МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
"УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ"
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра електронних систем

КОНЮК СТАНІСЛАВ ВАСИЛЬОВИЧ

ЕСІТФ УжНУ

БЛОК ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ІМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА

Спеціальність 171 Електроніка

Освітня програма Електронні системи

Кваліфікаційна робота

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

Науковий керівник:
Заяць Тарас Михайлович
кандидат фізико-математичних наук, доцент
(завідуючий кафедрою електронних систем)

Ужгород – 2025

Реєстрація _____
(номер)

«____» _____ 2025 р. _____ Тетяна СЕМАК
(підпис)

Кваліфікаційна робота допущена до захисту

Завідувач кафедри

_____ Тарас ЗАЯЦЬ
(підпис)

к.ф.-м.н., доцент

«____» _____ 2025 р.

Рецензент _____ _____
(підпис) (Ім’я, Прізвище)

_____
(науковий ступінь, вчене звання)

ЕС ІТФ УжНУ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Інженерно-технічний факультет

кафедра електронних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

На тему:

«Блок живлення для імпульсного лазера»

Студента 4 курсу

Конюка Станіслава Васильовича _____ _____

(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник к.ф.-м.н., доц. кафедри ЕС Заяць Тарас Михайлович _____

(посада, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Голова ЕК: д.ф.-м.н. зав.відділом ІЕФ НАН України Ремета Є.Ю. _____

(посада вчене звання прізвище, ініціали,) (підпис)

Член ЕК: к.ф.-м.н., доц. кафедри ЕС Заяць Тарас Михайлович ___ _____

(посада, вчене звання, прізвище, ініціали,) (підпис)

Член ЕК: к.ф.-м.н., доц. кафедри ЕС Юркін Ігор Михайлович___ _____

(посада, вчене звання (прізвище, ініціали,) (підпис)

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

Студент _____ (підпис)

Ужгород – 2025

ЕС ІФ УжНУ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
Інженерно-технічний факультет
Кафедра електронних систем

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Зав. кафедрою,
доц. _____ (Заяць Т.М.)
«____» _____ 2025 року

ЕС ТФ УжНУ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

На кваліфікаційну роботу бакалавра
на тему:
«Блок живлення для імпульсного лазера»

Студента 4 курсу групи ЕС
Конюка Станіслава Васильовича _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)
Керівник: к. ф.-м.н., доц, кафедри ЕС Заяць Т.М. _____
(посада, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Ужгород – 2025

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

Факультет: Інженерно-технічний Кафедра: Електронних систем

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Зав. кафедрою,
доц. _____ (Заяць Т. М.)
“____”_____2025 року

З А В Д А Н Н Я
на кваліфікаційну бакалаврську роботу
студенту **Конюку Станіславу Васильовичу**

1. Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи: “Блок живлення для імпульсного лазера”.
   Затверджені Розпорядженням декана ІТФ від «12» травня 2025 року № _____
2. Термін закінчення студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи:
   20 червня 2025 року.
3. Вихідні дані до бакалаврської роботи.
   1) Розробити просту електронну систему блоку живлення для імпульсного лазера.
   2) Блок живлення для імпульсного лазера повинен накопичувати електричну енергію, а потім швидко та контрольовано подавати її на активний елемент лазера (наприклад, лампу накачки або діод) у формі коротких, потужних імпульсів.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці).
   Вступ.
   1. Огляд та аналіз аналогів об’єкту проектування.
   1.1. Аналіз аналогів об'єкта проектування.
   1.2. Технічна пропозиція та її обґрунтування
   2. Проектно-конструкторський розділ.
   2.1 Синтез структурної схеми;
   2.2 Розробка електричної принципової схеми;
   3.3. Розрахунок окремих блоків пристрою
   3. Висновки.
   4. Список використаних джерел.
   5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов‘язкових креслень):
      1. Структурна схема.
      2. Принципова електрична схема.

ЕСТЕ УЖНУ

5. Консультанти роботи, вказати з яких розділів.

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
		доц. Заяць Т.М.	Конюк С. В.
Нормоконтроль			

6. Дата видачі завдання 25 жовтня 2024 року.

Керівник роботи _____ (доц. Т.М. Заяць)
(підпис)

Завдання прийняв на виконання _____ (С.В. Конюк)
(підпис)

К А Л Е Н Д А Р Н И Й П Л А Н

№ п/п	Найменування етапів виконання КБР	Термін виконання етапів	Примітки
1.	Пошук та аналіз аналогів об'єкта досліджень.	до 20.12.2024 року	
2.	Огляд та аналіз аналогів.	до 20.02.2024 року	
3.	Вибір технічного рішення та обґрунтування технічної пропозиції.	до 20.03.2025 року	
4.	Синтез структурної та принципової схем, їх розрахунок.	до 20.04.2025 року	
5.	Виготовлення конструкторської документації.	до 20.05.2025 року	
6.	Оформлення кваліфікаційної бакалаврської роботи.	до 20.06.2025 року	
7.	Захист на державній екзаменаційній комісії.	Згідно з графіком захисту	

Студент_____ (С.В. Конюк)
(підпис)

Керівник роботи _____ (доц. Т.М. Заяць)
(підпис)

ЕСТЕТУЖКУ

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна бакалаврська робота на тему «Блок живлення для імпульсного лазера» / УжНУ; Керівник Заяць Т.М.; Студент Конюк С. В., група ЕС.

Пояснювальна записка: 49 сторінок, 12 рисунків, 2 таблиці, 15 джерел, 4 додатки.

Графічна частина: 2 листи формату А3.

Сучасні лазерні технології є критично важливими для промисловості, медицини, науки та оборони, а ключовим компонентом лазерного обладнання є блок живлення. Він відповідає за формування стабільних і потужних електричних імпульсів, необхідних для генерації лазерного випромінювання. Ефективність, надійність і швидкість роботи всього лазерного пристрою безпосередньо залежать від якості цього блоку живлення.

Об'єктом даної роботи є розробка структурної та принципової електричної схеми блоку живлення для імпульсного лазера. Такий блок має відповідати суворим вимогам до енергетичних параметрів, надійності та електромагнітної сумісності, що вимагає застосування комплексного інженерного підходу. Мета дослідження полягає в аналізі існуючих прототипів та аналогів, вивченні принципів побудови подібних пристроїв та синтезі власної структурної схеми з подальшою її реалізацією у вигляді принципової електричної схеми.

Проєкт охоплює огляд технічних рішень, які використовуються в аналогічних розробках, аналіз функціональних блоків та вибір оптимальних компонентів. У рамках проєктно-конструкторської частини було виконано розробку структурної та принципової схем, а також розрахунок основних параметрів функціональних елементів. Особливу увагу приділено вибору елементної бази, що відповідає вимогам електричних характеристик, надійності та економічної доцільності. Результатом є комплексне проєктування блоку живлення, здатного забезпечити ефективну та стабільну роботу імпульсного лазера.

