

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

Факультет електроніки

Кафедра електронних пристроїв та систем

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Євген ВЕРБИЦЬКИЙ

«__» червня _____ 2025 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Електронні компоненти і системи»
спеціальності 171 «Електроніка»**

на тему: «Високовольтне джерело живлення озонного генератора»

Виконав :

студент IV курсу, групи ДЕ-11
Кошовий Антон Сергійович

Керівник:

доцент каф. ЕПС, к.т.н.
Сидоренко Сергій Бористович

Рецензент:

декан АМЕС, д.т.н., професор
Найда Сергій Анатолійович

Консультант

з нормоконтролю
доцент каф. ЕПС, к.т.н., доцент
Батрак Лариса Миколаївна

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроніки
Кафедра електронних пристроїв та систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 171 «Електроніка»

Освітньо-професійна програма «Електронні компоненти і системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Євген ВЕРБИЦЬКИЙ

«21» травня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Кошовому Антону Сергійовичу

1. Тема проєкту «Високовольтне джерело живлення озонного генератора»

керівник проєкту Сидоренко С. Б. доцент кафедри ЕПС, к.т.н.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання,

затверджені наказом по університету від «03» червня 2025 р. № 1885-с

2. Термін подання студентом проєкту «10» червня 2025 р.

3. Вихідні дані до проєкту : тип генератора – імпульсний високовольтний; мікроконтролер – ATtiny85; частота ШІМ – 20 кГц; напруга живлення – 12 – 20 В; метод виготовлення плати – термотрансфер; розміри плати – 70×50 мм; спосіб монтажу – ручний; моделювання – Proteus 8 Professional; середовище розробки – KiCad.

4. Зміст пояснювальної: аналіз фізичних процесів, що лежать в основі формування коронного та бар'єрного розрядів, електричні характеристики, умови запалення та вплив параметрів середовища на ефективність озонуутворення.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): схема електрична функціональна, схема електрична структурна, схема електрична принципова, плата.

6. Консультанти розділів проєкту

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

7. Дата видачі завдання 21 травня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд науково-технічної літератури з генерації озону, розрядів у газах та імпульсних перетворювачів	03.03.2025-07.04.2025	
2	Аналіз схемотехнічних рішень, вибір архітектури високовольтного генератора	07.04.2025-21.04.2025	
3	Підбір елементної бази та розрахунок ключових параметрів вузлів схеми	22.04.2025-28.04.2025	
4	Моделювання роботи схеми у середовищі Proteus, аналіз осцилограм	29.04.2025-06.05.2025	
5	Проектування друкованої плати в середовищі KiCad, трасування та перевірка	07.05.2025-14.05.2025	
6	Виготовлення плати, монтаж і паяння елементів, перевірка працездатності	15.05.2025-19.05.2025	
7	Розробка структурної та функціональної схем, підготовка технічної документації	20.05.2025-28.05.2025	
8	Написання розділів пояснювальної записки, формування висновків та рекомендацій	29.05.2025-06.06.2025	

Студент

Антон КОШОВИЙ

Керівник

Сергій СИДОРЕНКО

АНОТАЦІЯ

У цьому дипломному проєкті було спроектовано, реалізовано та досліджено високовольтний імпульсний генератор для застосування в системах озонування повітря. Об'єкт дослідження — процес формування високовольтних імпульсів для ініціації коронного або бар'єрного розряду. Предмет дослідження — електронна схема джерела високої напруги на базі мікроконтролера.

Метою роботи є створення компактного, надійного та енергоефективного пристрою, здатного забезпечити стабільне високовольтне живлення для побутових і лабораторних озонаторів.

У роботі проведено аналіз існуючих технічних рішень, обґрунтовано вибір основних компонентів схеми. На основі обраної структури розроблено принципову схему генератора та виконано її моделювання у середовищі Proteus 8 Professional.

Під час моделювання досліджено форми керуючих імпульсів, напругу на первинній обмотці трансформатора, стоковий струм, струм затвору та миттєву потужність комутації. Особливу увагу приділено втратам у силовому каскаді, тривалості фронтів, а також аналізу ефективності роботи за різної скважності ШІМ-сигналу.

Результати проєкту підтверджують доцільність використання розробленого генератора в системах знезараження повітря, медичних озонаторах та мобільних пристроях екологічного контролю.

Пояснювальна записка містить 72 сторінок, 36 ілюстрацій, 5 таблиць, 1 структурну схему, 1 функціональну схему, 1 принципову схему, 1 схема друкованої плати та 3 технологічні карти.

Ключові слова: високовольтний генератор, озонатор, дуговий розряд, трансформатор, очищення повітря, генерація озону, електроніка.

ANNOTATION

In this graduation project, a high-voltage pulse generator for use in air ozonation systems was investigated, designed and implemented. The object of research is the process of forming high-voltage pulses to initiate corona or barrier discharge. The subject of research is an electronic circuit of a high-voltage source based on a microcontroller.

The purpose of the work is to create a compact, reliable and energy efficient device capable of providing stable high-voltage power for household and laboratory ozonizers.

The work analyzes the existing technical solutions, justifies the choice of the main components of the scheme. Based on the selected structure, a schematic diagram of the generator was developed and modeled in the Proteus 8 Professional environment.

During the simulation, the forms of control pulses, the voltage at the primary winding of the transformer, the drain current, the gate current and the instantaneous switching power were investigated. Particular attention is paid to the losses in the power cascade, the duration of the fronts, as well as the analysis of the efficiency of work at different severity of the PWM signal.

The results of the project confirm the feasibility of using the developed generator in air disinfection systems, medical ozonators and mobile environmental control devices.

The explanatory note contains 72 pages, 36 illustrations, 5 tables, 1 block diagram, 1 functional diagram, 1 schematic diagram, 1 printed circuit board diagram, and 3 technological maps.

Keywords: high -voltage generator, ozonator, arc discharge, transformer, air purification, ozone generation.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1 РОЗЯДИ АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ ТА СХЕМОТЕХНІЧНИЙ АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ЇХ ГЕНЕРАЦІЇ.....	11
1.1 Електричні розряди в газовому середовищі.....	11
1.1.1 Бар'єрний розряд.....	12
1.1.2 Електросинтез озону в бар'єрному розряді.....	16
1.1.3 Аналіз впливу параметрів озону в бар'єрному розряді	19
1.1.4 Коронний розряд	20
1.1.5 Критерії запалення коронного розряду	22
1.1.6 Коронний розряд в лабораторних умовах	23
1.1.7 Вольт-амперні характеристики та вплив вологості на коронний розряд	24
1.1.8 Особливості та сфери застосування коронного розряду	27
1.2 Імпульсні перетворювачі для високовольтних джерел живлення	28
1.2.1 Зворотний перетворювач.....	29
1.2.2 Прямий перетворювач	33
1.2.3 Двотактний перетворювач	36
2 РОЗРАХУНОК ПРИСТРОЮ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ВИСОКОЇ НАПРУГИ....	40
2.1. Аналіз основних компонентів.....	44
2.1.1 Мікроконтролер DigiSpark на базі ATtiny85.....	44
2.1.2 Транзистор BC337.....	45
2.1.3 Драйвер затвору DS0026	47
2.1.4 MOSFET транзистор IRF740.....	48
2.1.5 Діод 1N4936	50
2.2. Моделювання, розрахунки та аналіз результатів	51
2.2.1 Аналіз сигналу ШІМ та каскаду підсилення.....	52
2.2.2 Послідовність керування: сигнал до MOSFET	53

									Арк.
									7
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата					

2.2.3 Поведінка силового ключа та навантаження	54
2.2.4 Аналіз режимів роботи ключових компонентів	56
2.2.5 Аналіз переваг і обмежень конструкції	57
3 РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИСТРОЮ: ПРОЄКТУВАННЯ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ	58
3.1 Розробка конструкції друкованої плати	58
3.2 Трасування та особливості плати	60
3.3 Технологія виготовлення друкованої плати.....	62
3.4 Монтаж та збирання пристрою.....	64
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	66
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	69
ДОДАТОК А	
ДОДАТОК Б	
ДОДАТОК В	
ДОДАТОК Г	
ДОДАТОК Д	
ДОДАТОК Е	
ДОДАТОК Ж	
ДОДАТОК З.....	

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ССМ – режим безперервної провідності (Continuous Conduction Mode);

ШІМ – Широтно-імпульсна модуляція;

ЕРС – електрорушійна сила;

ВЧ – високі частоти;

ПЗ – програмне забезпечення;

САПР – система автоматизованого проєктування;

					<i>ДЕ11. 111005. 001 ПЗ</i>	Арк.
						9
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Пі дпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

На сьогоднішній день людство зіштовхується з новими викликами, пов'язаними з погіршенням екологічної ситуації, поширенням вірусних захворювань, а також зростанням потреби у дезінфекції повітря та поверхонь. У зв'язку з цим зростає інтерес до технологій, що забезпечують ефективне очищення повітря. Однією з найбільш перспективних є озонування — процес, при якому за допомогою електричного розряду утворюється озон (O_3), відомий своїми потужними окиснювальними та бактерицидними властивостями.

Озонатори набули широкого застосування, як у побуті, так і в промисловості, однак для їхньої ефективної роботи необхідне надійне джерело високої напруги. Саме тому актуальною є розробка високовольтного генератора, який був би компактним, енергоефективним і доступним для самостійного виготовлення.

У межах цієї бакалаврської роботи було поставлено завдання розробити пристрій, що дозволяє генерувати стабільну високу напругу для озонування на основі коронного розряду. Проаналізувавши фізичні принципи бар'єрного та коронного розряду, було досліджено типи високовольтних перетворювачів, зокрема зворотний, прямий і двотактний, обґрунтовано вибір елементної бази та реалізовано готовий пристрій на основі мікроконтролера ATtiny85.

Проект включав в себе моделювання схеми в середовищі Proteus, розробку друкованої плати в KiCad, 3D-візуалізацію компонування, виготовлення та тестування пристрою. Отримані результати дозволили підтвердити працездатність схеми та оцінити її ефективність для застосування в озоногенераторах.

Отримані результати підтвердили функціональність розробленого пристрою та його придатність для використання в системах озонування. Розроблений пристрій поєднує компактність, доступність компонентної бази та достатню надійність для використання у побутових або лабораторних умовах.

									Арк.
									10
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата					

1. РОЗРЯДИ АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ ТА СХЕМОТЕХНІЧНИЙ АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ЇХ ГЕНЕРАЦІЇ

Високовольтні джерела живлення слабого струму знаходять широке застосування в екологічних, медичних, побутових та промислових приладах, зокрема для генерації озону. Озон (O_3) — це алотропна форма кисню, що має виражені окислювальні властивості, завдяки чому ефективно використовується для знезараження повітря, води, дезінфекції поверхонь і усунення запахів. Один із найефективніших методів його отримання в лабораторних і промислових умовах — електричний розряд у повітрі чи кисні.

Електричні розряди, які використовуються для генерації озону, можуть мати різну природу. Найпоширенішими серед них є бар'єрний та коронний розряди. Вони виникають при прикладанні високої напруги до електродів, між якими знаходиться газове середовище, і супроводжуються утворенням активних форм кисню, з яких надалі формується озон.

Для ефективної реалізації генерації озону необхідне спеціалізоване джерело живлення, здатне створювати високі напруги (десятки кіловольт) при відносно малому струмі. Такий режим є характерним для імпульсних або високочастотних перетворювачів, які можуть працювати в схемах зворотного, прямого або двотактного типу. Саме вибір схеми перетворювача впливає на стабільність, ефективність та габарити всього пристрою.

У цьому розділі розглянуто фізичну суть основних типів електричних розрядів, що забезпечують утворення озону, а також типові топології імпульсних перетворювачів, які дозволяють отримати необхідні параметри високовольтного живлення.

1.1 Електричні розряди в газовому середовищі

Проходження електричного струму крізь газоподібне середовище під впливом прикладеного електричного поля являє собою багатоаспектне фізичне

									Арк.
									11
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата					

явище. За звичайних обставин газові речовини характеризуються діелектричними властивостями, проте за специфічних умов вони набувають здатності до електропровідності внаслідок іонізаційних процесів, що відбуваються з атомами та молекулами. Результатом такої трансформації стає формування різновидів електричних розрядів, що відрізняються механізмом протікання, параметрами струму, конфігурацією провідного каналу та граничними умовами існування.

У високовольтних установках, де необхідно забезпечити інтенсивне електричне поле при відносно обмеженому струмі, ключову роль відіграють автономні (самопідтримувані) форми розрядів, серед яких виділяються діелектричний бар'єрний та коронний типи. Характерною особливістю цих явищ є відсутність дугового або іскрового розвитку при одночасному забезпеченні генерації активованих частинок у газовому об'ємі, що обумовлює їх цінність для технологічних процесів та наукових досліджень.

1.1.1 Бар'єрний розряд

Бар'єрним розрядом сьогодні називають розряд у газовому середовищі, який виникає під дією прикладеної напруги між електродами, де хоча б один з електродів обов'язково покривається шаром діелектрика. Початок систематичних досліджень бар'єрного розряду датується першими роками ХХ століття, роботами Е. Варбурга, О. Глокера і С. Лінда, а також в оглядах Ланта та Ю. В. Філіпова. Вивчаючи його основні характеристики, можна помітити певну періодичність струму при прикладанні знакозмінної напруги. Розряд виникає, коли миттєве значення напруги досягає певного порогового рівня, достатнього для іонізації газу. Погасання ж розряду відбувається в момент, коли напруга починає спадати й проходить через максимум або мінімум півперіоду сигналу, тобто до моменту інверсії полярності.[5]

Типова конфігурація бар'єрного розряду зображена на рис. 1.1. Так як діелектрик є ізолятором, він не може пропускати постійний струм, тому його діелектрична проникність і розміри товщини в поєднанні з похідною за часом

						Арк.
					ДЕ11. 111005. 001 ПЗ	12
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата		

напругою, $\frac{dU}{dt}$ визначають величину струму зміщення, який може проходити крізь діелектрик. Для виникнення розряду в газі електричне поле повинно бути достатньо сильним, щоб спричинити пробій. У випадку повітря за нормальних умов (1 атм, 20 °С) електричне поле має перевищувати критичне значення близько 3 кВ/мм. Саме при такій напруженості виникає іонізація молекул повітря та реалізується пробій між електродами. У більшості випадків струм у розрядному проміжку обмежується діелектриком, який виконує роль баласту без споживання енергії. Зазвичай як діелектричний бар'єр використовують скло, кварцове скло, кераміку, емаль або полімери. Іноді застосовують додаткові покриття для захисту або функціональності. На дуже високих частотах обмеження струму діелектриком знижується, тому розряди з діелектричним бар'єром працюють на частотах до 10 МГц. При атмосферному тиску ($\sim 10^5$ Па) у розрядному проміжку виникає багато мікророзрядів — це сприятливі умови для утворення озону, ексимерів і обробки димових газів.[17][21][5]

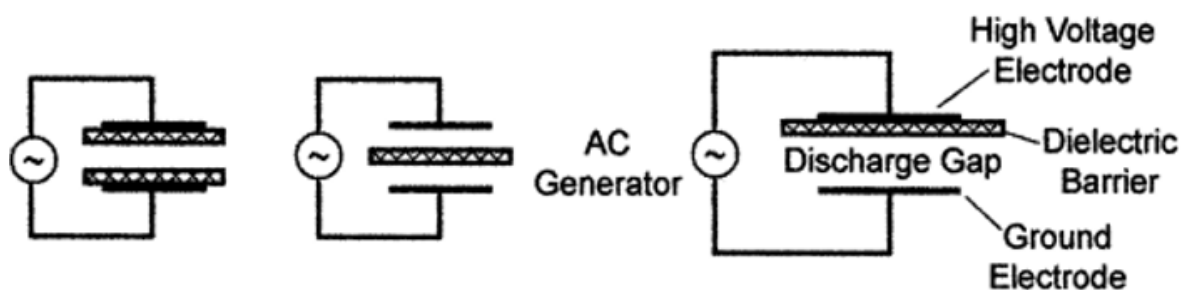


Рис. 1.1. Типова конфігурація діелектрично-бар'єрного розряду.

У ниткоподібному режимі плазмоутворення в бар'єрному розряді обмежується мікророзрядами, між якими газ не іонізується й виконує роль енергетичного буфера та середовища для перенесення активних частинок. У потужних установках один або обидва електроди часто охолоджуються рідиною. Крім плоских конструкцій, застосовуються також кільцеві розрядні проміжки з циліндричними електродами. Ширина таких проміжків може варіюватися від $< 0,1$ мм до кількох сантиметрів, а напруга для запуску розряду зазвичай

						Арк.
					ДЕ11. 111005. 001 ПЗ	13
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата		

становить від сотень до кількох тисяч вольт. Газ у системі може протікати (наприклад, при утворенні озону або обробці поверхонь), циркулювати (як у CO₂-лазерах) або бути повністю герметизованим (ексимерні лампи, флуоресцентні джерела, плазмові панелі). [15] [22]

На самій осцилограмі, поява розряду відмічається як викривлена форма кривої. Використовуючи широкополосну апаратуру, на даній кривій можна чітко розрізнити складові високочастотного струму (рис. 1.2) [15].

