань, які потрібно розробити розробити структуру
блоку публікації; розробити методи оцінювання та інші умови
публікації згідно з вимогами роботи публікації в публікації
з блоку публікації

6. Орієнтовний перелік ілюстративного (графічного) матеріалу Методика
методика публікації

7. Орієнтовний перелік публікацій Матеріали міжнародної конференції
«В-технічні компетенції: Регіональні події, Східний, африканський
та системи» (PTT/CAC-2019)

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
3 охорони праці	Каштанов С.Ф., доцент, к.т.н.		

9. Дата видачі завдання 02 вересня 2019 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Пошук та аналіз літератури	лютий 2019	
2.	Презентація експертів блоку публікації	березень - травень 2019	
3.	Проблема системності блоку публікації	травень 2019	
4.	Уточнення характеристик блоку публікації	вересень - жовтень 2019	
5.	Структура - методика	листопад 2019	
6.	Охорона праці	грудень 2019	

Студент

(підпис)

Арсенюк Д.О.
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Ю.Ф. Зінковески
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

РЕФЕРАТ

Структура та обсяг магістерської дисертації

Магістерська дисертація: 91 стр., 33 рис., 21 табл., 1 додаток, 27 джерел.

Ключові слова галій-нітрид, *GaN*, зворотноходовий перетворювач, *flyback*, живлення PEA.

Актуальність теми. Популярність зворотноходових перетворювачів на сьогодні значно підвищилась у зв'язку з простотою та дешевизною даного схемотехнічного рішення. Його використовують у адаптерах для ноутбуків, DVD-плеєрах, ЖК-телевізорах тощо. Разом із тим, зростають потреби у енергоефективності приладів. Одним із вирішенням цього питання може слугувати використання силових елементів на основі нітриду галію. Актуальність роботи обумовлена необхідністю розробки більш ефективних імпульсних блоків живлення.

Мета дослідження. Дослідження ефективності роботи блоку живлення з використанням транзисторів на основі нітриду галію.

Об'єкт дослідження. Зворотноходовий перетворювач з транзистором на основі нітриду галію.

Предмет дослідження. Вихідні характеристики приладу, характеристики роботи транзистора.

Наукова новизна одержаних результатів. Використання нового конструктивного рішення блоків живлення.

ABSTRACT

Structure and volume of thesis:

Master's dissertation: 91s, 33 figures, 21 tables, 1 appendix, 27 references.

Keywords: gallium-nitride, GaN, flyback convertor basic, SMPS.

Relevance of the topic. The popularity of flyback convertors has increased due to simplicity and low cost of design. It's used in adapter for laptops, DVD players, LCD TVs and more. At the same time, there is need for more energy efficiency. The solution to this case can be the use of gallium nitride based power electronic elements. Relevance of the topic is due to the need to develop more efficient switching power supply.

The aim of the study is the need to study the efficiency of a switching power supply using gallium nitride based transistors.

The object of the research is flyback convertor using gallium nitride based transistor.

Subject of research is the output parameters of the device and parameters of the main transistor.

Scientific novelty of the obtained results is new electronic design of switching power supply

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО МАГІСТЕРЬСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ**

На тему: Зворотноходовий перетворювач з транзистором на основі ніт-
риду галію

Київ 2019

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	5
Вступ.....	6
1 Ефективність транзисторів на основі галій нітриду в силовій електроніці	7
1.1 Структура галій нітридних транзисторів.....	7
1.2 Використання галій-нітридних транзисторів в імпульсних джерелах живлення	10
2 Дослідження Зворотноходових перетворювачів.....	13
2.1 Визначення та область використання	13
2.2 Принцип роботи зворотноходового перетворювача	14
3 Дослідження існуючих аналогів блоків живлення	18
3.1 Огляд доступних аналогів блоків живлення	18
3.2 Дослідження схемотехнічного рішення зворотноходового перетворювача	20
4 Проектування пристрою блоку живлення	24
4.1 Формування вимог для проектування імпульсного блоку живлення	24
4.2 Проектування імпульсного блоку живлення та вибір елементної бази	25
4.3 Розробка схеми електричної принципової	34
4.4 Проектування друкованої плати.....	40
5 Експериментальні дослідження	44
5.1 Симуляція роботи блоку живлення.....	44

	3
5.2 Температурне моделювання друкованої плати	54
6 Розробка стартап проекту	58
6.1 Опис ідеї проекту	58
6.2 Аналіз ринкових можливостей стартап проекту	59
6.3 Розробка маркетингової стратегії проекту	66
7 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	71
7.1 Визначення основних потенційно шкідливих виробничих факторів при виконанні науково-дослідницької роботи	71
7.2 Технічні рішення та додаткові заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії	72
7.2.1 Мікроклімат на виробничому місці	72
7.2.2 Відповідність повітря робочої зони епідеміологічним нормам ..	73
7.2.3 Електробезпека	76
7.2.4 Нормалізація повітря робочої зони	78
7.2.5 Освітлення робочого приміщення	79
7.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях	80
7.3.1 Вимоги до ефективності роботи систем оповіщення персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації	80
7.3.2 Обов'язки та дії персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації	81
7.3.3 Технічні та організаційні вирішення питань з пожежної безпеки	82
Висновки	84
Перелік джерел посилань	86
Додаток А Технічне завдання	89

Додаток Б Технічне завдання..... 94

Арсенюк Д.О. РІ-81МП, 2019

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ККД — Коефіцієнт корисної дії;

ШІМ — Широтно-імпульсна модуляція;

CCM — *Continuous Conduction Mode*;

DCM — *Discontinuous Conduction Mode*;

HEMT — *High-electron-mobility transistor*;

RMS — *Root mean square*.

Арсенюк Д.О. РІ-81МП, 2019

ВСТУП

Створення ефективних перетворювачів для систем живлення радіоелектронних пристроїв являється однією з ключових задач сучасної силової електроніки. Такі системи живлення необхідні у повсякденних електронних приладах, таких як адаптери для ноутбуків, *DVD*-плеєри, ЖК-телевізори тощо. Використання схеми зворотноходових перетворювачів значно спрощує розробку блоку живлення. Але зростання вимог до стабільності, ефективності та тепловідділення цих пристроїв змушує розробників систем живлення шукати нові рішення. Вирішенням цього питання може слугувати використання у таких блоках живлення силових елементів на основі нітриду галію.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю розробки більш ефективних імпульсних блоків живлення.

Мета дослідження — дослідити ефективність роботи блоку живлення з використанням транзисторів на основі нітриду галію.

Завдання дисертації:

1. Розробити конструкцію приладу
2. Розробити макет друкованої плати приладу
3. Провести дослідження ефективності роботи пристрою в порівнянні з аналогічними.

Об'єкт дослідження — зворотноходовий перетворювач з транзистором на основі нітриду галію.

Предмет дослідження — вихідні характеристики приладу, характеристики роботи транзистора.

Наукова новизна розробки полягає в розробці нового схемно-конструктивного рішення блоку живлення, яке забезпечило збільшення енергоефективності роботи пристрою.

1 ЕФЕКТИВНІСТЬ ТРАНЗИСТОРІВ НА ОСНОВІ ГАЛІЙ НІТРИДУ В СИЛОВІЙ ЕЛЕКТРОНІЦІ

У цьому розділі розглядається особливості галій нітридних транзисторів, їх застосування у силовій електроніці. Використання транзистора у науково-дослідницькій роботі.

1.1 СТРУКТУРА ГАЛІЙ НІТРИДНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Нітрид галію (GaN) — являє собою складний напівпровідниковий матеріал, котрий ще називається широкозонний напівпровідник (*Wide-Bandgap semiconductor*), який знайшов своє практичне призначення у якості джерела світла при використанні світлодіодів. Крім цього нітрид галію знайшов своє застосування у високошвидкісних перемикаючих приладах, таких як транзистори з високою рухливістю електронів (*HEMT*). Транзистори GaN відрізняється від кремнієвих рішень тим, що при заданих значеннях опору включення та напруги мають меншу величину електричного пробоя та більш високу швидкість перемикавання при мінімальному часі зворотного відновлення [1]. На відмінну від кремнієвих транзисторів, котрі близькі до своєї теоретичної межі виготовлення за параметрами напруги, GaN -транзисторам мають більшу перспективу для подальшого розвитку [2]. На рис. 1.1 показана порівняльна характеристика опору включення та напруги пробоя різних напівпровідникових матеріалів. Високий теоретичний ліміт GaN говорить про те, що GaN *HEMT* являється найбільш перспективним електронним пристроєм завдяки досягненню більш високої напруги пробоя та меншим опором включення.

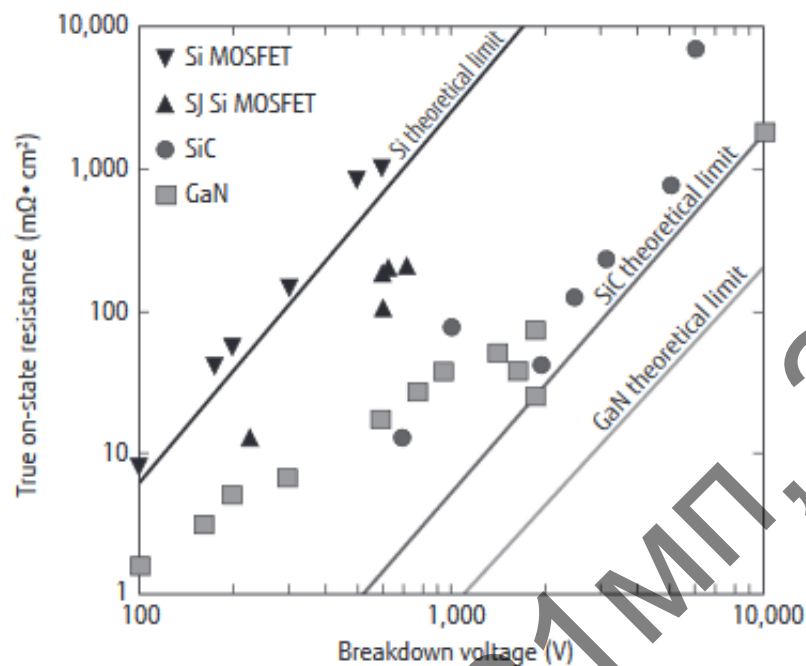


Рисунок 1.1 — Порівняння *GaN* з кремнієм та кремній карбідом (*SiC*) з точки зору зв'язку опору включення та напруги пробою

Базова структура *GaN*-транзистора показана на рис. 1.2 [3]. *GaN HEMT* представляє собою польовий транзистор, у якому дві області заборонених зон та поляризаційних полів нарощуються друг на друга. Підкладка використовується у якості основи для процесу нарощування. На даний момент транзистори вирощуються на підкладках із кремнію, сапфіру, карбіду кремнія, але найбільш поширений варіант із кремнію привертає увагу промисловості через велику номенклатуру кремнієвих пластин при низьких затратах. При нарощенні шару нітриду галію на підкладку через особливості кристалічної решітки можуть виникати деформації, які сприяють створенню тріщин. Тому створюється проміжна область між підкладкою та областю каналу, щоб компенсувати невідповідності між ними. Поверх каналного шару галій нітриду нарощують шар з більш ширшою забороненою зоною та меншою спорідненістю до електрона. Через різницю в поляризації між бар'єром та областю каналу під створеною гетероструктурою створюється потенційна яма, яка захоплює електрони та виникає канал. У якості бар'єрного шару нарощуються *AlGaN*. Так як,

у створеній гетероструктурі, у процесі поляризації, виникає шар вільних зарядів двохвимірною електронного газу (*2DEG*). Цей шар має високу провідність завдяки високій рухливості зарядів. Це дає можливість реалізувати низький опір каналу у відкритому стані. Шар пасивації нарощений поверх бар'єрного шару між затвором та витоком та між стоком та затвором. Шар може спочатку бути нанесений, як єдиний, а потім протравлюватись, щоб сформувати затвор. У якості матеріалу зазвичай застосовують нітрид кремнію. Електроди, такі як стік та витік, розміщуються на високолегованому напівпровіднику для створення омичних контактів. Але, затвор розміщується у напівпровідник, не сильно легований, щоб створити бар'єр Шоткі, котрий необхідний для керування струмом між стоком та витоком.

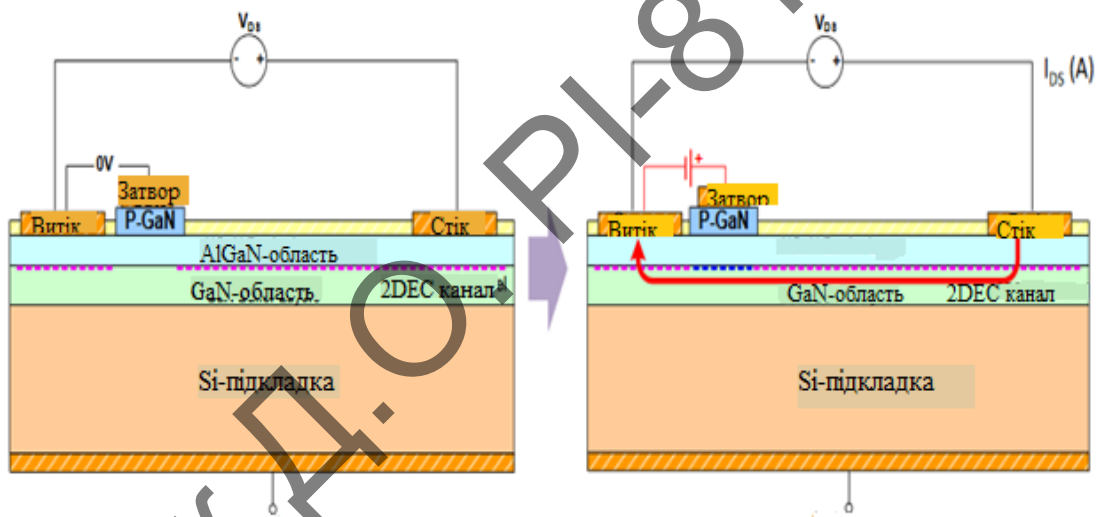


Рисунок 1.2 — Структура *GaN*-транзистора

GaN-транзистори існують у двох видах: транзистори, що працюють в режимі збіднення (*d-mode*) та транзистори з покращеною структурою (*enhancement mode* або *e-mode*), що працюють в режимі збагачення. Перший тип проводить струм при нульовій напрузі на затворі. Транзистор закривається лише тоді, коли до контактів стоку та витоків прикладається зворотна напруга. У покращеній структурі при нульовій напрузі затвор-стік транзистора закритий, при цьому струм не проходить.

Структура *GaN*-транзисторів відрізняється від кремнієвого аналогу підвищеною рухливістю електронів та збільшеною електричною міцністю. Такий транзистор має високу частоту переключення з мінімальним часом зворотного відновлення. У результаті, *GaN*-транзистори здатні комутувати напруги у сотні вольт з дуже малою тривалістю перехідних процесів. Така особливість являється вирішальною при проектуванні потужних імпульсних джерел живлення.

1.2 ВИКОРИСТАННЯ ГАЛІЙ-НІТРИДНИХ ТРАНЗИСТОРІВ В ІМПУЛЬСНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЖИВЛЕННЯ

У транзисторів *d-mode* існують проблеми подачі живлення. Для того, щоб перешкодити короткому замкненню у силових перетворювачах транзистор необхідно перед подачею напруги попередньо виключити прилад, сформувавши на затворах зворотну напругу, для усунення цього дефекта разом с *GaN*-транзистором застосовується низьковольтний кремнієвий транзистор. У *e-mode* транзисторів такого недоліка немає, тому проблем при початковому запуску відсутня.

Транзистори *GaN* мають максимальну допустиму напругу затвору, прикладену відносно стоку. У транзисторів с покращеною структурою нормальна порогова напруга затвор-витік становить 6 В, що приблизно в 2 раза менше, ніж у кремнієвих транзисторів. Перевищення цих меж може призвести до незворотного пошкодження пристроїв, тому цей режим слід уникати.

Переключення *GaN*-транзисторів значно швидше, ніж у кремнієвих польових транзисторів, тому вони піддаються впливу значно більш високих швидкостей наростанням напруги dV/dt та струму dI/dt , що може вплинути на працездатність транзистора [4]. Висока швидкість нарощення dV/dt є причиною підвищеної швидкості заряду ємності приладу, як показано на рис. 1.3.

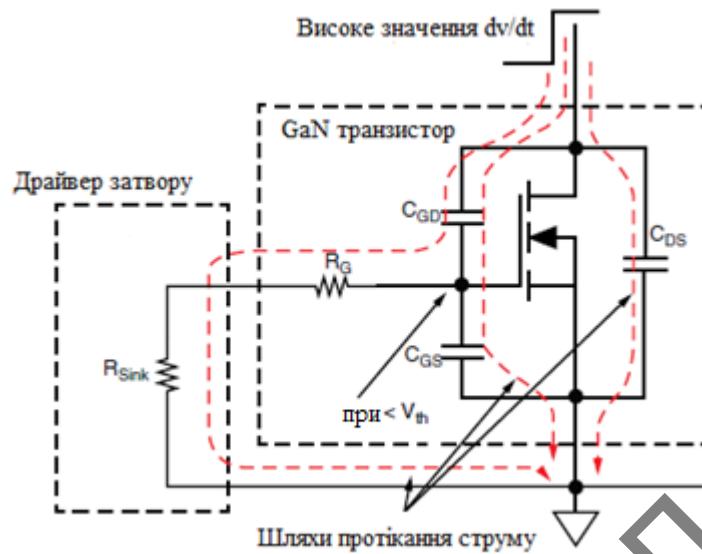


Рисунок 1.3 — Детальна модель транзистора з впливом dV/dt на пристрій в виключеному стані

Струм, що протікає через ємність затвор-стік, заряджає і ємність стік-ви-стік за межами порогової напруги V_{th} , що насамперед, включає пристрій. Це явище, що зветься ефектом Міллера, обмежує швидкість включення та впливає на форму сигналу. Найбільш простим вирішенням даної проблеми є розділення виходів драйвера та використання двох окремих затворних резисторів для включення та виключення. Оптимальний вибір значень цих резисторів дає високу ефективність та стабільність роботи *GaN*-транзистора.

Правильно побудована принципова схема та вибір елементної бази є необхідною умовою для проектування пристрою; для збільшення надійності пристрою необхідно мінімізувати проникнення завад від джерела живлення до схеми включення затвору транзистора. Сигнали з високим dV/dt та dI/dt у сукупності з мінімальною вхідною ємністю затвору та низькою пороговою напругою затвор-стік призводять до появи електромагнітних завад у схемі включення затвору та виникненню ефекту Міллера, які викликають осциляції струму стоку транзистора. Це може призвести до зниження ефективності роботи приладу або до відмови. Основною причиною виникнення пульсацій напруги являється паразитні індуктивності у схемі зворотного зв'язку. Таким чи-

ном, не меншу увагу необхідно виділяти проектуванню друкованої плати. Оптимізація компоновки елементів друкованої плати дає більшу ефективність та стабільність роботи приладу, що потребує проведення ефективної трасування друкованої плати з мікроелектронною базою.

Висновки

Використання транзисторів на основі нітриду галію являється перспективним напрямом у розробці силових радіоелектронних пристроїв.

За рахунок того, що транзистори на основі нітриду галію ефективні ніж кремнієві аналоги за такими параметрами, як опір відкритого каналу та внутрішня ємність, їх використання у потужних імпульсних блоках живлення з великими вихідними струмами та робочими частотами, являється доцільним.

Тим не менш, швидкості перемикання та можливості роботи *GaN*-транзисторів, потребують більшої уваги при розробці приладу. Необхідно детально проаналізувати характер перемикання транзистора, характеристику струмів, можливих завад та паразитних зв'язків. Тому необхідно уділяти увагу усім етап конструювання пристрою на основі *GaN*-транзисторів, від схемотехнічних задач до проектування друкованих плат.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВОРотноХОДОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

У цьому розділі розглядаються особливості та використання зворотноходових перетворювачів у практичних цілях.

2.1 ВИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ВИКОРИСТАННЯ

Зворотноходовий перетворювач (*flyback convertor*) являє собою наразі найбільш популярне рішення для імпульсних джерел живлення. Його широке використовують в більшості споживчих товарів: адаптери для ноутбуків, DVD-плеєри, телевізійні приставки, ЖК-телевізори і т.д. Простота топології поєднуються з необхідністю ефективного захисту від електромагнітних завад та пульсацій напруги на виході [7].

Перетворювач являється перемикаючим-перетворювачем постійного струму з гальванічною розв'язкою між входом та виходом. Основним елементом перетворювача є трансформатор, який ізолює вхід від виходу в силовій частині пристрою. Трансформатор дозволяє перетворювачам досягати значно більших чи менших значень функції передачі постійного струму, ніж їхні безтрансформаторні аналоги. Оскільки робоча частота ШІМ-перетворювачів значно перевищує частоту мережі, трансформатор, котушки індуктивності та конденсатори значно менші, ніж ті, які працюють на частоті мережі (50-60 Гц). Крім ізолювання, трансформатор дозволяє виконувати такі функції у *flyback*, як збереження магнітної енергії, зміна рівня напруги, додаткові обмотки дозволяють зробити більше ніж один вихід пристрою, що дозволяє використовувати один імпульсний блок живлення для багатьох призначень.

Flyback-перетворювач використовується у блоках живлення з енергоспоживанням, зазвичай від 10 до 200 Вт, з використанням польових транзисторів, як силового елемента, в залежності від потужності.

2.2 ПРИНЦИП РОБОТИ ЗВОРотноХОДОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Еквівалентна схема інвертованого та неінвертованого *flyback*-перетворювача показана на рис. 2.1 [9]. Вона складається з силового транзистора, який функціонує, як перемикач для трансформатора, діода та фільтруючого конденсатора. Трансформатор виконує дві функції: забезпечує ізоляцію постійного струму та накопичує магнітну енергію.

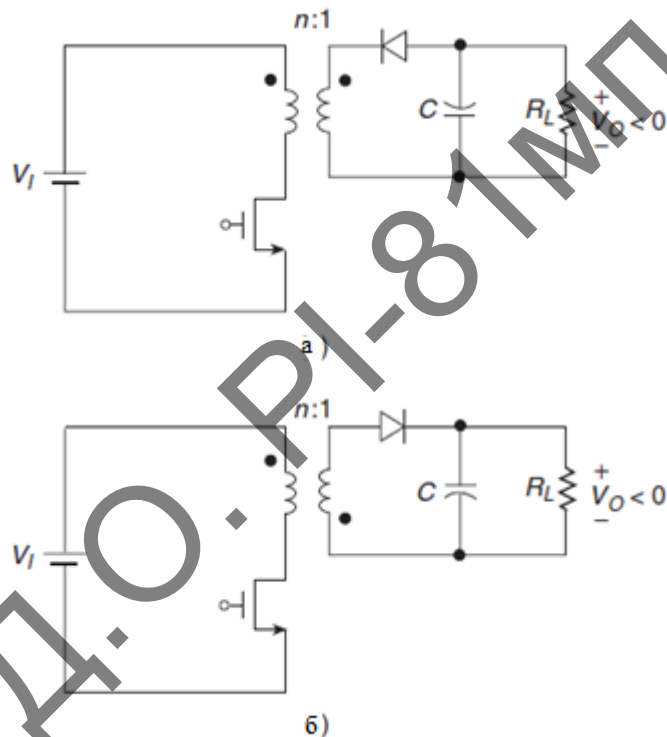


Рисунок 2.1 — Еквівалентна схема *flyback*-перетворювача: а) інвертованого; б) неінвертованого

Рівень потужності, зазвичай, у перетворювачів даного типу сягає 20-200 Вт. Існує декілька режимів роботи *flyback*-перетворювачів. Режим неперервної провідності (CCM), показаний на рис. 2.2, працює за принципом постійного протікання струму через трансформатор упродовж кожного циклу. Коли транзистор закритий, струм на трансформаторі збільшується. Коли ж транзистор виключений, енергія з трансформатора передається через вторинну обмотку та розмагнічує трансформатор. Остаточна енергія залишається у трансформаторі до наступного циклу, тому струм там не досягає нуля.

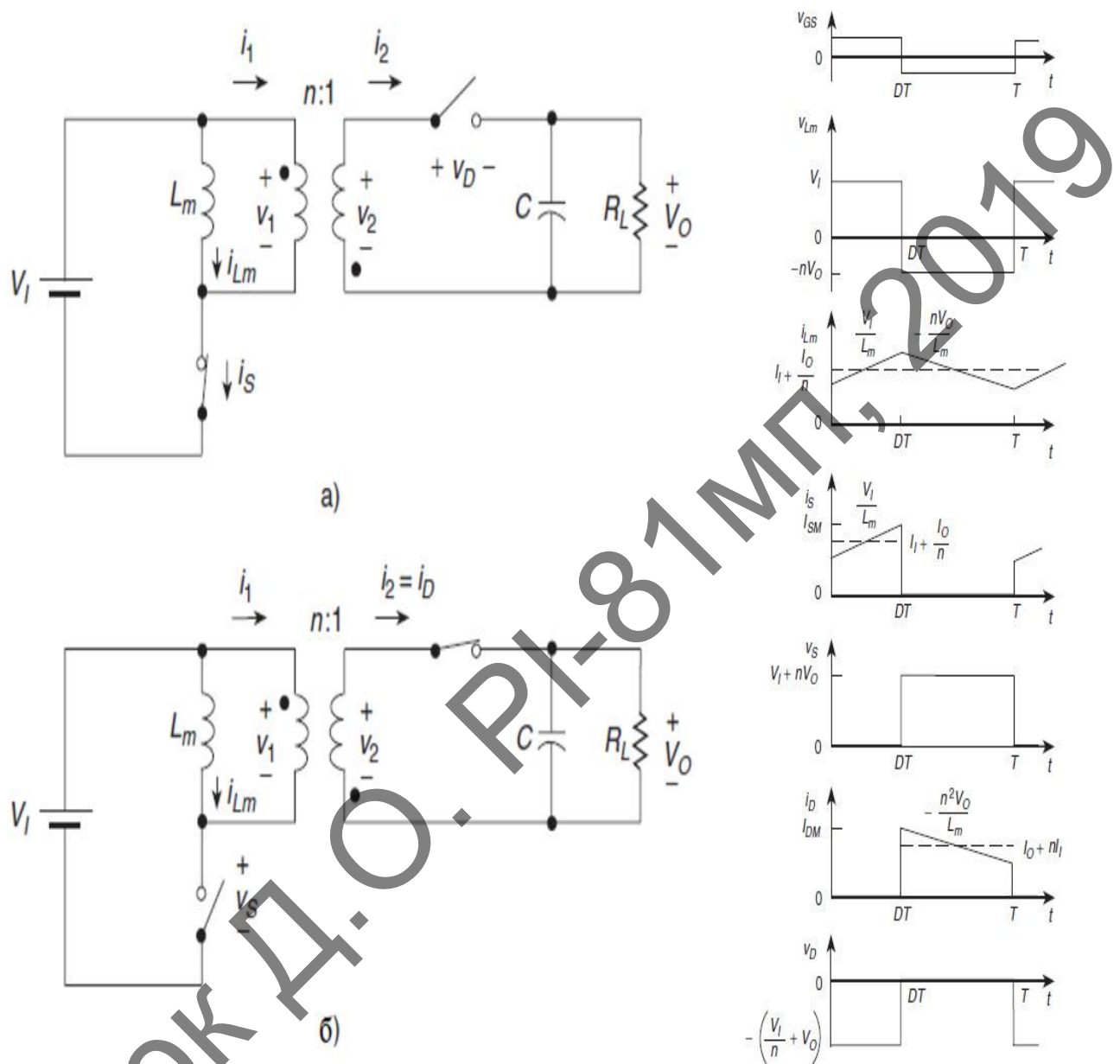


Рисунок 2.2 — Еквівалентна схема *flyback*-перетворювача в режимі CCM: а) транзистор відкритий, діод закритий; б) транзистор закритий, діод відкритий; в) Ідеалізовані форми напруги та струму

Серед переваг цього режиму роботи являється низький рівень пікового струму, більш низьке значення середньоквадратичного струму (*RMS*) та струми пульсації, менші втрати. Недоліком є те, що потребується більш потужний трансформатор.