ЛАЗЕР, БЛОК ЖИВЛЕННЯ, ІМПУЛЬСНИЙ ЛАЗЕР, СТРУКТУРНА СХЕМА, ПРИНЦИПОВА ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА, НАКОПИЧУВАЧ ЕНЕРГІЇ, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, НАДІЙНІСТЬ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ.

ЕС ІПФ УжНУ

ABSTRACT

Diploma project of the “Bachelor” degree: «Power supply unit for pulse laser » / UzhNU; Supervisor: Zayats T. M.; Student: Konjuk S. V., ES group.

Explanatory note: 49 pages, 12 figures, 2 table, 15 sources, 4 appendixes.

Graphic part: 2 A3 sheets.

Modern laser technologies are critically important for industry, medicine, science, and defense, with the power supply unit being a key component of laser equipment. It is responsible for generating stable and powerful electrical impulses necessary for laser emission. The efficiency, reliability, and speed of the entire laser device directly depend on the quality of this power supply unit.

The object of this work is the development of a structural and principal electrical circuit diagram for a pulsed laser power supply. Such a unit must meet strict requirements for energy parameters, reliability, and electromagnetic compatibility, necessitating a comprehensive engineering approach. The research aims to analyze existing prototypes and analogues, study the principles of constructing similar devices, and synthesize an original structural diagram, followed by its implementation as a principal electrical circuit diagram.

The project includes an overview of technical solutions used in similar developments, an analysis of functional blocks, and the selection of optimal components. As part of the design and engineering section, the structural and principal circuit diagrams were developed, along with the calculation of the main parameters of the functional elements. Special attention was paid to the selection of components that meet the requirements for electrical characteristics, reliability, and economic feasibility. The result is a comprehensive design of a power supply unit capable of ensuring efficient and stable operation of a pulsed laser.

Keywords:

LASER, POWER SUPPLY UNIT, PULSED LASER, STRUCTURAL DIAGRAM, PRINCIPAL ELECTRICAL CIRCUIT, ENERGY STORAGE, CONTROL SYSTEM, RELIABILITY, ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY.

ЕС ІТФ УжНУ

ЗМІСТ

ВСТУП 10

1. Огляд та аналіз аналогів об’єкту проектування 11

1.1. Аналіз аналогів об'єкта проектування 13

1.2. Технічна пропозиція та її обґрунтування 24

2. Проектно-конструкторський розділ 25

2.1. Синтез структурної та принципової схеми 25

2.2. Розрахунок окремих блоків пристрою 39

2.3. Вибір елементної бази та обґрунтування технічних рішень 43

3. Висновки 47

4. Список використаних джерел 42

ДОДАТКИ

Додаток А. Структурна схема КП.ЕС.9469680.001.Е1

Додаток Б. Принципова схема КП.ЕС.9469680.001.Е2

Додаток В. Перелік елементів КП.ЕС.9469680.001.ПЕ

Додаток Г. Специфікація КП.ЕС.9469680.001.СП

ЕС ІТФ УжНУ

					КРБ.ЕС.9469680.001.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Конюк С.В.			Блок живлення для імпульсного лазера	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Заяць Т. М.				У	9	49
Т.Контр.								
Н.Контр		Папп О.В.			Пояснювальна записка	УжНУ, ІТФ 4 курс, гр. ЕС		
Затверд.		Заяць Т. М.						

ВСТУП

Сучасні лазерні технології знаходять широке застосування в промисловості, медицині, науці та оборонній сфері. Одним із ключових елементів у складі лазерного обладнання є блок живлення, який забезпечує формування стабільних та потужних електричних імпульсів для збудження лазерного випромінювання. Від його надійності, швидкодії та відповідності технічним вимогам залежить ефективність функціонування всього пристрою.

Об'єктом розробки даної роботи є структурна та електрична принципова схема блоку живлення імпульсного лазера. Такий блок має відповідати жорстким вимогам щодо енергетичних параметрів, надійності та електромагнітної сумісності, що зумовлює необхідність комплексного інженерного підходу до його створення.

Метою дослідження є аналіз прототипів та існуючих аналогів, вивчення принципів побудови подібних пристроїв, а також синтез власної структурної схеми з подальшою її реалізацією у вигляді електричної принципової схеми. Робота включає огляд технічних рішень, що використовуються в аналогічних розробках, аналіз функціональних блоків та вибір оптимальних компонентів.

У рамках проєктно-конструкторської частини було виконано розробку структурної та принципової схем, а також розрахунок основних параметрів функціональних елементів. Окрему увагу приділено вибору елементної бази, яка відповідає вимогам щодо електричних характеристик, надійності та економічної доцільності. В результаті виконано комплексне проєктування блоку живлення, що здатний забезпечити ефективну та стабільну роботу імпульсного лазера.

ЕС ІТФ УЖНУ

1. Огляд та аналіз аналогів об’єкту проектуванняю

Загальний принцип дії лазерів на самообмежених переходах

Загальною відмінною рисою лазерів на самообмежених переходах є самообмеженість генерації по часу, обумовлена властивостями лазерних (робочих) рівнів, схемотехнічне зображення яких приведене на рис. 1.1. Верхній (2) із цих рівнів ефективно заселяється в результаті будь-якого процесу (наприклад, в ударах з електронами чи збудженими молекулами), а нижній (1) є метастабільним і заселюється тільки в результаті спонтанного розпаду верхнього рівня по лазерному (робочому) переходу з імовірністю A21.

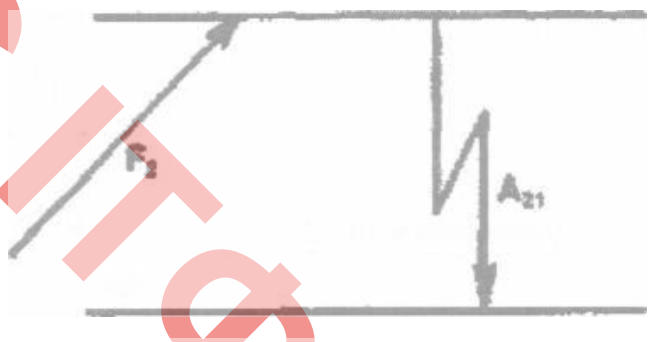


Рис. 1.1. Ідеальна схема рівнів з „самообмеженим переходом" між ними

В припущенні, що в початковий момент часу (t = 0) концентрації атомів на верхньому n_2 і нижньому n_1 рівнях дорівнюють нулю і, що швидкість збудження верхнього рівня $F^2(t)$ $[см^{-3}с^{-1}]$ = const, шляхом розв'язку нестаціонарних рівнянь балансу для концентрацій атомів n_1 і n_2 легко отримати співвідношення, яке відображає залежність цих концентрацій від часу.

$$n_{1=} - \frac{F^2\left(e^{A21t} - 1\right)}{A_{21}e^{A21t}} \qquad n_{2=} \frac{F^2\left(e^{A21t} - 1\right)}{A_{21}e^{A21t}} \quad (1.1)$$

Із цих співвідношень слідує, що інверсія заселеності буде існувати тільки в межах інтервалу часу