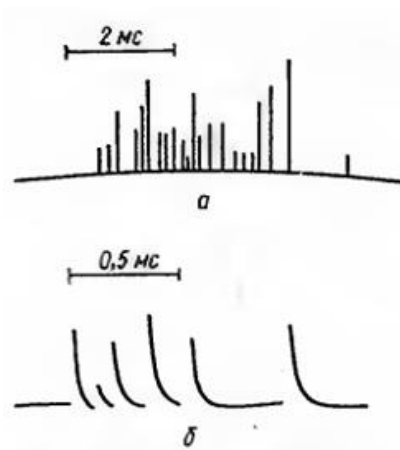


Рис. 1.2. Імпульси струму в бар'єрному розряді.

На рис. 1.3 зображено статичну ВАХ бар'єрного розряду в кисні і схема струмів і напруги на діелектричних бар'єрах, так точка *D* на горизонтальній осі – це уявне продовження кривої *AB* то перетину з віссю абсцис. Звідси величина проміжка *OD* являє напругу на газовому проміжку під час горіння розряду, звідси і сама назва цієї величини: напруга горіння розряду і позначається вона як U_r . Дана напруга є одна з основних характеристик бар'єрного розряду, де її визначення виконується через ВАХ.[14][22]

										Арк.
										14
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата	ДЕ11. 111005. 001 ПЗ					

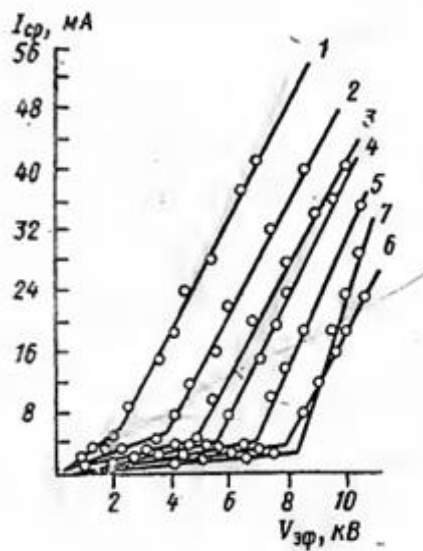


Рис. 1.4. ВАХ бар'єрного розряду з різними розрядними проміжками.

1.1.2 Електросинтез озону в бар'єрному розряді

Електросинтез озону в бар'єрному розряді характеризується двома ключовими особливостями: по-перше, його ефективність суттєво залежить від електричних параметрів розряду, а по-друге — сам процес зазвичай реалізується в режимі протікання газу. Через складну багатофакторну природу електричних явищ у бар'єрному розряді, кінетика синтезу озону також набуває складної залежності від умов проведення експерименту.[16]

Найбільш інформативним електричним параметром, що визначає інтенсивність генерації озону в електричному розряді, є середній струм, який відображає загальний обсяг перенесеного заряду через розрядний проміжок за певний час. За умови сталої напруги горіння (тобто напруги підтримки розряду), активна потужність, яка підводиться до плазми, є пропорційною середньому струму. Таким чином, вихід озону прямо залежить від величини середнього струму, що відображає рівень енергетичного внеску в одиницю об'єму газового середовища. [16] [24]

Оскільки процес генерації озону відбувається в умовах постійного газового потоку, при аналізі доцільно використовувати питому потужність, а не абсолютну. Цей параметр зручно визначати як добуток напруги підтримки розряду на середній струм, поділений на об'ємну витрату газу. Таким чином,

						ДЕ11. 111005. 001 ПЗ	Арк.
							16
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата			

нульового або першого порядку, а розпад — як реакція першого порядку. Це дає наступне диференціальне рівняння: [16]

$$\frac{dC}{dt} = K_0 - K_1 \cdot C + D_0 \frac{d^2C}{dy^2}, \quad (1.4)$$

де:

- C – концентрація озону,
- D_0 – коефіцієнт повздовжньої дифузії,
- y – координата вздовж потоку,
- K_0 та K_1 – відповідно константи синтезу та розпаду озону.

Зважаючи на пропорційність K_0 і K_1 до питомої потужності розряду, з цього рівняння можна вивести два асимптотичних розв'язки:

При відсутності дифузії: [16]

$$C = C_{cm} \cdot (1 - e^{-K_1 \frac{P}{V}}), \text{ де } C_{cm} = \frac{K_0}{K_1}. \quad (1.5)$$

При дуже великій дифузії: [16]

$$C = \frac{K_0 \cdot (\frac{P}{V})}{1 + \frac{K_1}{V}}. \quad (1.6)$$

Ці рішення адекватно описують поведінку концентрації озону в реакторі залежно від питомої потужності $\frac{P}{V}$, де P — активна потужність, а V — об'ємна швидкість потоку газу. При цьому рівняння відповідає умовам практичної реалізації, оскільки простіше використовується у розрахунках.[16]

На рис. 1.6 зображено характерні криві концентрації озону залежно від зміни фактора $\frac{P}{V}$. При фіксованій потужності й зміні швидкості потоку криві наближаються до граничного значення асимптотично. Однак при зміні потужності з'являється максимум, що пояснюється температурним впливом — зростанням температури газу в зоні розряду, який змінює кінетичні константи.[16] [23]

						Арк.
					ДЕ11. 111005. 001 ПЗ	18
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата		

Окрім частоти, на ефективність роботи впливають також геометричні та фізичні параметри системи. Зменшення розрядного проміжку призводить до зростання коефіцієнта K_0 , що досягає максимального значення при міжелектродній відстані близько 1 мм, після чого поступово зменшується. Це створює нелінійність у математичному описі процесу і вимагає точного вибору конфігурації електродів.[16]

Тиск у робочій камері також відіграє роль: у межах 0,3–1 атм його вплив є незначним, однак при підвищенні тиску до 5 атм спостерігається зменшення виходу озону більш ніж удвічі. Ще одним критичним фактором є вологість середовища. Наявність водяної пари погіршує умови утворення озону, знижує опірність діелектрика та змінює характер розряду. Особливо відчутним є падіння концентрації озону при підвищенні парціального тиску водяної пари до кількох міліметрів ртутного стовпа, навіть якщо інші домішки практично не мають впливу. [16] [23]

1.1.4 Коронний розряд

Коронний розряд є різновидом часткового електричного пробою газу, що виникає в неоднорідному електричному полі поблизу електродів з малою кривизною, зазвичай голчастих або тонких дротів. На відміну від тліючого розряду, який потребує зниженого тиску, коронний розряд може стабільно існувати при атмосферному тиску, що робить його зручним для ряду інженерних застосувань. Основою його виникнення є локальне перевищення електричного поля над пороговим значенням для іонізації нейтральних молекул газу, при цьому загальна напруга системи може залишатись значно нижчою за пробійну напругу проміжку. Виникає тонка зона іонізації поблизу високонапруженого електрода, де й утворюється розряд. [25]

Однією з головних проблем у промисловому використанні тліючого розряду є необхідність підтримки низького тиску, що значно ускладнює конструкцію обладнання. При підвищенні тиску стабільність тліючого розряду погіршується, і за наявності достатнього джерела струму можливий перехід до

					<i>ДЕ11. 111005. 001 ПЗ</i>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата		

дугового режиму. Цей перехід супроводжується різким зростанням струму та локальним перегрівом, що неприпустимо в багатьох прикладних системах. Одним із методів уникнення цього є створення умов для коронного розряду шляхом застосування електродів із сильною геометричною неоднорідністю, наприклад, комбінація загостреного електрода і плоскої протилежної поверхні (рис. 1.7). [7]

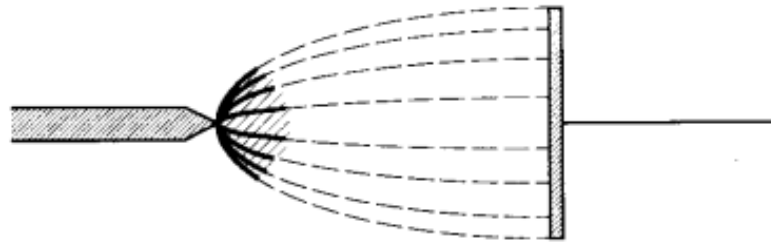


Рис. 1.7. Схематична модель коронного розряду.

Коронний розряд класифікується за полярністю електрода з високою напругою. При позитивній полярності спостерігається чітка початкова напруга виникнення розряду, яка залежить від радіуса кривизни електрода точки вістря та міжелектродної відстані. Подальше збільшення напруги призводить до утворення стримерів — іонізаційних фронтів, що швидко розповсюджуються від точки вістря до протилежного електрода. При ще вищій напрузі світіння стає більш однорідним і охоплює більшу частину околиці точки, а при досягненні критичної величини — відбувається повний пробій проміжку. У випадку негативної корони стартовим процесом є імпульси Тріхеля — періодичні, короткі імпульси струму, частота яких зростає із напругою. Негативна корона менш чутлива до радіуса електрода через ефект просторового заряду, який екранує поле, однак при надмірній напрузі також може привести до пробою.[5], [24],[6]

									Арк.
									21
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата					

1.1.5 Критерії запалення коронного розряду

Коли прикладена напруга U є меншою за напругу виникнення коронного розряду U_k , у колі реєструється несамотійний струм порядку 10^{-14} А. Такий струм зумовлений іонізацією повітря під дією космічного випромінювання та природної радіоактивності. На рівні моря в повітрі утворюється приблизно 10 пар іонів у 1 см^3 щосекунди, а стаціонарна концентрація іонів становить близько 10^3 іонів на см^3 . [7]

Необхідною умовою виникнення коронного розряду є значна неоднорідність електричного поля в проміжку між електродами. Це означає, що в околі одного або обох електродів напруженість поля повинна значно перевищувати її значення в інших частинах проміжку. Така ситуація характерна для випадків, коли характерний розмір електрода r істотно менший за міжелектродну відстань d . Наприклад, для паралельних провідників у повітрі з радіусом r , коронний розряд виникає за умови $\frac{d}{r} > 5,85$. [7], [24]

У протилежному випадку, при підвищенні прикладеної напруги між провідниками, спостерігається формування іскрового розряду. Для якісного аналізу умов виникнення коронного розряду, а також для інтерпретації експериментальних результатів, важливе значення мають аналітичні розв'язки рівнянь електростатики для простих геометричних конфігурацій. У разі коаксіальних циліндрів із внутрішнім радіусом r та зовнішнім радіусом R , напруженість електричного поля на відстані x від осі визначається виразом: [7]

$$E = \frac{U}{x} \ln\left(\frac{R}{r}\right), E_{\max} = \frac{U}{r} \ln\left(\frac{R}{r}\right), \quad (1.7)$$

де U - напруга між циліндрами.

Для концентричних сфер радіусами r та R , електричне поле описується формулою: [7]

$$E = \frac{UrR}{x^2} (R - r), E_{\max} = \frac{U}{r} \text{ при } R \gg r. \quad (1.8)$$

					ДЕ11. 111005. 001 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дис	Дата		

У випадку вістря параболоїдної форми з радіусом заокруглення r , розташованого на відстані d від площини, напруженість електричного поля вздовж осі симетрії на відстані x від кінця вістря визначається: [7]

$$E = \frac{2U}{(r + 2x) \ln\left(\frac{2d}{r} + 1\right)}, E_{\max} = \frac{2U}{r \cdot \ln\left(\frac{2d}{r}\right)}. \quad (1.9)$$

Якщо напруга U прикладена між двома паралельними провідниками радіуса r , розташованими на відстані d , або між провідником і паралельною площиною на відстані h , то максимальні значення напруженості поля біля поверхні провідників відповідно дорівнюють: [7]

$$E_{\max} = \left(\frac{U}{2r}\right) \ln\left(\frac{d}{r}\right), E_{\max} = \left(\frac{U'}{r}\right) \ln\left(\frac{2h}{r}\right). \quad (1.10)$$

Обидва поля будуть однаковими за умови: $U' = \frac{U}{2}$, $h = \frac{d}{2}$ що є типовим у практичних розрахунках. [24] [7] [5]

1.1.6 Коронний розряд в лабораторних умовах

Запалювання коронного розряду в лабораторних умовах супроводжується не лише світінням поблизу коронуючого електрода (яке може бути непомітним візуально), а й стрибкоподібним зростанням струму до величини порядку 10^{-6} А. Коронний розряд відноситься до самостійних, оскільки його підтримання зумовлене механізмами відтворення електронів у зоні підвищеної напруженості поля, де відбувається іонізація молекул газу. [6], [25]

Механізм розмноження електронів істотно залежить від полярності коронуючого електрода. У разі, коли електрод виступає катодом, коронний розряд називають негативним. У цьому випадку виникають електронні лавини, а вторинна іонізація зумовлена електронною емісією з катода, а також можливою фотоіонізацією газу.

Запалювання негативної корони, по суті, не відрізняється від таунсендівського пробою й переходу до темного таунсендівського розряду.

						Арк.
					ДЕ11. 111005. 001 ПЗ	23
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата		

Критерій запалювання, узагальнений для неоднорідного електричного поля з урахуванням ефекту електронного прилипання, має вигляд [7]:

$$\int_0^{x_1} [\alpha(x) - a(x)] dx = \ln(1 + \gamma^{-1}). \quad (1.11)$$

де:

- $\alpha(x)$ - коефіцієнт ударної іонізації,
- $a(x)$ - коефіцієнт електронного прилипання,
- γ - ефективний коефіцієнт вторинної емісії,
- межі інтегрування простягаються від поверхні катода до точки x_1 , де

$\alpha(x_1) = a(x_1)$, тобто припиняється електронне розмноження.

У газах без прилипання (наприклад, у чистому азоті) межа інтегрування формально може простягатися до анода. Проте через різке зменшення коефіцієнта іонізації $\alpha(E)$ при віддаленні від вістря або провідника, ефективне розмноження електронів зупиняється вже на деякій скінченній відстані x_1 . [6],[7]

У зоні розмноження електрони також збуджують молекули, що може супроводжуватись світінням. Поза цією зоною, в електронегативних газах електрони швидко захоплюються іонними пастками, перетворюючись на негативні іони. В електропозитивних газах, хоча захоплення іонів не відбувається, напруженість поля за межами коронного об'єму є недостатньою для збереження швидких електронів, тому газ за межами коронного розряду не світиться. [9]

1.1.7 Вольт-амперні характеристики та вплив вологості на коронний розряд

Експериментальні дослідження вольт-амперних характеристик (ВАХ) коронного розряду у повітрі при різних рівнях відносної вологості (Hr) підтверджують відповідність квадратичному закону Таунсенда. Це чітко простежується на рис. 1.8 і рис. 1.9, де струм різко зростає при перевищенні порогової напруги U_0 і досягає максимуму перед пробоем. Водночас функціональна залежність струму I від напруги U залишається нелінійною в

						ДЕ11. 111005. 001 ПЗ	Арк.
							24
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата			

Серед прикладних сфер використання коронного розряду можна виокремити електрофільтри для осадження аерозольних частинок, копіювальну техніку для зарядження фоточутливих поверхонь, очищення димових газів за допомогою електростатичного осадження, технології сухої сепарації руд, модифікацію полімерних поверхонь для покращення адгезії, а також детектори іонізуючого випромінювання. У високошвидкісних струменевих принтерах коронний розряд застосовується для керування зарядженими каплями чорнил, що дає змогу досягати високої точності друку. [8]

Отже, коронний розряд можна використовувати як контрольований частковий пробій, який уникає повного електричного руйнування діелектрика завдяки сильній локалізації електричного поля. Його фізична природа, стабільність при атмосферному тиску, а також керованість параметрами електродної системи роблять його незамінним інструментом у багатьох технічних галузях.[8]

1.2 Імпульсні перетворювачі для високовольтних джерел живлення

Генерація озону методом електричного розряду потребує стабільного джерела живлення, здатного формувати високу напругу з мінімальними втратами. Одним з найбільш ефективних рішень у таких задачах є імпульсні перетворювачі, які дозволяють підвищити напругу, зберігаючи високий коефіцієнт корисної дії навіть при малому споживаному струмі.

На відміну від лінійних джерел, які перетворюють енергію через теплову дисипацію та мають низький ККД при великій різниці між вхідною та вихідною напругою, імпульсні перетворювачі забезпечують енергопередачу за рахунок високочастотної комутації. Це дозволяє суттєво зменшити габарити трансформаторів, знизити втрати на нагрів і досягти високого коефіцієнта корисної дії (до 85–95%) навіть при живленні від низьковольтного джерела. Оскільки генерація озону у більшості випадків передбачає роботу із слабкими

						ДЕ11. 111005. 001 ПЗ	Арк.
							28
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дис	Дата			

струмами (до сотень мА), питання ефективного перетворення напруги з мінімальними втратами стає критично важливим.

Крім того, імпульсні джерела дають змогу забезпечити гальванічну розв'язку між первинною та вторинною сторонами трансформатора, що покращує електробезпеку пристрою. Гнучкість у налаштуванні частоти та скважності імпульсів дозволяє точно регулювати режим роботи силового каскаду та вихідну потужність.

Існує кілька основних типів імпульсних схем, які застосовуються для побудови високовольтних джерел:

- Зворотній перетворювач (flyback converter) — простий і економічний варіант, що забезпечує гальванічну розв'язку і надійне формування високої напруги;
- Прямий перетворювач (forward converter) — дозволяє отримати вищу ефективність при більших потужностях у порівнянні зі зворотним;
- Двотактний перетворювач (push-pull) — застосовується у випадках, коли потрібна симетрична робота трансформатора та підвищена потужність на виході.