Режим перерваної провідності (*DCM*), показаний на рис. 2.3, працює за принципом, коли енергія, накопичена у осерді трансформатора, подається на

вторинну обмотку під час фази виключення, тоді як струм в первинній обмотці падає до нуля до наступного циклу переключення. Вторинна обмотка трансформатора розряджає всю накопичену енергію, поки струм на діоді не впаде до нуля до наступного циклу.

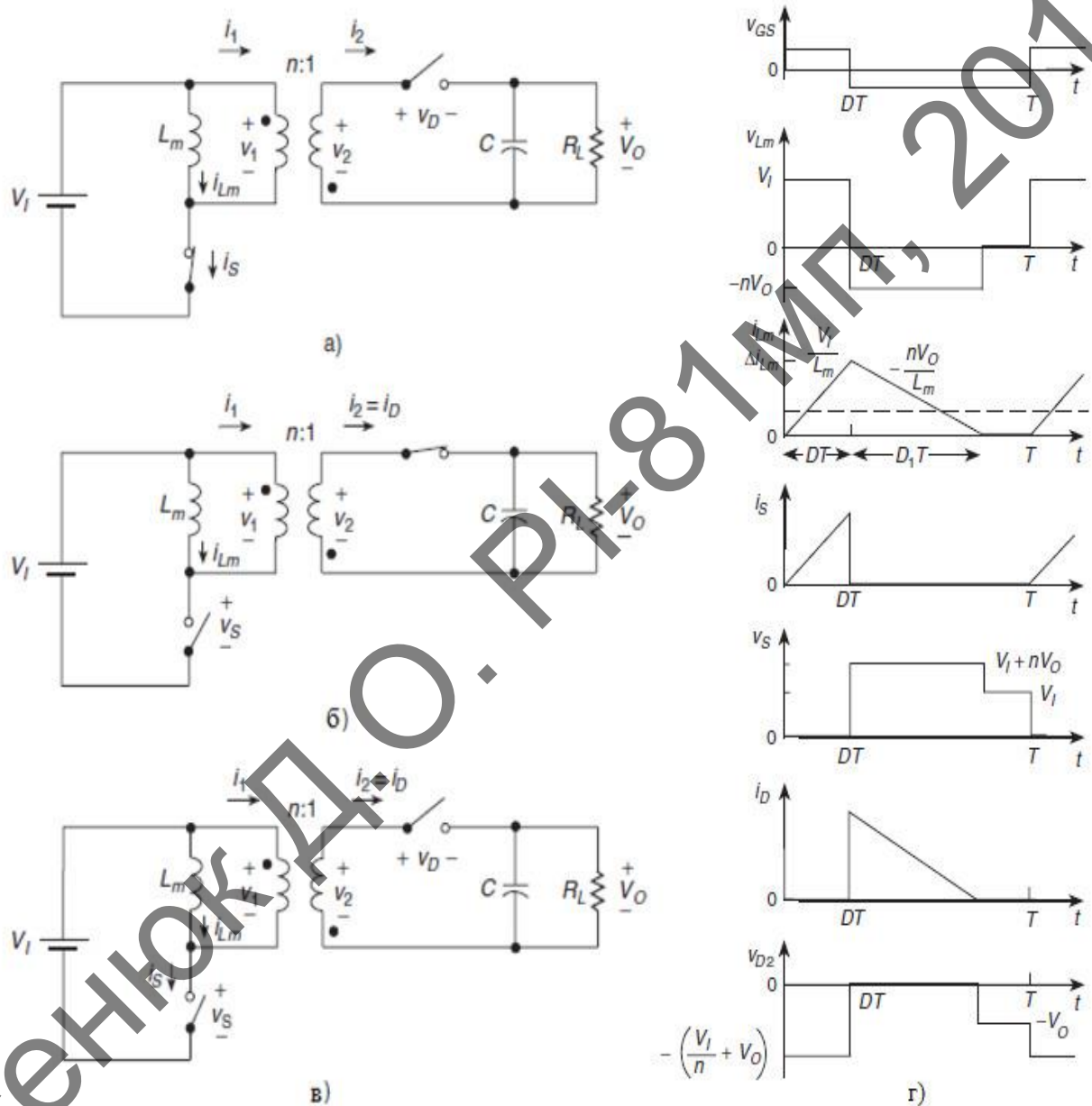


Рисунок 2.3 — Еквівалентна схема *flyback*-перетворювача в режимі *DCM*: а) транзистор відкритий, діод закритий; б) транзистор закритий, діод відкритий; в) транзистор та діод закритий г) Ідеалізовані форми напруги та струму

Перевагою цього режиму роботи відсутність втрат відновлення на вихідному діоді, менша індуктивність первинної обмотки, більш швидкий перехідний процес. Недоліки режиму — більш високі пульсації струму, необхідність у фільтрі.

Таким чином, використання різних типів роботи перетворювача дає змогу легше налаштувати прилад під певні види задач. Для малопотужних блоків живлення (до 50 Вт) використовується режим роботи *DCM*, що дозволяє використовувати трансформатор меншої потужності.

Висновки

Звратноходовий перетворювач являє собою ефективне рішення при розробках імпульсних блоків живлення за рахунок його простоти та дешевизни. Але топологія приладу використовує гальванічний розв'язок за допомогою трансформатора, що є його одним із недоліків. При розробці пристрою необхідно враховувати втрати у трансформаторі, що позначиться на ефективності роботи приладу, топологію легко налаштувати на необхідний режим роботи, подавати струм неперервно чи циклічно подавати струм з трансформатора на вихід пристрою. Використання імпульсних блоків живлення зворотноходових перетворювачів доцільно при вихідних потужностях до 200-300 Вт. Саме тому, дослідження топології у приладі з *GaN*-транзистором являється необхідним.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ БЛОКІВ ЖИВЛЕННЯ

У цьому розділі аналізуються існуючі аналоги імпульсних блоків живлення різних конфігурацій. Отримані результати аналізу приводяться для дослідження ефективності спроектованого пристрою.

3.1 ОГЛЯД ДОСТУПНИХ АНАЛОГІВ БЛОКІВ ЖИВЛЕННЯ

На сьогоднішній час на ринку існує велика кількість імпульсних блоків живлення, зроблених за топологіє *flyback* у зв'язку з тим, що простота топології дозволяє застосовувати їх у широкому призначенні. Розглянемо, як приклад, блок живлення потужністю 6 Вт маркою *PMP30308* виробництва *Texas Instruments*.



Рисунок 3.1 — Імпульсний блок живлення *PMP30308*

Даний блок живлення розроблений під режим роботи *DCM* працює від 10.8 до 13.2 В напруги живлення та видає на виході напругу приблизно 24 В та вихідний струм в 250 мА. Контролює пристрій контролер типу *TPS40210*, який дозволяє працювати при швидкості перемикання в 200 кГц. Контролер живиться від додаткової обмотки трансформатора. Головним транзистором слугує кремнієвий *n*-канальний польовий транзистор.

Дослідимо роботу польового транзистора за характеристиками, наданими виробником. На рис. 3.2 зображена характеристика напруги стік-витік. Мо-

жемо бачити втрати, які виникають під час включення із-за розрядки внутрішньої ємності транзистора, що обумовлено втратами на трансформаторі. Використання *GaN*-транзисторів дозволяє компенсувати енергетичні втрати та збільшити енергоефективність приладу.

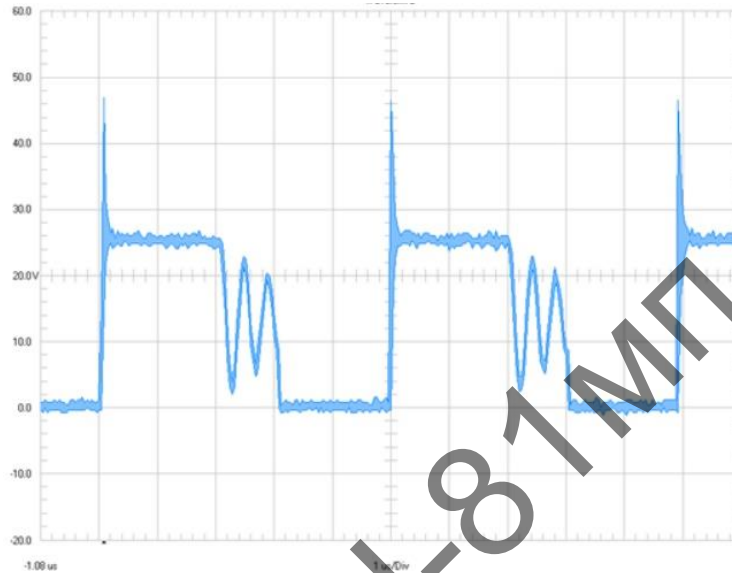


Рисунок 3.2 — Характеристика напруги стік-витік польового транзистора блоку живлення марки *RMP30308*

На рис. 3.3 зображені пульсації вихідної напруги блоку живлення. Одним із способів вирішення проблеми великих пульсацій напруги — у використанні декількох паралельно підключених конденсаторів, чи одного значно більшої ємності.

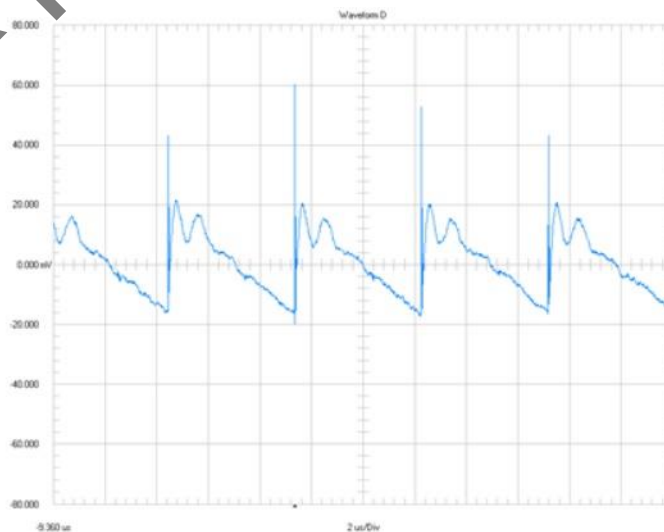


Рисунок 3.3 — Пульсації вихідної напруги блоку живлення марки *RMP30308*

Таким чином, пульсації напруги аналога неприпустимо великі і потребують зменшення.

Розглянутий блок живлення має значні втрати на силових елементах, які зменшують енергоефективність приладу. Тому, при проектуванні експериментального блоку живлення необхідно використовувати нові схемотехнічні та конструктивні рішення.

3.2 ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМОТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ ЗВОРотноХОДОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Для того, щоб дослідити роль *GaN*-транзистора у схемі імпульсного блоку живлення топології *flyback*, необхідно дослідити і порівняти поведінку блоку живлення з звичайним кремнієвим транзистором. У якості прикладу, розглянемо модель блоку живлення, зображену на рис. 3.4, змодельований у програмі модулювання *LTSpice*.

Блок живлення працює від вхідної напруги постійного струму 320 В. Зворотноходовий перетворювач працює у режимі *DCM*. Вихідна потужність цього блоку живлення 10 Вт. У ролі контролера слугує ШІМ-контролер типу *LTC3803*, який споживається від додаткової вторинної обмотки трансформатора.

Транзистор *n*-канальний польовий типу *STP8NM60* з максимальною напругою стік-витік 650 В, максимально допустимим струмом стоку 8 А та опором включення в 1 Ом.

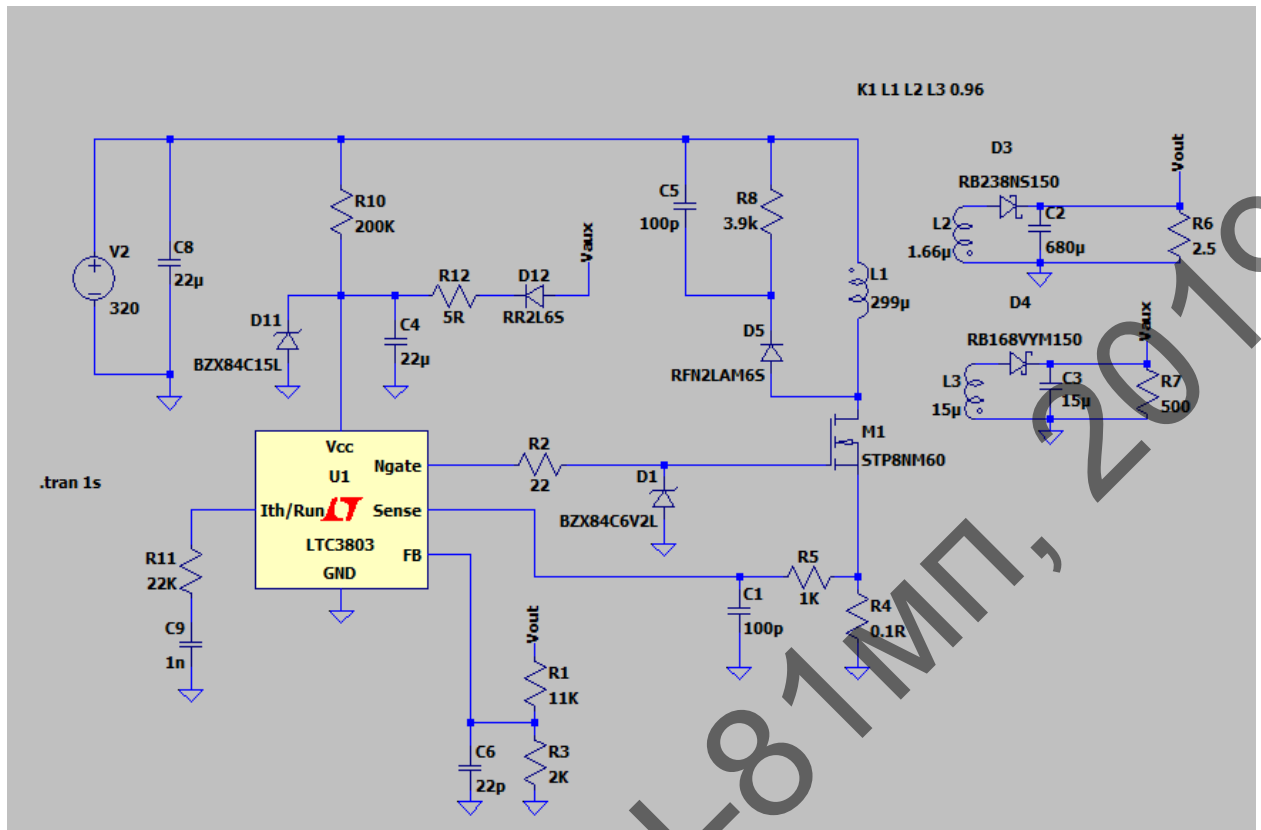


Рисунок 3.4 — Модель блоку живлення потужністю зроблений за топологією *flyback* з кремнієвим польовим транзистором

На рис. 3.5 зображено характеристику напруги та струму стік-витік польового кремнієвого транзистора.

Стрибки напруги та осциляції викликані взаємодією індуктивністю розсіювання та вихідної ємності транзистора. Саме індуктивністю розсіювання викликає стрибок напруги [10].

Внутрішня ємність та час відновлення залежать від транзистора, але коли транзистор закритий, великі стрибки напруги, надходять до польового транзистора, який може після цього вийти з ладу. *RCD*-коло уповільнює швидкість наростання напруги dV/dt , тому воно лише зменшує величину стрибку напруги та частоту осциляцій [11].

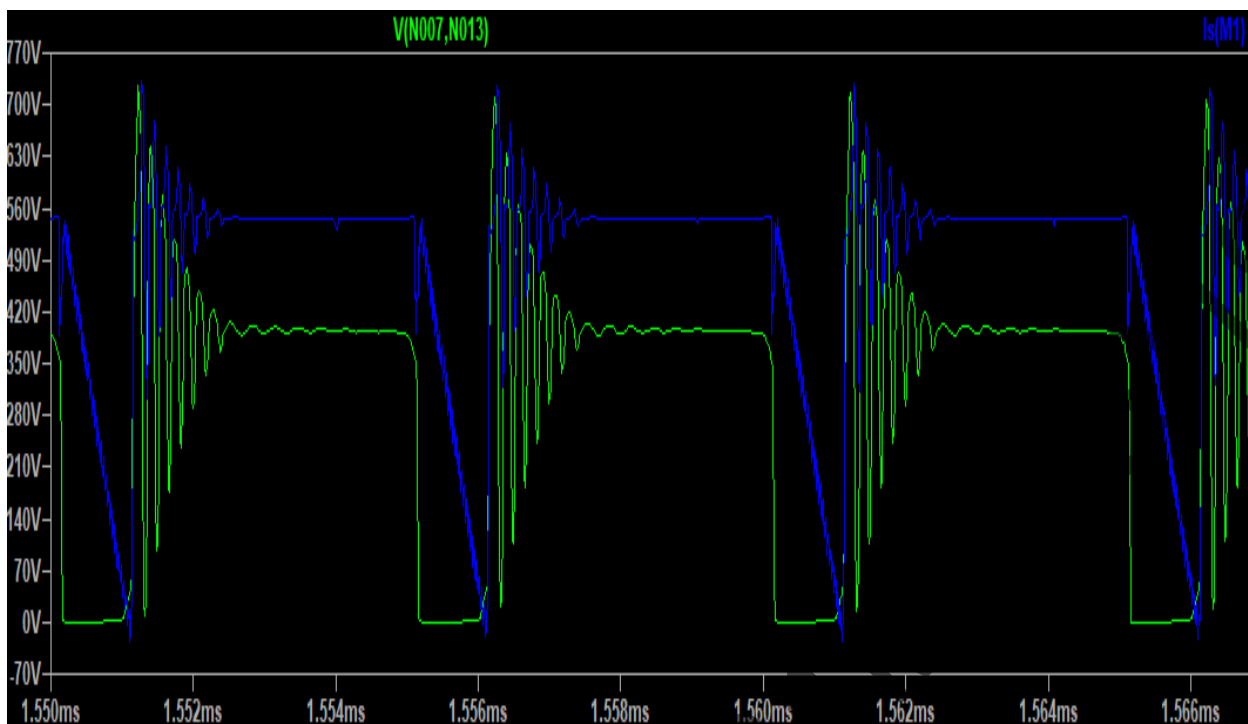


Рисунок 3.5 — Характеристика напругу та струму стік-витік польового транзистора блоку живлення (Крива зеленого кольору—напруга, синього—струм)

На характеристиці видно, що пульсації напруги стік-витік на польовому транзисторі складають 110-500 В частоту 10 кГц. Такі пульсації у приладі не бажані та потребують зменшення, як найменш на 40-50%.

Пульсації вихідної напруги блоку живлення, зображені на рис. 3.5.

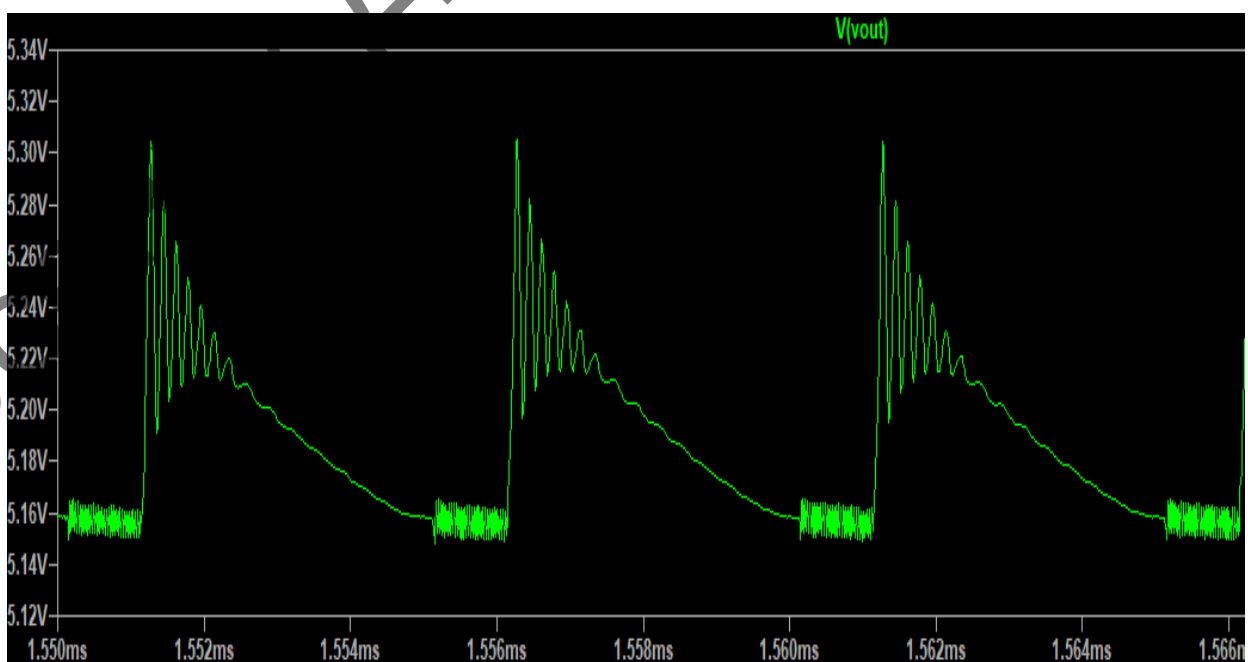


Рисунок 3.6 — Пульсації вихідної напруги блоку живлення

Пульсації вихідної напруги під час включення приладу складають приблизно 160 мВ частотою 6 МГц. Пульсації можна зменшити схемотехнічними методами.

Використання *GaN*-транзисторів та необхідних для цього схемотехнічних та конструктивних рішень дозволять досягти більшої стабільності роботи та високої енергоефективності блоку живлення.

Висновки

Огляд існуючих імпульсних блоків живлення дало змогу визначити основні проблеми використання стандартних кремнієвих польових транзисторів.

Як відомо, у трансформаторі під час включення виникають втрати на обмотках, які потрапляють на ключ транзистора, що спричиняє осциляції напруги та струму. Такі невеликі завади можуть не заважати роботі пристрою, але зменшують загальну ефективність її роботи.

Крім того, було перевірено на моделі використання малопотужного блоку живлення на кремнієвому транзисторі.

Зменшити завади на трансформаторі можливо схемотехнічним шляхом, але зменшення завади при переключенні транзистора можна досягнути лише використанням *GaN*-транзистора, що зроблено у наступному розділі представленої роботи.

4 ПРОЕКТУВАННЯ ПРИСТРОЮ БЛОКУ ЖИВЛЕННЯ

У цьому розділі наводяться результати проектування експериментального імпульсного блоку живлення з транзистором на основі нітриду галію.

4.1 ФОРМУВАННЯ ВИМОГ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ІМПУЛЬСНОГО БЛОКУ ЖИВЛЕННЯ

Для науково-дослідницької роботи по дослідженню роботи зворотного перетворювача з транзистором на основі нітриду галію необхідно спроектувати зразок блоку живлення для подальшого аналізу.

Пристрій мусить працювати від мережі живлення та водночас враховувати перебої електромережі. Вихідна потужність має складати 10 Вт. Напруга та струм на виході мають бути стабільні та мати мінімальні пульсації.

Частоту переключення транзистора обрано 350 кГц, для наочної демонстрації роботи транзистора на основі нітриду галію.

Таким чином, вхідними параметрами для розрахунку приладу є:

- Вхідна напруга 90-220 В;
- Вихідна напруга 5 В;
- Вихідний струм 2 А;
- Частота переключення транзистора 320 кГц;

Використання галій-нітридного транзистора передбачає певні вимоги до проектування принципової схеми та друкованої плати. Насамперед, для забезпечення роботи пристрою необхідно використовувати певні схемотехнічні рішення, які давали б змогу ефективніше використовувати потужний транзистор.

При розробленні друкованої плати пристрою блоку живлення необхідно звертати увагу на оптимальну компоновку схеми та трасування, щоб уникнути виникнення паразитних зав'язків, які могли би зашкодити роботі пристрою.

4.2 ПРОЕКТУВАННЯ ІМПУЛЬСНОГО БЛОКУ ЖИВЛЕННЯ ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТОЇ БАЗИ

Проектування принципової схеми пристрою почнемо з вибору режиму роботи пристрою [12]. У режимі *DCM* вся енергія, що зберігається в осерді трансформатора, повністю поставляється до вторинної обмотки, під час фази виключення. У режимі *CCM* енергія, що запасена у трансформаторі, не повністю поставляється до вторинної обмотки, до наступного циклу включення струм на вторинній обмотці трансформатора не досягає нуля.

Переваги *CCM* — низький піковий струм, більш низькі рівні *RMS* та струми пульсації, менші втрати, недоліком є необхідність використання індуктивність трансформатора більш великого значення.

Переваги *DCM* — відсутність втрат відновлення на вихідному діоді, менша індуктивність на первинній обмотці, швидкий перехідний процес. Недоліки — більш високі пульсації струму, необхідність у вхідному фільтрі.

У цій роботі застосовано режим *DCM*, так як у цьому режимі потребується менший трансформатор та, враховуючи його переваги, він більше підходить для проектування з низьким енергоспоживанням.

Головною вимогою для вибору ШІМ-контролера є відповідність вимогам, простота розробки та необхідна технічна база. У даному випадку застосовано контролер типу *LT3803* виробництва *Analog Devices* [13].

Характеристики контролера:

- Максимальна вхідна напруга 9,2 В;
- Максимальний вхідний струм 350 мкА;
- Вихідна напруга -0,3 В до значення, відповідного режиму *VCC*;
- Максимальний вихідний струм (при довжині імпульсу до 10 мкс) 1 А;

На рис. 4.1 зображена функціональна схема ШІМ контролера.