ЕС ІТФ УжНУ

$$\tau_{инв}A_{21} = \left(1 + {}^{g1}/_{g2}\right) * (1 - {}^{1}/_{A^{21}\tau_{инв}})$$

При **g1 = g2**

$$\tau_{инв} \approx 1{,}6A_{21}^{1}$$

Однією із найважливіших характеристик самообмеженого переходу є граничний ККД лазерного переходу $\eta_{пред.}$

Критерії, виконання яких забезпечує високу ефективність роботи лазерів на самообмежених переходах:

1. Верхній лазерний рівень має бути резонансним, сильно зв'язаним з основним рівнем випромінювальним переходом.
2. Нижній лазерний рівень має бути метастабільним, не зв'язаним з основним рівнем електричним дипольним переходом. Найчастіше ця умова пов'язана з тим, щоб основний і нижній лазерні рівні мали однакову парність, а верхній лазерний — протилежну їм.
3. Бажано, щоб верхній лазерний рівень був оптично зв'язаний тільки з основним і нижнім лазерними рівнями. Електричні дипольні матричні елементи для любих інших переходів з верхнього лазерного рівня мають бути малі в порівнянні з цими двома, для того щоб шунтуючі переходи атомів з верхнього були практично відсутні.
4. Імовірність лазерного переходу має бути менше імовірності резонансного. Якщо імовірність переходу буде більше швидкості збудження верхнього лазерного рівня, то спонтанне випромінювання спустошить верхній рівень до того, як буде досягнута достатня величина інверсії населеності.
5. Для забезпечення високої ефективності лазера треба також, щоб ККД лазерного переходу був достатньо великий. Ця вимога обмежує розміщення нижнього лазерного рівня зверху. З іншої сторони, нижній лазерний рівень не повинен бути заселений через больцманівський розподіл при робочій температурі. Теплове заселення нижнього лазерного рівня не повинне перевищувати 0,1 % загального числа атомів. Це означає, що нижній лазерний рівень не має бути вище основного на 6000 - 18000 $см^{-1}$ (0,74 - 2,23

ЕСТАФЕТУ

еВ).

Найбільш повно цим критеріям відповідають лазерні рівні атома міді рис.1.2.

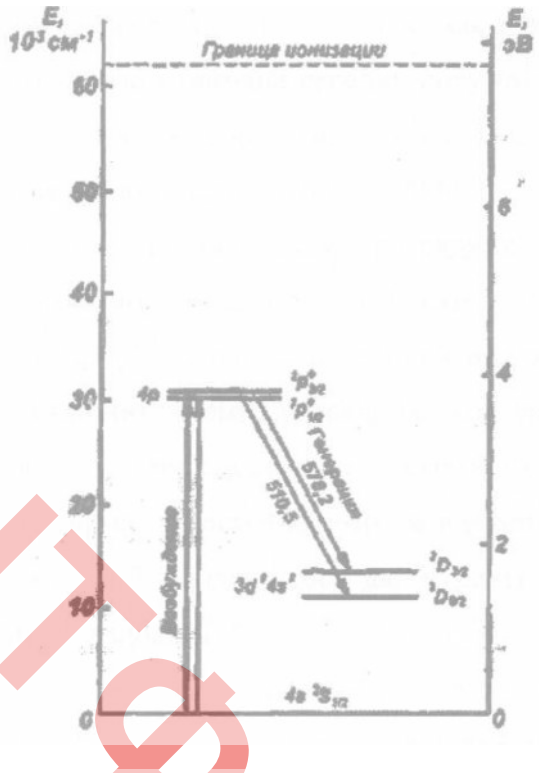


Рис. 1.2. Лазерні рівні атома міді

1.1. Аналіз аналогів об'єкта проектування

Схеми розрядних контурів, що забезпечують збільшення крутості переднього фронту імпульсу напруги на електродах ГРТ Корекція форми імпульсу напруги (збільшення крутості переднього фронту) за допомогою коректуючих (загострюючих) конденсаторів $C_к$, що з'єднуються паралельно розрядному проміжку, широко застосовується в потужних генераторах наносекундних імпульсів, що використовують як комутатори розрядники різних типів. У ряді робіт з лазерів на парах міді також застосовувалася корекція форми імпульсу збудження шляхом підключення коректуючого (загострюючого) конденсатора паралельно розрядному проміжку. Слід зазначити, що, як правило, рекордні результати по ККД і потужності генерації лазерів на парах міді отримані при використанні коректуючих конденсаторів.

ЕС ТПУ КПІ ім.

Причому в кожному конкретному випадку величина електричної ємності $C_к$ загострюючого конденсатора, підбиралася емпіричним шляхом. Так, наприклад, максимальний практичний ККД для лазера на парах міді (lp=26,5 см, dp=2 см) , що працює в частотному режимі з f= 8 кГц, отриманий за умови $C_k = C_s$. У той же час з лазером на парах міді (lp=80 см, dp=2,8 см) короткочасно отримана середня потужність генерації 43,5 Вт при практичному ККД 1 %, ємність коректуючого конденсатора складала 730 пф, при ємності накопичувального конденсатора — 2000 пф.

Крім традиційних схем розрядних контурів (схема прямого розряду накопичувального конденсатора і схема з загострюючим конденсатором) для збудження лазерів на парах галогенідів міді в минулому запропоновані і досліджені дві нетрадиційні схеми розрядних контурів (див. рис. 1.3): схема з двома загострюючими конденсаторами, і схема з взаємодіючими розрядними контурами. Схема з двома загострюючими конденсаторами, (рис. 1.3, а) містить у собі накопичувальний конденсатор, дві металеві пластини Р1 і Р2 розташовані між електродами уздовж ГРТ, і два загострюючих конденсатори С1 і С2, що з'єднують металеві пластини з електродами ГРТ. Крім того, у цю схему входять індуктивність Ls яка шунтує розряд на час перезарядження накопичувального конденсатора, і індуктивність Lк, що зменшує швидкість наростання струму в розрядному контурі. На відміну від схеми з двома загострюючими конденсаторами, схема з взаємодіючими розрядними контурами (рис.1.3, б) складається з двох розрядних контурів, утворених металевими пластинами (Р1, Р2), і двома парами конденсаторів (відповідно С1, С2 і С3, С4), що з'єднують ці пластини з електродами ГРТ. Електричні ємності конденсаторів С2 і С3 істотно менші ємностей конденсаторів С1 і С4. В лазері на парах CuBr із ГРТ діаметром 2 см і довжиною 50 см максимальний фізичний ККД реалізується при наступних величинах ємностей конденсаторів: С1=950 пф, С2 =С3 = 215 пф, С4 = 3140 пф. Важливою особливістю схеми з взаємодіючими розрядними контурами є те, що в ній електроди ГРТ не заземлені і знаходяться під деяким потенціалом відносно землі.