Розгляд саме цих схем пов'язаний з їхньою здатністю охоплювати широкий діапазон вихідних напруг — від сотень вольт до десятків кіловольт, що повністю відповідає вимогам до джерел живлення для озоногенераторів. Такий діапазон дозволяє адаптувати конструкцію під побутові, лабораторні або напівпромислові умови, змінюючи лише трансформатор або режим керування ШІМ.

Розглянемо принцип роботи кожного з типів перетворювачів, їх переваги, недоліки та доцільність застосування в контексті генерації озону. Такий аналіз дозволяє обґрунтувати вибір конкретної схеми у проєктованому пристрої.

1.2.1 Зворотний перетворювач

Зворотно-ходовий перетворювач (рис 1.13) є універсальним імпульсним джерелом живлення, здатним забезпечувати, як пониження, так і підвищення напруги, з можливістю інверсії її полярності. Його принцип дії базується на

									Арк.
									29
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дис	Дата					

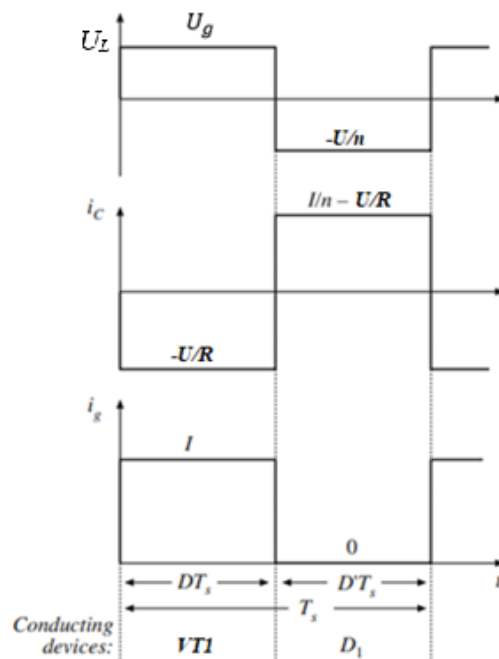


Рис. 1.16. Форми сигналів напруги на індукторі, струму в конденсаторі та струму джерела.

Застосування принципу вольт-секундного балансу до первинної обмотки дає: [1]

$$D(U_g) + D'(-\frac{U}{n}) = 0 \rightarrow M(D) = \frac{U}{U_g} = n \frac{D}{D'}. \quad (1.13)$$

Це свідчить про залежність вихідної напруги не лише від коефіцієнта заповнення D , а й від співвідношення витків обмоток трансформатора n .

Баланс зарядів на вихідному конденсаторі дає: [1]

$$I = \frac{nU}{D'R}, \quad (1.14)$$

де:

- n - коефіцієнт трансформації (відношення кількості витків первинної до вторинної обмотки трансформатора);
- U — середнє значення вихідної напруги, В;
- D' — комплементарний коефіцієнт заповнення ($D' = 1 - D$);
- R — опір навантаження, Ом.

Важливо також враховувати ефект нуля правої півплощини (Right Half-Plane Zero, RHPZ), частота якого визначається як: [1]

$$f_{rhz} = \frac{U_{out} (1 - D)^2}{2\pi \cdot D \cdot L_S \cdot I_{out}}, \quad (1.15)$$

де:

$$L_S = \frac{L_p}{\left(\frac{n_p}{n_s}\right)^2}. \quad (1.16)$$

Цей нуль ускладнює синтез стабілізуючого регулятора, обмежуючи можливу швидкодію замкненої системи. [1], [26]

Зворотно-ходовий перетворювач, завдяки простій топології та можливості гальванічної розв'язки, широко використовується в джерелах живлення для малопотужних навантажень. Його ключовою особливістю є накопичення енергії у магнітному полі під час замикання ключа та її передача у фазі розімкнення, що дозволяє ефективно перетворювати напругу. При вхідній напрузі $U_g = 12$ В, коефіцієнті трансформації $n = 1:10$, та коефіцієнті заповнення $D = 0,2$, вихідна напруга за формулою $U = U_g \frac{nD}{1-D}$ становить близько 30 В. Такий режим забезпечує достатнє підвищення напруги для подальшої трансформації до рівнів, необхідних для генерації коронного або бар'єрного розряду. Отже, дана схема придатна для використання в якості первинного ступеня живлення високовольтного озонатора, з можливістю масштабування параметрів залежно від типу навантаження.

1.2.2 Прямий перетворювач

Прямий перетворювач, зображений на рис. 1.17, є ізольованим варіантом понижувального перетворювача з трансформатором, що забезпечує гальванічну розв'язку між входом і виходом. Ця схема вимагає лише одного силового транзистора, тому вона часто використовується в низькопотужних застосуваннях, де конструкції на повному або напівмосту є надлишковими за складністю та вартістю. [2]

						Арк.
					ДЕ11. 111005. 001 ПЗ	33
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата		

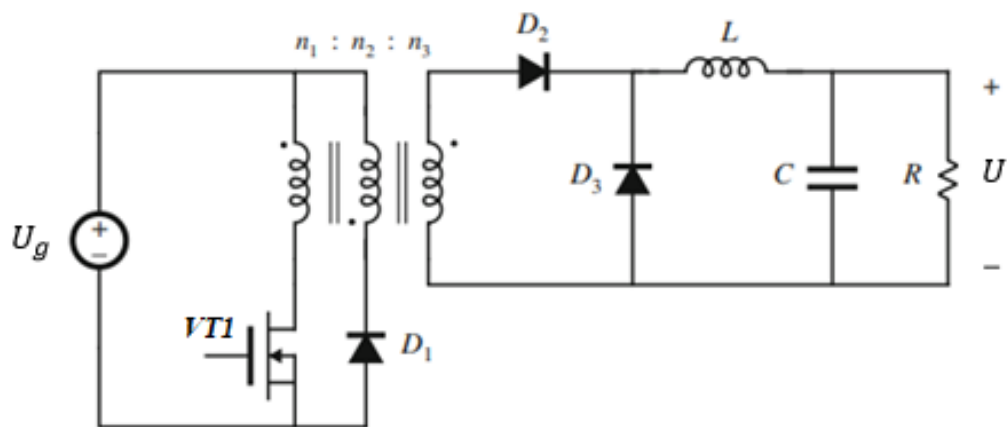


Рис 1.17 Схема прямого перетворювача.

Завдяки непульсуючому вихідному струму, який є спільною характеристикою всіх понижуючих топологій, прямий перетворювач є придатним для застосувань із високими вихідними струмами. Робочий цикл D обмежено, зокрема, при співвідношенні витків $n_1 = n_2$, він повинен задовольняти умову $0 \leq D < 0,5$. [2]

Поведінку струму намагнічування трансформатора можна пояснити, замінивши триобмотковий трансформатор на рис. 1.17 його еквівалентом. У результаті отримується схема, показана на рис. 1.18. Типові форми сигналів для цієї топології подано на рис. 1.19, де зображено струм намагнічування $i_M(t)$, струм навантаження, а також відповідні напруги в режимі безперервної провідності вихідного індуктора L . [1]

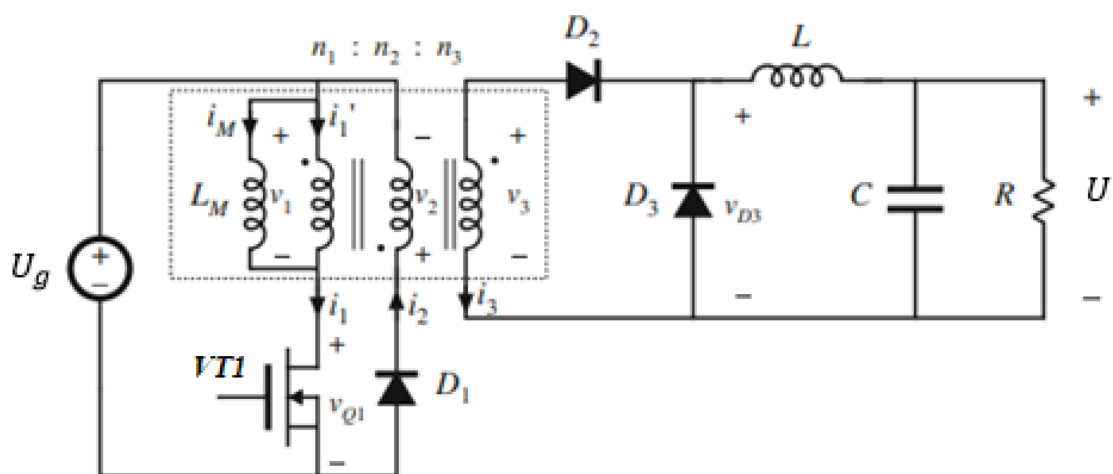


Рис 1.18. Схема прямого перетворювача з моделлю еквівалентної схеми трансформатора.

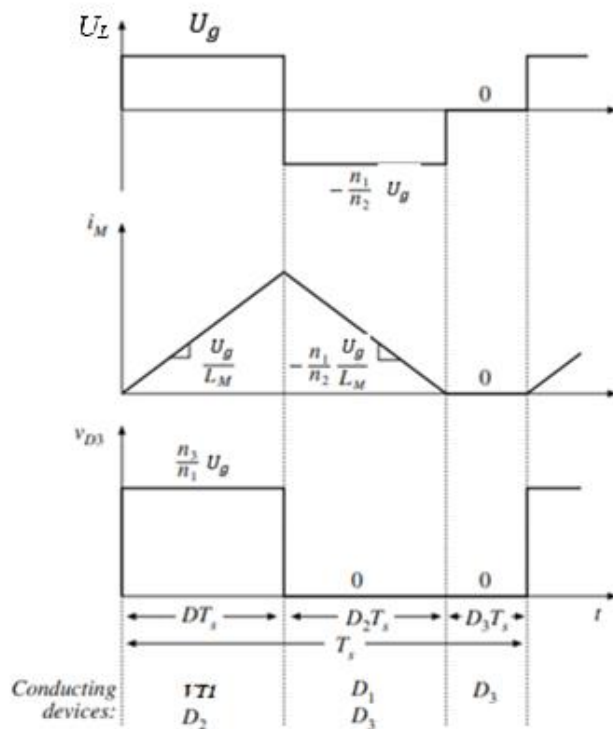


Рис 1.19. Форми сигналів для прямого перетворювача.

Під час кожного періоду перемикання відбуваються три характерні підінтервали:

- Підінтервал 1: транзистор VT_1 увімкнено. Діод D_2 – у провідному стані, а D_1 і D_3 – у зворотному. Напряга U_g подається на первинну обмотку трансформатора, внаслідок чого струм намагнічування зростає з крутизною $\frac{U_g}{L_M}$.

Напряга на діоді D_3 дорівнює $U_g \frac{n_3}{n_1}$

- Підінтервал 2: транзистор вимикається, але струм $i_M(t)$ залишається додатним і продовжує протікати через первинну обмотку. Згідно з законом збереження ампер-витків, струм відбивається у вторинну обмотку, активуючи діод D_1 , у той час як D_2 залишається замкненим. Негативна напряга $-U_g \frac{n_1}{n_2}$ зменшує струм намагнічування з нахилом $-U_g \frac{n_1}{n_2 L_M}$. Діод D_3 відкривається для передачі енергії на навантаження.

- Підінтервал 3: завершення процесу скидання енергії намагнічування, струми повертаються до початкових значень.

Робочі цикли кожної фази пов'язані співвідношенням:

$$D_2 = \frac{n_2}{n_1} \cdot D. \quad (1.17)$$

$$D_3 = 1 - D \cdot \left(1 + \frac{n_2}{n_1}\right) \geq 0. \quad (1.18)$$

Звідки випливає обмеження:

$$D \leq \frac{1}{1 + \frac{n_2}{n_3}}. \quad (1.19)$$

Хоча трансформатор прямого перетворювача використовує лише одну половину контуру $B-H$ (оскільки струм намагнічування не може бути від'ємним), це не означає, що він повинен бути вдвічі більшим. У сучасних високочастотних перетворювачах саме втрати в осерді, а не щільність потоку, обмежують експлуатаційний режим.[1]

Таким чином, прямий перетворювач є ефективним рішенням для систем із середніми та високими вихідними струмами, що потребують гальванічної розв'язки, простоти керування та мінімальних втрат у компонентах.

1.2.3 Двотактний перетворювач

Двотактний перетворювач, зображений на рис. 1.20, є ефективною топологією для перетворення вхідної напруги в більшу або меншу, а також у позитивну чи негативну вихідну напругу. Його характерною рисою є чергування керування двома транзисторами ($VT1$ і $VT2$), що під'єднані до первинної обмотки трансформатора з центральним відводом. Це дозволяє здійснювати повне використання симетричного перемикачання, що є критично важливим для підтримання вольт-секундного балансу трансформатора. [1], [2]

									Арк.
									36
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата					

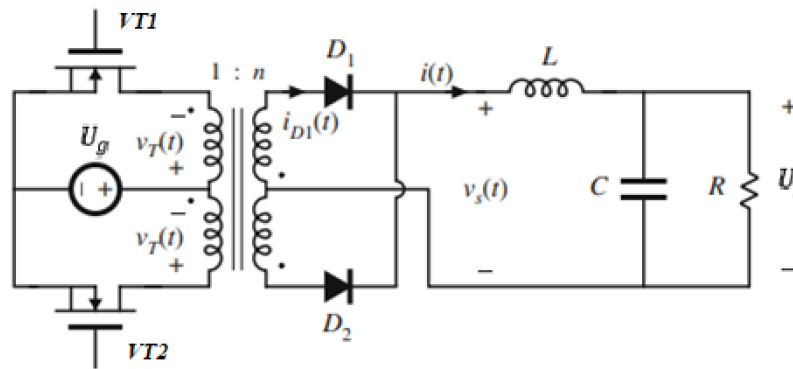


Рис. 1.20. Схема двотактного перетворювача.

Під час кожного циклу перемикання $Q1$ та $Q2$ проводить протягом часу D_{Ts} . Це забезпечує синусоїдальну форму струмів і дозволяє уникнути накопичення нерівномірного магнітного потоку в сердечнику. Однак асиметрія в провідності або падіннях напруги на ключах може викликати накопичення постійної складової струму, що призводить до насичення трансформатора – потенційної критичної проблеми цієї конфігурації. Її можна зменшити за допомогою програмованого струмового керування.[1], [2]

Типові форми сигналів представлені на рис. 1.21. Видно, як по черзі працюють обидва транзистори, змінюючи полярність напруги на первинній обмотці трансформатора, а також як формується вихідна напруга на вторинній стороні. [1]

Перевагами двотактного перетворювача є:

- низькі втрати провідності (у будь-який момент часу активний лише один транзистор),
- можливість досягнення великих коефіцієнтів перетворення навіть при низькій вхідній напрузі,
- повне використання петлі намагнічування $B-H$, оскільки струм i_M може бути, як позитивним, так і негативним.

Проте, така топологія вимагає центрального відведення в обох обмотках трансформатора, що дещо ускладнює конструкцію та знижує ефективність використання провідників.

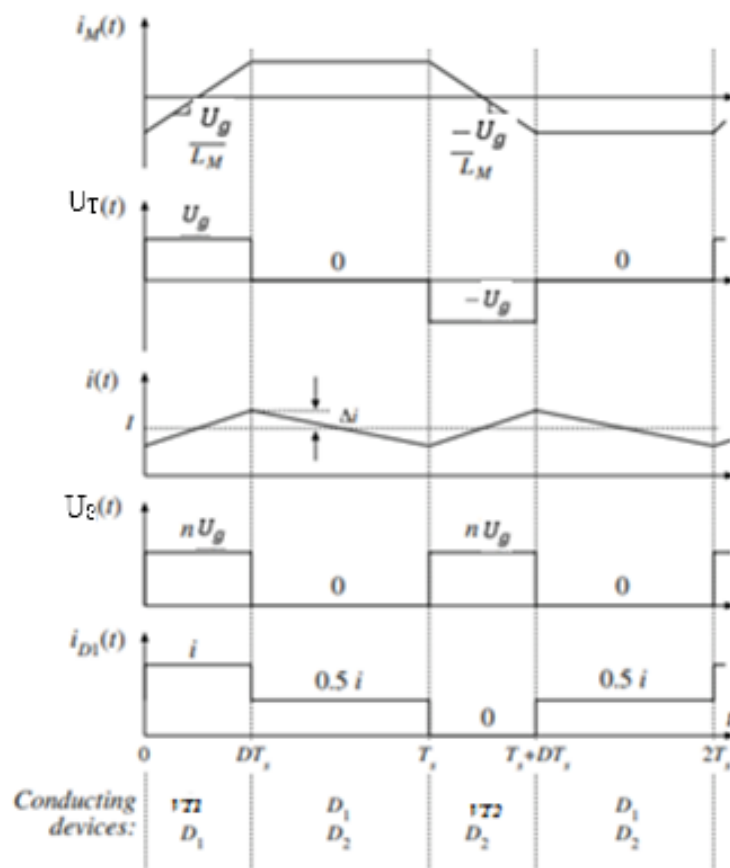


Рис. 1.21. Форми сигналів для двотактного перетворювача.