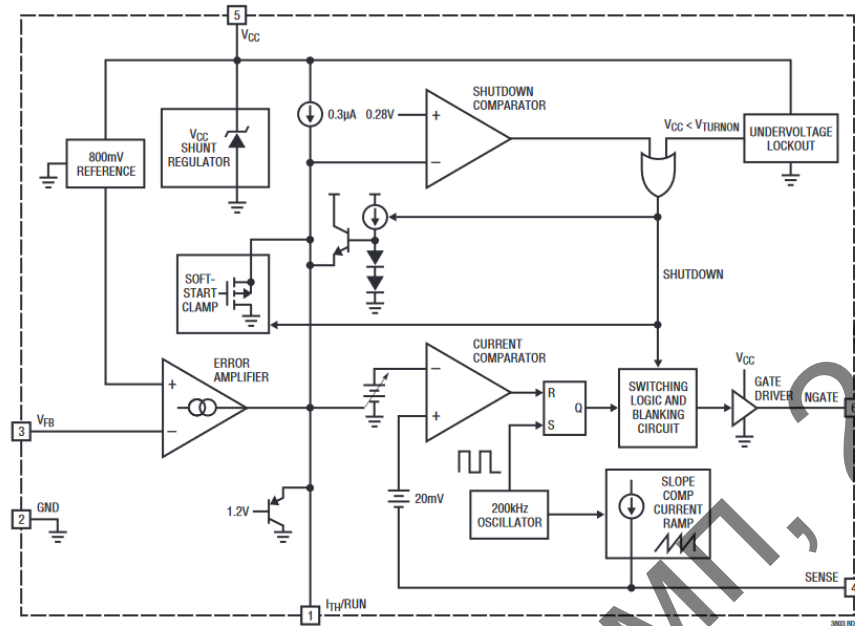


Рисунок 4.1 — Функціональна схема ШІМ-контролера типу *LTC3803*

У якості *GaN*-транзистора використано транзистор типу *GS-065-004-1-L* виробництва *GaN Systems* [14].

Характеристики транзистора:

- Максимальна напруга стік-витік 650 В;
- Опір включення на стоку-витіку 500 мОм;
- Максимальний струм на стоку-витіку 3,5 А;
- Запуск транзистора (від 0 В до 6 В);
- Частота переключення (> 10 МГц);
- Відсутність втрат при відновленні.

GaN-транзистори забезпечують високу швидкість перемикання, тому для нього потрібен драйвер затвору, який би забезпечував високу ефективність та надійність у імпульсному джерелі живлення. Вибираючи драйвер, необхідно звернути увагу на час включення/виключення, час затримки, частоту перемикання, оптимальну напругу включення та обмеження струму. За цими критеріями було використано драйвер типу *LMG1020* виробленої *Texas Instruments* [15].

Його основні характеристики:

- Наруга живлення 5 В;
- Максимальна вихідна напруга 6 В;
- Мінімальна ширина (часова протяжність) вхідного імпульсу 1 нс;
- Робоча частота до 60 МГц;
- Середня затримка 2,5 нс, максимальна 4,5 нс;
- Час включення та виключення в середньому 400 пс;
- Блокування живлення при зменшенні напруги та захист від перегріву.

На рис. 4.2 показана функціональна блок-схема пристрою. На рисунку 4.3 показана схема включення.

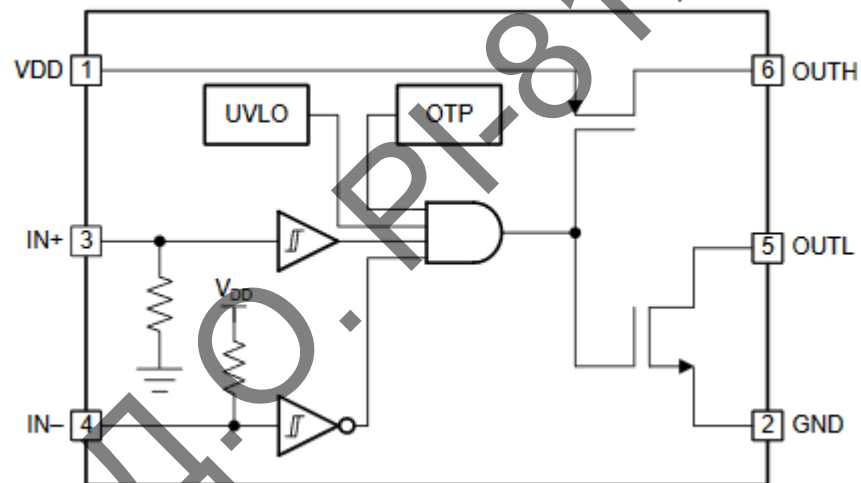


Рисунок 4.2 — Функціональна блок-схема драйвера *GaN*-транзистора типу *LMG1020*

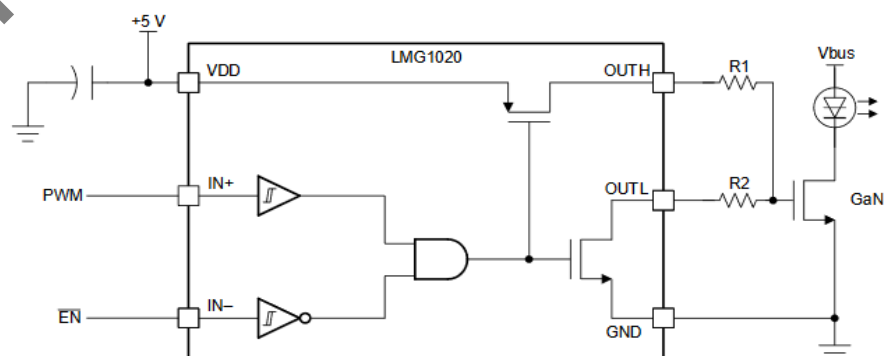


Рисунок 4.3 — Схема включення драйвера *GaN*-транзистора типу *LMG1020*

Драйвер типу *LMG1020* має два незалежних виходи для підключення затворних резисторів *OUTH* та *OUTL*.

Вхідний конденсатор C_{in} використовується для зменшення пульсацій у вхідній напрузі постійного струму та захисту від імпульсних стрибків напруги. Для заданого робочого діапазону краще використовувати конденсатор не більше 2 мкФ на Ват вхідної потужності.

Максимальна вхідна потужність:

$$P_{inmax} = \frac{P_{out}}{\text{ККД}} = \frac{10}{0,85} \approx 12 \text{ Вт},$$

де ККД (0,85) вибрано з міркувань максимальної ефективності даної топології.

Необхідна ємність вхідного конденсатора:

$$C_{in} = \frac{2 \text{ мкФ}}{\text{Вт}} * P_{inmax} \approx 24 \text{ мкФ}.$$

Напруга відбиття V_r являє собою напругу на первинній обмотці трансформатора, коли пристрій вимкнений. Розрахунок максимальної напруги на стіку-витіку визначається за формулою:

$$V_{DSmax} = V_{DCmax} + V_r + V_{spikes}, \quad (4.1)$$

де V_{DCmax} — максимальна вхідна напруга пристрою, V_{spikes} — стрибок напруги викликаний індуктивністю розсіювання трансформатора, припустимо що він 30% від V_{DSmax} .

Вибір напруги відбиття являється компромісом між напругою на польовому транзисторі та напругою на вихідному діоді. Встановлення занадто великого значення V_r буде означати більший V_{DSmax} , але більш низьку напругу на діоді та навпаки. Для 650 В транзистора V_r становить 80 В, тому максимальна напруга становить:

$$V_{DSmax} = 320 \text{ В} + 80 \text{ В} + 30\%V_{spikes} = 520 \text{ В}.$$

Максимальний робочий цикл з'являється при мінімальній вхідній напрузі V_{DCmin} , при цій умові проектується трансформатор, який буде на границі роботи між режимами *DCM* та *CCM*. Розрахунок робочого циклу:

$$D_{max} = \frac{V_r}{V_r + V_{DCmin}} = 0,471.$$

Розрахунок пікового струму на первинній обмотці трансформатора:

$$I_p = \frac{2 * P_{inmax}}{V_{DCmin} * D_{max}} = \frac{2 * 12 \text{ Вт}}{90 \text{ В} * 0,471} = 0,566 \text{ А}$$

Індуктивність первинної обмотки повинна бути розрахована у межах максимального робочого циклу:

$$L_p = \frac{V_{DCmin} * D_{max}}{I_p * f_{sw}} = \frac{90 \text{ В} * 0,471}{0,566 \text{ А} * 250 \text{ кГц}} = 299 \text{ мкГн.}$$

Щоб гарантувати забезпечення роботи блоку живлення у режимі *DCM* необхідно урахувати максимальну потужність приладу. Збільшення індуктивності понад розрахункового L_p також може підштовхнути перетворювач до роботи у режимі *CCM*.

Вибір основного типу та геометрії трансформатора зазвичай включає в себе багато факторів, які потрібно враховувати. Необхідно врахувати геометрію феритового осердя (як наприклад *EE, RM, PQ*), розмір осердя та його матеріал (*3F3, N87*, тощо).

Необхідно знайти потрібний показник $W_a A_c$ за формулою:

$$W_a A_c \geq \frac{P_{out}}{K_c K_t B_{max} f_{sw} J} * 10^4, \quad (4.2)$$

де $W_a A_c$ — показник вікна та основи осердя, см^4 ;

J — щільність струму $\frac{\text{А}}{\text{см}^2}$;

B_{max} — максимальна щільність магнітного потоку, T ;

K_t — константа топології, котра характеризує коефіцієнт заповнення вікна [9];

K_c — константа перетворення у систему *SI*;

Для *flyback* перетворювача з декількома обмотками виготовується $K_t = 0,00025$.

Щільність струму для пристроїв такого рівня потужності з природнім конвекційним охолодженням становить 400 А/см^2 (4 А/мм^2).

Щільність потоку для більш поширених феритів, таких як матеріал 3F35, при такій частоті перемикання становить 144 мТ.

Показник вікна осердя $W_a A_c$ становить:

$$W_a A_c \geq \frac{10 \text{ Вт}}{507 * 0,00025 * 144 \text{ мТ} * 250 \text{ кГц} * 400 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}} * 10^4 \geq 0,055 \text{ см}^4$$

Використовуючи існуючі каталоги феритів було обрано ферит 3F35 типорозміру EE 30/15/7, площа якого становить $A_c = 60 \text{ мм}^2$.

Мінімальна кількість витків на первинній обмотці залежить від площі феритового осердя та щільності потоку:

$$N_p = \frac{L_p I_p}{B_{max} A_e} = \frac{299 \text{ мкГн} * 0,566 \text{ А}}{144 \text{ мТ} * 60 \text{ мм}^2} = 19,65 \approx 20 \text{ витків.}$$

Для того, щоб розрахувати кількість витків на вторинній обмотці визначимо коефіцієнт витків n :

$$n = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_r}{V_{out} + V_D} = \frac{80}{5 + 0,5} = 14,5,$$

де V_D — падіння напруги на діоді вторинної обмотки (для діодів Шоткі становить 0,5 В).

Кількість витків для вторинної обмотки становить:

$$N_s = \frac{N_p}{n} = 1,37 \approx 2 \text{ витка}$$

Додаткова обмотка необхідна для живлення ШІМ-контролера та драйвера GaN-транзистора. Вихідна напруга необхідна бути приблизно 10 В. Кількість витків для додаткової обмотки становить:

$$N_{AUX} = \frac{V_{AUX} + V_{DAUX}}{V_{out} + V_D} = \frac{10 + 0,5}{5 + 0,5} = 2 \text{ витка.}$$

Для визначення необхідного розміру дроту слід обчислити струм приладу RMS для кожної обмотки.

Струм RMS для первинної обмотки:

$$I_{pRMS} = I_p * \sqrt{\frac{D_{max}}{3}} = 0,566 \text{ A} * \sqrt{\frac{0,471}{3}} = 0,244 \text{ A}.$$

Піковий струм та струм *RMS* для вторинної обмотки:

$$I_{spk} = I_p * \frac{N_p}{N_s} = 0,566 \text{ A} * \frac{20}{2} = 5,66 \text{ A}$$

$$I_{sRMS} = I_{spk} * \sqrt{\frac{1 - D_{max}}{3}} = 5,66 \text{ A} * \sqrt{\frac{1 - 0,471}{3}} = 2,38 \text{ A}.$$

Піковий струм та струм *RMS* для додаткової обмотки:

$$I_{auxpk} = 0,566 \text{ A} * \frac{20}{2} = 5,66 \text{ A}$$

$$I_{auxRMS} = 5,66 \text{ A} * \sqrt{\frac{1 - 0,471}{3}} = 2,37 \text{ A}.$$

Використовуючи каталоги, було обрано типорозмір дроту *SWG32* для первинної обмотки, *SWG22* для вторинних обмоток.

В той час, коли прилад виключений, на транзисторі з'являється високий сплеск напруги через індуктивних викидів трансформатора до транзистора.

Існує два типи захисту транзистора, який застосовують: фіксує *RCD* коло та обмежувач індуктивних викидів за допомогою стабілітрона. Схеми захисту показані на рис. 4.4 [12].

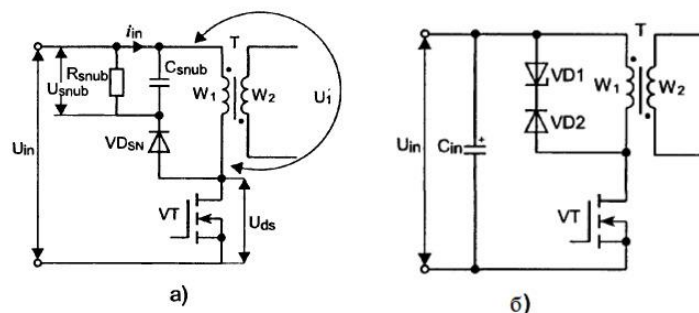


Рисунок 4.4 — Захист ключового транзистора від потенційного пробую: а) фіксує *RCD*-коло; б) обмежувач індуктивних викидів за допомогою стабілітрона.

Найбільш ефективний спосіб — використовувати обмежувач із стабілітрона та діода. Стабілітрон ефективно обмежує стрибки напруги до тих пір, поки енергія повністю не розсіється у стабілітроні. Перевагою такої схеми є те, що воно обмежує напругу тоді, коли значення V_r та V_{spikes} перевищують напругу пробою. При низьких навантаженнях, коли скачки напруги малі, потужність може не розсіюватися в колі.

Для цього кола необхідно вибрати стабілітрон, напруга пробою приблизно вдвічі більша, ніж напруга відбиття V_r , діод напругою пробою вища, ніж максимальна вхідна напруга пристрою.

Для вибору вихідного діоду необхідно розрахувати напругу відбиття та значення прямого випрямленого струму. Максимальна напруга відбиття повинна бути на 30% вища, ніж розрахована напруга відбиття. Максимальний прямий струм повинен бути вище на 50% ніж струм RMS на обмотці. Найкращим рішенням буде використання діодів Шоткі, що забезпечить менші енергетичні втрати.

Розрахунок напруги відбиття та прямого струму діода на виході вторинної обмотки:

$$V_{RV} = V_{out} + V_{DCmax} * \frac{N_s}{N_p} = 5 \text{ В} + 320 \text{ В} * \frac{2}{20} = 37 \text{ В}$$

$$I_{sRMS} = 2,38 \text{ А}$$

Розрахунок напруги відбиття та прямого струму діода на виході додаткової обмотки:

$$V_{RV} = 10 \text{ В} + 320 \text{ В} * \frac{2}{20} = 42 \text{ В}$$

$$I_{auxRMS} = 4.72 \text{ А.}$$

Для вибору вихідного конденсатора необхідно визначитись з наступними параметрами: ємність, еквівалентний послідовний опір (ESR), значення струму RMS на конденсаторі.

Ємність вихідного конденсатора розраховуємо за формулою:

$$C_{out} = \frac{I_o N_{cp}}{f_{sw} V_{out_ripples}}, \quad (4.3)$$

де I_o — максимальний вихідний струм, N_{cp} — кількість внутрішнього тактового циклу імпульсів, необхідний для керування робочого циклу з максимального до мінімального значення, припустимо, що значення періоду переключення 20, $V_{out_ripples}$ —пульсації напруги на виході.

Отже, для різних значень $V_{out_ripples}$ ємність C_{out} дорівнює:

$$V_{out_ripples} = 120 \text{ мВ: } C_{out} = 1333,3 \text{ мкФ;}$$

$$V_{out_ripples} = 240 \text{ мВ: } C_{out} = 666,6 \text{ мкФ;}$$

$$V_{out_ripples} = 480 \text{ мВ: } C_{out} = 333 \text{ мкФ;}$$

$$V_{out_ripples} = 960 \text{ мВ: } C_{out} = 166,6 \text{ мкФ;}$$

Мінімальний струм RMS конденсатора дорівнює:

$$I_{capRMS} = \sqrt{I_{SRMS}^2 - I_o^2} = \sqrt{2,38^2 \text{ А} - 2^2 \text{ А}} = 1,28 \text{ А.}$$

Враховуючи високу частоту переключення, високий піковий струм на вторинній обмотці можливі випадки створення пульсуючої напруги, котра проходить на виході ESR конденсатора. Конденсатор не повинен перевищувати значення максимального ESR . Максимальний ESR конденсатора розраховується за формулою:

$$ESR_{max} < \frac{V_{out_ripples}}{I_{spk}}, \quad (4.4)$$

Отже, при різних значеннях $V_{out_ripples}$:

$$V_{out_ripples} = 120 \text{ мВ: } ESR_{max} < 0,021$$

$$V_{out_ripples} = 240 \text{ мВ: } ESR_{max} < 0,042$$

$$V_{out_ripples} = 480 \text{ мВ: } ESR_{max} < 0,085$$

$$V_{out_ripples} = 960 \text{ мВ: } ESR_{max} < 0,17$$

Розрахунок ємності вихідного конденсатора для додаткової обмотки дає:

$$V_{out_ripples} = 120 \text{ мВ: } C_{out} = 33,3 \text{ мкФ;}$$

$$V_{out_ripples} = 240 \text{ мВ}; C_{out} = 16,6 \text{ мкФ};$$

$$V_{out_ripples} = 480 \text{ мВ}; C_{out} = 8,3 \text{ мкФ};$$

$$V_{out_ripples} = 960 \text{ мВ}; C_{out} = 4,2 \text{ мкФ};$$

Мінімальний струм RMS для вихідного конденсатора додаткової обмотки дорівнює $I_{capRMS} = 4,75 \text{ А}$.

Максимальний ESR конденсатора додаткової обмотки:

$$V_{out_ripples} = 120 \text{ мВ}; ESR_{max} < 0,012$$

$$V_{out_ripples} = 240 \text{ мВ}; ESR_{max} < 0,021$$

$$V_{out_ripples} = 480 \text{ мВ}; ESR_{max} < 0,042$$

$$V_{out_ripples} = 960 \text{ мВ}; ESR_{max} < 0,084.$$

Отже, спроектований зворотногоходовий перетворювач потужністю 10 Вт працює у режимі DCM . Використовується потужний транзистор на основі нітриду галію типу $GS-065-004-1-L$, котрий задовольняє по такими параметрами, як максимальної напруги стік-витік, струму стоку та опору включення. Спроектований трансформатор типорозміру феритового осердя $EE 30/15/7$, котрий задовольняє за параметрами пікового струму та струму RMS на обмотках. Елементна база на виході пристрою забезпечує необхідну напругу та струм.

Таким чином, розроблена елементна база проектованого пристрою задовольняє заданим вимогам для дослідження роботи імпульсного джерела живлення за галій-нітридним транзистором.

4.3 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИЦНИПОВОЇ

Flyback-перетворювач працює в режимі DCM . Під час включення, транзистор включається, енергія із входу зберігається у осерді трансформатора. Коли транзистор закритий, енергія в трансформаторі переходить до вторинної обмотки. На вихідні діодах виникає пряме зміщення та енергія переходить до вихідного конденсатора та навантаження. Струм на первинній обмотці зменшуються до нуля до того, як транзистор ввімкнеться знову. Вторинна обмотка

розрядиться та струм на первинній обмотці почне збільшуватися з нуля у циклічному процесі.

Додаткова обмотка трансформатора живить ШІМ-контролер та драйвер *GaN*-транзистора. На рисунку 4.5 зображена принципова схема перетворювача.

Схема обмежувача із діодів *VD5* та *VD6* стабілізує напругу, яка подається до транзистора *VT3* та дозволяє зменшити викиди енергії на транзистор, із-за наявності яких пристрій може вийти з ладу.

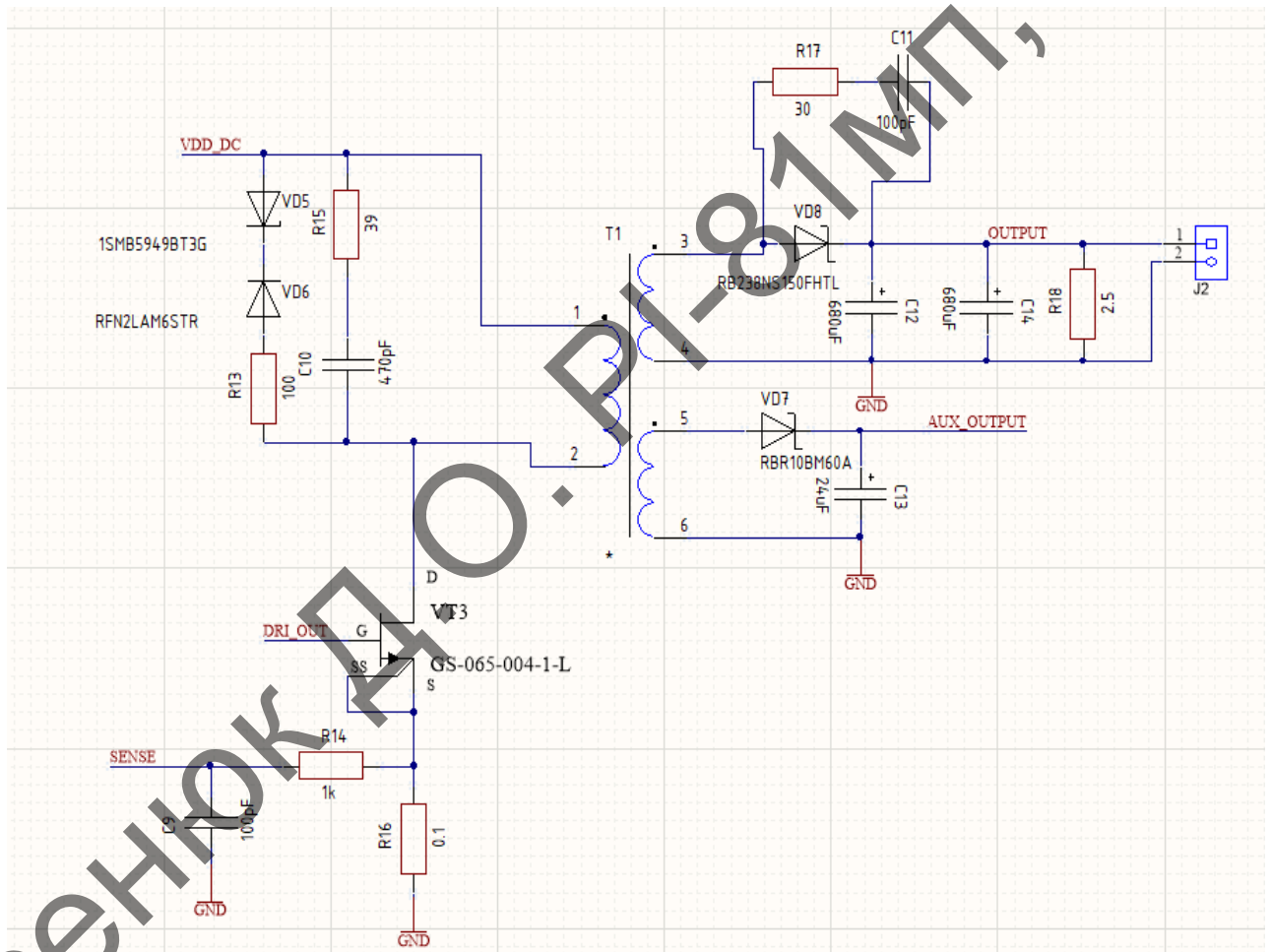


Рисунок 4.5 — Схема електрична принципова головного каскаду *flyback*-перетворювача

Шунтовий резистор *R16*, підключений до транзистора, дозволяє обмежити піковий струм переключення, котрий контролюється з ШІМ-контро-

лера, щоб забезпечити працездатності пристрою. Підключення ШІМ-контролера до транзистора забезпечується виводом *SENSE*, до якого підключено додатковий фільтр *C9*, *R14*.

Обрані діоди *D7* та *D8* обмежують індуктивні викиди для працездатності приладу. Вихідні конденсатори *C12*, *C13* та *C14* з низьким *ESR* грають роль фільтрів для зменшення вихідних пульсацій.

Для роботи пристрою необхідно забезпечити 90-320 В напруги постійного струму, для того щоб пристрій працював від мережі, підключено діодний міст *VD1* та два фільтруючих конденсатора *C1*, *C4*.

LTC3803 являє собою ШІМ-контролер створений для керування *n*-канальними польовими транзисторами або *GaN*-транзисторами при високій входній напрузі.

На рисунку 4.6 зображена принципова схема включення контролера.

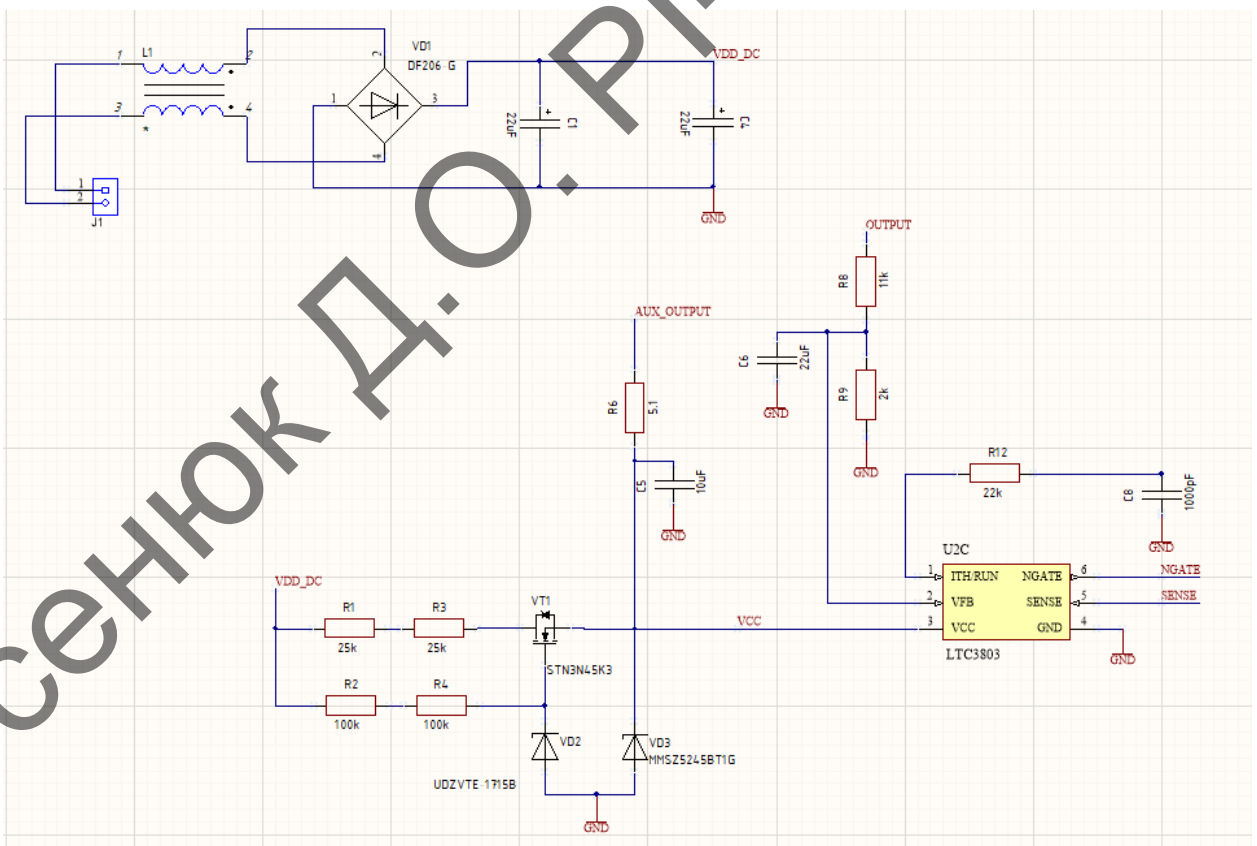


Рисунок 4.6 — Схема електрична принципова схеми живлення пристрою та підключення ШІМ-контролера *LTC3803*

ШИМ-контролер живиться через порт VCC при номінальній напрузі включення в 8,7 В. Контролер живиться від додаткової обмотки трансформатора, але цього не є достатньо. На запуск контролера впливає також зовнішній резистор включення та внутрішнього механізму блокування пониженої напруги. Резистор включення, під'єднаний до напруги живлення та подає невеликий струм до VCC . Згодом пристрій включається та зовнішній польовий транзистор починає подавати нормальний струм живлення, після чого контролер повністю забезпечується живленням із додаткової обмотки трансформатора. Контролер забезпечує операції перемикання для регулювання вихідної напруги на головному транзисторі с виводу $NGATE$ та стабілізації живлення. $LTC3803$ має два механізми короткострокового відключення: блокування пониженої напруги на виводі живлення VCC та примусове відключення усяк раз, коли зовнішнє коло призводить до низького контакту ITH/RUN . Напруга живлення, що подається через VCC повинна на мить перевищити, щоб забезпечити включення контролера. Потім напрузі VCC дозволяється зменшуватися на напругу відключення 5,7 В, перш ніж механізм блокування пониженої напруги відключить $LTC3803$. У простому випадку, контролер може житися від джерела високої напруги через резистор. Вбудований шунтуючий регулятор від порту VCC до GND буде споживати стільки струму, скільки необхідно через цей резистор, щоб регулювати напругу VCC приблизно до 9,5 В, поки до порту не буде подано струм більший ніж 25 мА. Отже, до живлення контролера підключено активну схему запуску, котра складається з польового транзистора $VT1$, стабілітрона $VD2$, резистори кола зміщення $R2$, $R4$ та резисторів включення $R1$, $R3$.