Ескіз ужгу

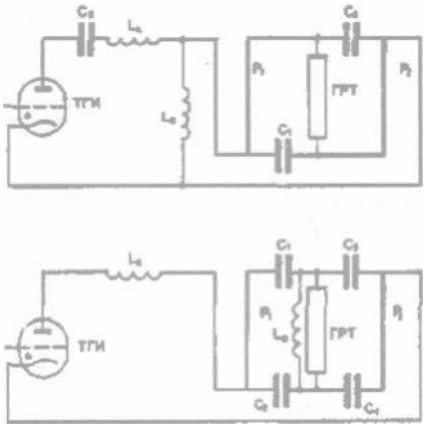


Рис. 1.3. Принципові схеми розрядних контурів: із двома загострюючими конденсаторами, (а) і взаємодіючими розрядними контурами (б)

У звичайних схемах з загострюючими конденсаторами, чи без них, а також у схемі з двома загострюючими конденсаторами, катод ГРТ значно нагрівається в порівнянні з заземленим електродом (анодом). У схемі з взаємодіючими розрядними контурами електроди лазерної трубки нагріваються практично однаково, тому використання такої схеми веде до значного збільшення середньої потужності й ефективності лазера в порівнянні зі звичайними схемами чи схемою з двома загострюючими конденсаторами.

Необхідно відзначити, що зі схемою з взаємодіючими розрядними контурами отримано рекордних на сьогоднішній день результатів. З ГРТ довжиною 50 см і діаметром 2 см отримана потужність генерації 24 Вт при практичному ККД 1,8 %. Для цього ж лазера зі схемою з загострюючим конденсатором, ККД складав 1,1%.

З CuBr/HBr - лазером із ГРТ діаметром 6 см і довжиною 200 см застосування схеми з взаємодіючими розрядними контурами дозволило одержати потужність генерації 201 Вт при практичному ККД 1,9 %. При вихідній потужності лазера 120 Вт практичний ККД складав 3,2 %.

ЕСТАФУКНУ

Завершуючи розгляд різних розрядних контурів, приведемо системи диференціальних рівнянь, що дозволяють розрахувати розрядний струм і напругу на активному опорі розряду, для кожного з контурів, еквівалентні схеми яких представлені на рис. 1.4.

$$dI/_{dt} = (Uc_1 - R_d I_d - \varphi)L_k \quad (1.3)$$

$$Uc_1/dI = I_d/C_1 \quad (1.4)$$

Для схеми з загострюючим конденсатором (рис. 1.4, b):

$$\frac{dI_{C_2}}{dt} = (Uc_1 - Uc_{2\_}L_k \frac{dI_d}{dt} - \varphi)/L_k \quad (1.5)$$

$$\frac{dI_d}{dt} = (Uc_2 - R_d I_d)/L_d \quad (1.6)$$

$$\frac{dUc_1}{dt} = \frac{(I_d + Ic_2)}{C_1} \quad (1.7)$$

$$\frac{dUc_2}{dt} = \frac{Ic_2}{C_1} \quad (1.8)$$

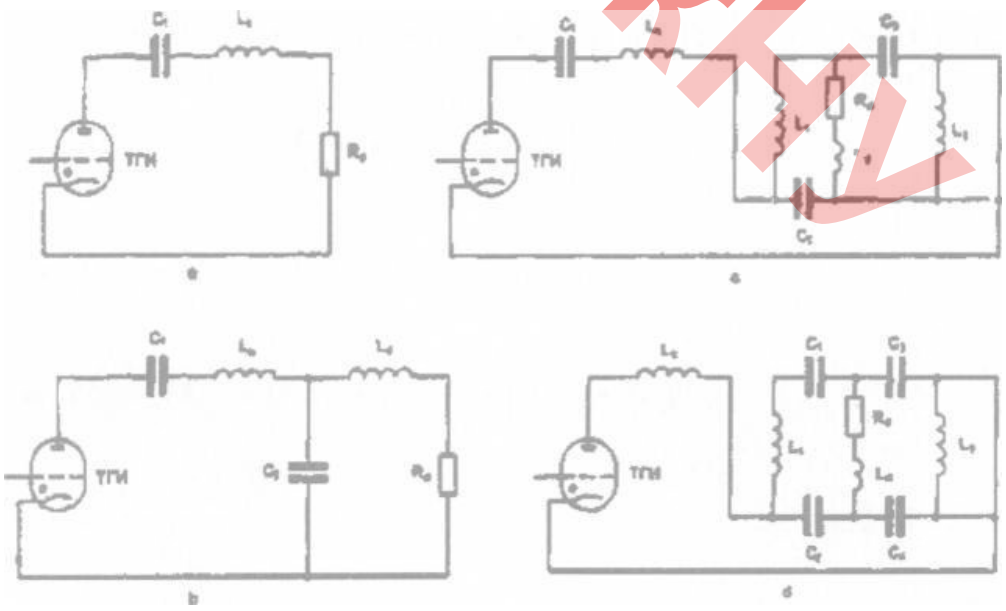


Рис. 1.4. Еквівалентні схеми різних розрядних контурів

ЕСІТФУЖКЧ

a - схема розрядного контуру при прямому розряді накопичувального конденсатора (індуктивність L_k містить у собі коректуючу індуктивність, індуктивність розряду і паразитну індуктивність сполучних проводів);

b - схема розрядного контуру з загострюючим конденсатором (тут і далі індуктивності L_k і L_d містять у собі паразитні індуктивності відповідних сполучних проводів);

c - схема розрядного контуру з двома загострюючими конденсаторами;

d - схема розрядного контуру з взаємодіючими розрядними контурами.

$$\frac{dI_{C_3}}{dt} = (Uc_1 - Uc_2 - (L_k + L_2)\frac{dI_{p_2}}{dt} - \varphi)/L_k, \quad (1.10)$$

$$\frac{dI_{p_2}}{dt} - (Uc_3 - R_d I_d - \frac{L_d \frac{dI_r}{dt}}{L_2}, \quad (1.11)$$

$$\frac{dI_d}{dt} = (Uc_2 - R_d I_d - L_d \frac{dI_{C_3}}{dt})/(L_1 + L_d),$$

$$\frac{dU_{c_1}}{dt} = \frac{(I_{p_2} + I_{c_3})}{c_1},$$

$$\frac{dU_{c_1}}{dt} = \frac{(I_{p_2} + I_d)}{c_1}, \quad (1.12)$$

$$\frac{dU_{c_3}}{dt} = \frac{I_{c_3}}{c_3},$$

Для схеми з взаємодіючими розрядними контурами (рис.1.4 (d))

$$\frac{dI_{C_3}}{dt} = (Uc_2 + Uc_4 - (L_k + L_2)\frac{dI_{c_4}}{dt} - \varphi)/L_k, \quad (1.13)$$

$$\frac{dI_{C_4}}{dt} = (Uc_4 - Uc_3 - R_d I_d - L_d \frac{dI_a}{dt})/L_2,$$

$$\frac{dI_d}{dt} = (Uc_1 - Uc_2 - R_d I_d - L_1 \frac{dI_a}{dt})(L_d + L_1),$$

$$\frac{dU_{c_1}}{dt} = \frac{(I_{c_1} + I_d)}{c_1}, \quad (1.14)$$

$$\frac{dU_{c_2}}{dt} = \frac{(I_{c_4} + I_d)}{c_2},$$

$$\frac{dU_{c_3}}{dt} = -\frac{I_{c_3}}{c_3},$$

$$\frac{dU_{c_4}}{dt} = -\frac{I_{c_4}}{c_4}.$$

ЕСТФ УжНУ

Тиратронні блоки збудження з підвищеною частотою проходження імпульсів збудження і підвищеною комутуючою потужністю

Збільшення потужності блоків збудження лазерів на само обмежених переходах атомів металів може здійснюватися або за рахунок збільшення частоти / повторення імпульсів порушень при тому же рівні енергії \ $W_т$, що комутується тиратроном заодин імпульс, або за рахунок збільшення $W_т$ при незмінному значенні f, або за рахунок збільшення того й іншого одночасно.