На завершення аналізу імпульсних перетворювачів варто узагальнити основні характеристики розглянутих топологій. Прямий перетворювач демонструє добру ефективність при середніх і високих вихідних струмах, однак має обмежений діапазон регулювання та ускладнення, пов'язані з намагнічуванням трансформатора. Двотактний перетворювач, у свою чергу, дозволяє досягати високої потужності та ефективного використання трансформатора завдяки симетричному перемиканню, однак є складним у реалізації, потребує центральних відводів і обережного балансування струмів для уникнення насичення магнітопроводу.

Зворотний перетворювач вирізняється відносною простотою конструкції, мінімальною кількістю активних компонентів та зручністю керування. Він забезпечує гальванічну розв'язку, широкий діапазон регулювання вихідної напруги та компактність, що є критично важливим для джерел живлення слабкого струму. Особливо це актуально у випадках, коли необхідно отримати

високу напругу при мінімальному струмі — як у випадку створення електричного розряду.

Враховуючи вищезгадані переваги, а також специфіку застосування в проєктованому пристрої, було обрано саме зворотний перетворювач як найбільш оптимальну схему реалізації високовольтного джерела живлення. Його властивості забезпечують надійність, енергоефективність та простоту конструкції — важливі чинники для розробки компактного і стабільного пристрою.

					<i>ДЕ11. 111005. 001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Пі підпис</i>	<i>Дата</i>		39

2. РОЗРАХУНОК ПРИСТРОЮ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

Перед виконанням функціонального аналізу елементної бази та розрахунків параметрів роботи пристрою доцільно розглянути електричну принципову схему генератора, яка слугує основою для його подальшого виготовлення, моделювання та тестування. Схему було розроблено в середовищі KiCad, що дозволило забезпечити високий рівень наочності, точності та зручності трасування під час подальшого проектування друкованої плати.

На рис. 2.1 подано повну електричну схему пристрою, яка складається з чотирьох основних функціональних блоків:

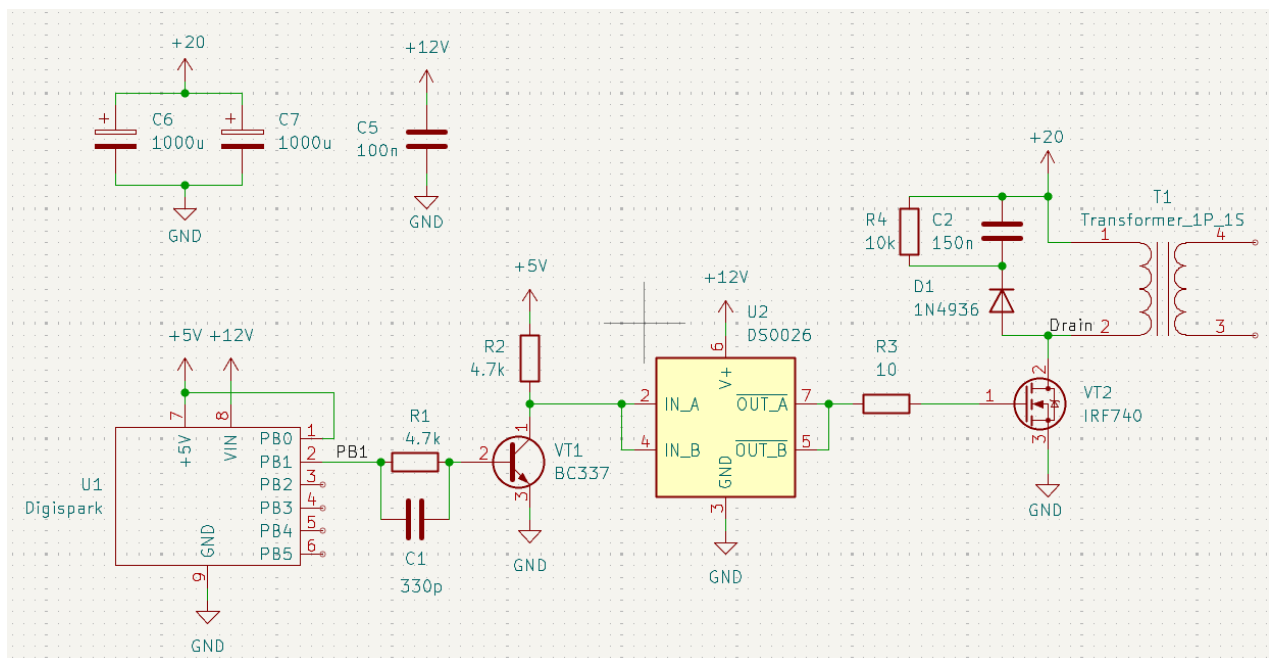


Рис. 2.1. Електрична принципова схема пристрою в середовищі KiCad.

Блок формування ШІМ-сигналу:

Керування пристроєм здійснюється мікроконтролером *U1* (DigiSpark на базі ATtiny85), що працює в режимі генерації широтно-імпульсного сигналу (ШІМ). Живлення мікроконтролера здійснюється від джерела +12 В. Сигнал ШІМ виводиться з виводу *PB1* (контакт 2) та подається на базу транзистора *VT1* (BC337) через резистор *R2* (4,7 кОм).

									Арк.
									40
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дис	Дата					

Блок керування затвором:

З колектора транзистора *VT1* (BC337) сигнал подається на вхід драйвера затвору *U2* (DS0026), який живиться від джерела +12 В. Драйвер формує імпульси струму для керування MOSFET-транзистора *VT2* (IRF740).

Для обмеження пускового струму між виходом драйвера та затвором транзистора встановлено резистор *R3* (10 Ом), що також виконує функцію демпфування паразитних коливань.

Силовий каскад:

Транзистор *VT2* (IRF740) працює в ключовому режимі та комутує струм через первинну обмотку трансформатора *T1*. Внаслідок комутації в трансформаторі створюється змінне магнітне поле, яке індукує високу напругу у вторинній обмотці.

Для захисту транзистора *VT2* (IRF740) від перенапруг, викликаних самоіндукцією, паралельно до трансформатора встановлено діод *D1* (1N4936). Конденсатор *C2* (150 нФ), під'єднаний паралельно до первинної обмотки трансформатора, знижує рівень високочастотних завад і виконує роль фільтра.

Система живлення:

Схема передбачає використання двох незалежних джерел живлення: +5 В – для живлення мікроконтролера DigiSpark на базі ATtiny85 і транзисторного каскаду *VT1* (BC337), та +12 В – для драйвера затвору *U2* (DS0026) і силового ключа *VT2* (IRF740).

Для стабілізації напруги та зменшення пульсацій у схемі передбачено конденсатори *C4*, *C5* (1000 мкФ) — як основні фільтрувальні елементи, а також *C1* (330 нФ), який призначений для придушення високочастотних шумів поблизу мікросхеми.

Подана схема є повноцінною реалізацією пристрою для генерації високої напруги з цифровим керуванням, у якій поєднано простоту, надійність та функціональну завершеність. Завдяки модульному підходу (окремі каскади керування, драйвера і комутації), конструкція дозволяє легко адаптуватися під інші задачі — наприклад, зміни частоти, потужності або типу навантаження.

									Арк.
									41
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата					

Основою роботи пристрою генерації високої напруги є електромагнітна індукція, що реалізується за допомогою перемикання струму через індуктивність. При різкому розмиканні струму у первинній обмотці індуктивного елемента виникає імпульс електрорушійної сили (ЕРС) у вторинній обмотці, спрямований згідно з законом Ленца проти зміни магнітного потоку. Цей імпульс може досягати десятків або сотень вольт навіть при живленні від низьковольтного джерела.

У поданій конструкції для формування імпульсів застосовано одноконтурну ключову схему, де комутація первинної обмотки трансформатора здійснюється силовим MOSFET-транзистором VT2 (IRF740), керованим з мікроконтролера U1 (DigiSpark на базі ATtiny85) через каскад підсилення і драйвер затвору. Вибір такої топології обумовлений наступними перевагами:

- простота побудови (не потребує двополярного живлення);
- висока ефективність для однонаправленого навантаження;
- можливість гнучкого програмного регулювання частоти та скважності;
- мінімальна кількість компонентів.

Широтно-імпульсний сигнал, що генерується мікроконтролером, визначає час накопичення енергії в магнітному полі трансформатора. Коли транзистор відкритий, через первинну обмотку протікає струм, що створює магнітний потік. Після закриття ключа (вимкнення транзистора) магнітне поле в трансформаторі стрімко змінюється, що, згідно із законом Ленца, призводить до появи імпульсу високої напруги у вторинній обмотці, і в вторинній обмотці виникає високовольтний імпульс напруга якого може сягати кількох десятків кіловольт, залежно від конструкції трансформатора, кількості витків, енергії накопиченої в магнітному полі та режиму комутації.

Ключовими параметрами, що впливають на ефективність роботи такого генератора, є:

- частота перемикання (f): визначає кількість імпульсів за секунду;

									Арк.
									42
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата					

- ширина імпульсу: впливає на тривалість накопичення енергії в обмотці;
- індуктивність обмотки: визначає, скільки енергії накопичується;
- швидкодія ключа та драйвера: впливає на втрати енергії та форму імпульсу.

Розглянута вище схема пристрою (рис. 2.1) фактично реалізує топологію зворотного перетворювача, адаптовану для генерації високої напруги в генераторах плазми атмосферного тиску. Аналіз основних функціональних блоків схеми дозволяє провести аналогію з класичними елементами зворотно-ходового перетворювача де:

1) Ключовий елемент (MOSFET-транзистор $VT2$ (IRF740)) виконує ту саму функцію, що і у зворотному перетворювачі: він періодично відкривається та замикає контур з джерелом живлення та первинною обмоткою трансформатора, дозволяючи накопичувати енергію в магнітному полі.

2) Індуктивний елемент (трансформатор $T1$) має роздільні первинну та вторинну обмотки і працює як двообмотковий індуктор, де енергія, накопичена в магнітному полі, переноситься на навантаження після розімкнення ключа.

3) Навантаженням у цій схемі є високовольтна обмотка трансформатора (вторинна сторона), що забезпечує імпульси напруги, які можуть бути подані на озонатор чи інший високовольтний пристрій.

4) Мікроконтролер $U1$ (DigiSpark) разом із каскадом підсилення ($VT1$, $R2$, $R3$) та драйвером затвору $U2$ (DS0026) формує керуючий вузол, що відповідає за генерацію імпульсів та контроль частоти/скважності, тобто фактично реалізує функцію широтно-імпульсного керування ключем — як це передбачено у сучасних імпульсних перетворювачах.

Реалізована схема забезпечує пряме керування генерацією імпульсів з мікроконтролера, що робить її придатною для використання в побутових і лабораторних пристроях із вимогами до компактності, дешевизни та програмної адаптивності.

						Арк.
					ДЕ11. 111005. 001 ПЗ	43
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата		

2.1 Аналіз основних компонентів

Розглянемо вибір основних компонентів для побудови високовольтного генератора. Вибір кожного елемента здійснювався з урахуванням електричних параметрів, сумісності, вартості, простоти впровадження та доступності на ринку.

2.1.1 Мікроконтролер DigiSpark на базі ATtiny85

У якості керуючого елемента пристрою обрано мікроконтролер ATtiny85, який реалізовано у вигляді модуля DigiSpark (рис. 2.2). Основною його функцією є генерація широтно-імпульсного сигналу (ШИМ) з необхідною частотою та скважністю, який подається на драйвер силового каскаду. Мікроконтролер має 8-бітну архітектуру AVR, працює з тактовою частотою до 20 МГц та підтримує програмування через середовище Arduino IDE.



Рис. 2.2. Зовнішній вигляд мікроконтролера ATtiny85 на платі DigiSpark.

Порівняно з іншими представниками цього класу, такими як ATtiny13 та STM32F030F4P6, мікроконтролер ATtiny85 забезпечує оптимальний баланс між функціональністю, споживанням ресурсів, ціною та простотою налаштування. ATtiny13 має менший обсяг пам'яті, що обмежує можливості програмної реалізації алгоритмів ШИМ, тоді як STM32F030F4P6 є надлишково потужним для даного застосування та вимагає складнішого середовища розробки. Детальне

					ДЕ11. 111005. 001 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата		

порівняння характеристик зазначених мікроконтролерів наведено у табл. 2.1, де представлено основні параметри, що впливають на вибір керуючого елемента.

Таблиця 2.1

Параметр	ATtiny85	ATtiny13	STM32F030F4P6
Архітектура	AVR, 8-біт	AVR, 8-біт	ARM Cortex-M0, 32-біт
Тактова частота	До 20 МГц	До 9,6 МГц	До 48 МГц
Flash пам'ять	8 КБ	1 КБ	16 КБ
Кількість I/O	5	5	15
Живлення	2.7–5.5 В	2.7–5.5 В	2.0–3.6 В
Ціна	Дешево	Середньо	Дорого
Простота налаштування	Легко	Легко	Середньо

Отже, мікроконтролер ATtiny85 на модулі DigiSpark забезпечує необхідний рівень функціональності, простоти програмування та надійності для генерації керуючих сигналів у складі високовольтного пристрою. Його використання дозволяє реалізувати компактне й енергоефективне рішення без перевитрат ресурсів.

2.1.2 Транзистор BC337

Для інверсії логічного рівня сигналу та забезпечення підсилення керуючого імпульсу використовується NPN-транзистор BC337 (рис. 2.3). Його розміщено між виходом мікроконтролера та входом драйвера затвору. Максимальний колекторний струм цього елемента становить до 800 мА, що забезпечує достатню потужність для надійного керування наступним каскадом.

									Арк.
									45
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі підпис	Дата	ДЕ11. 111005. 001 ПЗ				

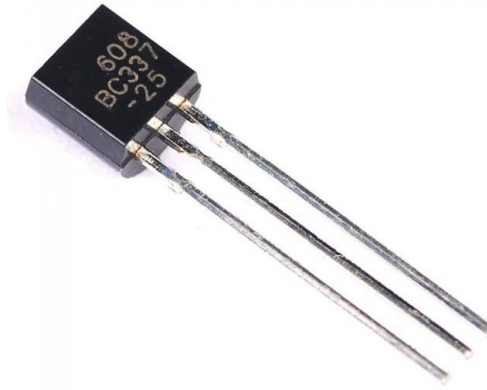


Рис. 2.3 Зовнішній вигляд транзистора BC337.

Порівняно з BC547 та 2N2222, транзистор BC337 демонструє оптимальне співвідношення швидкодії та допустимого струму. Хоча BC547 має вищу граничну частоту, його номінальний струм значно менший, що обмежує можливість роботи у навантажених режимах. Узагальнені параметри згаданих транзисторів наведено у табл. 2.2, що дозволяє оцінити їх придатність до використання в імпульсних каскадах.

Таблиця 2.2

Параметр	BC337	BC547	2N2222
Тип	NPN	NPN	NPN
f_T (Гранична частота)	100 МГц	300 МГц	250 МГц
I_c макс.	800 мА	100 мА	800 мА
Напруга колектора	45 В	50 В	40 В
Ціна	Дешево	Дешево	Дешево

Таким чином, транзистор BC337 є оптимальним вибором для реалізації інверторного та підсилювального каскаду. Його електричні характеристики забезпечують надійне узгодження між мікроконтролером та драйвером затвору.

2.1.3 Драйвер затвору DS0026

Для швидкого та ефективного перемикання силового MOSFET-транзистора у схемі використовується драйвер затвору DS0026 (рис. 2.4). Цей компонент формує імпульси високого струму до 2 А, необхідні для заряджання та розряджання затворної ємності силового ключа, що працює в імпульсному режимі.



Рис. 2.4 Зовнішній вигляд драйвера DS0026.

Основними перевагами драйвера DS0026 є низький час затримки (~ 100 нс), просте під'єднання, а також сумісність із TTL-рівнями мікроконтролерів. У порівнянні з аналогами — TC4420 та IR2110 — DS0026 є більш компактним та економічним рішенням. TC4420 має вищий струм, однак є надмірним для даного застосування. IR2110 призначений для мостових схем і складніший в реалізації. Основні параметри драйверів DS0026, TC4420 та IR2110 порівнюються у табл. 2.3, що підтверджує доцільність вибору саме DS0026 для керування однотактним силовим ключем.

					ДЕ11. 111005. 001 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата		

Таблиця 2.3

Параметр	DS0026	TC4420	IR2110
Струм затвору (макс.)	2 А	6 А	2 А
Напруга живлення	4.5–15 В	4.5–18 В	10–20 В
Тип	Одноканальний	Одноканальний	Двоканальний (high/low side)
Час затримки	~100 нс	~50 нс	~120 нс
Складність під'єднання	Легка	Легка	Легка
Ціна	Дешево	Середньо	Дорого

Отже, драйвер DS0026 забезпечує ефективну комутацію силового транзистора за рахунок високошвидкісної зарядки затворної ємності, зберігаючи при цьому простоту реалізації та стабільність роботи пристрою на частотах десятків кілогерц.

2.1.4 MOSFET транзистор IRF740

У схемі високовольтного генератора основну комутаційну функцію виконує MOSFET транзистор IRF740 (рис. 2.5). Він працює як силовий ключ у режимі імпульсного навантаження, перериваючи струм через первинну обмотку високовольтного трансформатора. Вибір саме цього транзистора обґрунтований його високими електричними параметрами: максимальна напруга стік-витік 400 В, допустимий струм стоку до 10 А і відносно низький опір відкритого каналу 0,55 Ом.