Вивід мікросхеми ITH/RUN слугує точкою компенсації для типу операційного підсилювача трансдуктивності (OTA), який слугує для детектування збоїв [16]. Якщо встановити цей вивід нижче пороги відключення, контролер відключиться. В режимі вимкнення вивід $NGATE$ знаходиться на низькому рівні. Також він слугує точкою компенсації для контуру керування. Як пра-

вило до *ITH/RUN* підключається зовнішній *RC*-контур *R12* та *C6*, котрий вибирається для оптимальної реакції на навантаження та перехідних процесів у мережі. Імпеданс цього *RC*-контура перетворює вихідний струм *OTA* на напругу *ITH/RUN*, котрий встановлює поріг порівняння струму та чинить значний вплив на динаміку контуру регулювання напруги.

Вихід *VFB* отримує напругу зворотного зв'язку від зовнішнього подільника напруги, котре потрібно спроектувати таким чином, щоб вихідний сигнал знаходився на необхідній напрузі, напруга на контакті *VFB* була рівно 800 мВ. Подільника напруги *R8*, *R9* можна розрахувати за формулою:

$$R8 = \frac{V_{out} - 0.8}{0.8} * R9. \quad (4.5)$$

Доцільним буде обрати *R8* = 11 кОм та *R9* = 2 кОм для мінімізації будь-яких завад та забезпечення помилок менше 1%.

LMG1020 — високоефективний драйвер затвору *GaN*-транзистора, який живиться від напруги 5 В та оптимізований для забезпечення мінімальної затримки від драйвера до силового транзистора, забезпечення необхідного рівня напруги та струму для прямого керування затвору перемикаючого пристрою.

Драйвер живиться від 5,7 В напруги. Для живлення використовується напруга від виходу додаткової обмотки трансформатора. Керування напругою здійснюється через схему запуску, яка включає *nnp*-транзистор *BSR14*, стабілітрон та резистор.

Резистор *R17*, котрий зміщує стабілітрон, також являється джерелом усього струму навантаження, тому зміна в навантаження модулює зміщення стабілітрона. Резистор вибирається так, аби:

$$R_{13} = \frac{V_{cc} - V_z}{I_z} \approx 10 \text{ кОм},$$

де V_z та I_z — напруга та струм стабілітрона.

На рис. 4.7 зображена схема включення драйвера.

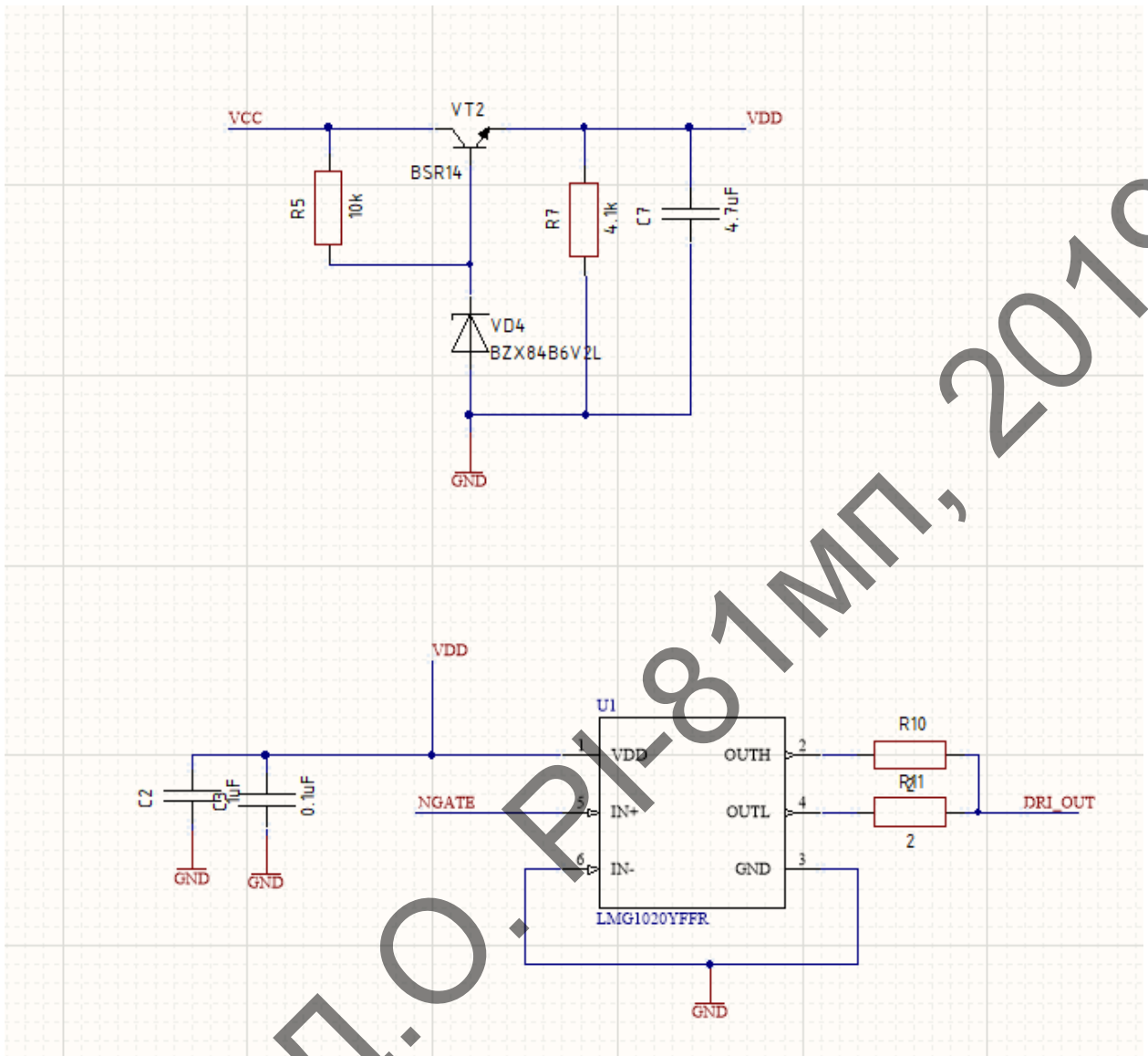


Рисунок 4.7 — Схема електрична принципова включення драйвера *GaN*-транзистора *LMG1020*

Для досягнення більшої ефективності використовується комбінація із конденсаторів ємністю 0,1 мкФ (ближчий до драйвера) та конденсатора 1 мкФ між *VDD* та *GND* для забезпечення пікового струму, споживаного через *VDD* під час включення транзистора. Вхідний каскад драйвера має тригери Шмітта на контактах *IN+* та *IN-* для зниження чутливості до шумів на вході. *LMG1020* забезпечує струм 7 А, піковий струм включення транзистора до 5 А та конфі-

гурацію з роздільним виходом. Виходи *OUTH* та *OUTL* дозволяють використовувати незалежні резистори підключені до затвору транзистора. Це дозволяє регулювати сигнал затвору, знешкоджуючи електромагнітні завади.

Таким чином, у спроектованій схемі розроблені схемотехнічні рішення, які підвищують працездатність зворотноходового перетворювача та дає змогу ефективніше використовувати особливості роботи транзисторів на основі нітриду галію.

4.4 ПРОЕКТУВАННЯ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ

Проектування схеми електричної принципової та вибір елементної бази являються необхідним, але не достатнім для ефективного функціонування імпульсного блоку живлення. На прикладі *GaN*-транзисторів, які мають високу швидкість переключення, необхідно мінімізувати електромагнітний вплив, які виникає у схемі затвору, особливо при підключенні драйвера транзистора. Крім цього, *flyback* перетворювач, як імпульсний блок живлення, керує напругою шляхом переключення. При цьому генеруються високочастотні електромагнітні завади, які за умови наявності зворотного зв'язку, який чутливий до паразитних зв'язків, які можуть призвести до відмови пристрою. Тому бажано використовувати багатопшарові друковані плати, так як це дозволить зменшити довжину друкованих провідників.

Для виготовлення друкованих плат та металізованих отворів у них доцільно використовувати комбінований позитивний метод виготовлення [18]. У цьому методі травлення малюнку виконується вже після металізації отворів. Малюнок створюють завдяки нанесенню та експонуванню фоторезисту, а металізацію отворів роблять електрохімічними методами. Серед недоліків цього метода є відносно велика глибина травлення, яка зменшує роздільну здатність процесу. У якості матеріалу друкованої плати обрано двосторонній фольгований стеклотектоліт *FR-4* товщиною 1,6 мм, товщиною фольги 35 мкм. Мате-

ріал дає змогу працювати в діапазонах температур від $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+155\text{ }^{\circ}\text{C}$. Стеклотектоліт відомий своєю високою механічною міцністю, термостійкістю, низькими втратами, високим поверхневим опором.

У першу чергу, при проектуванні, необхідно зробити оптимізацію компонування елементів друкованої плати, для зменшення довжини доріжок. Драйвер затвору *GaN*-транзистора необхідно розмістити як найближче до затвору транзистора. Вхідне живлення відокремлене від схеми, гальванічна розв'язка дає змогу знизити завади від мережі. Друковані провідники робляться як найбільш широкою відносно щільності струму, що дає змогу зменшити паразитну індуктивність. Задля зменшення завад, особливо у схемі живлення, застосовано окремий шар заземлення, що надає більшу стабільність роботи пристрою.

Друковану плату спроектовано в системі автоматичного проектування *Altium Design*. На рис. 4.8 зображена розведена друкована плата блоку живлення.

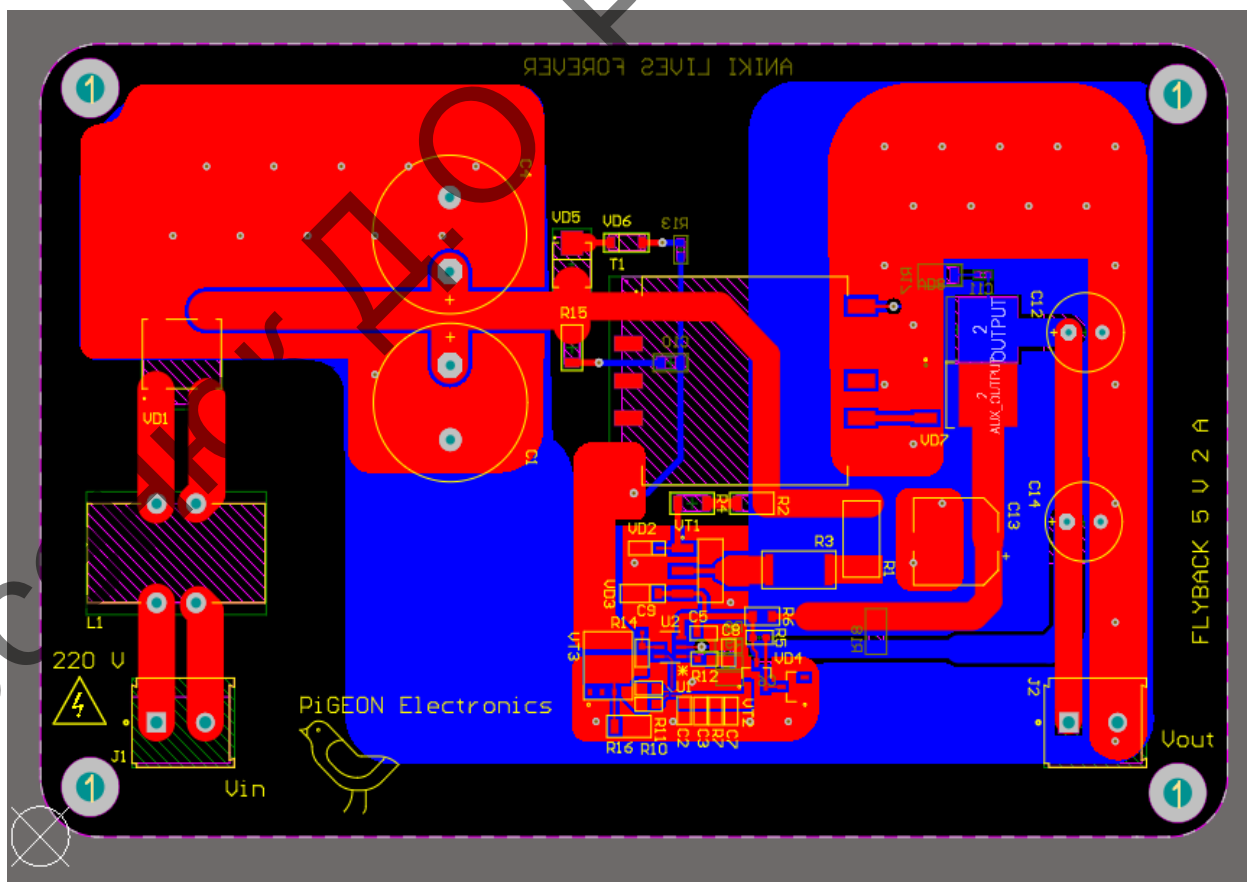


Рисунок 4.8 — Розведення друкованої плати зворотноходового перетворювача у середовищі *Altium Designer*

Габаритні розміри друкованої плати 120x80 мм. На платі маються металізовані кріпильні отвори М3. Плата покрита лаком УР-231 для захисту від пошкоджень.

На рис. 4.9 зображений зовнішній вид друкованої плати блоку живлення.

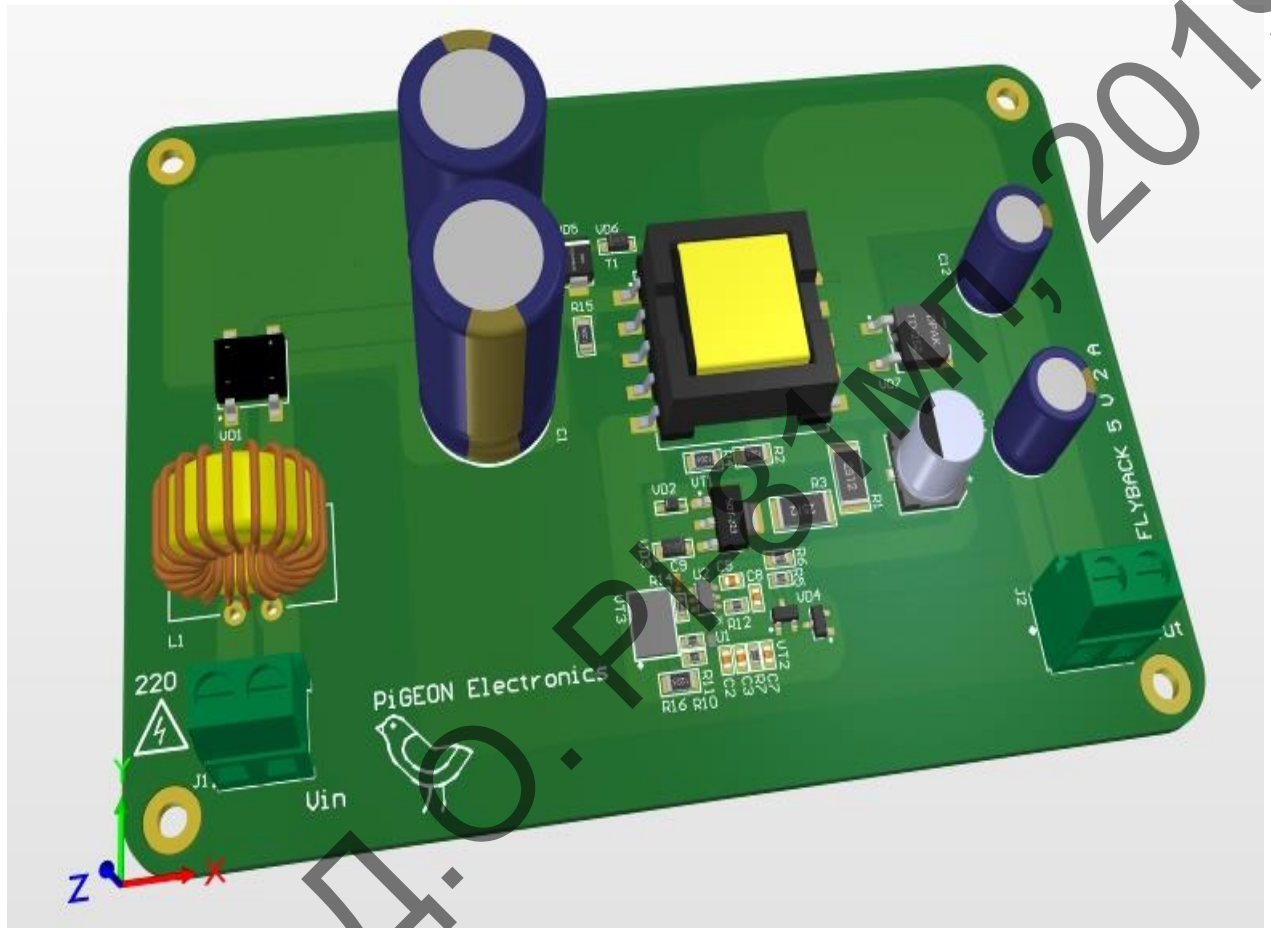


Рисунок 4.9 — Зовнішній вид друкованої плати зворотногоходового перетворювача

Спроектована друкована плата відповідає вимогам, поставленим для збереження ефективності приладу та працездатності. Друкована плата має невеликі габарити, що дозволяє використовувати у малогабаритних системах. Для забезпечення низьких паразитних зв'язків компоновка елементів щільна, провідникові доріжки широкі. Заземлення створено за допомогою полігонів.

Створена в системі *Altium Designer* друкована плата зворотногоходового перетворювача дозволяє використовувати розроблену модель для подальшого моделювання у системах моделювання для подальшого дослідження.

Висновки

Для науково-дослідницької роботи було спроектовано експериментальний імпульсний блок живлення топології зворотногоходового перетворювача потужністю 10 Вт; вхідна напруга якого може живитися від мережі в 220 В. На виході пристрій видає 5 В напруги та 2 А струму.

Перетворювач працює в режимі *DCM* та використовує ШІМ-контролер типу *LTC3803* та драйвера затвору головного транзистора типу *LMG1020*.

У якості транзистора використаний *GaN HEMT GS-065-004-1-L* з максимальною напругою в 650 В та опором включення 500 мОм.

Спроектовано трансформатор, котрий відповідає заданими параметрами пристрою. Осердя трансформатору типу *EE 30/15/7* марки фериту *3F35*. Параметри обмоток трансформатора: піковий струм первинної обмотки — 0,566 А, вторинної — 5,66 А; індуктивність первинної обмотки 299 мкГн.

Розроблені схемотехнічні рішення, які удосконалюють топологія зворотногоходового перетворювача та дозволяють використовувати особливості транзисторі на основі нітриду галію.

Друкована плата пристрою також спроектована за умови зменшення паразитних параметрів задля більшої ефективності роботи головних елементів пристрою.

У порівняно з розглянутим існуючим аналогом блоку живлення типу *RMP30308*, у експериментальному блоці живлення використано галій-нітридний транзистор, який краще за такими параметрами, як максимальна напруга стік-витік, опір включення, внутрішня ємність транзистора. У порівнянні з розглянутою моделлю зворотногоходового перетворювача з використанням кремнієвого транзистора *STP8NM60*, вихідні пульсації напруги було зменшено більш ніж у двічі.

Пристрій відповідає вимогам щодо ефективності роботи та працездатності приладу. Друкована плата розроблена з можливістю використання у малогабаритних приладах.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою цього розділу являється проведення експериментальних досліджень зворотноходового перетворювача використовуючи транзистор на основі нітриду галію.

5.1 СИМУЛЯЦІЯ РОБОТИ БЛОКУ ЖИВЛЕННЯ

Спроектований імпульсний блок живлення, як зазначено, працює від мережі напругою від 90 до 320 В. Для того, щоб оцінити роботу пристрою практично, пристрій змодельований у системі симуляції електронних схем загального призначення (*SPICE*). Програма дозволить оцінити вихідні характеристики, роботу головного транзистора, працездатність пристрою при різних умовах. У цьому випадку, спроектований *flyback*-перетворювач був змодельований у програмі *LTSpice* на рис. 5.1.

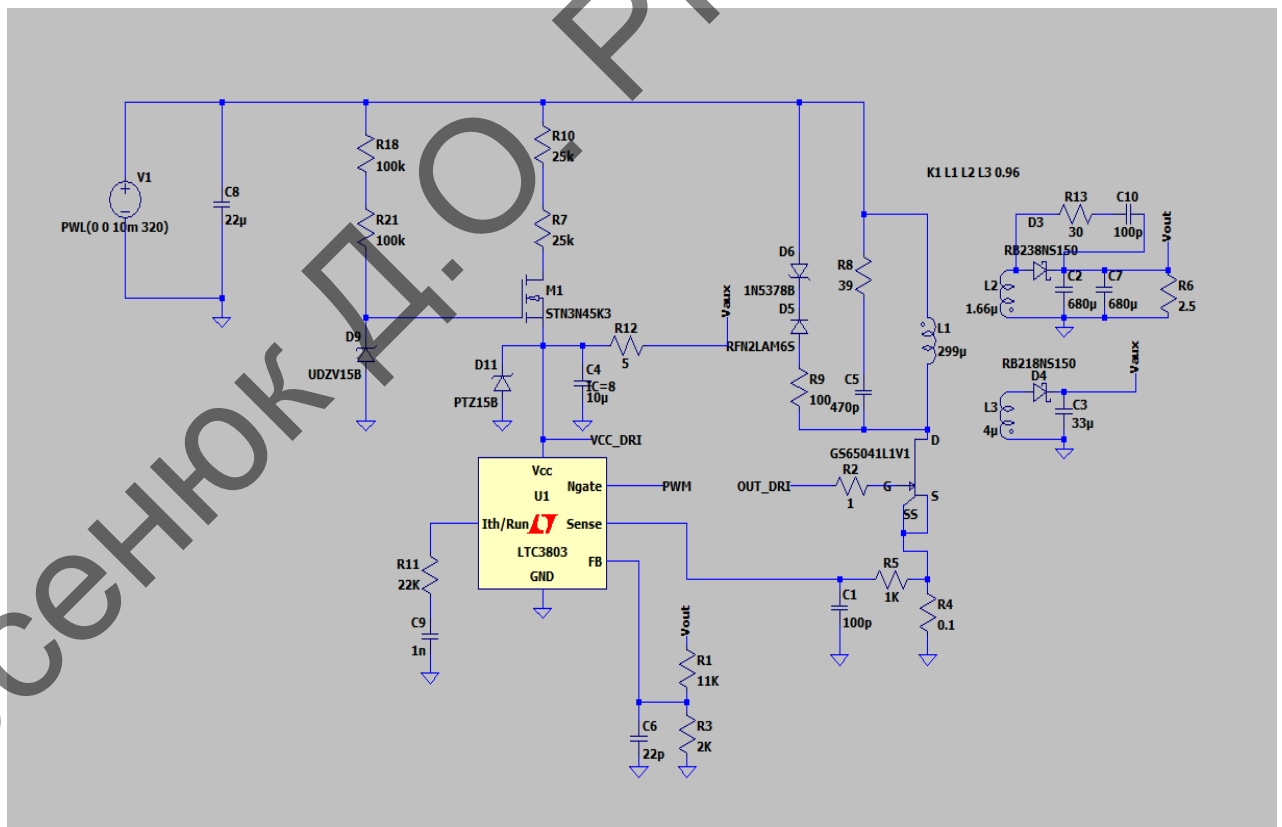


Рисунок 5.1 — Модель спроектованого *flyback*-перетворювача у програмі симуляції *LTSpice*

У програмі присутні бібліотеки компонентів, використані у етапі проектування пристрою. У тих елементів, які не мають своєї моделі в бібліотеці, використовуються аналогічні. У випадку драйвера затвору *GaN*-транзистора *LMG1020*, який за своєю складністю та параметрами не має аналогічних приладів, створена модель, відповідна до внутрішньої схеми [15]. Модель драйвера в середовищі *LTSpice* зображена на рис. 5.2.