Гранична частота повторення визначається часом відновлення τr електричної міцності тиратрона. За цей час струм, що протікає через тиратрон, не повинен перевищувати деякого припустимого значення I_{Tmax}. При заданій частоті / граничне значення $W_т$ визначається припустимою для тиратрона величиною потужності, що розсіюється на його електродах, при перевищенні якої відбуваєтеся перегрів тиратрона, у кінцевому рахунку, вихід його з ладу.

При використанні тиратрона ТГИ1-1000/25 у блоках збудження лазера на парах міді при 1 %-ій ефективності генерації вдавалося комутувати всього 1,5 - 1,6 кВт. Очевидно, для тиратрона ТГИ1-1000/25 граничний рівень потужності, що комутується, складає близько 2 кВт. Підвищення рівня комутуємої потужності понад 2кВт вимагає використання в блоках збудження декількох тиратронів ТГИ1-1000/25.

Один зі способів збільшення частоти проходження імпульсів збудження і рівня комутуємо! потужності зводиться до включення декількох однотипних блоків (модулів) збудження на одну ГРТ. При цьому кожний з модулів має свій власний зарядний дросель і накопичувальний конденсатор. Основне достоїнство такого способу полягає в тому, що при використанні тиратронів і конденсаторів з низькими припустимими значеннями частоти повторення імпульсів ця схема дозволяє одержувати практично будь-які затримки між імпульсами збудження і, як наслідок, дуже високі частоти повторення імпульсів збудження. Про це, наприклад, свідчать результати роботи [11], у якій у дослідницьких цілях застосовувалася методика здвоєних імпульсів збудження.

Ескіз ужгу

Кожний із двох накопичувальних конденсаторів заряджався через свій зарядний ланцюг, що складається з дроселя і діода, і розряджався через свій тиратрон. Зазначена схема дозволила працювати з частотою проходження здвоєних імпульсів 2 кГц при зміні часу затримки між імпульсами від 0 до 130 мкс.

У [2] лазер на парах хлориду міді з ГРТ діаметром 3 см і довжиною 70 см збуджувався двома блоками з діод-дросельним зарядом накопичувального конденсатора і наступним його розрядом на навантаження через тиратрон ТГИ1- 1000/25. Блоки збудження працювали поперемінно із сумарною частотою проходження імпульсів 20 кГц. Величина ємності накопичувального конденсатора в кожному блоці - 1100 пф, напруга на анодах тиратронів - 17 кВ. Середня потужність, що комутується обома тиратронами, складала 3,2 кВт.

Основним недоліком модульних блоків збудження є велике число зарядних ланцюгів, що в схемах з резонансним перезарядженням накопичувального конденсатора приводить до істотного збільшення ваго-габаритних характеристик блоку збудження. Тому при розробці блоків збудження лазерів на парах металів застосовувалися різні способи підвищення частоти проходження імпульсів збудження і комутуємої (споживаної від випрямляча) потужності, що забезпечують максимально можливе використання тиратронів як по частотах /, так і по потужностях, що комутуються ними.

Строго говорячи, величина зарядної індуктивності L_{ch} повинна бути більше деякої обумовленої характеристиками тиратрона величини L_{ch}, при який за час τ_r (відновлення електричної міцності тиратрона) струм, що протікає через нього, не перевищує припустимої величини I_{Tmax}

$$L_{ch} \geq L_{chT} = \frac{U_r}{I_{Tmax}} \tau_r \,, \quad (1.15)$$

Відповідно гранична частота проходження імпульсів збудження f і максимальна комутуєма (споживана від випрямляча) потужність Q_r, обумовлені характеристиками тиратрона, відповідно рівні:

$$f_t = \frac{1}{\pi\sqrt{L_{ch}Tc_2}},$$

$$Q_r = f_t \frac{c_r U_0^2}{2},$$

$$U_0 = 2U_r, \quad (1.15)$$

З метою збільшення частоти проходження імпульсів збудження f використовували як зарядну індуктивність насичувальну індуктивність, що дозволяє при забезпеченні достатнього часу для відновлення електричної міцності тиратрона сильно зменшити час перезарядження накопичувального конденсатора і тим самим реалізувати частоту f, значно перевищуючу частоту f, обумовлену співвідношенням .

Авторами розроблений генератор імпульсів для збудження імпульсно-періодичних лазерів великої потужності. Тиратрон, використаний у цьомугенераторі, мав наступні характеристики: Ua_{max}= 40 кВ, τ_r= 20 мкс, I_{Tmax} ~ 1 А. Накопичувальний конденсатор ємністю 10 нФ заряджався до ЗО кВ через діод і зарядну індуктивність, що представляє собою систему з 15 тороїдальних котушок, намотаних на феритові осердя з внутрішнім діаметром 34 мм, товщиною 9 мм і висотою 27 мм, що мали двухміліметровий повітряний зазор. Вся система занурювалася в трансформаторне масло. Індуктивність ненасиченої зарядної індуктивності складала 150 мГн.

Розроблений генератор мав наступні характеристики: частота проходження імпульсів збудження f ~ 15 кГц, передімпульсна напруга на. U_0=67,5 кВт

У тому випадку, коли час відновлення електричної міцності тиратрона забезпечує необхідну частоту проходження імпульсів збудження і поірібне

ЕСТФ УжНУ

лише збільшення потужності імпульсу збудження, застосовують схеми з одним зарядним ланцюгом і рівнобіжним включенням декількох тиратронів. При цьому основні труднощі полягають у забезпеченні одночасного спрацьовування всіх тиратронів. Справа в тому, що існує деякий час запізнювання імпульсу анодного струму від імпульсу запуску тиратрона. Час запізнювання визначається часом розвитку розряду в тиратроні і залежить від цілого ряду факторів: тиску водню, напруги розжарення, параметрів сіткового імпульсу і т.д. Більш того, час запізнювання різний для різних тиратронів того самого типу. При розігріві тиратрона відбувається перерозподіл густини водню в розрядному обсязі і, Як наслідок, зміна часу запізнення. При тривалій його роботі час запізнення збільшується. Відзначені особливості тиратронів послужили причиною того, що при розробці потужних модуляторів на тиратронах був вироблений цілий ряд методів, що забезпечують одночасне спрацьовування тиратронів.