									Арк.
									48
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата	ДЕ11. 111005. 001 ПЗ				



Рис. 2.5. Зовнішній вигляд тринзистора IRF740.

Завдяки широкому поширенню, надійності та доступності, IRF740 є популярним вибором у схемах високовольтної імпульсної комутації. У порівнянні з IRF840, який допускає вищу напругу (500 В), IRF740 має нижчий опір каналу і дещо нижчу ціну. У свою чергу, STP55NF06 має значно вищий струм стоку, однак його гранична напруга становить лише 55 В, що не дозволяє використовувати його у схемах з високовольтним навантаженням. Параметри MOSFET-транзисторів IRF740, IRF840 та STP55NF06 зіставлено у табл. 2.4, де порівнюються їхні граничні значення напруги, струму та опору каналу.

Таблиця 2.4

Параметр	IRF740	IRF840	STP55NF06
Напруга стоку (V_{ds})	400 В	500 В	55 В
Струм стоку (I_d)	10 А	8 А	50 А
Опір каналу (R_{ds})	0.55 Ом	0.85 Ом	0.018 Ом
Ціна	Дешево	Середньо	Дорого
Призначення	Високовольтний	Високовольтний	Низьковольтний

Загалом, IRF740 задовольняє вимоги до силового елемента у схемі високовольтного генератора завдяки поєднанню високої напруги комутації, достатнього струму та надійної роботи в імпульсному режимі.

2.1.5 Діод 1N4936

Для захисту силового каскаду від імпульсів самоіндукції, що виникають при перемиканні індуктивного навантаження, у схемі використовується швидкодіючий діод 1N4936 (рис. 2.6). Його встановлено паралельно до первинної обмотки трансформатора у зворотному напрямку. У моменти вимкнення струму через MOSFET діод пропускає енергію, накопичену в магнітному полі, тим самим захищаючи транзистор від перенапруги.



Рис. 2.6. Зовнішній вигляд діода 1N4936.

Діод 1N4936 характеризується напругою пробою до 200 В, максимальним струмом 1,5 А і коротким часом відновлення – 150–200 нс, що дозволяє йому ефективно працювати в імпульсному режимі з частотою до десятків кілогерц.

У порівнянні з UF4007 та HER108, які мають вищу допустиму напругу, 1N4936 є більш високострумним і краще підходить до застосування із силовим навантаженням. UF4007 має менший струм (1 А), а HER108 призначений переважно для швидкодіючого випрямлення, а не для захисту в імпульсних схемах. Основні характеристики діодів 1N4936, UF4007 і HER108 подано у табл. 2.5, що дозволяє наочно оцінити їхню ефективність у відповідних режимах роботи.

					ДЕ11. 111005. 001 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі підпис	Дата		

Таблиця 2.5

Параметр	1N4936	UF4007	HER108
Напруга	200 В	1000 В	1000 В
Струм	1.5 А	1 А	1 А
Час відновлення	150–200 нс	~75 нс	~75 нс
Ціна	Дешево	Дешево	Дешево

У підсумку, діод 1N4936 ефективно виконує захисну функцію в схемі, зменшуючи навантаження на силовий транзистор та підвищуючи загальну надійність пристрою в умовах імпульсної експлуатації.

Проаналізована елементна база відповідає всім вимогам до створення компактного, ефективного та надійного високовольтного генератора. Всі компоненти підбрано з урахуванням відповідності електричним режимам роботи, здатності працювати в імпульсних схемах, простоти реалізації у лабораторних умовах та доступності на ринку та невисокої вартості.

Використані резистори та конденсатори, що не включені в окремі таблиці, виконують допоміжні функції формування часових параметрів сигналів, фільтрації, стабілізації напруги та захисту вузлів. Номінали цих елементів підбрано на підставі попереднього моделювання та розрахунків.

Для підвищення технологічної готовності пристрою до виготовлення було розроблено відповідну документацію, зокрема: операційну карту, маршрутну карту та контрольну карту, які наведено у додатках Е, Ж та З. Це дозволяє адаптувати розробку до серійного виробництва або багаторазового лабораторного виготовлення.

2.2 Моделювання, розрахунки та аналіз результатів

З метою перевірки працездатності пристрою, уточнення режимів його роботи та визначення ефективності силового каскаду було проведено комп'ютерне моделювання у середовищі Proteus 8 Professional. Моделювання

						Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата	ДЕ11.111005.001 ПЗ	

охоплювало етапи формування ШІМ-сигналу, його посилення, передачу на драйвер затвору, комутацію навантаження MOSFET-транзистором, а також аналіз сигналів на первинній обмотці трансформатора.

2.2.1 Аналіз сигналу ШІМ та каскаду підсилення

На першому етапі було змодельовано генерацію широтно-імпульсного сигналу (ШІМ) мікроконтролером *U1* (ATtiny85 на модулі DigiSpark). Частота сигналу становила 20 кГц, відповідно період — 50 мкс. Осцилограма сигналу зображена на рис. 2.7, де видно стабільну прямокутну форму імпульсів із чіткими фронтами та постійною періодичністю.

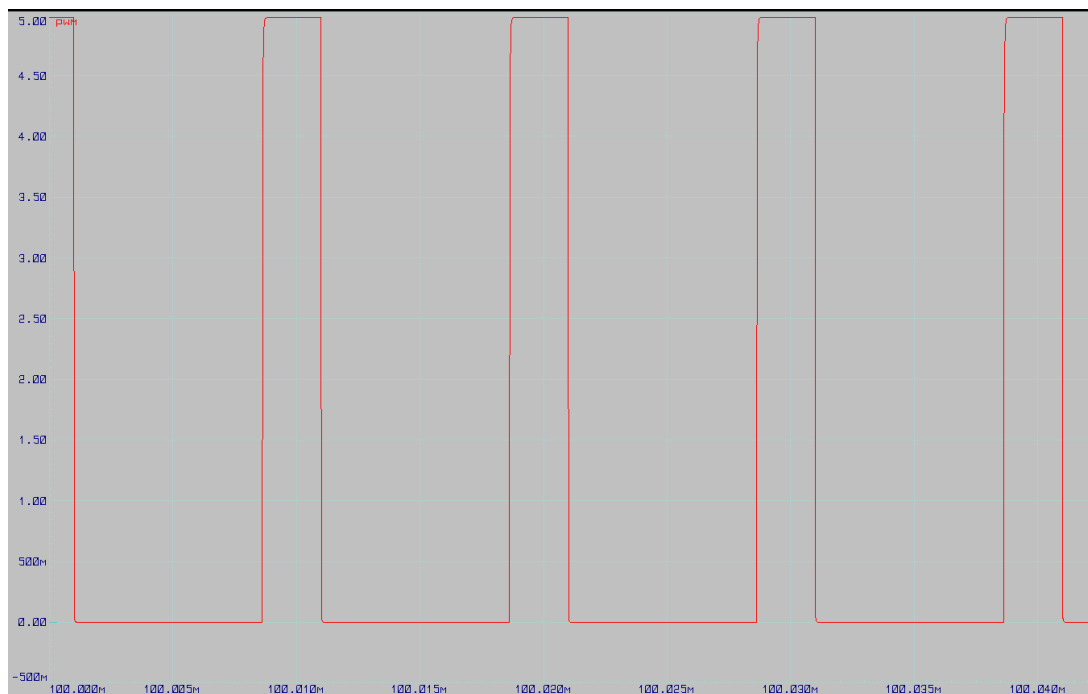


Рис 2.7 Осцилограма ШІМ-сигналу, сформованого мікроконтролером ATtiny85.

Таке формування сигналу дозволяє керувати часом відкритого стану силового транзистора *VT2* (IRF740), а отже — і кількістю енергії, що передається у трансформатор. Завдяки програмному заданням частоти та скважності в прошивці мікроконтролера, параметри комутації можна легко змінювати без змін в апаратній частині.

2.2.2 Послідовність керування: сигнал до MOSFET

Після генерації ШІМ-сигналу на виводі PB1 мікроконтролера ATtiny85, імпульси надходять на інверторний каскад на транзисторі VT1 (BC337), який виконує логічну інверсію та підсилення. З колектора цього транзистора сигнал подається на вхід драйвера затвору U2 (DS0026). Основне призначення цього каскаду — забезпечити швидке та енергетично достатнє керування затвором MOSFET-транзистора VT2 (IRF740).

На наступному етапі моделювання було досліджено напругу на затворі силового ключа, яка є критичною для правильного відкривання та закривання каналу. Отримана осцилограма, зображена на рис. 2.8, демонструє прямокутний імпульс із амплітудою приблизно 12 В, який чітко відповідає інверсованому сигналу після драйвера U2 (DS0026).

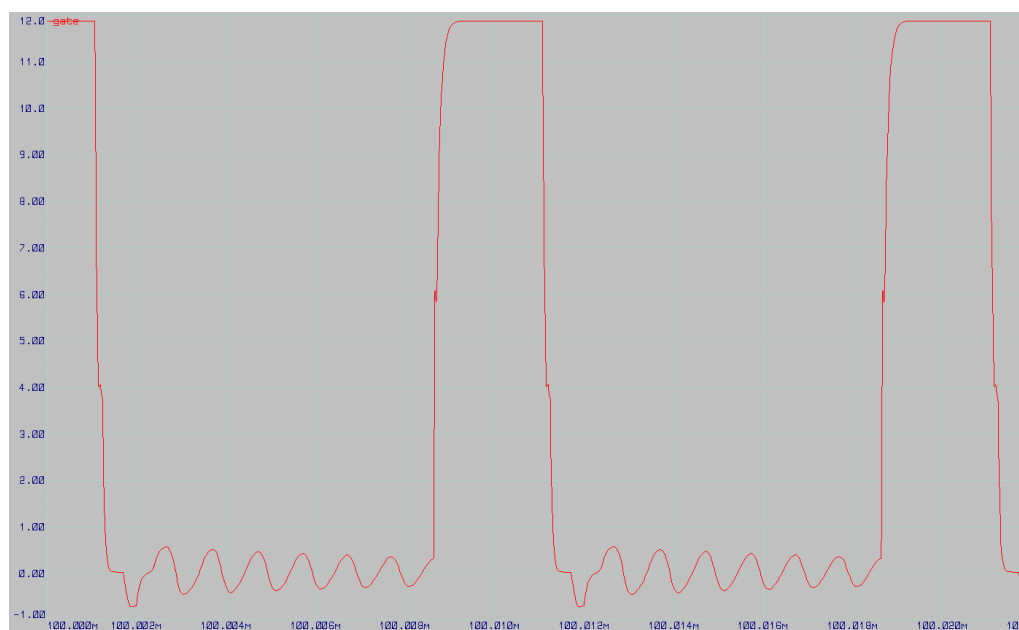


Рис 2.8 Осцилограма напруги на затворі силового ключа.

Такі параметри забезпечують швидке перемикання силового транзистора, зменшуючи втрати потужності на етапі комутації. Крім того, стабільна форма імпульсу без осциляцій чи паразитних коливань свідчить про якісне демпфування в колі затвора та правильний підбір номіналів обв'язки драйвера.

						ДЕ11. 111005. 001 ПЗ	Арк.
							53
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата			

Для оцінки енергетичних втрат при заряджанні/розряджанні затворної ємності MOSFET VT2 (IRF740), скористаємося класичною формулою:

Для оцінки втрат потужності, пов'язаних із зарядом затворної ємності транзистора VT2 (IRF740), використано формулу розрахунку енергії:

$$E_{switch} = \frac{1}{2} \cdot C_{gs} \cdot U_{GS}^2, \quad (2.1)$$

де C_{gs} - ємність затвор-стік (у IRF740 це 850 пФ)

$$E_{switch} = \frac{1}{2} \cdot 850 \cdot 10^{-12} \cdot 12^2 = 61.2 \text{ нДж.}$$

Тоді середня потужність на заряд затвору:

$$P_{gate} = E_{switch} \cdot f_{PWM}, \quad (2.2)$$

$$P_{gate} = 61.2 \cdot 10^{-9} \cdot 20 \cdot 10^3 = 1.224 \text{ мВт.}$$

Тобто втрати на затворі — дуже маленькі (~1.2 мВт) і не вимагають активного охолодження драйвера або окремого управління енергоспоживанням.

2.2.3 Поведінка силового ключа та навантаження

Проаналізуємо режим роботи силового ключа VT2 (IRF740) у момент комутації, на основі осцилограм напруги на первинній обмотці трансформатора і струму в стоку транзистора.

У відкритому стані MOSFET VT2 (IRF740) створює шлях для струму через первинну обмотку трансформатора. Осцилограма напруги на обмотці (рис. 2.9) демонструє імпульсний сигнал з амплітудою близько 190 В. У момент закривання транзистора напруга зростає стрибком, а після цього спостерігаються високочастотні затухаючі коливання, характерні для LC-резонансної системи. Це свідчить про накопичення енергії в магнітному полі трансформатора та її часткове повернення у схему після розриву струму.

									Арк.
									54
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дис	Дата					

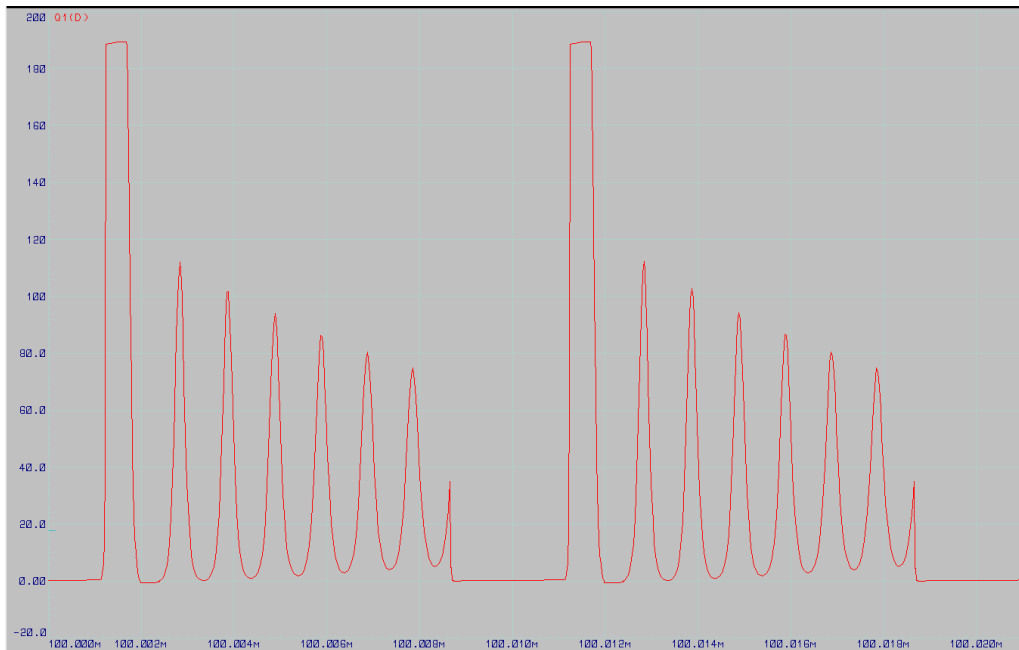


Рис 2.9 Осцилограма напруги на первинній обмотці трансформатора

На основі напруги на первинній обмотці та стокового струму побудовано графік миттєвої потужності як добуток цих величин. Осцилограма (рис. 2.10) демонструє чітко виражені вузькі піки, що досягають понад 90 Вт. Вони зумовлені різким фронтом струму при високій прикладеній нарузі. Така поведінка є характерною для імпульсних схем з низькою скважністю, де значна енергія передається у короткий проміжок часу.

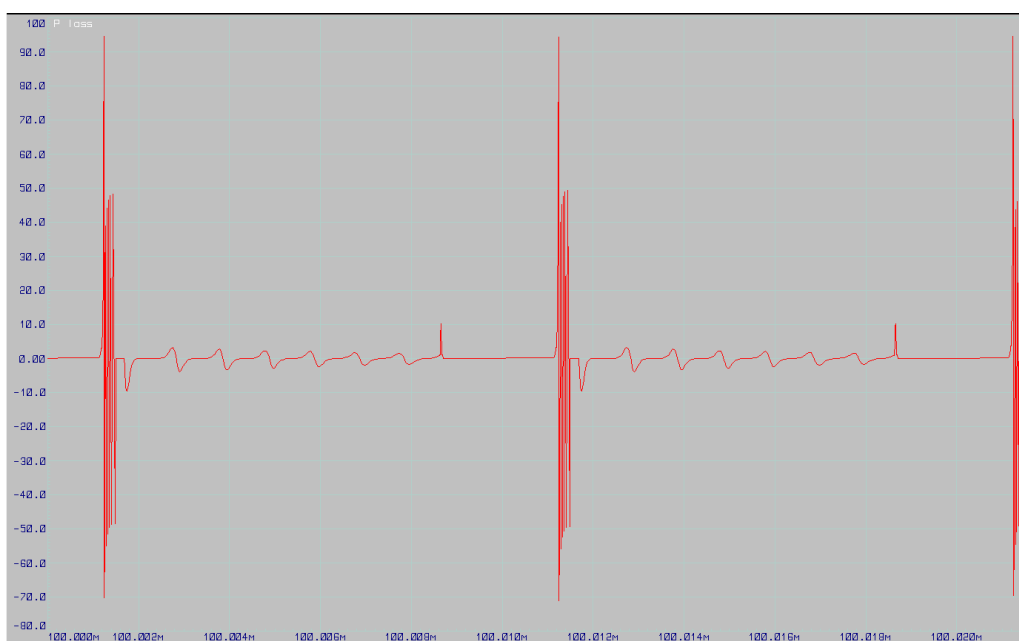


Рис 2.10 Осцилограма миттєвої потужності IRF740.