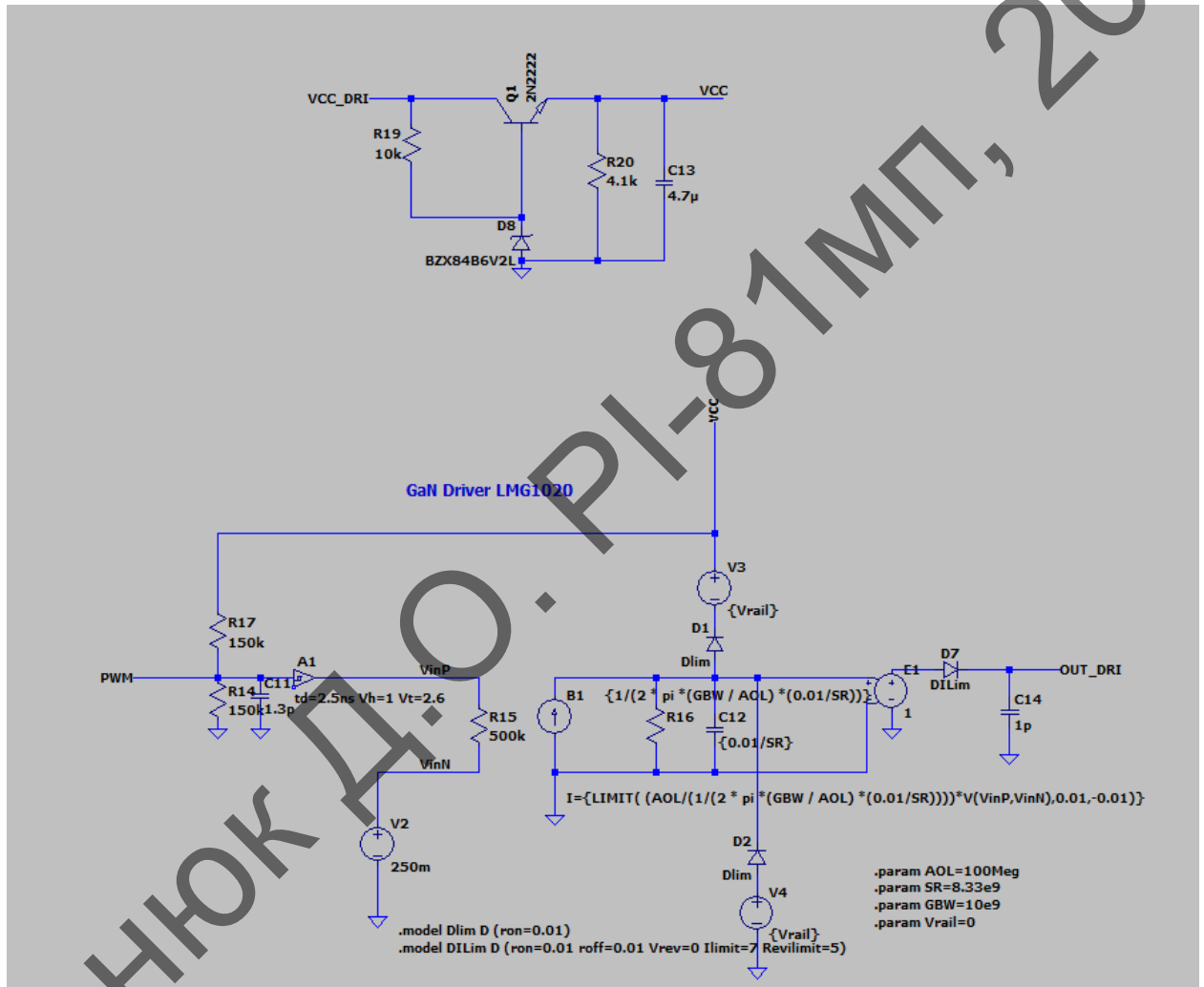


Рисунок 5.2 — Модель *GaN*-драйвера *LMG1020* в середовищі *LTSpice*

Програма *SPICE* дозволяє зробити аналіз перехідних процесів (*Transient Analysis*), котрий дозволить отримати залежність струму чи напруги від часу. По отриманій формі сигналу можна судити о працездатності приладу.

На рис. 5.3 зображена форма сигналу вихідної напруги та струму при вхідній напрузі в 90, 220, 320 В.

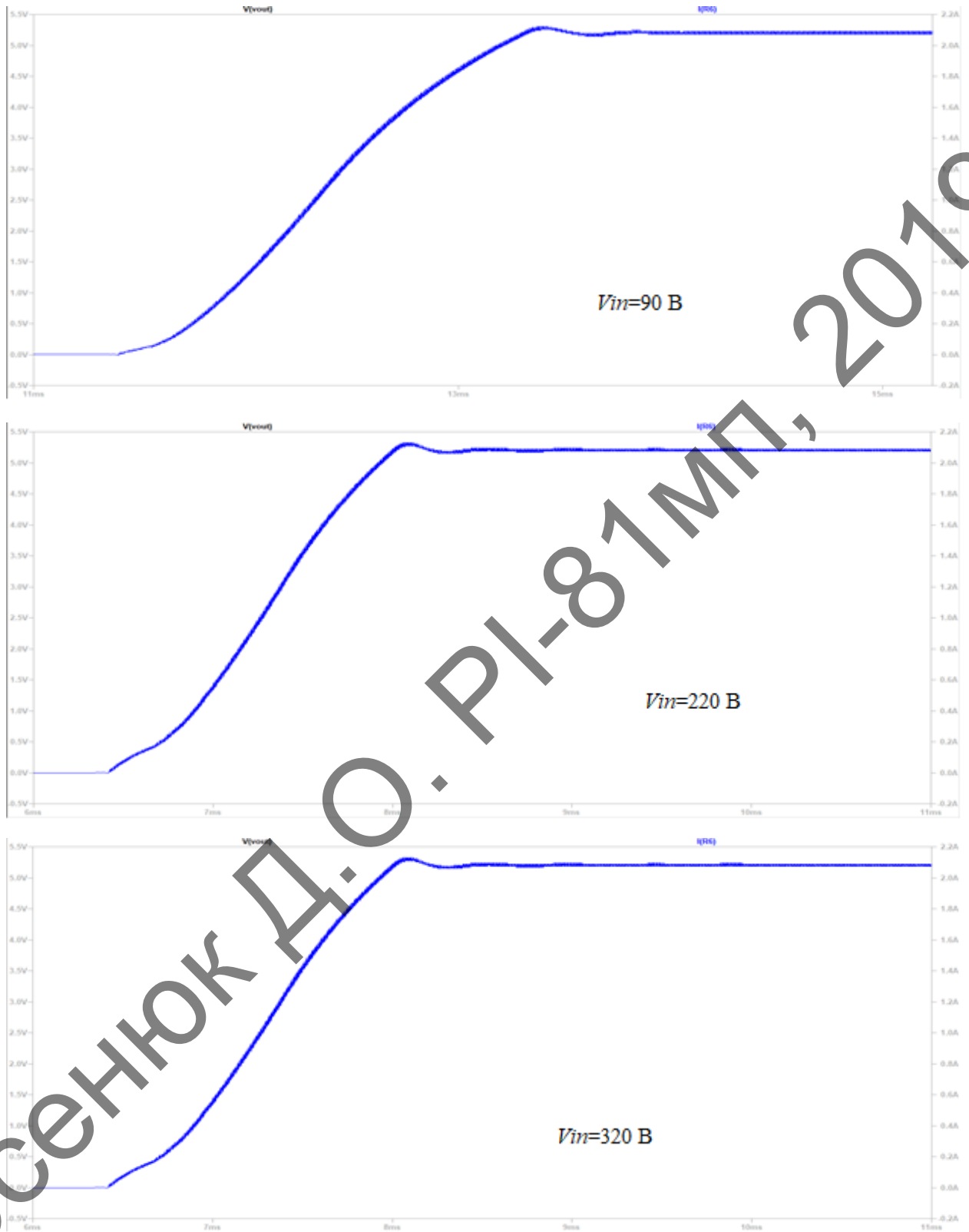


Рисунок 5.2 — Вихідна напруга та струм при вхідній напрузі в 90 В, 220, 320 В

Вихідна напруга на початку постійно прирощується значеннями розрахованого рівня напруги. Так, як пристрій працює у відкритому циклі, відбувається невелике перевищення напруги, після чого напруга стабілізується. Вихідний струм має таку саму форму сигналу, що і вихідна напруга, через резистивну характеристику навантаження. Із зміною вхідної напруги, форма сигналу остається стабільною, тобто пристрій реалізований відповідно до розрахунків.

Пульсації напруги на виході виникають в залежності від вихідної потужності пристрою. Пульсації прогножуються на етапі проектування пристрою, коли ємності фільтруючих конденсаторів достатні, щоб задати необхідний мінімально можливий рівень пульсацій для стабільної роботи пристрою. На рис. 5.3 зображені вихідні пульсації напруги блоку живлення.

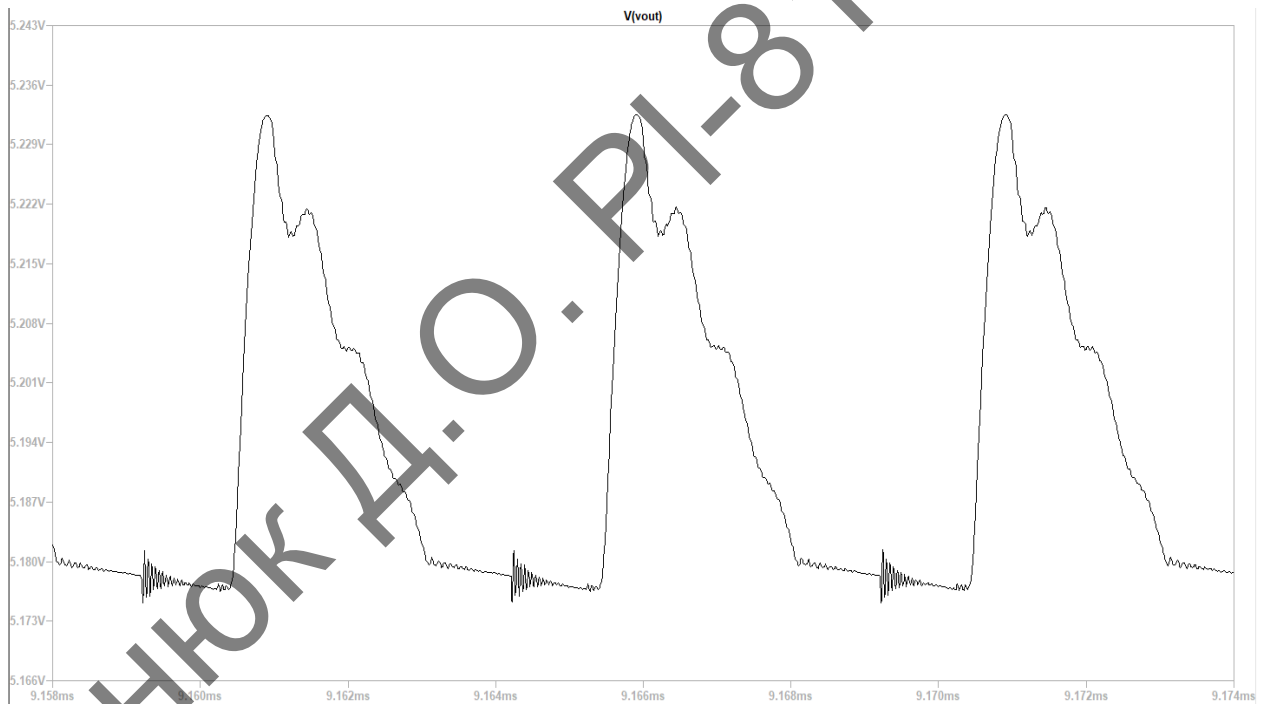


Рисунок 5.3 — Вихідні пульсації напруги зворотного перетворювача при вхідній напрузі в 220 В.

По результату моделювання видно, що пульсації на виході пристрою складають приблизно 60 мВ з частотою 2 МГц. Амплітуда коливань досить незначна тому прилад буде працювати стабільно та необхідність у додаткових фільтруючих засобах не потребується.

Вихідна напруга пристрою змінюється в залежності в різних умовах роботи мережі та навантаження. Змінивши ці два параметра, можна дослідити відхилення від номінальної вихідної напруги. Результати вимірів зображені у таблиці 5.1

Таблиця 5.1 — Вихідна напруга при зміні у лінії мережі та навантаження

$V_{in}, \text{В} / I_{out}, \text{А}$	$V_{out}, \text{В}$				
	0,25	0,50	1,0	1,5	2,0
90	5,2	5,2	5,2	5,21	5,22
115	5,2	5,2	5,2	5,21	5,22
150	5,2	5,2	5,2	5,21	5,22
180	5,2	5,2	5,2	5,21	5,22
220	5,2	5,2	5,2	5,21	5,22
320	5,2	5,2	5,2	5,21	5,22

Як видно із результатів, вихідна напруга майже не залежить від зміни вхідної напруги. На рис. 5.4 показана лише зміна вхідної напруги при зміні струму навантаження при вхідній напрузі в 220 В.

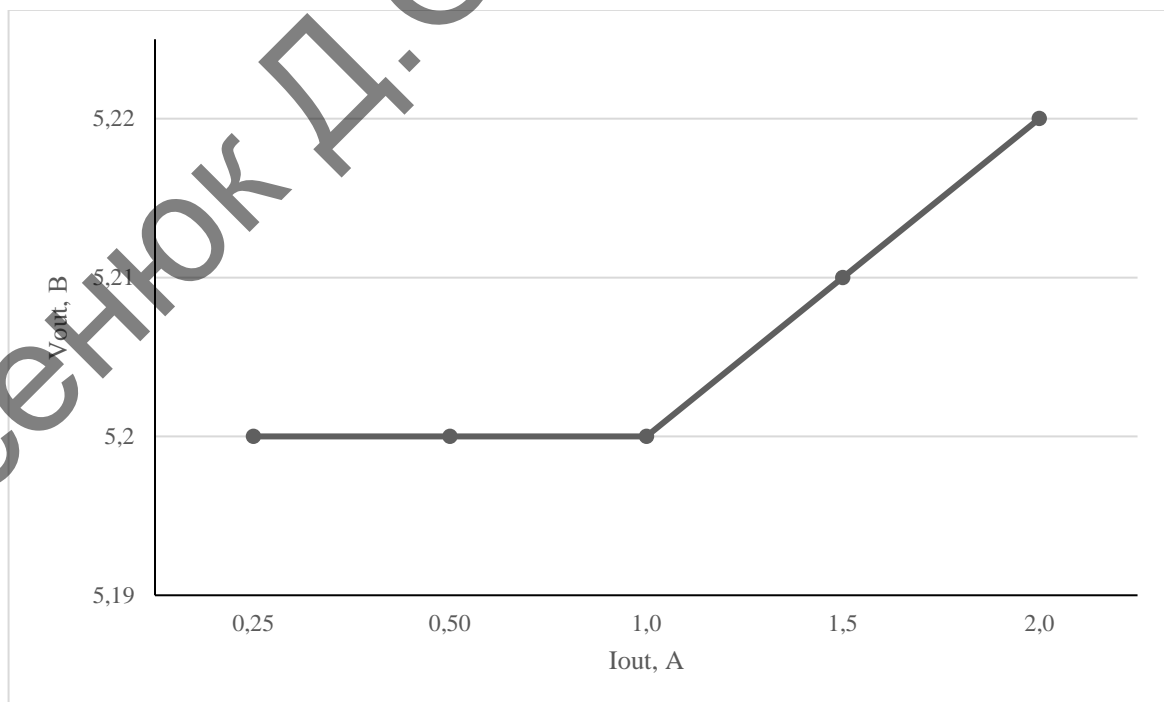


Рисунок 5.4 — Зміна вихідної напруги в залежності від зміни у навантаженні при вхідній напрузі в 220 В.

Таким чином, можна побачити, що спроектований імпульсний блок живлення працює стабільно незалежно від зовнішніх умов. На рис. 5.5 зображена симуляція роботи блоку живлення, коли струм навантаження різко змінюється від 10% до 90% від номінального навантаження.

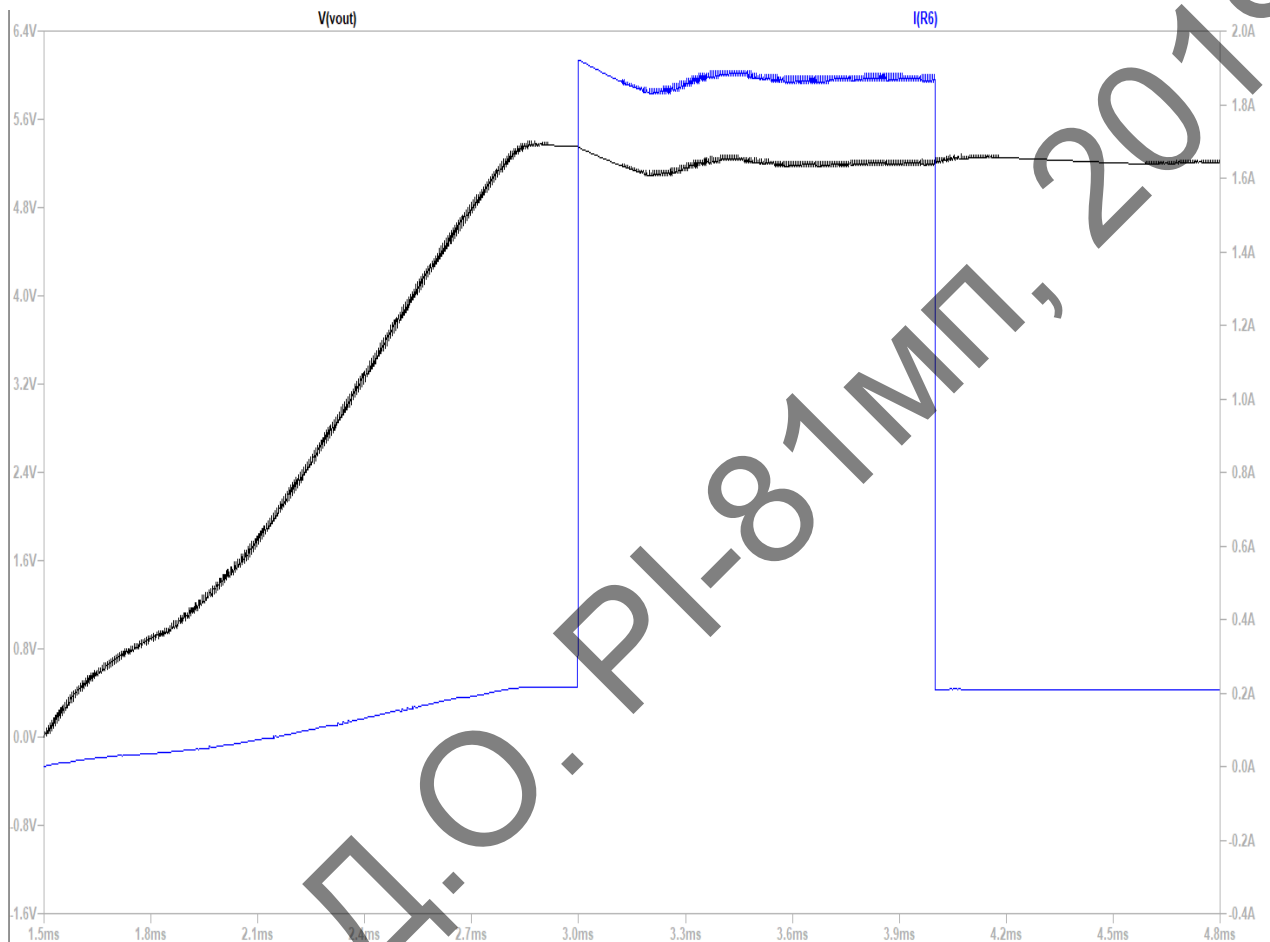


Рисунок 5.5 — Зміна вихідної напруги під час зміни струму навантаження з 10% до 90% від номінального вихідного струму при вхідній напрузі у 220 В

Як видно, вихідна напруга блоку живлення тримає напругу приблизно 5 В, яка являється номінальною, не залежно від різкої зміни навантаження. Таким чином, спроектований пристрій може працювати у екстремальних умовах та подавати живлення, на виході пристрою, котре і було заявлено, при етапі проектування пристрою.

Головним перемикаючим елементом приладу являється галій нітридний транзистор. Очікується, що робота зворотногоходового перетворювача з GaN-транзистором збільшить ефективність роботи, порівнянню з аналогічними

блоками живлення з транзисторами на кремнієвій основі. Транзистор на основі нітриду галію має високу швидкість перемикання, при меншому часі відновлення, що зменшує збільшення динамічних втрат та небажаних пульсацій струму та напруги.

На рис. 5.6 зображено характеристики струму стоку та напруги стік-витік головного транзистора при різних значеннях вхідної напруги.

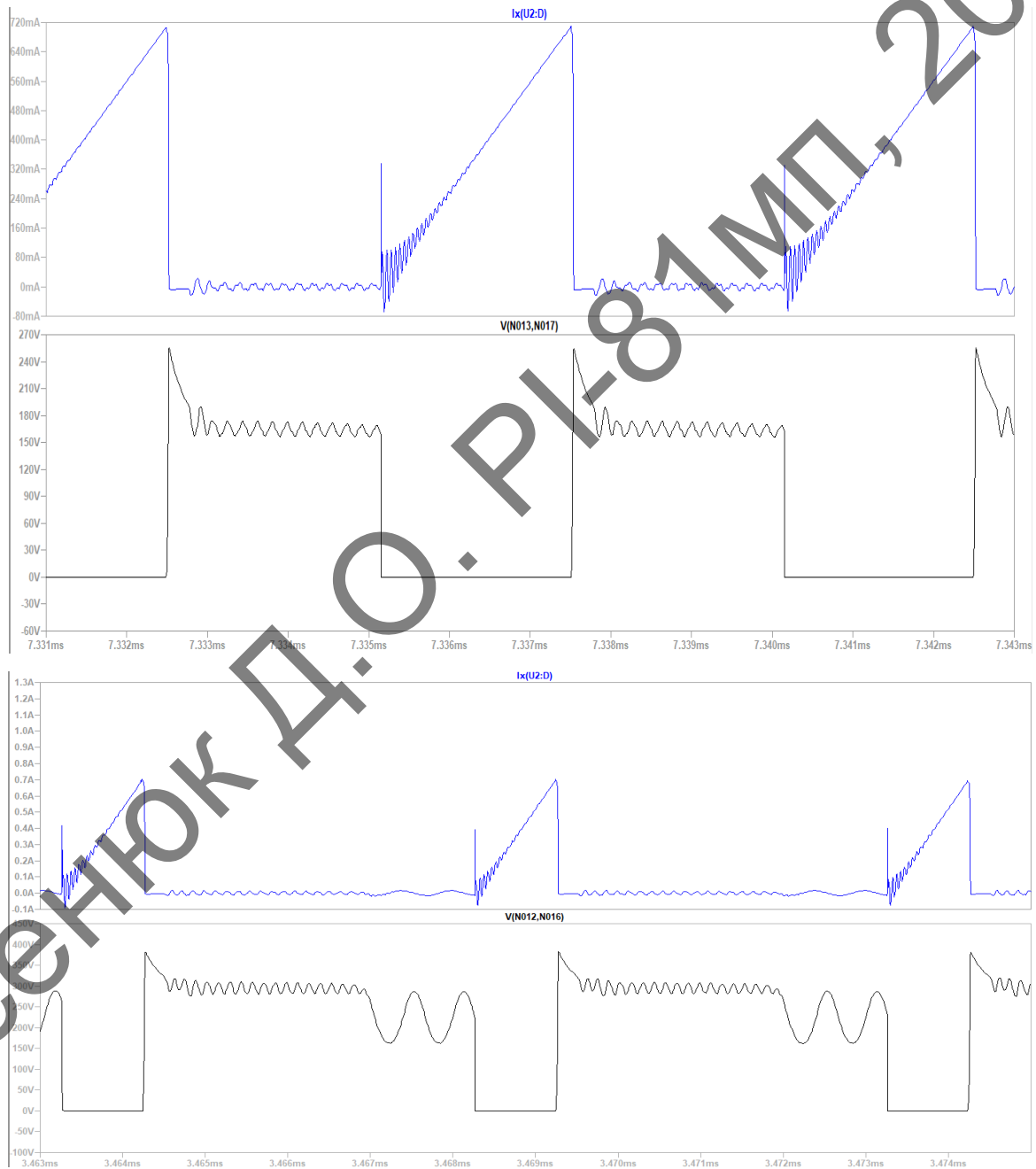


Рисунок 5.6 — Струм та напруга на стоку-витоку *GaN*-транзистора при вхідній напрузі у 90 та 220 В

На рисунку видно, коли транзистор відкритий, струм, який тече через первинну обмотку трансформатора, лінійно зростає поки не досягне пікового струму, налаштованого контролером. Коли транзистор закритий, струм падає до нуля, енергія передається до вторинної обмотки трансформатора. Напруга на стоку-витоку вища, ніж вхідна напруга постійного струму. Коли вся збережена енергія передається до вихідного каскаду приладу, виникають пульсації напруги на стоку-витоку. Необхідно звернути уваги на викиди струму, коли транзистор відкривається. Викиди струму складають 400 мА, тому вони не значні, необхідність в додаткових фільтруючих засобах не потребується.

Згідно з результатами моделювання, блок живлення працює в режимі *DCM*, як і було зазначено під час проектування. Як і передбачалось, коефіцієнт заповнення робочого циклу при усіх режимах роботи мережі живлення приблизно дорівнює 0,5, так само, як і піковий струм. Пульсації напруги стік-витік складають 90 В при частоті 4-5 кГц.

Таким чином, пристрій з транзистором на основі нітриду галію працює значно ефективніше ніж аналогічній пристрій з кремнієвим аналогом, за рахунок більшої стабільності та менших пульсацій напруги та струму приблизно на 80% під час переключення та при викидах енергії з трансформатора. При цьому транзистор дозволяє збільшити швидкість перемикання більш ніж на 10 МГц, у порівнянні з транзисторами на кремнієвій основі. Це дозволить, у перспективі, зменшити розміри приладу та збільшити енергоефективність пристрою, у порівнянні з аналогічними, чи значно підвищити вимоги до вихідної потужності приладів блоків живлення, не жертвуючи коефіцієнтом корисної дії приладу.

До затвору транзистора подається скорегований ШІМ-сигнал із драйвера транзистора. На рис. 5.7 зображена вхідна напруга на затворі *GaN*-транзистора при вхідній напрузі в 90 та 220 В. Як і очікувалось, пристрій працює на заданій частоті, а драйвер затвору транзистора задає необхідну напругу та струм для роботи транзистора.