На рис.1.5 представлена схема модулятора на двох паралельно включених тиратронах, що ілюструє різні методи, які забезпечують синхронне спрацьовування тиратронів. Одночасність спрацьовування тиратронів і рівномірність розподілу струму між ними забезпечується живленням сіток обох тиратронів від загального потужного генератора пускових імпульсів. Крім того, у сіткове коло кожного чи декількох тиратронів включаються регульовані лінії затримки, що дозволяють компенсувати різницю в запізнюванні анодного струму відносно імпульсу напруги на сітці, що виникає в процесі розігріву тиратронів чи в процесі їхньої роботи.

І, нарешті, для вирівнювання струмів у тиратронах між їхніми анодами включаються спеціальні трансформатори чи включені в протифазі балансові дроселі L_6, обмотки яких мають рівне число витків. Наявність балансного дроселя приводить до того, що при відкриванні одного з тиратронів напруга на його аноді зменшується за рахунок спадання напруги на балансному дроселі і швидкість розвитку розряду в тиратроні, що відкрився, зменшується. З іншого боку, перенапруга на аноді другого тиратрона, що виникає за рахунок зв'язку зустрічних обмоток балансового дроселя, сприяє його відмиканню.

Ескіз ужку

Відразу ж варто відмітити, що застосування балансних дроселів у блоках збудження лазерів на парах міді навряд чи доцільно, тому що приводить до росту індуктивності розрядного контуру і, як наслідок, до всіх тих розглянутих вище негативних наслідків впливу індуктивності розрядного контуру на параметри генерації.

Прямий розряд накопичувального конденсатора на ГРТ через чотири тиратрони одночасно використовувався в [4] для збудження лазера на парах міді з ГРТ діаметром 3,8 і довжиною 125 см. Як вказується в [4], спостерігалася визначена кореляція між синхронністю спрацьовування тиратронів і потужністю генерації лазера: розкид у спрацьовуванні тиратронів у 10 не впливає на потужність генерації. Точне короткочасне настроювання тиратронів на один режим дозволяли отримувати одиночні результати, що значно перевищують ті, що були досягнуті при тривалій роботі тиратронів.

Ескіз

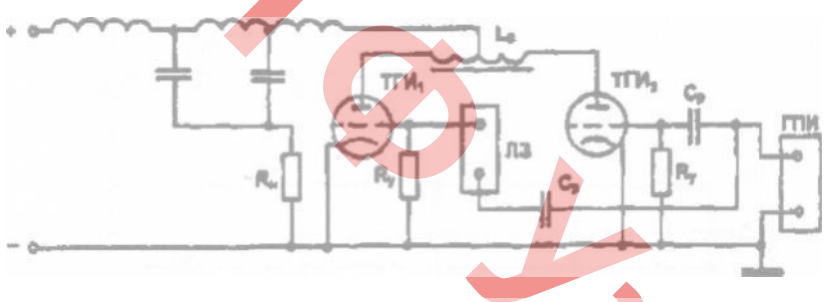


Рис. 1.5. Принципова схема паралельного включення імпульсних тиратронів ТГИ1 і ТГИ2 [21]. ЛЗ - регульована лінія затримки сіткового імпульсу; L_6 -балансовий дросель; ГПИ - генератор піджигаючих імпульсів; ФЛ - формуюча лінія; RH - опір навантаження; RY - опір витоку; СР - розділюючий конденсатор.

Можливо, що в умовах [4] збудження синхронності спрацьовування тиратронів зв'язане якоюсь мірою з нестабільністю розжарення тиратронів, обумовленою, у свою чергу, коливаннями напруги в електричній мережі. Стабільність розжарення тиратронів може бути істотно підвищена за допомогою пристрою стабілізації розжарення тиратронів, який від раніше відомих пристроїв стабілізації розжарення тиратронів відрізняється: відсутністю силового трансформатора, що працює на частоті 50 Гц; досить

високим ступенем стабілізації при мінімальній кількості елементів схеми.

На рис. 1.6 приведена схема паралельного включення тиратронів у блоці живлення лазерів на парах різних металів. Синхронна робота тиратронів забезпечувалася запуском їх від одного генератора підпалюючих імпульсів і включенням у сіткове коло тиратронів ліній затримки. Автоматичний зсув на сітці тиратронів забезпечувався конденсатором C_{p1}-C_{p4} і резисторами R_{y1}-R_{y4}

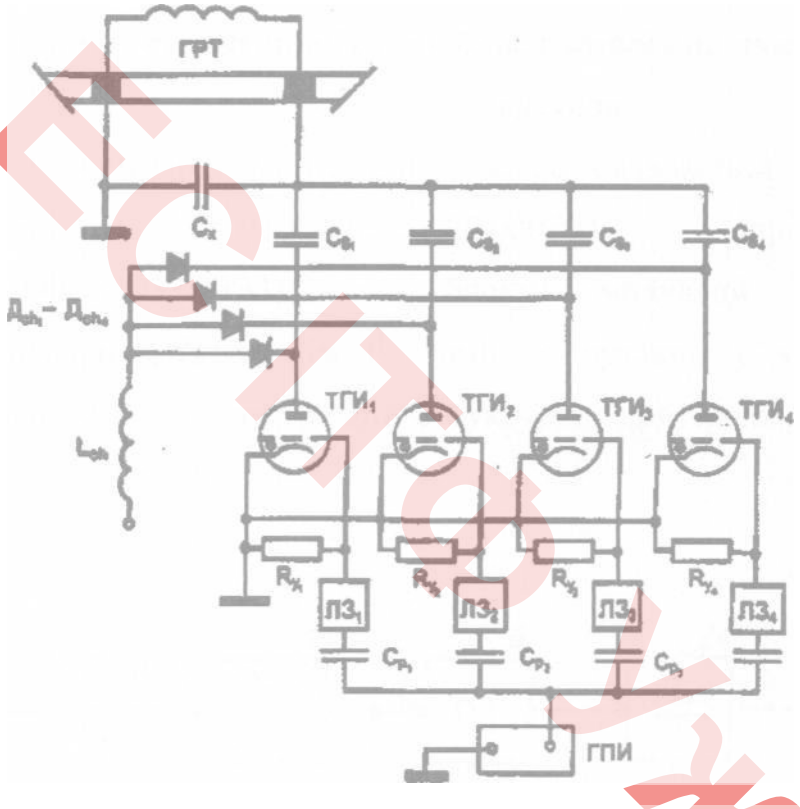


Рис. 1.6. Принципова схема паралельного включення імпульсних тиратронів ТГИ1-1000/25 у блоці збудження лазера на парах міді, допоміжного трансформатора для живлення самого пристрою.

На сітках тиратронів формувалися імпульси напруги позитивної полярності амплітудою 1,5 кВ і тривалістю 300 не. Якщо навіть припустити, що тривалість переднього фронту імпульсу напруги на сітках тиратронів складає усього лише половину від його тривалості, тобто 150 не, то крутість фронту імпултсу напроти на сітці складає не менти 104 В/мкс. Тобто більш ніж у 4 рази перевищує максимально припустиме значення для тиратрона ТГИ1-1000/25. Очевидно, що при роботі в такому режимі довговічність тиратронів буде значно нижче їх паспортної довговічності.