									Арк.
									55
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата	ДЕ11. 111005. 001 ПЗ				

Отримані результати підтверджують ефективну роботу силового каскаду в режимі ключового керування. Комутація відбувається швидко, імпульси напруги і струму мають очікувану форму, а коливання залишаються в контрольованих межах. Така динаміка підтверджує доцільність обраної схеми та правильність розрахунку керуючих імпульсів.

2.2.4 Аналіз режимів роботи ключових компонентів

Для забезпечення надійної та тривалої роботи пристрою важливо оцінити електричні та теплові навантаження на критичні компоненти: силовий транзистор $VT2$ (IRF740), драйвер затвору $U2$ (DS0026), попередній каскад на транзисторі BC337 та захисний діод. Розрахунок здійснено з урахуванням частоти перемикачання 20 кГц та отриманих осцилограм напруги і струму.

$VT2$ (IRF740) працює у ключовому режимі. При відкриванні транзистора, струм через первинну обмотку трансформатора зростає до значень у межах 0.4 А. Провідний опір каналу становить $R_{DS(on)} \approx 0.55$ Ом, що дає статичні втрати потужності:

$$P_{cond} = I_2 \cdot R_{DS(on)}, \quad (2.3)$$

$$P_{cond} = 0.42 \cdot 0.55 \approx 0.088 \text{ Вт}$$

Загальні втрати потужності на транзисторі не перевищують 0.09 Вт, що дозволяє використовувати компонент без активного охолодження, за умови природної вентиляції.

Драйвер $U2$ (DS0026) керує затвором MOSFET транзистора. Середня потужність, що розсіюється драйвером:

$$P_{gate-driver} \approx P_{gate}, \quad (2.4)$$

$$P_{gate-driver} = 1.22 \text{ Вт}$$

Усі ключові компоненти працюють в межах своїх допустимих електричних і теплових характеристик. Найбільші навантаження припадають на MOSFET-транзистор $VT2$ (IRF740), однак завдяки короткій тривалості імпульсу й

						ДЕ11. 111005. 001 ПЗ	Арк.
							56
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дис	Дата			

обмеженому струму втрати залишаються на безпечному рівні. Схема демонструє стабільність і придатність до тривалої імпульсної роботи без перевантажень.

2.2.5 Аналіз переваг і обмежень конструкції

Результати моделювання свідчать про наступні переваги запропонованої конструкції:

- Висока енергоефективність: втрати на заряд затвору становлять лише 1.22 мВт;
- Швидкодія: драйвер *U2* (DS0026) забезпечує миттєве перемикання транзистора *VT2* (IRF740);
- Простота та компактність: використання мікроконтролера *U1* (ATtiny85) дозволяє реалізувати функцію генерації ШІМ без складного програмного або апаратного забезпечення;
- Гнучкість налаштувань: частоту та скважність імпульсів можна змінювати програмно;
- Низька вартість елементної бази;
- Можливість автономної роботи та впровадження в мобільні пристрої.

Разом з тим, конструкція має низку обмежень:

- Чутливість до пульсацій живлення, що може викликати нестабільність;
- Потенційне утворення ВЧ-завад, що потребує екранування у складних середовищах.

									Арк.
									57
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі прис	Дата	ДЕ11. 111005. 001 ПЗ				

3. РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИСТРОЮ: ПРОЄКТУВАННЯ, ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ

3.1 Розробка конструкції друкованої плати

Одним із найважливіших етапів у реалізації пристрою генерації високої напруги є створення друкованої плати, яка слугує фізичною основою для з'єднання всіх електронних компонентів у єдину електронну систему. В умовах імпульсної роботи, де мають місце швидкі фронти сигналів, високі струми перемикавання та високочастотні імпульси, правильне трасування та компонування плати мають ключове значення.

Проєктування виконувалося у середовищі KiCad, яке є сучасним та відкритим ПЗ для електронного дизайну. У ході роботи було створено електричну принципову схему, після чого виконано перехід до топологічного проєктування плати. Схема пройшла електричну перевірку зв'язків, після чого розпочато створення плати.

Експорт 3D-моделі у формат .STEP надасть можливість імпортувати плату у САПР-середовище FreeCAD. У ньому можна спроектувати корпус пристрою з урахуванням доступу до виводів, вентиляційних отворів, системи кріплення та заземлення. Також необхідно врахувати простір під майбутній трансформатор та можливість заміни елементів.

Окрему увагу приділено розведенню загального проводу (GND), оскільки імпульсні струми можуть викликати перешкоди, які позначаються на стабільності роботи мікроконтролера. Саме тому застосована широка мідна заливка по всій нижній частині плати, з'єднана з загальною точкою живлення.

Розміщення елементів виконано таким чином, щоб мінімізувати довжину силових доріжок для зменшення паразитних індуктивностей, забезпечити прямий і швидкий шлях сигналу від мікроконтролера до силового ключа та спростити монтаж та діагностику.

									Арк.
									58
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата					

Також були враховані теплові умови експлуатації, і силовий транзистор IRF740 було розміщено на краю плати з можливістю під'єднання до радіатора. Усі високоструміві доріжки зроблено максимально короткими та широкими, для зменшення теплових та індуктивних втрат.

На рис. 3.1 представлено тривимірну модель друкованої плати, що включає основні елементи електронної схеми:

- Електролітичні конденсатори $C2$ і $C5$ виконують функцію згладжування живлення та фільтрації високочастотних коливань.
- Драйвер затвору $U2$ (DS0026) розташований у центрі для мінімізації довжини сигналових доріжок до силового ключа.
- Інверторний каскад на транзисторі $VT1$ (BC337) формує правильний рівень керуючого сигналу.
- Резистори $R1$ та $R2$ визначають параметри базового струму на транзисторі $VT1$ (BC337).
- Діод $D1$ (1N4936) під'єднано до первинної обмотки трансформатора для захисту від імпульсів самоіндукції.

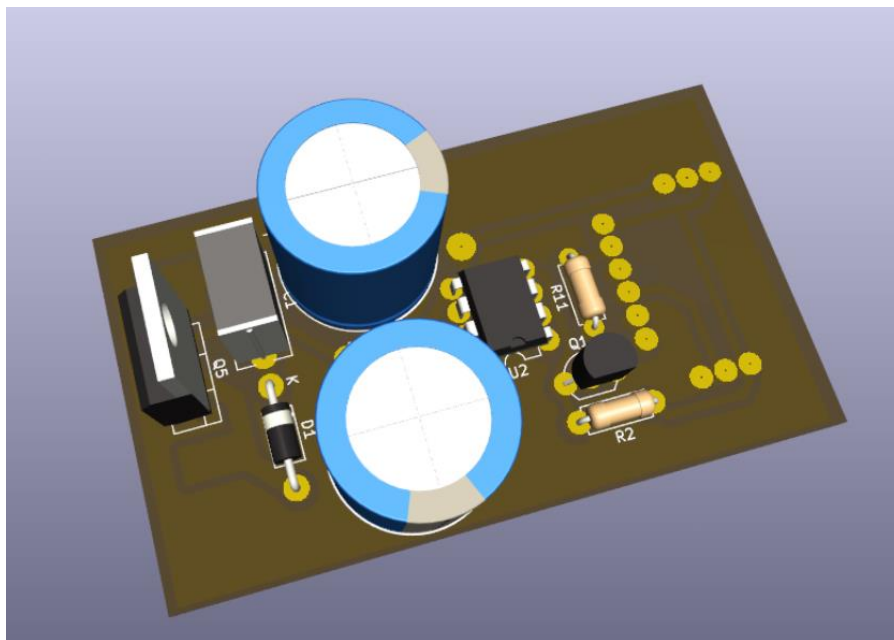


Рис 3.1. 3D-модель плати пристрою.

									Арк.
									59
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата					

Послідовність кроків з проектування зафіксовано у маршрутній карті (див. Додаток 3), яка відображає етапи створення, перевірки та оптимізації плати.

3.2 Трасування та особливості плати

На рис. 3.2 наведено вигляд плати у середовищі трасування KiCad, який демонструє топологічну структуру плати, її загальний вигляд та логіку з'єднань між елементами. У межах проєкту було прийнято рішення реалізувати друковану плату в односторонньому виконанні, тобто всі провідні доріжки та з'єднання розміщено лише на нижньому шарі плати. Такий підхід обрано через його технологічну простоту, що дає змогу виготовити плату в умовах звичайної лабораторії без необхідності застосування фотолітографії або багат шарових структур.

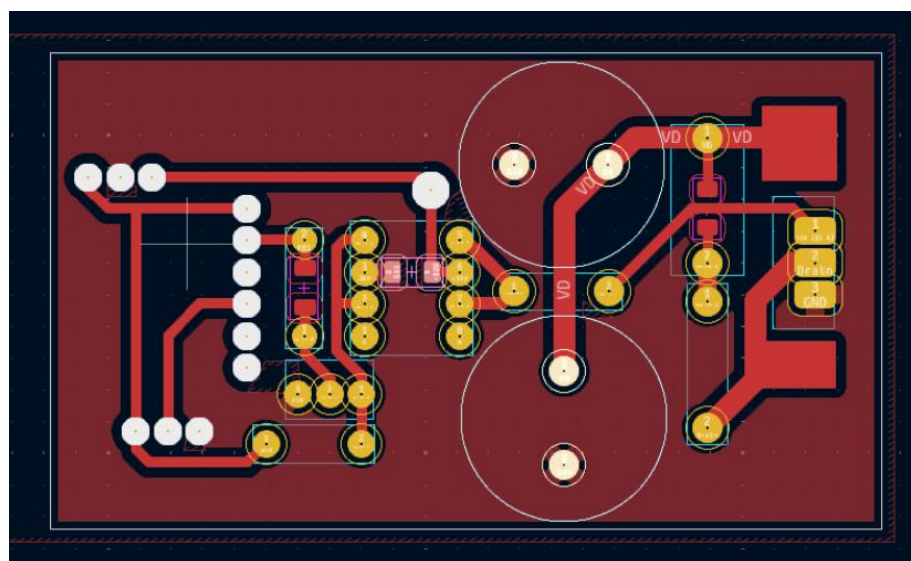


Рис 3.2 Вигляд плати в редакторі трасування KiCad.

Використання одностороннього монтажу накладає певні обмеження на розміщення елементів та прокладання доріжок. Проте завдяки оптимальному компонуванню схеми та логічному поділу на функціональні блоки вдалося уникнути складного багаторівневого перетину провідників. Критично важливі сигнальні та силові шини — зокрема, тракти живлення, відводу імпульсів до

									Арк.
									60
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата					

трансформатора, а також з'єднання з MOSFET — прокладено максимально коротко та прямолінійно для зменшення індуктивного впливу.

Однією з важливих особливостей плати є реалізація мідної заливки на нижньому шарі, що утворює GND-полігон — суцільну площину, з'єднану з потенціалом загальної шини (землі). Така конструкція має кілька важливих переваг:

- По-перше, мідна площа істотно знижує імпеданс (повний опір) зворотного шляху для струму, особливо в умовах роботи на високих частотах. Це сприяє більш стабільній роботі цифрових та аналогових каскадів, оскільки перешкоджає утворенню паразитної різниці потенціалів між вузлами живлення.

- По-друге, GND-заливка виступає як додатковий тепловідвід. Оскільки силовий транзистор VT2 (IRF740), діод D1 (1N4936) та деякі інші компоненти нагріваються під час роботи, наявність суцільної мідної площини дає змогу ефективніше передавати тепло на більшу площу плати, знижуючи локальне температурне навантаження.

- По-третє, суцільна "земляна" площа виконує функцію екранування, зменшуючи рівень електромагнітних завад, які виникають під час роботи пристрою в імпульсному режимі. Зокрема, перемикання силового MOSFET з високими швидкостями наростання сигналу може генерувати ВЧ-перешкоди, що впливають на роботу мікроконтролера або інших вузлів. GND-полігон виступає бар'єром для таких завад і забезпечує кращу електромагнітну сумісність (ЕМС) пристрою загалом.

Загалом, технічна реалізація плати з використанням одностороннього монтажу та суцільної мідної заливки довела свою ефективність у процесі моделювання, виготовлення та подальшого тестування. Така конструкція дозволила досягти балансу між простотою виготовлення, стабільністю електричних характеристик і надійністю в умовах високочастотного та високовольтного навантаження.

									Арк.
									61
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дис	Дата					

3.3 Технологія виготовлення друкованої плати

Виготовлення друкованої плати для пристрою було здійснено з використанням термотрансферного методу перенесення зображення доріжок, що є одним із найефективніших способів створення односторонніх друкованих плат у лабораторних умовах. Такий підхід забезпечує високу точність, не вимагає складного обладнання та дозволяє досягти стабільної якості виготовлення при мінімальних витратах. Детальна послідовність операцій наведена в операційній карті (див. Додаток Е).

Процес виготовлення розпочинався з підготовки фольгованого склотекстоліту FR-4 товщиною 1,5 мм із мідним шаром 35 мкм. Поверхню плати було ретельно зачищено дрібнозернистим наждачним папером до дзеркального блиску, що забезпечило належну адгезію тонера. Після цього мідна поверхня знежирювалася ізопропіловим спиртом або ацетоном для усунення слідів окислення та жиру, які могли б перешкодити перенесенню зображення.

Шаблон плати, створений у середовищі KiCad, було експортовано у формат PDF з роздільною здатністю 600 dpi без масштабування. Зображення було надруковано лазерним принтером на глянцевому фотопапері або аркуші з каталогу. Такий тип носія дозволив тонеру залишатися на поверхні без поглинання волокнами паперу, що є необхідною умовою для його ефективного перенесення на мідь.

Перенесення шаблону здійснювалося методом термопереносу — надрукований аркуш щільно прикладався до фольгової поверхні плати та прогрівався побутовою праскою при температурі 150–180 °C упродовж 3–5 хвилин. Після охолодження папір розмочувався у воді та обережно знімався, залишаючи тонер на поверхні міді у вигляді малюнка майбутніх провідників.

Процес травлення плати проводився у підігрітому до 40–45 °C розчині хлорного заліза (FeCl_3), який забезпечує рівномірне та контрольоване видалення незащитених ділянок міді. Тривалість процесу становила приблизно 15 хвилин. Після завершення травлення плата промивалася проточною водою, а залишки

									Арк.
									62
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата					

тонера видалялися розчинником (наприклад, ацетоном), після чого поверхню сушили.

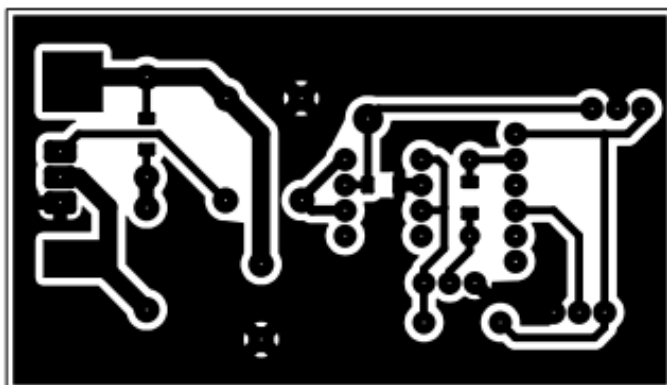


Рис 3.3 Вигляд шаблону друкованої плати, надрукованого для термотрансферного перенесення.

Наступним етапом було свердління монтажних отворів, що виконувалося з використанням міні-дрилю та твердосплавних свердел діаметром 0,8–1,2 мм. Для точності позиціонування застосовувався ручний свердлильний стенд. Особливу увагу приділяли отворам під компоненти з високим струмовим навантаженням — зокрема, транзистор VT2 (IRF740), клемники живлення, та трансформатор. Чистота отворів і точність свердління мали важливе значення для надійного електричного й механічного контакту при пайці.

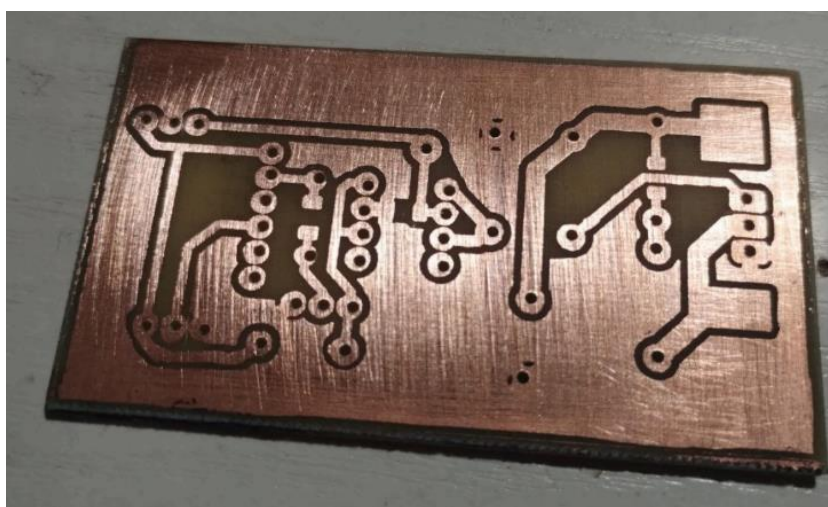


Рис 3.4 Плата після травлення та свердління, з видимими провідниками і монтажними отворами.