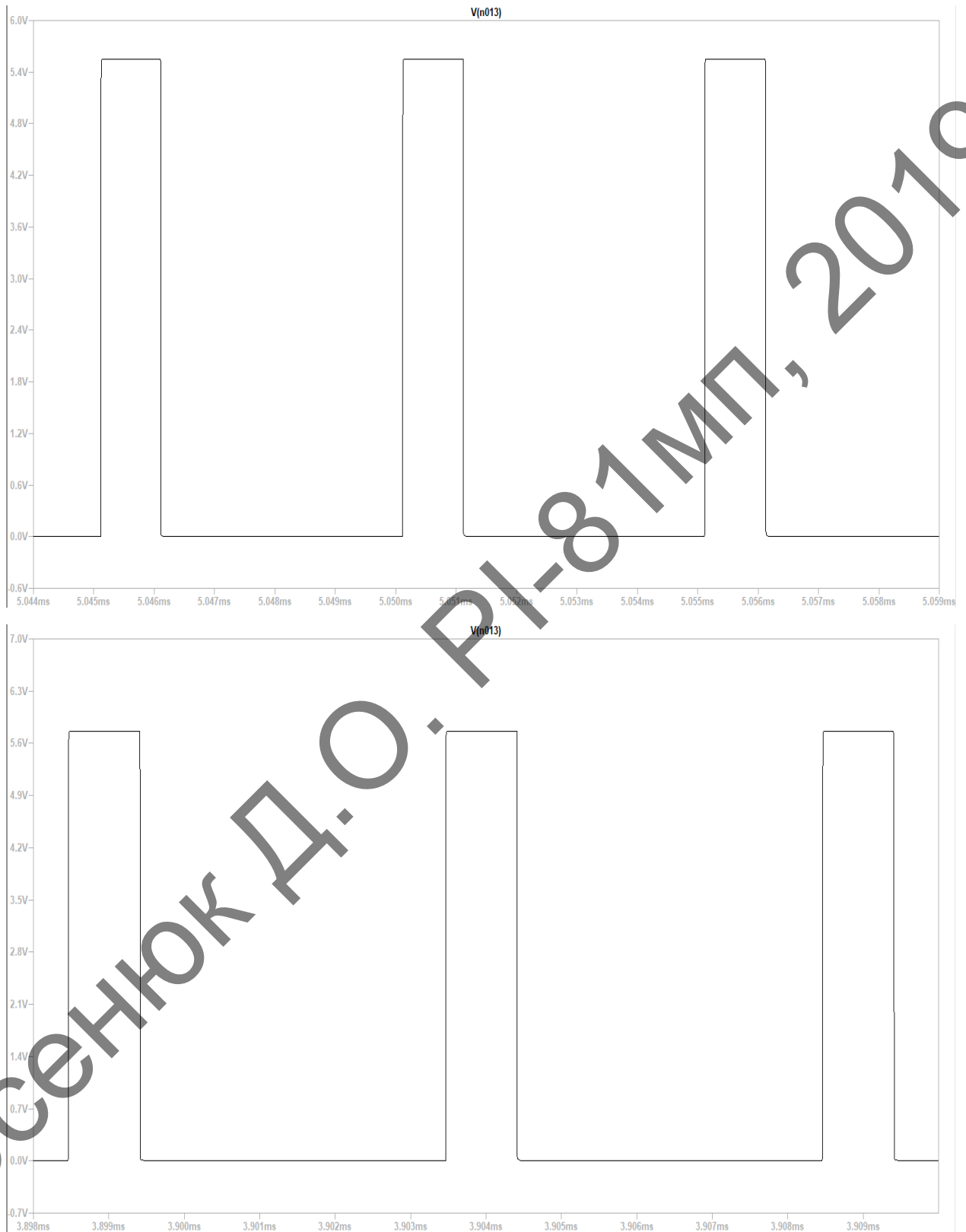


Рисунок 5.7 — Напряга на затворі *GaN*-транзистора при вхідній напрузі у 90 та 220 В

На працездатність приладу також впливають теплові втрати. У симуляторі використана можливість перевірити теплової потужності розсіювання елементів приладу. Насамперед, визначимо потужність розсіювання у *GaN*-транзисторі під час роботи. На рис. 5.8 зображена потужність розсіювання транзистора.

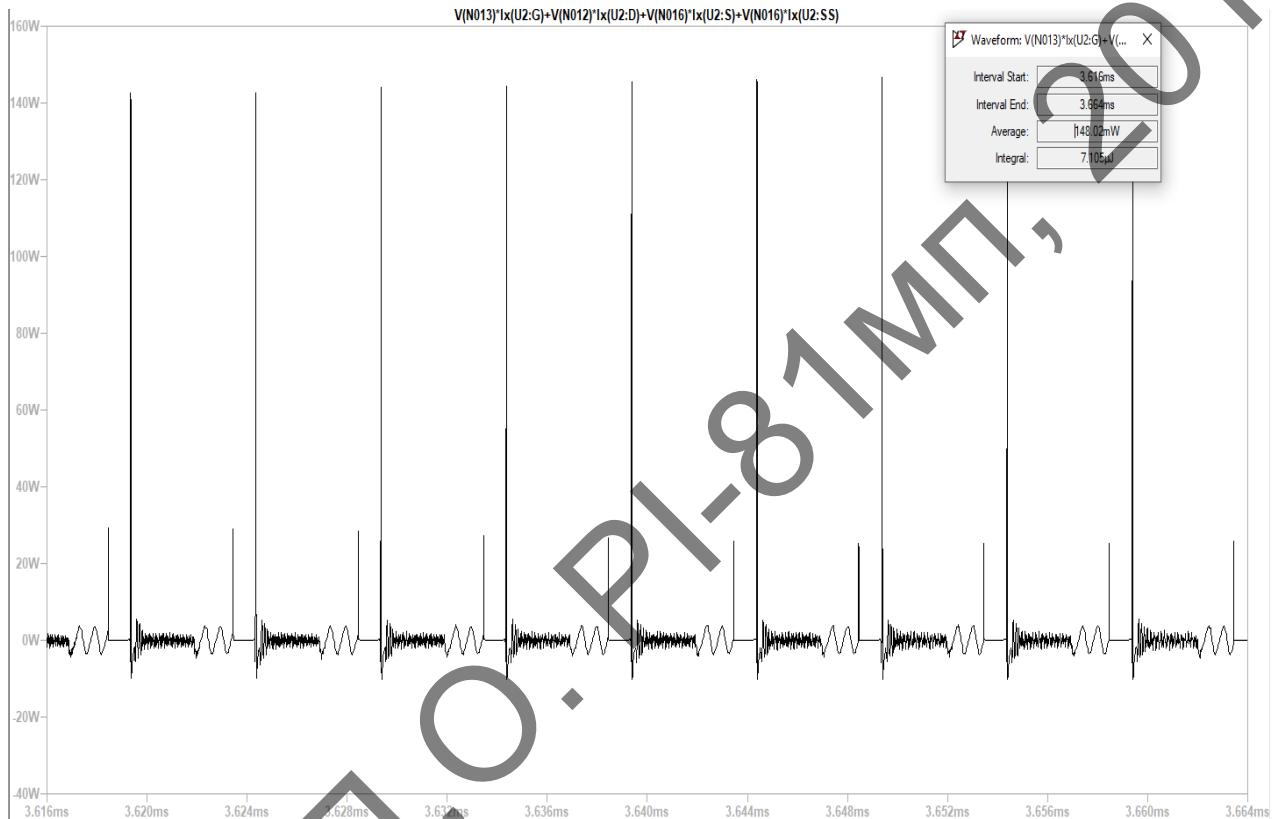


Рисунок 5.8 — Потужність розсіювання на *GaN*-транзисторі при входній напрузі в 220 В

Як видно з результату моделювання, втрати потужності досить низькі та складають у середньому 148 мВт (при корисній потужності 3 Вт). Спостерігаються лише короточасні сплески потужності, які відбуваються при переключенні транзистора. Короточасність цього явища не впливає на загальну роботу приладу.

Оцінимо також потужність розсіювання інших силових елементів (вихідних діодів, транзисторів, трансформатора), як наприклад, потужності розсіювання вихідного діоду на виході пристрою, показані на рис. 5.9.

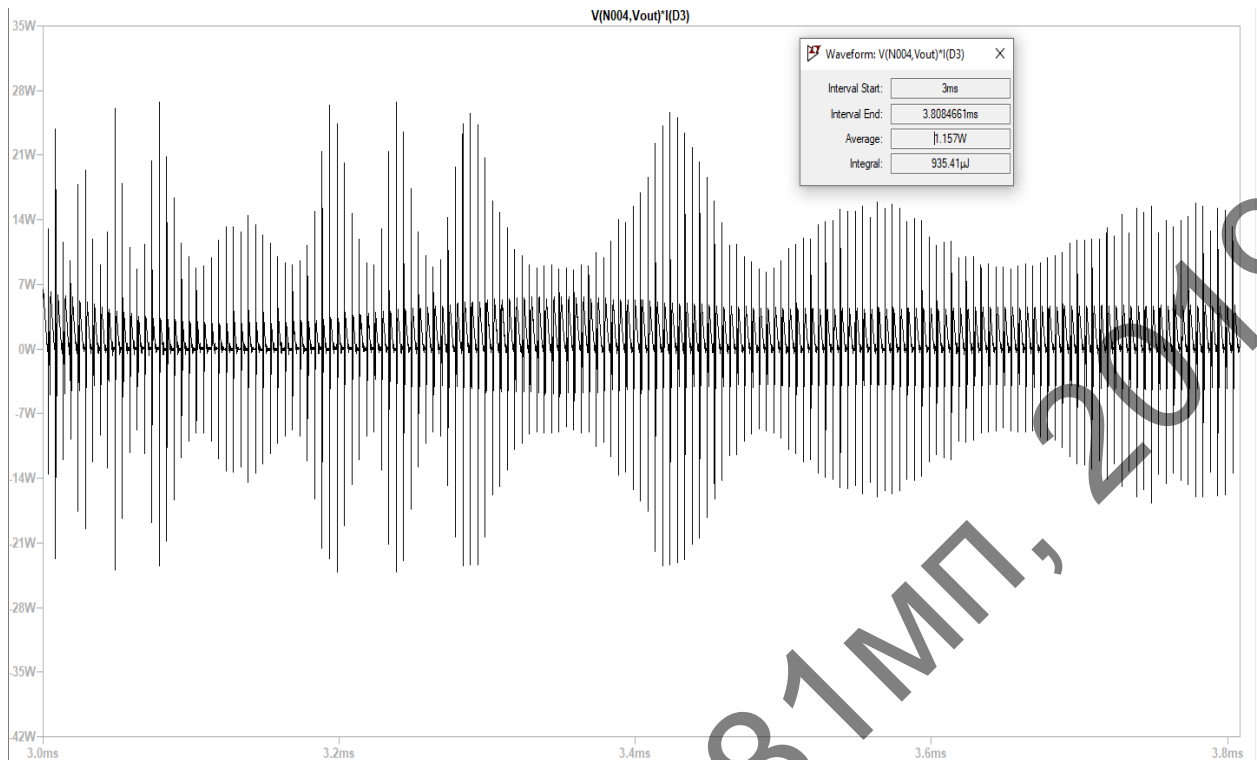


Рисунок 5.9 — Потужність розсіювання вихідного діоду на виході пристрою при вхідній напрузі в 220 В

Як бачимо, середня потужність розсіювання складає 1.15 Вт. Пікові сплески потужності різняться від кількості енергії, яка передається від вторинної обмотки трансформатора. Ці данні, та данні втрат потужності інших силових елементів приладу, можна використати при виконанні температурного моделювання друкованої плати імпульсного блоку живлення.

5.2 ТЕМПЕРАТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ

Отримані в результаті моделювання блоку живлення дані, щодо втрат потужності елементів приладу, застосовані для температурного моделювання друкованої плати. Моделювання показує розподіл тепла по друкованій платі. При цьому була звернута увага на кількість тепла, котре виділяється із корпусу головного транзистора.

Моделювання проводиться в системі автоматичного проектування *SolidWorks FlowSimulation*. Програма дозволяє виконувати моделювання потоку теплоносія в умовах приближених до реальних, аналізувати наслідки теплообміну, що впливають на електронні компоненти.

У даному випадку моделювання друкованої плати блоку живлення проходить в умовах, коли на друковану плату, на яку подано живлення 220 В, направлений потік повітря з об'ємною витратою в 0,2 м³/с, при температурі навколишнього середовища в 20 °С.

Результати теплового моделювання друкованої плати блоку живлення показані на рис. 5.10 та 5.11.

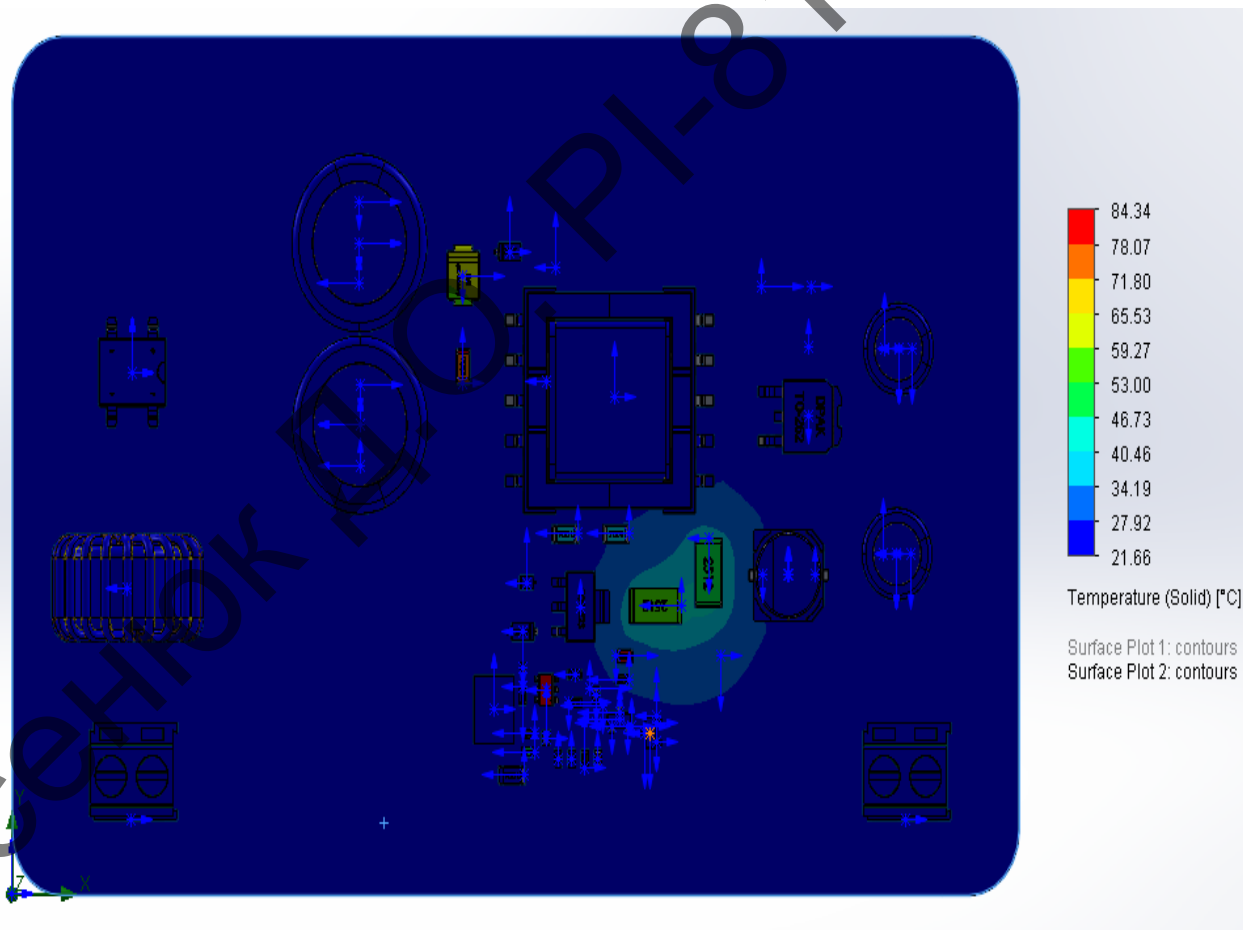


Рисунок 5.10 — Результат теплового моделювання на верхній стороні друкованої плати імпульсного блоку живлення

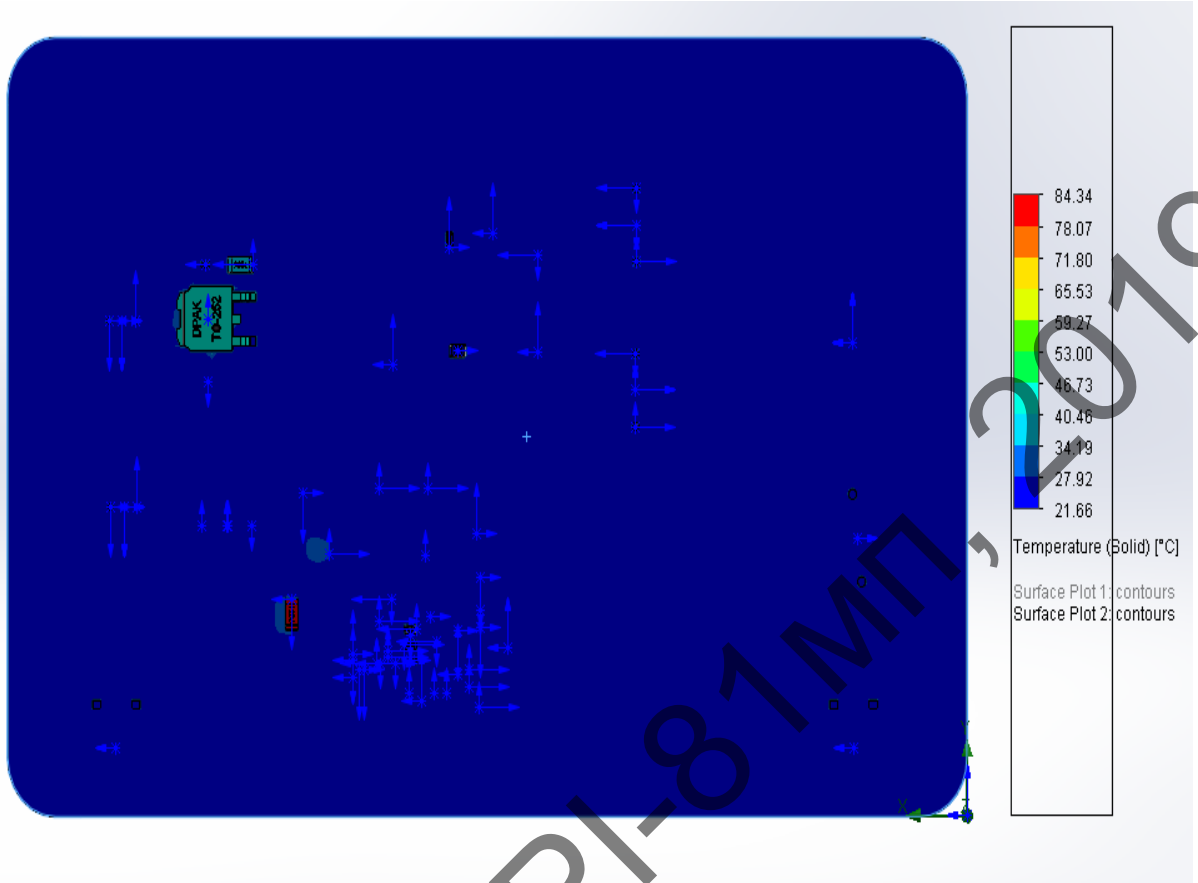


Рисунок 5.11 — Результат теплового моделювання на сторонній стороні друкової плати блоку живлення

Згідно з розрахунками, температура головного транзистора в робочому режимі не перевищує $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, з чого можна зробити висновок, що транзистор дуже енергоефективний, та має дуже малі теплові втрати.

Найбільш висока температура спостерігається у ШІМ-контролера типу *LTC3803*, яка становить приблизно $84\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура відповідає межам, зазначеним у технічній документації. Також спостерігаються очікувані підвищення температур у силових елементів ланцюгу живлення.

Таким чином можна зробити висновок, що імпульсний блоку живлення надійно функціонує у нормальних температурних умовах без прийняття додаткових заходів для покращення теплового режиму. Тепловий аналіз *GaN*-транзистора показує низькі викиди тепла порівнюючи з кремнієвими аналогами, для яких би потребувались додаткові засоби охолодження.

Висновки

Імпульсний блок живлення було промодельовано в системі симуляції електронних схем загального призначення *LTSpice*.

Серед предмету дослідження визначалась вихідна характеристика приладу, пульсації напруги на виході приладу, струм та напруга на головному перемикаючому транзисторі. Аналіз проводився при різних значеннях вхідної напруги, а саме 90 В, 220 В та 320 В.

Згідно з аналізом вихідної характеристики приладу, форма сигналу після включення приладу остається стабільною та відповідає номінальним значенням напруги та струму. Після старту відбуваються невелике перевищення напруги та вихідні пульсації, що відбуваються через режим роботи пристрою, та не впливають на його працездатність.

Проведений тест роботи пристрою при зміні струму навантаження показує, що спроектований пристрій працює стабільно при екстремальних електричних умовах.

Аналіз напруги стік-витік та струму стоку головного транзистора показує, що прилад працює в заданому режимі роботи. Динамічні завади та пульсації, що виникають у транзисторі через викиди із трансформатора приблизно на 80% менші, ніж у розглянутих аналогах. Незначна внутрішня ємність галій нітридного транзистора зменшує викиди струму, під час роботи транзистора.

Визначалися потужності розсіювання силових елементів (транзисторів, діодів, трансформаторів) для температурного моделювання. Температурне моделювання показує, що при нормальних умовах, транзистор має низький викид тепла, що показує достатню надійність даного типу транзисторів.

Тому можна зробити висновок, що розроблений зворотньоходовий перетворювач на основі нітриду галію працює значно ефективніше у порівнянні з аналогічними приладами на кремнієвих транзисторах та дозволяє використовувати їх, у перспективі, у більш потужних силових радіоелектронних приладах, зменшити розміри приладів, у порівнянні з кремнієвими польовими транзисторами.

6 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

Даний розділ має на меті проведення маркетингового аналізу стартап проекту задля визначення принципової можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації цього впровадження.

6.1 ОПИС ІДЕЇ ПРОЕКТУ

В межах цього підрозділу аналізується зміст ідеї, можливі напрямки застосування, основні вигоди які може отримати користувач товару та відмінності від існуючих аналогів та заміників. У таблиці 6.1 описані основоположні ідеї створення стартап-проекту.

Таблиця 6.1 — Опис ідеї стартапу

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Головною ідеєю є високо-ефективного створення імпульсного блоку живлення	Виробництво блоків живлення для живлення пристроїв	Енергоефективне живлення приладів різноманітного призначення.
	Застосування приладу у наукових цілях	

Основними перевагами приладів, створеним на основі запропонованого дослідження являється більша енергоефективність та екологічність, за рахунок зменшення габаритів, при ціні традиційних приладів.

Основним конкурентом розроблюваного приладу являється продукти компанії *Texas Instruments*, такі, як *PMP30308*. У таблиці 6.2 надані характеристики сильних та слабких місць ідеї стартап-проекту.

Таблиця 6.2 — Визначення сильних, нейтральних та слабких характеристик ідей стартапу

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Товари конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент			
1	Енергоефективність	✓				✓
2	Габарити	✓				✓
3	Ціна		✓		✓	

Наведена характеристика дає уявлення про потенціал стартап-проекту та дозволить сформулювати вимоги для збільшення конкурентоспроможності.

6.2 АНАЛІЗ РИНКОВИХ МОЖЛИВОСТЕЙ СТАРТАП ПРОЕКТУ

Метою даного розділу являється визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження стартап-проекту, та ринкових ризиків, які можуть перешкодити реалізації проекту. Аналіз дає змогу спланувати подальший розвиток проекту із урахуванням ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій конкурентів.

У таблиці 6.3 показані відомі характеристики потенційного ринку розробленого стартап-проекту.

Таблиця 6.3 — Характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців	Від 2-х
2	Загальний обсяг продаж	Невідомий
3	Динаміка ринку	Висока
4	Наявність обмеження для входу	Невідома
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Існують
6	Середня норма рентабельності в галузі	Невідома

За результатами аналізу можна зробити висновок щодо привабливості для входження за попереднім оцінюванням.

Для подальшого планування напрямків розвитку стартапу потрібно враховувати також потреби потенційних клієнтів. Характеристика потреб показана у таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 — Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Фактори, що формують поведінку клієнта	Вимоги споживачів до товару
1	Ринку потрібен сучасний прилад для жи-	Цільовою аудиторією розроблюваного пристрою є вироб-	Ціна, енергоефективність, іновативність рішення по розробці блоків живлення	Ергономічність, відсутність збоїв роботи. Прийнятна комплекта-

	влення побутових або наукових пристроїв	ництва радіоелектронних пристроїв та науковці		ція товару. Підтримка товару виробником.
--	---	---	--	--

Наступним кроком буде аналіз ринкового середовища. Для цього складемо таблицю факторів, що стимулюють вихід продукту на ринок та фактори ризику, які могли би нашкодити йому (таблиця 6.5 і 6.6 відповідно).

Таблиця 6.5 — Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Ринок залишила компанія-конкурент	З'явилися додаткові можливості у збільшенні обсягу виробництва	Створення нових робочих місць, грошові впливання
2	Товар купують надто швидко	Не вистачає ресурсів для виробництва	Розширення виробництва
3	Поява нового інвестора	Збільшення інвестицій у проект	Вихід на нові сегменти ринку, розширення компанії

Таблиця 6.6 — Фактори ризиків

№	Фактор	Зміст ризику	Можлива реакція компанії
1	2	3	4
1	Відсутність належного рівня продаж	Прибутки компанії через це будуть падати	Переглянути маркетингову стратегію, залучити нові цільові групи користувачів

Продовження таблиці 6.6

1	2	3	4
2	Партія товарів виявилась бракованою	Клієнти вимагають компенсацію за неякісний товар	Безкоштовно видати всім покупцям пристрої належної якості, зробити знижку на наступну покупку
3	Конкуренти витіснили компанію із сегменту ринку	Компанія буде триматися на плаву за рахунок грошових вливань	Зміна вектору розвитку, випуск пристрою іншого призначення. Пошук інвесторів, залучення значних коштів, спроба відновити рівень продажів

Таким чином, спрогнозовані можливості та ризики дають змогу дотепер спрогнозувати ситуацію при виході спроектованого приладу на ринок.

Проведемо аналіз наявних на даних позицій, які можуть вплинути на напрямки конкуренції на ринку. Результати аналізу представлено у таблиці 6.7.

Таблиця 6.7 — Ступеневий загальний аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив діяльності підприємства
1	2	3
Тип конкуренції — олігополія	Домінує невелика кількість конкуруючих фірм	Зменшення прибутку, попиту, кількості клієнтів, втрата свого місця на ринку, якщо не бути активним гравцем на ринку
За рівнем конкурентної боротьби — національна	Даний товар виробляється та постачається в багатьох країнах світу	

Продовження таблиці 6.7

1	2	3
За галузевою ознакою — внутрішньогалузева	Товар може вироблятися в одній галузі	Зменшення прибутку, попиту, кількості клієнтів, втрата свого місця на ринку.
За характером конкурентних переваг — нецінова	Перевагою даного товару є його особливості та функціонал, а не якість	

Більш детальніший аналіз умов конкуренції у галузі показаний у таблиці 6.8

Таблиця 6.8 — Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товарозамінники
		Сертифіковані прилади	Блоки живлення	<i>Texas Instruments</i>	Невідомо
		Блоки живлення	<i>Analog Devices</i>	Невідомо	Невідомо
Висновки	Міжнародна компанія програє через високу ціну на свій продукт і в подальшому високі витрати на обслуговування. Відчизняна ж компанія є більшим конкурентом у галузі	Є можливість виходу на ринок	Невідомо	Невідомо	Невідомо

За результатами аналізу можна зробити висновок, що працювати на даному ринку можливо, не зважаючи на конкуренцію. Для поширення товару на ринку, він повинен володіти рядом особливостей, котрий би відрізняв би його від товару конкурентів.

Аналізуючи конкурентні спроможності приладу на ринку збуту, враховуючи при цьому характер ідеї стартапу визначимо основні фактори конкурентоспроможності у таблиці 6.9.