ЕС ПОЗУЖНУ

1.2. Технічна пропозиція та її обґрунтування

Тема роботи є «Розробка структурної та принципової схем для блоку живлення імпульсного лазера».

Спректований прилад призначений для живлення імпульсно-періодичного лазера, у тому ж числі, даний прилад може бути застосований для всіх лазерних систем, вхідні дані яких задовільняють вихідним параметрам блока живлення.

Основні технічні дані блоку живлення лазера:

Блок живлення повинен складатись з керованого джерела струму та керованого джерела напруги;

Виконання відповідно УХЛ 5.1 (по ГОСТІ5160-69) для роботи при температурі +10 до +50 °С та відносній вологості повітря до 90% при температурі +25°С;

Живлення пристрою здійснювати від трифазної мережі електричного струму напругою 380±10%, частоти (50±1)Гц ;

Максимальна вихідна потужність блоку живлення - 2,5 кВт;

Контрольована висока напруга на вихідному навантаженні - 10 кВ;

Вихідна частота джерела має складати f = 10 кГц;

Імовірність безвідмовної роботи приладу за t = 1000 год не повинна бути нижчою за 0.98;

Прилад - стаціонарний;

Вага не регламентується;

Виробництво малосерійне.

ЕСТФ УжНУ

2. Проектно - конструкторський розділ

2.1. Синтез структурної та принципової схеми

Блок живлення імпульсного лазера складається з трьох блоків - вузла стабілізації (МР.ЕС.161107.03.000), пристрою управління (МР.ЕС.161107.01.000) та блоку модуляції (МР.ЕС.161107.02.000).

Функціональні зв'язки між блоками та вузлами у межах відповідних блоків приведені на схемі електричній структурній пристрою МР.ЕС.161107.01.000 Е1 та на рис. 2.1.

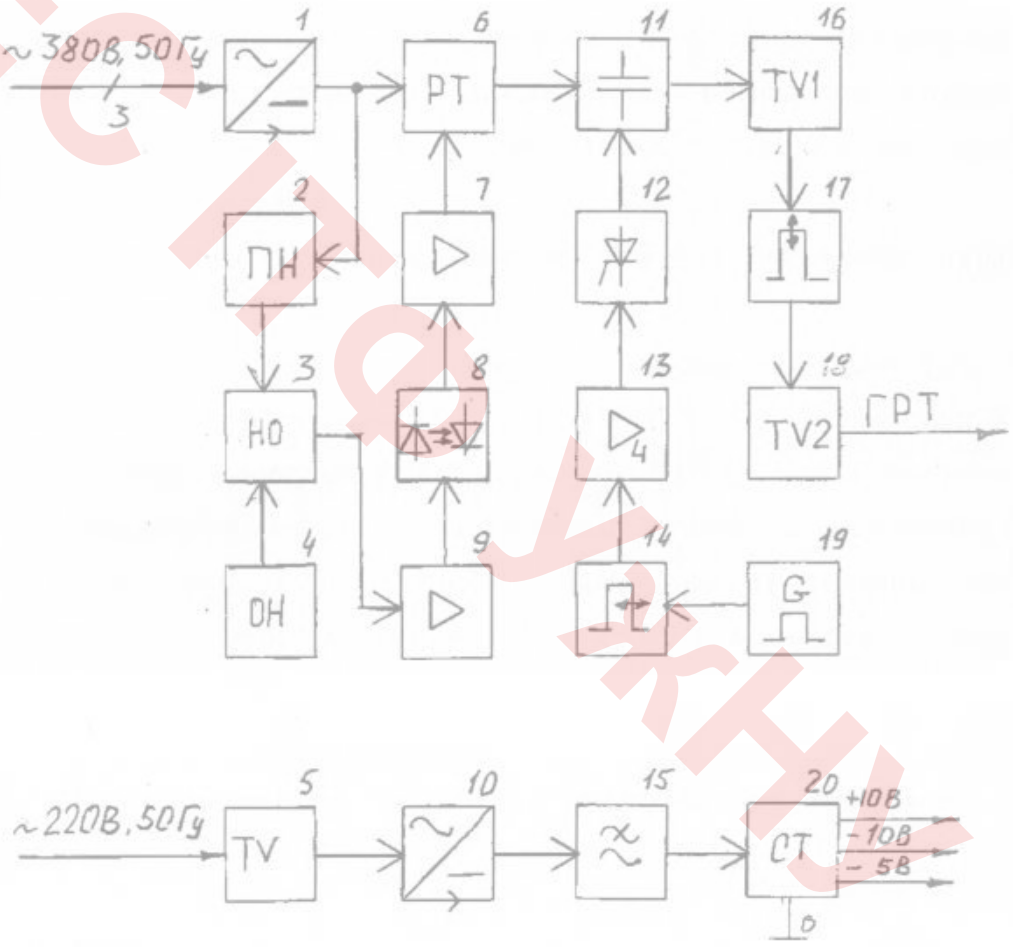


Рис. 2.1. Схема структурна блоку живлення

Живлення пристрою відбувається від трьохфазної мережі 380В. частотою 50Гц. Ця напруга випрямляється випрямлячем 1. Після регулювання регулюючим транзистором 6, заряджає робочу ємність 11.

У зв’язку з тим, що під час експлуатації відбувається флуктуація напруги

Електронний

у мережі і відповідно мінялася би напруга на робочій ємності 11, у даній схемі передбачено відслідковування амплітудного значення напруги. Даний сигнал контролю формується подільником напруги 2, потім поступає на нуль орган (схема порівняння). З іншого боку на схему порівняння поступає сигнал опорної напруги, який формується джерелом опорної напруги 4. Нуль орган виконаний на мікросхемі DA1 К544УД2А. Вихідний сигнал через підсилювач 9 на основі транзистора VT1, управляє світлодіодом фотодіодного оптрона U1. Останній призначений для гальванічної розв'язки вхідного і вихідного кіл. Сигнал, що знімається з фотоприймача U1 після підсилення підсилювачем 7 поступає на управління регулюючим транзистором 6.

Для управління модулятором високої напруги на основі тиратрона ТГИ11000/25 використана наступна схема.

Генератор імпульсів 19 задає частоту слідування імпульсів (К555ЛАЗ). Тривалість імпульсу формується мікросхемами DD2 і DD3, і елементами R2-R4, VD1, C2. Після інвертування на мікросхемі DD3.2, сигнал подається на чотирьохкаскадний підсилювач 13, звідки сигнал поступає на тиристорний ключ, що розряджає через VT1 (16) робочу ємність 11. Із вторинної обмотки трансформаторного перетворювача 16 сигнал поступає на модулятор. З виходу TV2 сигнал поступає на ГРТ.

Схемою передбачений контроль форми імпульсів та амплітудного значення струму завдяки використанню імпульсного трансформатора струму в катодному колі тиратрона.