					ДЕ11. 111005. 001 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дис	Дата		

Результатом виконаних операцій стала якісна одностороння друкована плата з чітким малюнком доріжок та точним позиціонуванням отворів, що відповідає вимогам подальшого монтажу компонентів та забезпечує електричну цілісність схеми.

3.4 Монтаж та збирання пристрою

Монтаж елементної бази на виготовлену друковану плату здійснювався вручну за допомогою електричного паяльника з регулюванням температури. Пайка проводилася з дотриманням усіх стандартів безпечного монтажу електронних схем: попередньо виводи компонентів очищувались, при потребі — лудились, використовувався свинцевий припій марки ПОС-61 у поєднанні з каніфольним флюсом. Особливу увагу приділяли полярним елементам, де неправильне встановлення могло призвести до порушення функціонування пристрою або виходу окремих вузлів з ладу.

Зокрема, діод швидкого відновлення *D1* (1N4936) повинен бути встановлений відповідно до маркування катода, оскільки зміна полярності призведе до відсутності захисту від імпульсів самоіндукції. Аналогічно, електролітичні конденсатори *C1*, *C2*, *C3*, *C4* та *C5* необхідно було впаяти з правильним дотриманням "+" та "-" полюсів. У разі неправильного під'єднання виникає ризик перегріву, вибуху чи деградації ємності, особливо при роботі в імпульсному режимі.

Важливим етапом було встановлення MOSFET транзистора *VT2* (IRF740), який не лише є критичним для комутації високої напруги, але й зазнає найбільших теплових навантажень під час роботи. З огляду на це, транзистор було розміщено з можливістю під'єднання до зовнішнього радіатора. Його встановлення супроводжувалось використанням теплопровідної пасти, яка забезпечує щільний тепловий контакт між корпусом транзистора та металевим радіатором, зменшуючи тепловий опір і покращуючи відведення тепла.

									Арк.
									64
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата					

Розміщення всіх компонентів здійснювалося відповідно до розробленої схеми та тривимірної моделі плати, що дозволило зменшити ймовірність помилок під час монтажу. Завдяки 3D-візуалізації, проведеній на попередньому етапі проєктування, вдалося уникнути конфліктів по висоті, розміщенню отворів та розведенню контактів. Усі ці етапи перевірки й контролю відображені в контрольній карті (див. Додаток Ж).

Після завершення монтажу було проведено ретельну візуальну перевірку усіх з'єднань на наявність можливих коротких замикань, залишків флюсу, а також — правильність під'єднання живлення, заземлення та сигнальних ліній. Для забезпечення механічної стабільності, плата була закріплена на ізоляційній основі — це може бути текстоліт або термостійкий пластик — з передбаченими отворами для вентиляції, що сприяє природному охолодженню при тривалому навантаженні.

Зображення змонтованої друкованої плати з усіма компонентами представлено на рис. 3.5. На ньому видно правильне розміщення елементів відповідно до 3D-моделі, під'єднання до радіатора, а також — роз'єми для живлення та навантаження.

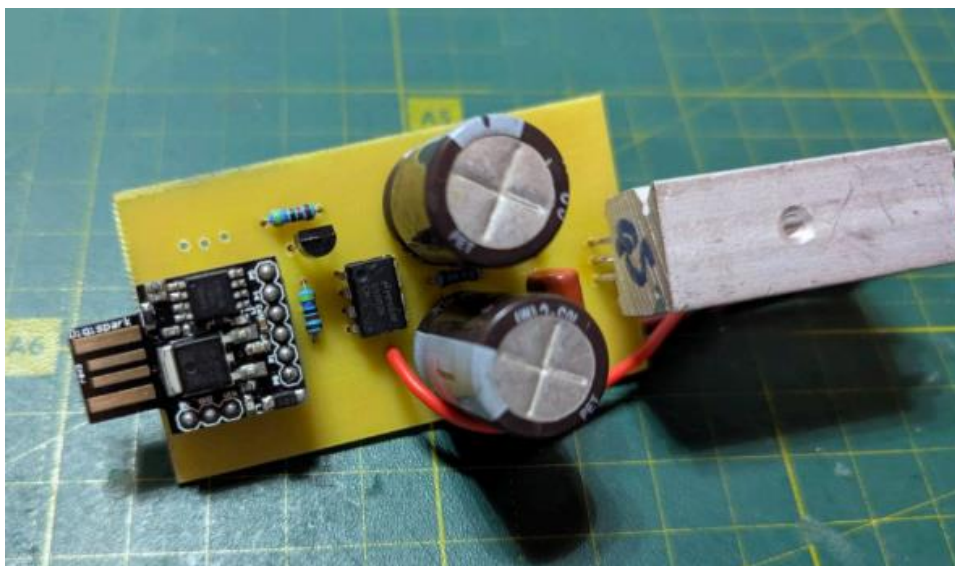


Рис 3.5. Вигляд змонтованої плати.

					ДЕ11. 111005. 001 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата		

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У межах виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було розроблено, змодельовано, зібрано та протестовано високовольтний генератор низької потужності на основі мікроконтролера ATtiny85.

На підставі виконаних досліджень та практичної реалізації можна сформулювати такі висновки:

1. Аналіз предметної області показав, що існує значна потреба у простих і недорогих високовольтних генераторах для локального озонування, лабораторних задач, сенсорних систем і імпульсних пристроїв. Виявлено, що більшість існуючих рішень або надто складні, або вимагають дорогих компонентів та спеціального обладнання.

2. Конструкція пристрою спирається на оптимальний набір електронних компонентів, які забезпечують баланс між вартістю, функціональністю, надійністю та доступністю. Зокрема, ATtiny85 обрано як керуючий елемент завдяки його гнучкості, простоті програмування та здатності генерувати стабільні ШІМ-сигнали.

3. Схема пристрою є простою, лінійною та добре структурованою. Вона включає підсилювальний каскад (транзистор BC337), драйвер DS0026, силовий MOSFET IRF740, а також захисний діод 1N4936. Обґрунтовано вибір кожного елемента порівнянням з альтернативами та аналізом технічних параметрів.

4. Моделювання у Proteus 8 Professional дозволило візуалізувати сигнали в ключових вузлах схеми, виявити та усунути потенційні помилки, а також оцінити втрати потужності та якість перемикачів. Проведено розрахунок енергетичних параметрів.

5. Розробка друкованої плати здійснена в середовищі KiCad. Створено односторонню плату з мідним полігоном, що виконує роль «землі» та сприяє зниженню імпедансу і покращенню тепловідведення. Враховано технологічність виготовлення в умовах лабораторії — мінімальна кількість перемичок, зручне компоновання.

						Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата	ДЕ11.111005.001 ПЗ	

6. Фізичне виготовлення плати виконано методом термотрансферу з подальшим травленням у хлорному залізі, що забезпечило високу якість доріжок. Монтаж компонентів здійснено вручну з дотриманням полярності, черговості та правил паяння.

7. Результати експериментального тестування підтвердили стабільність генерації ШІМ-сигналу, правильність роботи драйвера та наявність високої напруги на виході трансформатора.

8. Розроблено комплект технічної документації, який включає специфікацію, операційну карту, маршрутну карту, контрольну карту, а також інструкцію з контролю якості.

Також було розраховано втрати енергії на затворі, на комутаціях та в провідному режимі, які склали менше 1,3 мВт на драйвері та близько 0,09 Вт на транзисторі IRF740, що дозволяє експлуатацію без активного охолодження.

Результати реального експерименту підтвердили моделювання: пристрій стабільно формував високовольтні імпульси, конструкція не перегрівалась, а вихідна напруга дозволяла ініціювати коронний розряд.

У процесі розробки пристрою були визначені напрями, які можуть бути покладені в основу подальшого вдосконалення та розвитку конструкції. Насамперед, доцільним є впровадження апаратного захисту за струмом та напругою, що дозволить запобігти виходу з ладу силових елементів у разі перевантаження або короткого замикання на виході трансформатора. З метою підвищення енергоефективності та покращення перетворення енергії варто звернути увагу на оптимізацію параметрів трансформатора: зміну геометрії обмоток, вибір феритового матеріалу з меншими втратами, а також аналіз впливу частоти комутації на індуктивні характеристики.

З метою розширення функціональності генератора варто розглянути можливість впровадження зворотного зв'язку та регулювання параметрів ШІМ-сигналу у режимі реального часу. Це дозволить адаптувати вихідну потужність до конкретних умов роботи та підвищити стабільність характеристик на виході. Для зменшення габаритів, спрощення монтажу та підвищення повторюваності

									Арк.
									67
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата					

виробництва доцільним є перехід до компонування на базі поверхневого монтажу (SMD-технологій). У випадку комерційного використання або серійного виробництва важливим кроком є розміщення пристрою в герметичному або екранованому корпусі з урахуванням тепловідведення та захисту від електромагнітних завад. Зазначені рекомендації дозволяють не лише вдосконалити розроблений генератор, але й адаптувати його до ширшого спектру практичних задач, зокрема — у медичних, екологічних чи наукових установках.

					<i>ДЕ11. 111005. 001 ПЗ</i>	Арк.
						68
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Пі підпис</i>	<i>Дата</i>		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Erickson R. W., Maksimovic D. Fundamentals of Power Electronics Електронний ресурс. – Режим доступу: https://elprivod.nmu.org.ua/files/converters/Robert_Erikson_fundamentals-of-power-electronics-3n_2020.pdf (дата звернення: 10.03.2025).
2. Texas Instruments. Power Topologies Handbook Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://cxemka.com/upload/art/boost/f/TI%20topology.pdf> (дата звернення: 11.03.2025).
3. Електроніка, радіотехніка та засоби телекомунікацій: навч. посіб. / За ред. С.І. Каленик. – КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/ca1f6142-553c-4fe6-b620-70d0299378c8/content> (дата звернення: 11.03.2025).
4. УСЕРЕДНЕНІ характеристики коронного розряду з високотемпературною областю іонізації Електронний ресурс. – Режим доступу: <http://www.lib.krsu.edu.kg/uploads/files/public/1975.pdf> (дата звернення: 16.03.2025).
5. Застосування коронного та бар'єрного розряду в апаратах для синтезу озону Електронний ресурс. – Режим доступу: https://ed.kpi.ua/wp-content/uploads/materials/Plasm-elekt_r_lab-3_ozone.pdf (дата звернення: 18.03.2025).
6. Zhao X., Shi Y., Zhang Y. Corona discharges: fundamentals and diagnostics Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=a11578da37209e6870a1489460a564387e50cbcb> (дата звернення: 18.03.2025).
7. Wojciech D. Analysis of the Current–Voltage Characteristic during the Corona Discharge in Wires-To-Planes Electrostatic Precipitator under Variable Air Humidity Електронний ресурс // Acta Physica Polonica A. – 2019. – Vol. 135(3). – Режим доступу: <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/135/app135z3p02.pdf> (дата звернення: 01.04.2025).

									Арк.
									69
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата					

8. Kogelschatz U. Dielectric-Barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications Електронний ресурс Електронний ресурс Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://www.dvs-media.eu/media/pdf/600021.pdf> (дата звернення: 02.04.2025).

9. Райзер Ю.П. Фізика газового розряду. – М.: ІД «Інтелект», 2009. Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://www.scribd.com/document/493609271> (дата звернення: 02.04.2025).

10. ВАНТ. Дослідження тліючого розряду в низькому тиску Електронний ресурс // Вісник НАН України, 2000. – №1. – С. 58–63. – Режим доступу: https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2000_1/article_2000_1_58.pdf (дата звернення: 10.04.2025).

11. Chemical Engineering Journal. Surface ozone generation using dielectric barrier discharge Електронний ресурс // ScienceDirect. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0009250982850677> (дата звернення: 15.04.2025).

12. Atmel Corporation. ATtiny85 Datasheet Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/174761/ATMEL/ATTINY85.html> (дата звернення: 15.04.2025).

13. ON Semiconductor. BC337 Transistor Datasheet Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/171972/ONSEMI/BC337.html> (дата звернення: 22.04.2025).

14. Електронні джерела живлення: навчальний посібник / Маскальський О.І., Шпильовий І.М. – НТУУ «КПІ», 2017. Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/ff89421e-c979-4d4c-95af-01ff78454633/content> (дата звернення: 22.04.2025).

15. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Плазмова електроніка» Електронний ресурс. – КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Режим доступу: <https://ed.kpi.ua> (дата звернення: 27.04.2025).

									Арк.
									70
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дис	Дата					

16. ВАНТ. Дослідження коронного та бар'єрного розряду у повітрі при атмосферному тиску Електронний ресурс // Вісник НАН України, 2000. – №1. – С. 58–63. – Режим доступу: https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2000_1/article_2000_1_58.pdf (дата звернення: 28.04.2025).

17. Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasma Actuators for Flow Control Електронний ресурс // DVS Media. – Режим доступу: <https://www.dvs-media.eu/media/pdf/600021.pdf> (дата звернення: 28.04.2025).

18. Электронные преобразователи энергии: метод. указания / СПбГТУ. – 2005. Електронний ресурс – Режим доступу: <https://elib.spbstu.ru/dl/1406.pdf/download/1406.pdf> (дата звернення: 01.05.2025).

19. Raychenko V. Simulation of ozone generator discharge gap using Comsol Multiphysics Електронний ресурс // Conference Proceedings of KPI. – 2022. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/ff89421e-c979-4d4c-95af-01ff78454633/content> (дата звернення: 20.05.2025).

20. В. М. Smirnov. Physics of Electric Discharges in Gases. – Moscow: Energoatomizdat, 1984. Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://archive.org/details/SmirnovGasDischarges> (дата звернення: 02.05.2025).

21. Raizer, Y. P. Gas discharge physics. – Berlin : Springer-Verlag, 1991. Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://d-nb.info/910692815/04> (дата звернення: 02.05.2025).

16. Brandenburg R. Dielectric barrier discharges: Progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments. – Plasma Sources Science and Technology. – 2017. – Vol. 26. – № 5. – P. 053001. Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6595/aa6426/pdf> (дата звернення: 11.05.2025).

22. Fridman A. Plasma Chemistry. – Cambridge University Press, 2008. – 978 р. . Електронний ресурс. – Режим доступу: https://assets.cambridge.org/97805218/47353/frontmatter/9780521847353_frontmatter.pdf (дата звернення: 14.05.2025).

									Арк.
									71
Змн.	Арк.	№ докум.	Пі дпис	Дата					

ДОДАТОК Е

<i>Операційна карта технологічного процесу</i>										ДЕ11.111005.002 ОК				
<i>Літера</i>		<i>Виготовлення та монтаж плати високовольтного генератора</i>								<i>Високовольтне джерело живлення озонного генератора. Операційна карта</i>				
<i>Обладнання, технологічна оснастка, тара</i>														
<i>Найменування</i>										<i>Позначення (код)</i>				
<u>Паяльна станція</u> <u>Осцилограф цифровий</u> <u>Мультиметр</u> <u>Лабораторне джерело живлення</u> <u>Монтажна плата</u> <u>Тара для готових виробів</u> <u>Антистатичний браслет</u> <u>Піницет прямий</u> <u>Лупа для контролю</u> <u>Витяжка або місце з вентиляцією</u>										<u>Lukey 702 (PS-01)</u> <u>Hantek DS05102P</u> <u>OSCO1</u> <u>DT-9205A (MM-01)</u> <u>HY3005D (PSU-01)</u> <u>FR-4 (PCB-01)</u> <u>ESD-01</u>				
<i>Складальні одиниці, деталі, н/ф, матеріали</i>														
<i>Найменування, марка, сорт, розмір</i>										<i>Позначення ГОСТ, ТУ</i>				
<u>Плата друкована FR-4, одностороння, 70x50 мм</u> <u>Транзистор I RF740</u> <u>Драйвер затвору DS0026</u> <u>Транзистор BC337</u> <u>Мікроконтролер ATtiny85</u> <u>Діод 1N4936</u> <u>Резистори SMD 0805</u> <u>Конденсатори електроліт. 1000 мкФ 16 В</u> <u>Конденсатор керамічний 100 нФ</u> <u>Провід монтажний МГТФ, 0.12 мм²</u> <u>Припій ПОС-61</u> <u>Флюс LTI-120 або аналог</u> <u>Резистор 100 кОм</u>										<u>ГОСТ 10316-78</u> <u>Vi shay</u> <u>Texas Instruments</u> <u>ГОСТ 17467-79</u> <u>Microchip</u> <u>ГОСТ 28242-89</u> <u>ГОСТ 28883-90</u> <u>ГОСТ 13348-78</u> <u>ГОСТ 28179-89</u> <u>ГОСТ 6323-79</u> <u>ГОСТ 21931-76</u> <u>20.2-25318203-001: 2005</u> <u>ГОСТ 28883-90</u>				
<i>Виробнича гігієна</i>		<i>Заходи</i>												
<i>Змін</i>														
<i>Лист</i>														
<i>№ докум</i>														
<i>Пі дпис</i>														
<i>Дата</i>														
<i>Розроб.</i>														
<i>Кошовий А.С.</i>														
<i>Перев.</i>														
<i>Сидоренко С.Б.</i>														
<i>Н. Контр.</i>														
<i>Батрак Л.М.</i>														
<i>Затв</i>														
<i>Сидоренко С.Б.</i>														

Пі дпис та дат
 Інв. № дубл
 Зам. Інв. №
 Пі дпис та
 Інв. № ориг

*Операційна карта
технологічного
процесу*

ДЕ11.111005.002 ОК

Виготовлення та монтаж плати високовольтного генератора

Високовольтне джерело живлення озонного генератора.