Таблиця 6.9 — Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактори конкурентоспроможності	Обґрунтування чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим
1	Якість	Товар має хороші технічні характеристики, технічний рівень проектування, фізичні властивості, конструкцію, функціональні характеристики, високу надійність, стабільність та швидкодію
2	Ціна	Продукт має низьку собівартість, рівень затрат на ремонт та обслуговування.
3	Енергоефективність	◆ Пристрій відповідає технічним та екологічним нормам
4	Безпека	Товар виготовлено з якісних матеріалів і не є шкідливим для користувача, за дотриманням рівня безпеки зазначеного в документації
5	Суб'єктивність	Продукт є якісним та надійним через високу якість компонентів та високий рівень кваліфікації кадрів підприємства виробника

Проведемо порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту.

Таблиця 6.10 — аналіз сильних та слабких сторін проекту

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів конкурентів у порівнянні з проектом, що розробляється						
			-3	-3	-1	0	+1	+2	+3
			1	Якість	18				
2	Ціна	15				✓			
3	Енергоефективність	19							✓
4	Безпека	15					✓		
5	Суб'єктивність	18						✓	

Враховуючи вищезазначені фактори можна зробити висновок, що розроблений пристрій має високу конкурентоспроможність на ринку.

Визначившись із ринковим аналізом впровадження проекту, необхідно скласти матрицю аналізу сильних та слабких сторін, загроз та можливостей, на основі виділених ринкових загроз та можливостей, слабких та сильних сторін продукту, так званий *SWOT*-аналіз. Внесені дані аналізу в таблиці 6.11.

Таблиця 6.11 — *SWOT*-аналіз

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Інноваційна ідея 2. Висока надійність 3. Висока якість 4. Доступна ціна 5. Відмінні характеристики 6. Невисока собівартість 7. Задоволення клієнтів 8. Висока кваліфікація робітників 9. Якісне обладнання 	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Невідома компанія виробник 2. Нова продукція на ринку 3. Невеликий стартовий капітал 4. Слабка маркетингова кампанія
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Розширення функціонування приладів 2. Нові технологічні рішення 3. Підвищення ціни 4. Залучення інвесторів 	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Товари-замінники 2. Нові товари на ринку 3. Зміна тенденції попиту 4. Активність конкуруючих компаній 5. Економічний спад

З огляду на *SWOT*-аналіз можна прийти до висновків, що розробка додаткових ринкових впроваджень не потребується.

6.3 РОЗРОБКА МАРКЕТИНГОВОЇ СТРАТЕГІЇ ПРОЕКТУ

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку, а саме опис цільових груп потенційних споживачів у таблиці 6.12.

Таблиця 6.12 — Опис цільових груп потенційних споживачів товару

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Виробництва	Готові	Високий	У сегменті значна конкуренція	Важко
2	Науковці	Готові	Високий	У сегменті значна конкуренція	Важко

Для роботи в обраних сегментах ринку сформуємо базову стратегію розвитку. Стратегія охоплення ринку являється диференційованим, що дозволяють зазначити такі позиції, як ключові: якість, ціна та енергоефективність. Тому обрано стратегію спеціалізації ринку.

Так як, проєкт першопроходець на ринку, то можливо заняття конкурентної ніші.

Сформуємо маркетингову концепцію товару, який отримає споживач. Для цього, спочатку визначимо ключові переваги концепції потенційного товару (таблиця 6.13).

Таблиця 6.13 — Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Потреба у сучасному блоку живлення, який би працював ефективніше та був більш економічно вигідний	Енергоефективність приладу, малі габарити та ціна	Енергоефективність, малі габарити, ціна

Після цього необхідно описати модель товару на різних рівнях (таблиця 6.14).

Таблиця 6.14 — Опис рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
Товар за задумом	Живлення радіоелектронних пристроїв
Товар у реальному виконанні	Властивості: 1. Енергоефективність 2. Малі габарити 3. Мала ціна
	Якість: апробація на готових фізичних моделях
	Пакування відсутнє
	Марка відсутня
Товар із підкріпленням	До продажу: невідомо
	Після продажу: невідомо

Таким чином, товар не буде захищений від копіювання та буде поширюватися на ринку. Це не дасть створити монополію товару, але дасть поштовх для розповсюдження технології.

Визначимо цінові межі, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на товар.

Таблиця 6.15 — Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціна на товар
1	100\$ 300\$	100\$ 300\$	Високий	50-100\$

Ціни, вказані у таблиці, є приблизними для малосерійних приладів. Також відсутня інформація про компоненти складові. Тому для стартап-проекту буде встановлена низька ціна, для заохочення інтересу цільової аудиторії.

Визначимо оптимальну систему для збуту продукції за наступними рішеннями: збут товару проводиться власними силами або залучаються сторонні посередники, вибору оптимальної глибини та виду посередників.

Таблиця 6.16 — Система збуту товару

№	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Форма збуту	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Цільові клієнти здійснюють свої покупки через інтернет	Форма збуту продукції власна	Глибина каналу є мінімальною, адже у збуті продукції не задіяні посередники	Інтернет-магазини

Після визначення системи збуту товару необхідно розробити концепцію маркетингових комунікацій.

Таблиця 6.17 — Концепція маркетингової комунікації

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Цільові клієнти здійснюють покупки через інтернет	B2C — бізнес прямо контактує із потенційними споживачами	Інноваційність рішення, енергоефективність, ціна	Схилити потенційних клієнтів до покупки блоку живлення	Неагресивне рекламне повідомлення, що містить інформацію про продукт

Досліджуючи товар із точки зору ринкової комерціалізації було виявлено перспективність впровадження продукту на ринок. Технологія досить конкурентоспроможна, поріг входження на ринок низький. Можливо встановити на початковому етапі низьку ціну на товар для заохочення аудиторії.

У подальшому можливо вихід на ринок збуту за допомогою інтернет магазину, де цільова аудиторія, після рекламної кампанії, зможе замовляти товар. Подальша імплементація товару є доцільною через високий рівень комерціалізації проекту.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Потрібно визначити всі потенційно небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що мають місце при цьому, а також ступінь їх небезпеки на робочому місці і розробити заходи для захисту робітників від негативного впливу даних факторів при перевищенні ними допустимих норм.

Одним з основних процесів під час технологічного процесу виготовлення радіоелектронного пристрою є пайка і залуження. Під час цих процесів утворюється цілий комплекс небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Крім того в даному розділі визначенні проблеми електробезпеки та безпеки у надзвичайних ситуаціях.

7.1 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПОТЕНЦІЙНО ШКІДЛИВИХ ВИРОБНИЧИХ ФАКТОРІВ ПРИ ВИКОНАННІ НАУКОВО-ДОСЛІДНЦЬКОЇ РОБОТИ

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які мають місце при технологічному процесі пайки:

- запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- наявність інфрачервоного випромінювання від розплавленого припою;
- вплив електростатичного розряду;
- незадовільна освітленість робочого місця;
- незадовільні метеорологічні умови в робочій зоні;
- вплив бризок та капель розплавленого припою;
- можливість ураження електричним струмом.

Група психофізіологічних шкідливих виробничих факторів: фізичні перевантаження (статичні та динамічні), нервово-психічні перевантаження (монотонність роботи, емоційні перевантаження).

На території організації повинно бути ізольоване приміщення для збору, короткочасного зберігання та утилізації відходів, отриманих при виконанні робіт з пайки.

Місце монтажника в робочому приміщенні: однотоумбовий стіл, стілець, регульований світильник, електропаяльник, панель для включення контрольно-вимірювальних приладів із клемою для заземлення.

Згідно НПАОП 31.6-1.01-08 «Правила охорони праці для виробництв електроізоляційних матеріалів» площа виробничого приміщення на одного робітника дорівнює 4,5 , об'єм – 15 , висота виробничого приміщення –3 м. Оскільки кількість робочих місць дорівнює 4, то приміщення з розмірами 4,7x4x3,5 м задовольняє вищевказаним нормам.

7.2 ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ТА ДОДАТКОВІ ЗАХОДИ З БЕЗПЕКИ І ГІГІЄНИ ПРАЦІ ТА ВИРОБНИЧОЇ САНИТАРІЇ

7.2.1 МІКРОКЛІМАТ НА ВИРОБНИЧОМУ МІСЦІ

До параметрів мікроклімату робочих приміщень відносять: температуру повітря, температуру робочої поверхні, відносну вологість, швидкість руху повітря та інтенсивність теплового випромінювання.

Оптимальні та допустимі значення параметрів мікроклімату залежно від періоду року й категорії робіт, забезпечуються згідно «Санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень» ДСН 3.3.6.042-99. Допустимі та оптимальні параметри, приведено в таблиці 7.1, для мікроклімату для категорії тяжкості робіт «I а» (сидяча робота, що не потребує фізичних навантажень, а енергетичні витрати становлять близько 120 ккал/годину).

Таблиця 7.1 — Допустимі та оптимальні значення параметрів мікроклімату робочої зони (при постійному робочому місці)

Параметр	Холодний період		Теплий період	
	Допустимі	Оптимальні	Допустимі	Оптимальні
1	2	3	4	5

Продовження таблиці 7.1

1	2	3	4	5
Температура, °С	21-25	22-24	22-28	23-25
Швидкість руху повітря, м/с	0,1	0,1	0,1-0,2	0,1
Відносна во- логість	80	40-60	75	40-60

Для опалення робочого приміщення в холодну пору року, використовують 8-ми секційну чавунну батарею центрального опалення, завдяки чому підтримується нормальна температура повітря. Також є кондиціонер для підтримки постійної температури в приміщенні.

З таблиці видно, що в лабораторії всі параметри мікроклімату знаходяться в припустимих межах, крім температури повітря в холодний час року. Для того, щоб підвищити температуру і забезпечити оптимальні умови праці були проведені ряд заходів: утеплення вхідних дверей і віконних прорізів.

7.2.2 ВІДПОВІДНІСТЬ ПОВІТРЯ РОБОЧОЇ ЗОНИ ЕПІДЕМІОЛОГІЧНИМ НОРМАМ

Всі різновиди процесів пайки і залуження супроводжуються забрудненням повітряного середовища: аерозолями припою і флюсу, парами різних рідин, які використовуються для змивання флюсу та розчинення лаків. Операції пайки і залужування супроводжуються забрудненням повітряного середовища в приміщеннях парами окису свинцю, олова, сурми та інших елементів, що

входять до складу припою, а також парами каніфолі. Пари, потрапляючи в атмосферу цеху, конденсуються і перетворюються в аерозоль конденсації, дисперсний склад якого приведений в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 — Дисперсний склад парів каніфолі

Розмір часток, мкм	Відсоток частот даної фракції	Розподіл часток за масою, %	Швидкість випа- ривання, м/с
7	0,4	20	7
4	0,8	19,5	2,2
2	8,8	34,6	0,5
1,5	15	11,8	0,3
1,0	35	10	0,15
0,9	20	2,6	0,12
0,8	10	0,9	0,09

Знаходячись у запиленій атмосфері, робітники піддаються впливу пилу та парів, шкідливі речовини осідають на шкірі, потрапляють на слизову оболонку порожнини рота, очей, верхніх дихальних шляхів, зі слиною потрапляють у травний тракт, вдихаються в легені. Поряд із забрудненням повітря-ного середовища забруднюються робочі поверхні й одяг працюючих. Ступінь впливу аерозолів залежить від хімічного складу, який визначається хімічним складом припою.

Вміст шкідливих речовин у повітрі робочої зони не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій.

У таблиці 7.3 приведені шкідливі речовини, їх вплив на організм людини та гранично допустимі концентрації їх у повітрі.

Таблиця 7.3 — Вплив на організм людини шкідливих речовин

Компоне- нти	Характер токсичності	Клас не- безпеки	ГДК у пові- трі робочої зони, кг/м ³
1	2	3	4

Продовження таблиці 7.3

1	2	3	4
Олово	Ураження бронхів, пролітеративнокритичну реакцію в бронхах. При тривалому впливі можливий пневмоконіоз.	3	10
Свинець	При отруєнні спостерігається ураження нервової системи, крові, серцево-судинної системи, шлунково-кишкового тракту, статевої системи.	1	0,01
Каніфоль соснова	Має дратівну дію. При тривалому впливі на шкіру викликає дерматид		
Спирт етиловий	Має наркотичну та дратівливу дію. Викликає зміни в печінці, серцево-судинній системі сухість шкіри при тривалому контакті	4	100
Бензин	Діє як дратівник та наркотик. Функціональні нервові розлади, що супроводжуються м'язовою слабкістю, млявістю чи сонливістю, безсонням. Розлад травлення, печінки, тремтіння пальців та мови поразка шкіри. Характерний розвиток судом, зниження кров'яного тиску, сповільнення пульс	4	300

Для визначення концентрації в атмосфері аерозолю свинцю при пайці із залуженні хвилею необхідно скористатися формулою:

$$C = y \cdot S \cdot t \cdot \frac{N}{V}, \quad (7.1)$$

Де y — питоме утворення аерозолю свинцю, $\text{мг}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$;

S — площа поверхні хвилі, м^2 ;

t — тривалість зміни, год ;

N — кількість робочих місць;

V — об'єм приміщення.

Питоме утворення аерозолю свинцю при залуженні та паянні хвилею олов'яно-свинцевим припоєм складає 3000-5000 $\text{мг}/\text{год}$. Площа поверхні хвилі дорівнює 0,004 , тривалість зміни — 8 годин, об'єм приміщення — 360 , а кількість робочих місць дорівнює 1. Виходячи з таких даних ми можемо визначити концентрацію аерозолю свинцю:

$$C = 400 \cdot 0,004 \cdot 8 \cdot \frac{1}{360} = 0,356 \text{ мг}/\text{м}^3$$

Згідно ГОСТ 12.1.005-88 гранично допустима концентрація аерозолю свинцю дорівнює 0,01 мг , таким чином, концентрація аерозолю свинцю перевищує ГДК, що потребує введення додаткових заходів захисту для зниження його концентрації.

7.2.3 ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА

Найбільш ймовірною причиною поразки робітників електричним струмом є дотик до струмоведучих частин електрообладнання при його аварійному режимі роботи, наприклад, у результаті руйнування робочої ізоляції. Електрична мережа, що підведена до робочого місця трьохфазна електрична мережа змінного струму, частотою 50 Гц і напругою 220 В, з заземленою нейтраллю, зануленням та з застосуванням автоматів струмового захисту.

Для підвищення електробезпеки в робочому приміщенні застосовується понижена напруга для електропаяльника (потужністю 25–36 Вт). Для виміральної апаратури використовується електромережа 220 В. Клеми введення електроенергії до робочого місця обгороджені кожухом, щоб уникнути випадкового дотику. Штепсельні роз'єми, а також закріплення проводів і кабелів в електроінструментах відповідають технічним вимогам і мають елементи заземлення. Використовується подвійна ізоляція проводів, що живлять електропаяльники. Електроапаратуру підключають до джерела живлення через запобіжники з відповідними по струму і напрузі нормованими плавкими вставками.

Дане робоче приміщення, згідно НПАОП 40.1-1.21-98, відноситься до приміщень без підвищеної небезпеки. Вимірвальна апаратура згідно з вимогами ГОСТ 12.2.007.0-75 має I клас щодо електрозахисту.

Виконуємо розрахунок ланцюга захисного відключення фазного проводу при короткому замиканні (КЗ). Струм КЗ можна обчислити за формулою:

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{U_{\Phi}}{R_{\text{Н}} + R_{\Phi} + Z_{\text{ТР}}} \quad (7.2)$$

Де $U_{\Phi} = 220$ В – напруга фазного проводу; $R_{\text{Н}} = 2,4$ Ом – опір нульового проводу; $R_{\Phi} = 3$ Ом – опір фазного проводу; $Z_{\text{ТР}} \cong 0,1$ Ом – еквівалентний опір трансформатора.

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{220}{2,4+3+0,1} = 40 \text{ А}$$

Струм спрацьовування автоматів захисту з електромагнітним розпилювачем повинен бути в 1,4 рази менше струму короткого замикання необхідне при струмі до 100 А. Знайдемо номінальне значення струму спрацьовування автомату максимального струмного захисту.

$$I_{\text{СПР}} = \frac{40}{1,4} \leq 28,6 \text{ А}$$

Таким чином, струм спрацювання автомата повинен бути менше 28,6А. Автомати встановлені в робочому приміщенні мають струм спрацювання 20 А, що задовільняє дану вимогу. Розрахуємо напругу дотику до корпусів електрообладнання при короткому замиканні:

$$U_{\text{дот}} = I_{\text{кз}} \cdot R_0 = 40 \cdot 2,4 = 96$$

Відповідно до ПУЕ - 2018, щоб ця напруга була безпечна для людини, необхідно використовувати автомати максимального струмового захисту у яких час спрацювання менше 0,7 с.

Автомати максимального струмового захисту, встановлені у науково-дослідницькій лабораторії задовольняють цим умовам ($I_{\text{СПР}}=20$ А, $T_{\text{СПР}}<0,4$ с.).

Із проведених розрахунків видно, що у науково-дослідницькій лабораторії основним захистом від поразки електричним струмом є занулення та застосування пристроїв максимального струмового захисту.

7.2.4 НОРМАЛІЗАЦІЯ ПОВІТРЯ РОБОЧОЇ ЗОНИ

Відповідно до СНиП 2.09.02-85 «Производственные здания»:

Виробничі приміщення, в яких знаходяться ділянки пайки, повинні бути обладнані постійно діючою загальнообмінною та місцевою припливною - витяжною вентиляцією з розводкою припливу в робочу зону;

На ділянках, де застосовуються речовини першого класу небезпеки (олово - свинцеві припої, берилій і його сплави, флюси та інші сполуки), системи місцевих відсмоктувачів повинні включатися до початку робіт і вимикатися після їх закінчення. Робота вентиляційних установок повинна контролюватися за допомогою світлової та звукової сигналізації, автоматично включатися при зупинці вентиляції;

Приймачі повітря повинні кріпитися на гнучких або телескопічних повітроводах, здатних переміщатися в процесі монтажних робіт для максимального наближення до місця пайки, при цьому повинна бути надійна фіксація положення приймачів повітря;

Повітря, що видаляється витяжними установками з виробничих приміщень і від устаткування, що містить токсичні гази і пил, повинне перед викидом в атмосферу проходити очищення через фільтри - вловлювачі.

Внутрішні поверхні повітроводів витяжних систем і вентилятори повинні періодично очищатися від флюсу, забрудненого свинцем;

Аналіз повітряного середовища повинен проводитися за графіком, що затверджується роботодавцем, не менше 1 разу на місяць. Крім того, незалежно від існуючого графіка, аналіз повітряного середовища повинен проводитися після кожної зміни технологічного процесу. Можливість ураження електричним струмом;

7.2.5 ОСВІТЛЕННЯ РОБОЧОГО ПРИМІЩЕННЯ

У виробничих приміщеннях, призначених для пайки, має передбачатися природне і штучне освітлення відповідно до вимог будівельних норм і правил;

Для місцевого освітлення робочих місць при виконанні робіт з паяння виробів повинні бути світильники з непросвічуваними відбивачами. Світильники повинні розташовуватися таким чином, щоб їх світіння, не влучало в поле зору працівників;

На робочих місцях, призначених для виконання робіт з використанням мікроскопа, освітленість від системи комбінованого освітлення повинна бути не нижче 2500 лк;

Контрольні вимірювання освітленості на робочих місцях в цехах і на ділянках пайки необхідно проводити не рідше двох разів на рік і результати вимірювань заносити у відповідний журнал реєстрації;

У цехах і на ділянках пайки повинно бути обладнане автоматичне аварійне освітлення. До мережі аварійного освітлення не допускається приєднувати інші струмоприймачі;

Для очищення світильників, ліхтарів і вікон необхідно застосовувати пристрої, що забезпечують безпеку робіт (сходи, пересувні підйомники тощо). Очищення світильників загального освітлення повинна проводитися два рази

на місяць. Скло вікон і ліхтарів повинні очищатися періодично, не рідше двох разів на рік. Фактичні рівні освітлення робочих місць відповідають БН В.2.5-28-2012.

В науково-дослідних лабораторіях є план евакуації на випадок виникнення надзвичайної ситуації. Максимальна віддаль робочих місць від евакуаційних виходів і ширина евакуаційних проходів відповідають вимогам СНиП 2.02.02-85 та СНиП 2.01.02-85.

В робочому приміщенні виконано всі вимоги НАПБ А.01.001-2004 «Правил пожежної безпеки України».

7.3 БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Безпека в НС регламентується планом ліквідації аварійних ситуацій (ПЛАС). Основними складовими частинами ПЛАС є розробка технічних рішень та організація заходів щодо оповіщення, евакуації та дій персоналу при виникненні НС, а також визначення основних заходів з пожежної безпеки.

7.3.1 ВИМОГИ ДО ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМ ОПОВІЩЕННЯ ПЕРСОНАЛУ У РАЗІ ВИНИКНЕННЯ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ

Розміри зон оповіщення, черговість оповіщення та час початку оповіщення людей в окремих зонах визначаються, виходячи з умов забезпечення безпечної та своєчасної евакуації людей у разі виникнення НС. Оповіщення про НС та управління евакуацією людей здійснюється одним з наступних способів або їх комбінацією:

- подання звукових і (або) світлових сигналів в усі виробничі приміщення будівлі з постійним або тимчасовим перебуванням людей;
- подання звукових і (або) світлових сигналів в усі виробничі приміщення будівлі з постійним або тимчасовим перебуванням людей;
- трансляція текстів про необхідність евакуації, шляхи евакуації, напрямки руху й інші дії, спрямовані на забезпечення безпеки людей;

- трансляція спеціально розроблених текстів, спрямованих на запобігання паніці й іншим явищам, що ускладнюють евакуацію;
- розміщення знаків безпеки на шляхах евакуації згідно з ДСТУ ISO 6309;
- ввімкнення евакуаційних знаків «Вихід»;
- ввімкнення евакуаційного освітлення та світлових показників напрямку евакуації.

Кількість оповіщувачів, їх розміщення та потужність повинні забезпечувати необхідну чутність у всіх місцях постійного чи тимчасового перебування людей. У місцях, де є небезпека механічного ушкодження оповіщувачів, повинен бути забезпечений їх захист, що не порушує працездатності оповіщувачів. Встановлення звукових та мовних оповіщувачів у виробничих приміщеннях повинно виключати можливість концентрації та нерівномірного розподілу звуку. Оповіщувачі повинні підключатися до мережі без роз'ємних пристроїв і не мати регуляторів гучності. Сигнали оповіщення про пожежу повинні відрізнятися від сигналів іншого призначення. Комунікації системи оповіщення людей про пожежу можуть проектуватися суміщеними з радіотрансляційної мережею будівлі. Електропостачання, заземлення, занулення, вибір та прокладання мереж оповіщення приймаються згідно з вимогами до систем пожежної сигналізації за ДБН В.2.5-56-2014 «Системи протипожежного захисту». Управління системою оповіщення слід передбачати з приміщення пожежного поста, диспетчерської або іншого спеціального приміщення.

Вимоги до такого приміщення приймаються за аналогією з вимогами до приміщень чергового персоналу з ДБН В.2.5-56-2014.

7.3.2 *ОБОВ'ЯЗКИ ТА ДІЇ ПЕРСОНАЛУ У РАЗІ ВИНИКНЕННЯ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ*

У разі виявлення ознак НС працівник, який їх помітив, повинен:

- повідомити про НС керівника, адміністрацію, пожежну охорону підприємства;

- організувати оповіщення людей про НС;
- вжити заходів щодо евакуації людей та матеріальних цінностей;
- вжити заходів щодо ліквідації наслідків НС з використанням наявних засобів.

Керівник та пожежна охорона установки, яким повідомлено про виникнення пожежі, повинні:

- перевірити, чи викликані підрозділи ДСНС;
- вимкнути у разі необхідності струмоприймачі та вентиляцію;
- у разі загрози життю людей негайно організувати їх евакуацію, та їх рятування, вивести за межі небезпечної зони всіх працівників, які не беруть участь у ліквідації НС;
- перевірити здійснення оповіщення людей про НС;
- забезпечити дотримання техніки безпеки працівниками, які беруть участь у ліквідації НС;
- організувати зустріч підрозділів ДСНС та надати їм допомогу у локалізації і ліквідації НС.

Після прибуття на НС підрозділів повинно бути забезпечено безперешкодний доступ їх до місця, де виникла НС.

7.3.3 ТЕХНІЧНІ ТА ОРГАНІЗАЦІЙНІ ВИРІШЕННЯ ПИТАНЬ З ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ

В приміщенні лабораторії знаходиться багато твердих легкозаймистих речовин та матеріалів (меблі з дерева, пластикові вироби, гума, паперові вироби, що поглинає покриття на стінах). Згідно ДСТУ Б.В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень та споруд за вибухопожежної та пожежної небезпекою», наукову та дослідницьку лабораторії відносять до пожежо-небезпечних приміщень категорії В (тверді горючі й важкогорючі речовини й матеріали, речовини й матеріали, що при взаємодії з водою, киснем, повітрям або одним з іншим можуть лише горіти).

Згідно з класифікацією що до робочої зони відповідно до ДНАОП 0.00-1.32-01 науково-дослідницької лабораторії та робочих зон, що відносяться до зон класу П-Па—пожежонебезпечне, які містять тверді легкозаймисті речовини, які не здатні до переходу у зважений стан.

Загоряння може бути через електричні іскри, коротке замикання, перевантаження електричних провідників, несправність електроапаратури, куріння в приміщенні. Тому для запобігання пожеж в приміщеннях проводять пожежно-профілактичні заходи: застосування запобіжників в електричних мережах, використання пило непроникних сполучних і розподільних коробок, а також проводиться інструктаж з техніки пожежної безпеки.

Згідно з ДСТУ 3675-98 12.4.009-75 та ISO 3941-77 в лабораторії знаходяться вогнегасники двох типів: вуглекислотний типу «ОУ-5» і порошковий «ОП-2». «ОУ-5» розташований на висоті 1,5 м від підлоги поруч з виходом.

В коридорах знаходяться ящики, в яких знаходиться пожежний кран і пожежний рукав, а також вогнегасник типу «ОХП-2».

В протилежних кінцях коридору розташовані телефонні апарати, над якими розміщено таблички з номерами телефонів для виклику внутрішньої і міської пожежної служби.

ВИСНОВКИ

Науково-дослідницька робота включає в себе дослідження зворотного перетворювача з транзистором на основі нітриду галію.

1. Транзистори на основі нітриду галію, серед груп польових транзисторів порівняно наприклад з кремнієвими транзисторами відрізняється меншим опором відкритого каналу та меншою внутрішньою ємністю. Ці властивості забезпечують зменшення статичних втрат провідності більш ніж у 3 рази та забезпечує досягнення високої швидкості переключення

Топологія зворотного перетворювача потребує ефективного захисту від електромагнітних завад. Під час розробки експериментального пристрою враховувались втрати енергії на обмотках трансформатора у вигляді кола обмежувача індуктивних викидів. Обраний нами режим перерваної провідності (*DCM*) дозволило застосувати, у експериментальному пристрою менший за потужністю трансформатор з типорозміром осердя *EE 30/15/7*, індуктивність первинної обмотки якого складає 300 мкГн.