Операційна карта

<i>Лист</i>	<i>2</i>	<i>Листів</i>	<i>5</i>
-------------	----------	---------------	----------

Зміст переходів, робочих прийомів. Ескізи

Операція 001 – Підготовка друкованої плати

Переходи:

- *Розкроїти фольгований текстоліт за розмірами 70×50 мм.*
- *Зачистити мідну поверхню наждачним папером до блиску.*
- *Знежирити поверхню і зопрофілювати спиртом.*

Робочі прийоми:

- *Використовувати гумові рукавички, щоб уникнути залишків жиру;*
- *Протирання виконувати безворсовою серветкою.*

Примітка: ескіз – плоска заготовка прямокутної форми з отворами під монтаж.

Операція 002 – Перенесення зображення плати

Переходи:

- *Роздрукувати шаблон плати на лазерному принтері.*
- *Зафіксувати шаблон на фользі та перенести тонер методом термотрансферу (праска 180-200 °С, 2-3 хв).*

Робочі прийоми:

- *Притискати праску без зсуву;*
- *Після охолодження зняти папір шляхом розмочування.*

Примітка: ескіз – контур плати з тонером, що позначає майбутні доріжки.

Операція 003 – Травлення

Переходи:

- *Занурити плату у розчин хлорного заліза.*
- *Після повного витравлення мідного фону – виїняти та промити.*

Робочі прийоми:

- *Постійно перемішувати ємність для рівномірного травлення;*
- *Після травлення видалити залишки тонера розчинником.*

<i>Пі дпис та дат</i>	
<i>Інв. № дубл</i>	
<i>Зам. Інв. №</i>	
<i>Пі дпис та дата</i>	
<i>Інв. №</i>	

<i>Змін</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум</i>	<i>Пі дпис</i>	<i>Дата</i>	<i>Розроб.</i>	<i>Кошовий А. С.</i>			
					<i>Перев.</i>	<i>Сидоренко С. Б.</i>			
					<i>Н. Контр.</i>	<i>Батрак Л. М.</i>			

Операційна карта
технологічного
процесу

ДЕ11.111005.002 ОК

Виготовлення та монтаж плати
високовольтного генератора

Високовольтне джерело
живлення озонного
генератора

Лист

5

Листів

5

Зміст переходів, робочих прийомів. Ескізи

Операція 010 – Упаковка

Переходи:

- Встановити плату в пластикову антистатичну тару.
- Позначити інвентарний номер або код виробу.

Робочі прийоми:

- Укладання з розділниками або пінопластом.

Підпис та дата									
Інв. № дубл									
Зам. Інв. №									
Підпис та дата									
Інв. №									
Змін	Лист	№ докум	Підпис	Дата	Розроб.	Кошовий А.С.			
					Перев.	Сидоренко С.Б.			
					Н. Контр.	Батрак Л.М.			

№ ориг	№ дпис та дата	Зам і № №	№ дубл.	№ дпис та дата
№ пера	Високочольне джерело живлення озонного генератора			

Контрольна карта

У разі виявлення першого дефекту – перевіряється вся партія. Браковані вироби поміщаються в окрему тару та ізолюються. Повторний контроль здійснюється лише за письмовим дозволом керівника.		Виробнича зігнєна	Найменування операції
		ОСТ 11 580.005.022	Збирання та монтаж компонентів на друковану плату; пайка; візуальний контроль; перевірка функціонування
		Матеріалу	Найменування, марка
			Плата: FR-4 одностороння
			ГОСТ чи ТУ
			ГОСТ 10316
		Обладнання (найменування чи код)	Заподіжні заходи
		Паяльна станція Likeu 702; мультиметр DT-9205A; БЖ HYELEC HY3005D.	Див текст лист 3

№ перевіряється	Засоби контролю		% контролю	Метод контролю, ознаки забракування, допустимі дефекти
	Найменування	Код		
1	Надіїність пайки	лула 5х.	100	Візуальний огляд усіх з'єднань через лупу.
				Ознаки забракування: матова або зерниста припою, тріщини, темна плівка
		Міліметра	100	Позвонка міліметром.
2	Орієнтація компонентів	Монтажна схема	100	Порівняння фактичного монтажу з монтажною
				Якщо діод або електродит запаяний навпаки.
				мікроконтролер позначений не за ключем.
				переплутані позиції резисторів. вблжати браком.

Змн	№ докум.	№ дпис	Дата	Змн	Лист	№ докум.	№ дпис	Дата	Розроб.	Контролю А. С.
									Перевір.	Сидоренко С. Б.
									Н. контр.	Батрак Л. М.
									Затв.	Сидоренко С. Б.

№ лінійки в документах

Інв. № ориг.	Пі дпис та дата	Зам і інв. №	Інв. № дубл.	Пі дпис та дата

Контрольна карта

Високовольтне джерело живлення озонного генератора

ДІ 11. 111005. 003 КК

Лист 2 Листів 3

№ перехід	Що перевіряється	Засоби контролю		% контрольності	Допустимість браку	Метод контролю, ознаки забракування, допустимі дефекти
		Найменування	Код			
3	Відсутність коротких замикань	Мультиметр	DT-9205A	100		Режим прозвонки мультиметру між ВСС та GND Ознаки забракування: замикаючий писк при подачі живлення з обмеженням по струму. Ознаки забракування: різке зростання струму на живлення, перегрів.
4		Лабораторне джерело	НУ30050			
5	Вихідна напруга	Мультиметр + резист	DT-9205A	100	±10	Під'єднання навантаження 100 кОм. Вимірювання ІВих через діодник. Аналіз ознаки забракування: ІВих < 100 В або > 125 В; стрибки; відсутність напруги; перегрів

Змін	Лист	№ док.	Пі дпис	Дата	Змін	Лист	№ док.	Пі дпис	Дата	Розроб.	Контроль А.С.
										Перевір.	Ковалій А.С.
										Н. контр.	Сидоренко С.Б.
											Балрак Л.М.
										Зам.	Сидоренко С.Б.

№ ліній вказати в про карті

№ орг	№ докум	№ докум	№ докум	№ докум	№ докум

Контрольна карта

Високовольтне джерело живлення озонного генератора

№11. 111005. 003 КК

№ перехід	Засоби контролю		% контролю	Допустимі браки	Метод контролю, ознаки забракування, допустимі дефекти
	Найменування	Код			
					Запобіжні заходи
					1. Під час вимірювань і тестування слід використовувати лише ізольовані інструменти.
					2. Під час монтажу елементів необхідно використовувати антистатичний браслет
					3. Перше вмикання пристрою здійснюється через лабораторне джерело живлення з обмеженням струму.
					4. Транзистор 1RF740 повинен бути оснащений радіатором а місце монтажу мати отвори для вентиляції
					5. Через наявність високовольтних елементів в заборонено використовувати пристрій у підвищеною вологістю

Змін	Лист	№ докум	Підпис	Дата	Змін	Лист	№ докум	Підпис	Дата	Розроб.	Контроль
										Ковалів А. С.	
										Сидоренко С. Б.	
										Батрак Л. М.	
										Сидоренко С. Б.	

№ лінійки в квадраті про
контр.

Лист 3 Листів 3

Інв. № ориг	Пі дпис та дата	Зам. Інв. №	Інв. №	Пі дпис та дата								
<p>Маршрутна карта технологічного процесу</p> <p>Високовольтне джерело живлення озонного генератора</p> <p>ДЕ11.111005.004 МК</p>												
Літера	Вид нормув.											
Лист	1	Лист	2									
Лист	№	Операції	Позначення технологічного документу	Найменування	Примане №	Позначення ГОСТ, ТУ, код матеріалу	Об'єм	Витрати на од.	Від норми	Технологічні вимоги	Резервація %	Код або найменування обладнання
1	Підготовка плати	ОК-001	Плата FR-4	одностороння, 70x50 70x50 мм		ГОСТ 10316-78	шт	1				Ножіці по металу
2	Перенесення зображення плати	ОК-002	Шаблон плати (лазерний друк)	Шаблон плати			шт	1				Лазерний принтер
3	Травлення плати	ОК-003	Розчин хлорного заліза	Розчин хлорного заліза		ТУ У 6-15-287-87	мл	200				Праска 180-200 °C
4	Свердління отворів	ОК-004	Свердло Ø8-1 мм	Свердло Ø8-1 мм		ГОСТ 886-77	шт	1				Хімічна ванна
5	Монтаж пасивних елементів	ОК-005	Резистори 100м4.7 кОм 4.7 кОм	Резистори 100м4.7 кОм 4.7 кОм		ГОСТ 28883-90	шт	1				Піницет
			Конденсатори 100 нФ, нФ, 1000 мкФ	Конденсатори 100 нФ, нФ, 1000 мкФ		ГОСТ 28179-89, 13348-78	шт	1				Піницет
6	Монтаж активних елементів	ОК-006	АТТіпу85 (Di gi Sprak) 1 RF740 DS0026 BC337	АТТіпу85 (Di gi Sprak) 1 RF740 DS0026 BC337		ТУ Мсгосчір ТУ Vishay ТУ Texas	шт	1				Піницет
			Додаток 1	Додаток 1		ГОСТ 17467-79	шт	1				Піницет
			Додаток 2	Додаток 2		ГОСТ 28242-89	шт	1				Піницет
ЗМ	№ докум	Пі дпис	Дата	Змін	Лист	№	Розроб.	Коштовий А.С.				
							Перев.	Сидоренко С.Б.				
							Н. контр.	Балрак Л.М.				
							Затв.	Сидоренко С.Б.				

Інв. № ориг	Пі дпис та дата	Зам. Інв. №	Інв. № дубл.	Пі дпис та дата
-------------	-----------------	-------------	--------------	-----------------

Літера		Маршрутна карта технологічного процесу		Високовольтне джерело живлення озонного генератора		Вид нормув.		ДЕ11.111005.004 МК	
--------	--	----------------------------------------	--	----------------------------------------------------	--	-------------	--	--------------------	--

№	Львниця	Операції	Позначення технологічного документу	Найменування	№ Черку	Позначення ГОСТ, ТУ, код матеріалу	Од. виміру	Витрати на од.		Вид норми	Технологічні витрати	%	Код або найменування обладнання
								Часткові	з урахуванням відходів				
7		Пайка елементів	ОК-007	Пайка		ГОСТ 21931-76	г	10					Паяльна станція Lukey 702
8		Візуальний контроль перевірка КЗ	КК-001	Плата з компонентами пайки		ГОСТ 20.2-25318203-2005	мл	100					Паяльна станція, пензлик
10		Перевірка ШМ-	КК-002	Плати з компонентами після пайки			шт	1					Мультиметр DT-9205A
11		Перевірка вихідної напруги	КК-003	Плати з компонентами після пайки			шт	1					Осцилограф Haltek DS05102P
				Плати з компонентами після пайки			шт	1					Щуп осцилографа
				Плати з компонентами після пайки			шт	1					Мультиметр DT-9205A
				Плати з компонентами після пайки			шт	1					випробувальна плата

ЗМ	Лист	№ докум	Пі дпис	Дата	Змн.	Лист	№	Розроб.	
								Дата	Ким
								Кошубий А.С.	
								Сидоренко С.Б.	
								Н. конгр.	Батрак Л.М.
								Залтв	Сидоренко С.Б.

S U M M A R Y

High voltage power supply of ozone generator

The diploma project of first educational level "Bachelor" by specialty 171 Electronics, specialization electronic devices and equipment, Koshovy Anton. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Faculty of Electronics, Department of Electronic Devices and Systems. Academic group DE-11. - Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2025. - 72 p., Ill. 36, tables 5.

Keywords: High - voltage generator, ozonator, arc discharge, transformer, air purification, ozone generation.

Summary of the project: 5 pages

1) Relevance and purpose

The growing demand for compact, cost-effective, and energy-efficient high-voltage power sources has led to the development of specialized solutions tailored for low-current applications. Among these applications, ozone generation, high-voltage testing, and sensor excitation systems require reliable circuits capable of producing controlled high-voltage pulses at relatively low power.

This diploma project is dedicated to the full-cycle development of a laboratory prototype of a high-voltage pulse generator, based on an ATtiny85 microcontroller and standard discrete components. The goal is to design a generator that is compact, efficient, reliable, and suitable for potential application in ozone synthesis systems or other research-oriented uses.

The objectives of the project include:

- Analysis and selection of optimal electronic components;
- Circuit design and simulation;

- PCB layout and fabrication;
- Manual assembly of the prototype;
- Functional testing and performance validation;
- Development of supporting technical documentation.

2) Component selection and functional description

The heart of the generator is the ATtiny85 microcontroller, chosen for its small form factor, low cost, and the ability to generate precise PWM (pulse-width modulation) signals. Compared to its analogs (such as ATtiny13 and STM32F030F4P6), ATtiny85 strikes a balance between simplicity and functionality, offering sufficient program memory and peripheral support to meet the requirements of PWM-based control.

To drive the power stage, the microcontroller output is fed into a bipolar NPN transistor (BC337), which inverts and amplifies the signal. This stage ensures a stronger and cleaner transition, suitable for activation of a gate driver. The gate driver selected is the DS0026, capable of delivering peak currents of up to 2 A with nanosecond-level switching times, making it ideal for fast charge/discharge cycles of the gate capacitance in power MOSFETs.

The switching element of the high-voltage generator is an IRF740 N-channel MOSFET, chosen for its high drain-source voltage rating (400 V), reasonable on-resistance, and compatibility with low-side switching configurations. This transistor commutates the primary winding of a step-up transformer, which converts the low-voltage pulses into high-voltage output at the secondary winding.

To ensure circuit protection, a fast-recovery diode (1N4936) is implemented in parallel with the transformer primary. This protects the switching transistor from voltage spikes caused by inductive kickback.

Passive elements such as resistors and capacitors are selected based on their voltage ratings, signal conditioning needs, and timing functions. All values are determined through a combination of datasheet analysis and simulation data.

3) Simulation and analysis

Before physical prototyping, the schematic was modeled and tested in Proteus 8 Professional. This simulation environment allowed for time-domain analysis of signals at various circuit nodes. The PWM signal was tested for stability, amplitude, frequency (20 kHz), and duty cycle.

The gate driver output was analyzed using virtual probes to verify that sharp pulses were achieved during transitions — critical for minimizing switching losses in the MOSFET. Energy losses due to gate charging were calculated to be less than 1 mW, which confirms high efficiency.

In the final simulation stage, a virtual transformer model was used to observe the voltage rise on the secondary side. With an equivalent load of 100 k Ω , the effective output voltage reached approximately 113.4 V. The calculated output power, using Ohm's law, was close to 0.128 W — which satisfies the criteria for low-power ozone generation and similar applications.

4) Pcb design and fabrication

The schematic was exported to KiCad, where the printed circuit board (PCB) layout was designed. A single-layer (one-sided) PCB was chosen for ease of production. The layout includes a solid ground plane to reduce electromagnetic interference (EMI) and improve heat dissipation from the MOSFET.

Fabrication was done using the toner transfer method, a common laboratory technique. A laser-printed mirror image of the PCB traces was thermally transferred onto a copper-clad board using a heated iron. The board was then etched in ferric chloride solution, drilled, and cleaned.

This method ensures sufficient resolution and alignment for the scale of components used. The board footprint measures 70×50 mm.

5) Assembly, quality control, and testing

Manual assembly was performed using a standard soldering station with leaded solder (Sn60Pb40 or POS-61). All components were placed according to the KiCad silkscreen layer and verified against the schematic.

After soldering, the board was visually inspected under magnification. Key checkpoints included:

- Correct polarity of diodes and electrolytic capacitors;
- Absence of solder bridges or cold joints;
- Proper component alignment and insertion.

Functional testing included:

- Powering the board through a lab-grade power supply with current limiting;
- Monitoring PWM output using an oscilloscope;
- Verifying gate signal quality;
- Measuring high-voltage output under load conditions.

The device passed all tests and demonstrated stable operation.

6) Results and conclusions

The result of this work is a fully functional laboratory prototype of a high-voltage pulse generator. It meets the initial technical requirements: compact dimensions, efficient operation, cost-effectiveness, and reliable performance.

Key benefits of the developed system include:

- High switching speed and low energy losses;
- Simple topology, easy replication;
- Adjustable signal parameters via firmware (frequency and duty cycle);
- Low manufacturing cost and no need for specialized equipment.

Among the limitations is the relatively low output power (~ 0.13 W), which may not be sufficient for industrial-grade ozone systems. Also, galvanic isolation is

not implemented in the prototype, which may restrict use in applications requiring user safety protection.

7) Potential applications and further improvements

This design can be integrated into compact ozone generators, ionizers, sensor excitation modules, or controlled discharge systems. With minor modifications (e.g., isolation, casing, thermal protection), it may be scaled for consumer or research use.

Future enhancements may include:

- Integration of optical isolation;
- Use of higher-efficiency transformer windings;
- Implementation of feedback regulation;
- Transition to SMT components for miniaturization.