2. Спроекований експериментальний пристрій має вихідну потужність 10 Вт, живиться від напруги 90~220 В, забезпечуючи на виході напругу 5 В та струм 2 А, розроблена в роботі методика конструювання приладу забезпечує отримання конструкції блоку живлення потужністю до 200 Вт без заміни топології схеми. При цьому у якості головного транзистора рекомендовано галійнітридний транзистор типу *GS-065-004-1-L*. Забезпечення ефективної роботи розробленого блоку живлення потужністю 10 Вт задовольняється використанням пристрою драйвера транзистора типу *LMG1020*, який дозволяє збільшити частоту переключання транзистора до 60 МГц. Динамічні завади та пульсації, що виникають у транзисторі через викиди енергії трансформатора приблизно на 80% менші, ніж у розглянутому аналогу блоку живлення типу *PMP30308* та розглянутій моделі пристрою з кремнієвим польовим транзистором типу *STP8NM60*. Незначні викиди струму не потребують додаткових фільтруючих

засобів. Втрати потужності розсіювання на транзисторі складають у середньому 148 мВт при корисній потужності 3 Вт становить величину ККД у 95%. Розроблені схемотехнічні рішення дозволили зменшити вихідні пульсації напруги приблизно на 60%.

3. Під час проектування друкованої плати приладу увагу приділено компоновці елементів, аби ізолювати високовольтну частину схеми та зменшити довжину з'єднувальної доріжок у схемі підключення головного транзистора для зменшення впливу паразитних зв'язків на роботу приладу. Шар заземлення, зроблений окремим полігоном, котрий дозволить зменшити вплив зовнішніх та внутрішніх електромагнітних завад. Спроектована друкована плата має розмір 120x80 мм, що дозволяє використовувати блок живлення в малогабаритних системах.

4. Результатом теплового моделювання друкованої плати, на яку подано живлення 220 В та направлений потік повітря з об'ємною витратою в 0,2 м³/с, при температурі навколишнього середовища в 20 °С дає збільшення температури контролера типу *LTC3803*, яка становить 84 °С та температура силових елементів ланцюгу живлення, не більше 70 °С. Температура головного транзистора при цьому складає приблизно 28 °С. Низький викид тепла з транзистора не потребує додаткових засобів охолодження.

Машинне моделювання експериментального імпульсного блоку живлення на основі зворотногоходового перетворювача виявила, що використання транзисторів на основі нітриду галію дозволяє досягнути більшої енергоефективності приладу та відкриває дорогу для створення нових типів радіоелектронні пристроїв, які б відповідали сучасним вимогам.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. New concepts for normally-off power Gallium Nitride (GaN) High Electron Mobility Transistor (HEMT). / Saleem Hamady. — Micro and nanotechnologies/Microelectronics. Universite Toulouse III Paul Sabatier. — 2014.
2. GaN HEMT Technology for Environmentally Friendly Power Electronics. / Tatsuya Hirose, Miki Imai, Keiji Watanabe. — FUJITSU Sci. Tech. J. — 2017.
3. GaN Transistors for Efficient Power Conversion / Alex Lidow, Michael de Rooij, Johan Strydom, David Reusch, John Glaser. — John Wiley & Sons. — 2014.
4. GN001 Application Guide Design with GaN Enhancement mode HEMT [електроний ресурс] — Режим доступу: https://gansystems.com/wp-content/uploads/2018/02/GN001_Design_with_GaN_EHEMT_180228-1.pdf — Назва з екрану.
5. Optimizing GaN performance with an integrated driver [електроний ресурс] — Режим доступу: <https://www.ti.com/lit/wp/slyy085/slyy085.pdf> — Назва з екрану.
6. GaN Power Devices: Potential, Benefits, and Keys to Successful Use / Bill Schweber. — Mouser EIU — 2018.
7. Switch-Mode Power Supplies Spice Simulations and Practical Designs, 2nd edition edn. / Christophe Basso. — New York: Mcgraw-Hill Education. — 2014.
8. Darkholme V. Efficiency Calculations of Synchronous Flybutt Converter / Van Darkholme, Bill Herrington, Ricardo Milos. — DungeonPrint. — 2016.
9. Pulse-width Modulated DC–DC Power Converters / Marian K. Kazimierczuk. — Dayton, Ohio, USA: Wright State University. — 2008.

10. Силовая электроника. От простого к сложному. / Семёнов Б. У. — Москва: СОЛОН-Пресс — 2005
11. Switching Power Supply Design / Abraham I. Pressman — USA:McGraw-Hill — 1998.
12. Design Guide for Off-line Fixed Frequency DCM Flyback Converter. [электронный ресурс] — Режим доступа: https://www.mouser.com/pdfdocs/DN_201301.pdf — Назва з екрану.
13. GS-065-004-1-L Bottom-side cooled 650 V E-mode GaN transistor Preliminary Datasheet [электронный ресурс] — Режим доступа: <https://gansystems.com/wp-content/uploads/2019/03/GS-065-004-1-L-DS-Rev-190301.pdf> — Назва з екрану
14. LTC3803 Constant Frequency Current Mode Flyback DC/DC Controller in ThinSOT [электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/3803fc.pdf> — Назва з екрану
15. LMG1020 5-V, 7-A, 5-A Low-Side GaN and MOSFET Driver For 1-ns Pulse Width Applications datasheet (Rev. B) [электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmg1020.pdf> — Назва з екрану
16. Demystifying Type II and Type III Compensators Using Op-Amp and OTA for DC/DC Converters [электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/an/slva662/slva662.pdf> — Назва з екрану
17. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів ДНАОП0.00-121-98 — 1С Основа, 1998.
18. ГОСТ 23751-86 Платы печатные. Основные параметры конструкции.
19. ГОСТ 12.1.004-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования.
20. ГОСТ 12.1.038-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.

21. НАПБ Б.03.002-2007 Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпечкою.
22. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення.
23. ДСН 3.3.6.042-99 Санитарные нормы микроклимата производственных помещений.
24. Вимоги безпеки до електричного устаткування для вимірювання, керування та лабораторного застосування. Частина 1. Загальні вимоги ІЕС 61010-1:2005 — К.: Держспоживстандарт України, 2008.
25. ДБН В.2.5-56:2014 Системи протипожежного захисту.
26. Бурковский Я. Ю. Применение галлий-нитридных транзисторов (GAN FET) в системах питания современной РЭА: матеріали міжнародної науково-технічної конференції [“Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи”] / Бурковский Я. Ю., Арсенюк Д. О. — Київ — 2019.
27. Арсенюк Д.О. Зворотноходовий перетворювач (FLYBACK) з галій-нітридовим (GAN) транзистором: матеріали міжнародної науково-технічної конференції [“Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи”] / Арсенюк Д. О., Бурковский Я. Ю.— Київ — 2019.

ДОДАТОК А

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

ПОГОДЖЕНО

Науковий керівник, доцент кафедри радіоконструювання та виробництва радіоапаратури

_____ Ю.Ф. Зіньковський
(підпис) д.т.н., професор

(дата)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри радіоконструювання та виробництва радіоапаратури

_____ Є.А. Нелін
(підпис) д.т.н., професор

(дата)

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ

Зворотногоходовий перетворювач з транзистором на основі нітриду галію

1 НАЗВА ТА ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ

Підставою для виконання є завдання на виконання магістерську дисертацію.

2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ

2.1 ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження: імпульсний блок живлення створений за топологією тополгії зворотноходового перетворювача с транзистором на основі нітриду галію.

Предмет дослідження: вихідні характеристики блоку живлення, пульсації напруги на виході приладу, струм та напруга на головному перемикаючому транзисторі та тепловий аналіз блоку живлення.

2.2 МЕТА РОБОТИ

Метою магістерської дисертації є аналіз роботи імпульсного блоку живлення створеного за топологією зворотноходового перетворювача з використанням польового транзистора на основі нітриду галію.

2.3 ЗАДАЧІ, ЯКІ ПОТРЕБУЮТЬ ВИРІШЕННЯ

Розроблення моделі пристрою блоку живлення.

Розроблення макету друкованої плати в середовищі *Altium Design*.

Проведення моделювання в середовищі *LTSpice*: вихідних характеристик пристрою, характеристик роботи транзистора.

Проведення моделювання в середовищі *SolidWorks FlowSimulation*.

3 ВИХІДНІ ДАННІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

1. Switch-Mode Power Supplies Spice Simulations and Practical Designs, 2nd edition edn. / Christophe Basso. — New York: Mcgraw-Hill Education. — 2014.

2. Pulse-width Modulated DC–DC Power Converters / Marian K. Kazimierczuk. — Dayton, Ohio, USA: Wright State University. — 2008
3. Lidow A. GaN Transistors for Efficient Power Conversion / Alex Lidow, Michael de Rooij, Johan Strydom, David Reusch, John Glaser. — John Wiley & Sons. — 2019.
4. New concepts for normally-off power Gallium Nitride (GaN) High Electron Mobility Transistor (HEMT). / Saleem Hamady. — Micro and nanotechnologies/Microelectronics. Universite Toulouse III Paul Sabatier. — 2014.
5. Switching Power Supply Design / Abraham I. Pressman — USA:McGraw-Hill — 1998.
6. Силовая электроника. От простого к сложному. / Семёнов Б. У. — Москва: СОЛОН-Пресс — 2005.

4 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ

Дисертація має бути виконана якісно та у встановлений у календарним планом термін. Моделювання роботи пристрою створюється у середовищі *LTSpice*, температурне дослідження макету створюється у середовищі *SolidWorks FlowSimulation*.

5 ЕТАПИ ТА ТЕРМІН ВИКОНАННЯ

Етап	Зміст етапу	Термін виконання
Вибір напрямку дослідження	Пошук та аналіз літератури. Розроблення, погодження та затвердження ТЗ	Лютий 2019
Теоретичні та експериментальні дослідження	Теоретичні розрахунки. Проведення експериментальних робіт та дослідження.	Березень-Травень 2019

Узагальнення і оцінювання результатів та складання звітної документації	Узагальнення результатів теоретичних та експериментальних робіт. Оцінювання повноти і якості поставлених завдань. Підготовка комплекту звітної документації	Вересень-Листопад 2019
Захист дисертації	Представлення дисертації кафедрі. Попередній захист. Захист перед екзаменаційною комісією.	Грудень 2019

6 ОЧІКУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ

1. Огляд предметної області, поставили завдання для магістерської дисертації.
2. Провести розробку необхідного для дослідження блоку живлення.
3. Провести моделювання та аналіз результату.

7 МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬСЯ ПО ЗАКІНЧЕННЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Завдання на магістерську дисертацію
2. Технічне завдання
3. Пояснювальна записка
4. Електронна презентація

8 ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ЇЇ ЕТАПІВ

1. Поетапне узгодження з керівником
2. Представлення кафедрі
3. Попередній захист

4. Захист перед екзeмінаційною комісією

9 ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАЛЬНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

1. ДСТУ 3008-2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлювання.
2. ДСТУ 3973-2000. Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Правила використання науково-дослідних робіт. Загальні положення.

10 ПРИБЛИЗНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Аналітичний огляд
2. Розробка моделі пристрою блоку живлення
3. Моделювання та аналіз пристрою блоку живлення
4. Висновки

Виконавець

Науковий керівник

Д.О. Арсенюк

(підпис)

Ю.Ф. Зіньковський

(підпис)

ДОДАТОК Б

ЗВОРотноХОДОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ (FLYBACK) З ГАЛІЙ-НІТРИДОВИМ (GAN) ТРАНЗИСТОРОМ

*Арсенюк Д.О., магістрант; Бурковский Я.Ю., магістрант
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна*

Популярність зворотноходових перетворювачів (flyback) на сьогодні значно підвищилась у зв'язку з простотою та дешевизною даного схематехнічного рішення. Його використовують у адаптерах для ноутбуків, DVD-плеєрах, ЖК-телевізорах тощо. Разом із тим, зростають потреби у енергоефективності приладів. Одним із вирішенням цього питання може слугувати використання галій-нітريدних (GaN) польових транзисторів.

Flyback-перетворювач являє собою топологію імпульсного блоку живлення з гальванічною розв'язкою між входом та виходом. Основним елементом перетворювача є трансформатор, який виконує функцію ізолятора та зберігача магнітної енергії.

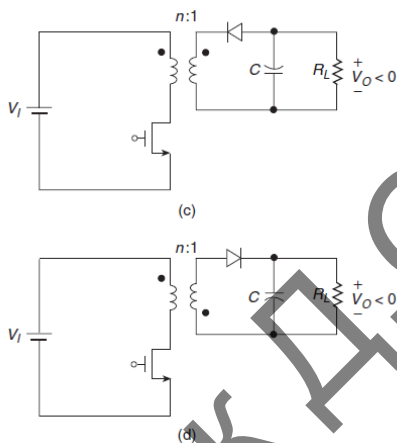


Рисунок 1. Еквівалентна схема flyback-перетворювача

Еквівалентна схема перетворювача зображена на рис. 1. Вона складається з силового транзистора, який функціонує, як перемикач, трансформатора, діода та фільтруючого конденсатора. Трансформатор виконує дві функції: забезпечує ізоляцію постійного струму та накопичує магнітну енергію. Рівень потужності, зазвичай, у перетворювачів даного типу сягає 20-200 Вт.

Існує декілька режимів роботи flyback-перетворювачів. Continuous conduction mode (CCM) працює за принципом постійного протікання струму, через трансформатор упродовж кожного циклу. Коли транзистор закритий, струм на трансформаторі збільшується. Коли ж транзистор виключений, енергія з трансформатора передається через вторинну обмотку та розмагнічує трансформатор. Остаточна енергія залишається у трансформаторі до наступного циклу, тому струм там не досягає нуля. Discontinuous conduction mode (DCM) працює за принципом, коли енергія, накопичена у осерді трансформатора, подається на вторинну обмотку під час фази виключення, тоді як струм на первинній обмотці падає до нуля до наступного циклу переключення. Вторинна обмотка трансформатора розряджає всю накопичену енергію, поки струм на діоді не впаде до нуля до наступного циклу.

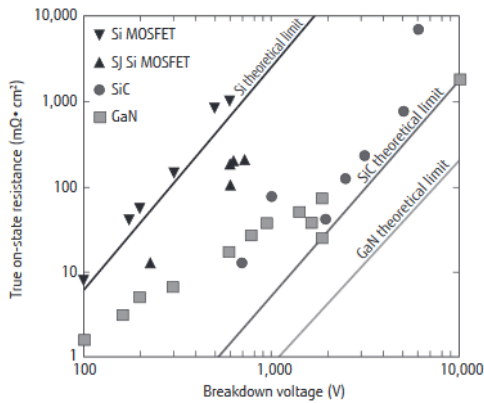


Рисунок 2. Порівняння GaN з кремнієм та кремній карбонм (SiC) з точки зору взаємодії опору відкритого каналу та напруги пробою

ються транзистори на основі нітриду-галію (GaN). Більш високий теоретичний ліміт, показаний на рис. 2, дозволяє досягнути зменшення статичних завад, за рахунок зменшення опору відкритого каналу, та високої швидкості перемикавання, так як GaN-транзистор забезпечує вхідну ємність. У результаті, транзистори можуть працювати при сотнях вольт з мінімальним перехідним процесом.

У якості прикладу ефективності блоку живлення з GaN-транзистором, розглянемо пристрій, вхідні параметри для розрахунку якого вказані у таблиці 1.

Провівши розрахунок, за допомогою методик із [1,3] для флубек-перетворювача с кремнієвим польовим транзистором та галій-нітридним, проведемо аналіз напруги та струму стік-витік транзистора.

Результати аналізу зображені на рис. 3 та рис. 4.

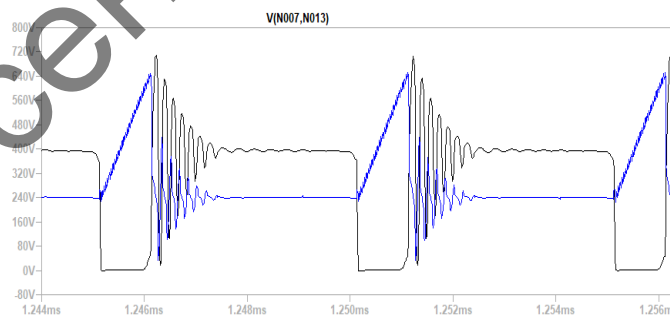


Рисунок 3. Напруга та струм стік-витік кремнієвого транзистора у флубек-перетворювачі

шою ефективністю та дозволяє зменшити необхідність в охолодженні.

Як бачимо, вибір транзистора грає ключову роль в роботі блоку живлення. Збільшивши швидкість перемикавання у схемі можна досягти більшої ефективності роботи пристрою. У міру розвитку технології кремнієвих транзисторів постійно удосконалювались: знижувалися опір відкритого каналу, збільшувалась робоча напруга, швидкість перемикавання і тд. Але на даний час технологія виробництва досягла свого піку та параметри кремнієвих польових транзисторів фізично досягли своєї теоретичної межі. Саме тому найбільш перспективною являються

Таблиця 1

Вхідна напруга	90-320 В
Вихідна напруга	5 В
Вихідний струм	2 А
Частота переключення	320 кГц

Як видно із характеристик, на кремнієвому транзисторі виникають втрати, які обумовлені розрядженням внутрішньої ємності транзистора та взаємодією з індуктивністю розсіювання трансформатора. Використання GaN-транзистора дозволило зменшити пульсації та завади, що забезпечує блок живлення більшою



Рисунок 4. Напряга та струм стік-витік у галій-нітридовому транзисторі флябак-перетворювача

Тому використання перспективної технології на основі галій-нітриду дозволяє досягти більшої енергоефективності приладу, що являється, на сьогоднішній день, необхідним критерієм розробки сучасних систем живлення РЕА та дозволяє збільшувати вимоги до їх створення.

Перелік посилань

1. Switch-Mode Power Supplies Spice Simulations and Practical Designs, 2nd edition edn. / Christophe Basso. — New York: Mcgraw-Hill Education. — 2014.
2. Darkholme V. Efficiency Calculations of Synchronous Flybutt Converter / Van Darkholme, Bill Herrington, Ricardo Milos. — DungeonPrint. — 2016.
3. Pulse-width Modulated DC–DC Power Converters / Marian K. Kazimierczuk. — Dayton, Ohio, USA: Wright State University. — 2008.

Анотація

У роботі представлений аналіз роботи блоку живлення топології зворотноходових перетворювача із застосуванням галій нітридових польових транзисторів.

Ключові слова: галій-нітрид, GaN, зворотноходовий перетворювач, флябак, живлення РЕА.

Аннотация

В работе представлен анализ работы блока питания топологии обратногоходового преобразователя с использованием галлий-нитридовых полевых транзисторов.

Ключевые слова: галлий-нитрид, GaN, обратногоходовой преобразователь, флябак, питание РЕА.

Abstract

This work present analysis of flyback convertor using gallium nitride based transistor.

Keywords: gallium-nitride, GaN, flyback convertor basic, SMPS.

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЛЛИЙ-НИТРИДНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ (GAN FET) В СИСТЕМАХ ПИТАНИЯ СОВРЕМЕННОЙ РЭА

*Бурковский Я.Ю., магистрант; Арсенюк Д.О., магистрант
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна*

Создание компактных и эффективных преобразователей для систем питания РЭА является одной из ключевых задач современной силовой электроники. Непрерывный рост требований к эффективности и тепловыделению конечных устройств, особенно, с батарейным питанием, заставляет разработчиков систем питания постоянно искать новые решения.

В современных преобразователях энергии основными силовыми элементами являются IGBT (биполярные транзисторы с изолированным затвором) и FET-транзисторы (транзисторы на полевом эффекте). В свою очередь FET-транзисторы разделяют на MOSFET (полевой транзистор с изолированным затвором), SiC MOSFET (полевой транзистор с изолированным затвором на основе карбида кремния) и GaN FET (полевой транзистор на основе нитрида галлия). IGBT и SiC MOSFET имеет смысл применять при достаточно высоких напряжениях питания, тогда как GaN FET и MOSFET отлично подходят для низковольтных преобразователей. Поэтому целесообразно сравнивать GaN FET именно с традиционными N-ch MOSFET.

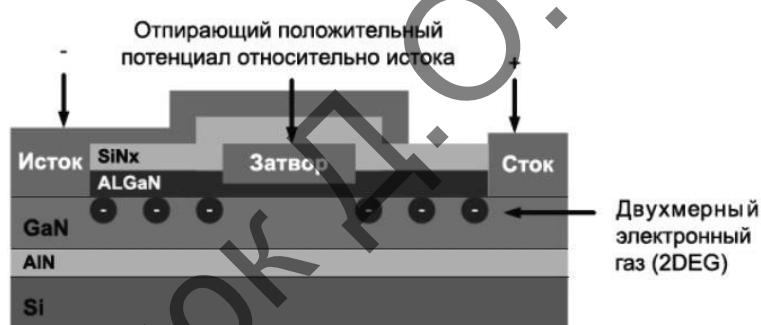


Рисунок 1. Конструкция enhancement mode AlGaN транзистора. Источник: EPC

Несмотря на схожесть с классическими MOSFET транзисторами, GaN FET имеют ряд ключевых отличий, обусловленных особенностями конструкции транзистора (рис.1). Одним из основных отличий от MOSFET-транзисторов, является отсутствие паразитного диода. Это позволяет избежать появления сквозных токов при восстановлении диодов. Кроме того, у GaN транзисторов нет неосновных носителей заряда, соответственно им не требуется время на восстановление изолирующих свойств канала. Эти особенности позволяют создавать абсолютно новые топологии преобразователей, которые невозможно было бы реализовать на классической элементной базе.

Значительным недостатком традиционных MOSFET является нелинейная зависимость тока через транзистор от заряда затвора, обусловленная в том числе и эффектом Миллера. Это увеличивает время переключения, вызывает рост динамических потерь и способствует возникновению нежелательных пульсаций тока и напряжения в силовых контурах устройства. В отличие от

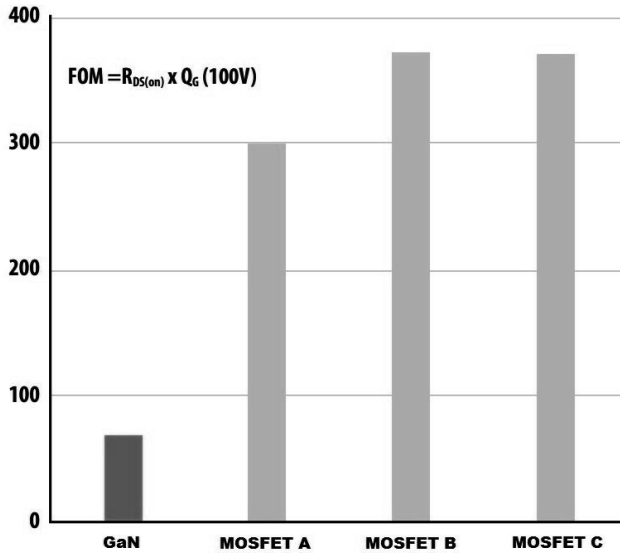


Рисунок 2. Сравнение FOM GaN и MOSFET транзисторов. Источник: EPC

MOSFET, ток через канал GaN транзистора линейно зависит от заряда затвора. Кроме того, время переключения GaN транзисторов, на порядок меньше, чем у лучших MOSFET-транзисторов этого класса, а энергия, необходимая для управления транзистором на 25% меньше. Это можно проиллюстрировать при помощи Figure Of Merit (FOM) — эмпирического показателя эффективности силового транзистора, который рассчитывается как произведение полного заряда затвора на сопротивление полностью открытого канала. На рис. 2 приве-

дено сравнение FOM GaN и нескольких MOSFET транзисторов. Как можно увидеть, FOM GaN транзисторов гораздо меньше, что означает более высокую эффективность работы транзистора в сравнении с обычными MOSFET.

В качестве примера эффективности GaN транзисторов в роли силового элемента традиционного преобразователя, рассмотрим классический синхронный buck-конвертер. Входные параметры для расчета указаны в табл. 1 — типичные значения для блоков питания телекоммуникационных систем.

Таблица 1

Входное напряжение	48В
Выходное напряжение	5В
Выходной ток	25А
Рабочая частота	1МГц
Выходные пульсации	<100мВ

Воспользовавшись методиками расчета потерь из [1] для GaN и [2, 3] для MOSFET, построим зависимости потерь от выходного тока для MOSFET и GaN транзисторов (рис. 3, рис. 4)

В качестве тестовых транзисторов были выбраны MOSFET BSC037N08NS5 (нижнее плечо) и BSC117N08NS5 (верхнее плечо) производства компании Infineon и GaN-сборка EPC2102 производства Efficient Power Conversion.

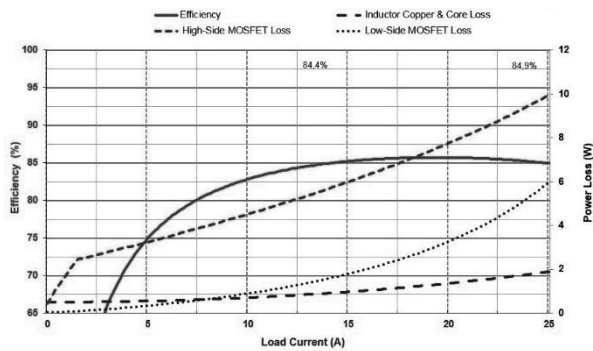


Рисунок 3. График зависимости потерь от тока нагрузки для MOSFET-транзисторов

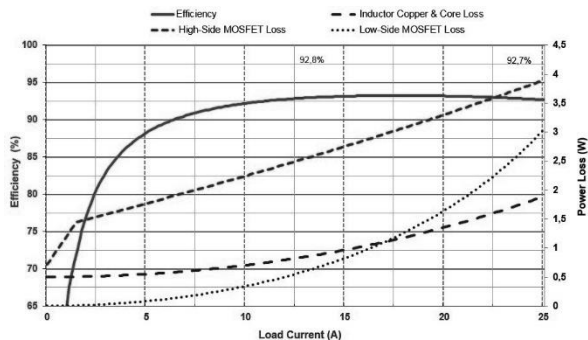


Рисунок 4. График зависимости потерь от тока нагрузки для GaN-транзисторов

Как видно, при применении GaN-транзисторов в тех же условиях, КПД преобразователя вырос практически на 10%, а суммарные потери в транзисторах уменьшились более чем в 3 раза, что позволило создать более компактный преобразователь и уменьшить необходимую систему охлаждения более чем в 2 раза.

Подобный рост критичен для систем питания современной РЭА, т.к. позволяет достигать большей энергоэффективности и создавать электронику, соответствующую самым современным требованиям.

Перелік посилань

1. Lidow A. GaN Transistors for Efficient Power Conversion / Alex Lidow, Michael de Rooij, Johan Strydom, David Reusch, John Glaser. — John Wiley & Sons. — 2019.
2. Darkholme V. Efficiency Calculations of Synchronous Buck Converter / Van Darkholme, Bill Herrington, Ricardo Milos. — DungeonPrint. — 2016.
3. Dr. Dušan Graovac. MOSFET Power Losses Calculation Using the DataSheet Parameters / Dušan Graovac, Marco Pürschel, Andreas Kieper. — Infineon Technologies AG — 2006.

Анотація

У роботі представлений аналіз застосування GaN-транзисторів в сучасній РЕА та проведено порівняння з MOSFET-транзисторами в buck-перетворювачі.

Ключові слова: галій-нітрид, GaN, MOSFET, buck-конвертер, живлення РЕА.

Аннотация

В работе представлен анализ применения GaN-транзисторов в современной РЭА и проведено сравнение с MOSFET-транзисторами в buck-преобразователе.