Ескіз ужну

Електрична характеристика розряду

Під електричними характеристиками розряду, в першу чергу маються на увазі такі як напруга на розряді (на електродах газорозрядної трубки)

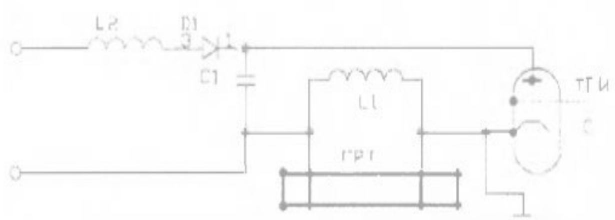


Рис. 2.2. Схема збудження лазерів.

L1 - індукт., шунтуюча розрядний проміжок на час перезарядки накопичуючого конденсатора; L2-зарядна індуктивність; C1- накопичуючий конденсатор; ТГИ- тиратрон; D-зарядний діод.

$U_{p(t)}$ струм через розряд $I_{p(t)}$, активний опір $R_{p(t)}$ та індуктивність Lp розряду. Для, формування загальних понять про ці характеристики розрядів у імпульсних лазерах на самообмежених переходах ознайомимося із рядом робіт , в яких дослідження проводилось з самонагрівним лазером на парах міді з відпаяним випромінювачем рис. 2.2., представляючим собою один із варіантів схеми із прямим розрядом накопичуючого конденсатора на розрядний проміжок і із резонансною перезарядкою накопичуючого конденсатора при наявності діода у розрядному колі (рис. 2.3) - схемами з діодно-дросельним зарядом накопичуючого конденсатора.

У якості буферних газів для імпульсних лазерів використовувались He, Ne і Ar при тисках від 2 до 14кПа. Напруга на виході випрямляча в межах від 3 до 6кВ, а частота слідування імпульсів - від 2 до 10 кГц.

У імпульсних лазерів схема збудження не оптимізувалась з метою досягнення максимального ККД, ні з метою одержання максимальної потужності генерації. Завдяки цьому можливе виявлення ряду факторів, впливаючих на характеристики генерацій імпульсних лазерів на самообмежених переходах. Типові осцилограми імпульсів струму і напруг

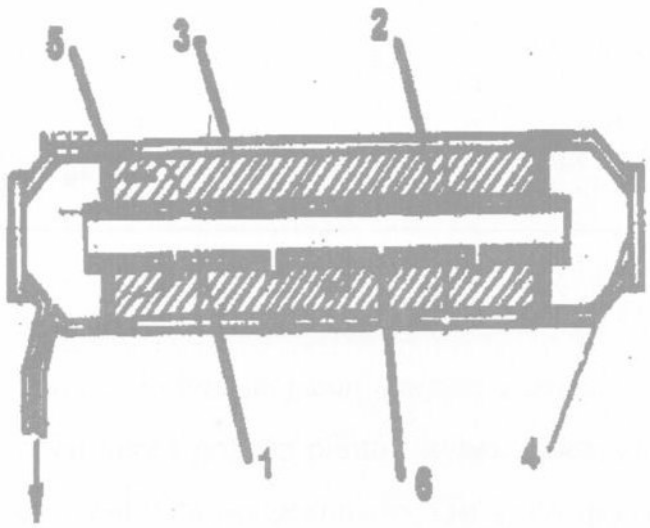


Рис. 2.3. Схематичне зображення конструкції випромінюючого самонагріваючого лазера.

1-ГРТ із алунда; 2-теплова ізоляція; 3-вакуумноплотонна оболонка; 4-вікна для виводу лазерного випромінювання; 5-струмопроводи з електродами; 6-генератор пари міді;стрілка-до вакуумної системи.

Джерела живлення під час збудження приведенні на рис. 2.4.Осцилограма імпульсів струму через розряд напруги на електродах ГРТ свідчать про індукований характеррозряду. Розрахунок індуктивності розряду L_p здійснюється по рівнянню:

$$U_p = U_{r+U_{lp}} = I_p * R_p + L_p * (\frac{dlp}{dt}), \qquad (2.1)$$

де U_R і L_p −напруги на активному навантаженні і індуктивності розряду, для того моменту часу, коли струм через розряд рівний нулю, показало, що величина Lp зменшується від декількох сотень Ом до декількох Ом і, по-друге не залежить від умов експерименту (походження і тиск буферного газу, напруга на випрямлячі) і складає L_p=1,6мкГн. Для порівняння - індуктивність прямого провідника, розміри якого співпадають з розмірами розрядного проміжку ГРТ складає 0,7 мкГн.

ЕС ІПФУ НТУ

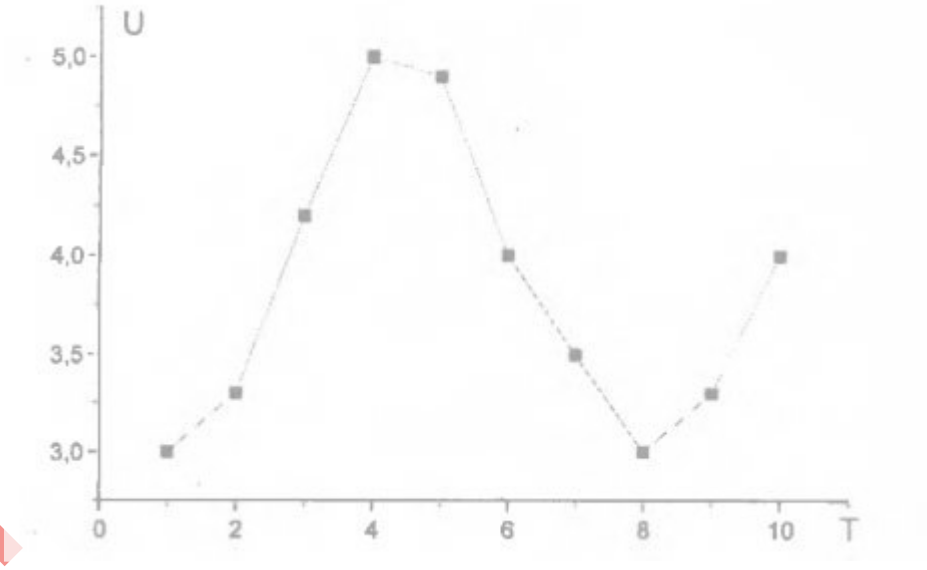


Рис. 2.5. Осцілограма напруги в схемі

Проаналізувавши причини збільшення індуктивності розряду для вище приведених умов, укажемо деякі з них:

- Індуктивність струмопроводів випромінювача;
- Індуктивність шунта перезарядженого для вимірів імпульсів розрядного струму;
- Взаємна індукція розряду з іншими ділянками розрядного контура.

Тому, строго кажучи, виміряну індуктивність, слід розглядати як загальну індуктивність розряду, шунта і струмопроводів розряду випромінювача.

На рис. 2.6. приведено розрахунок опору розряду R_p з врахуванням індуктивності розряду. Згідно цих результатів, по-перше, за час імпульсу збудження опір розряду, значення R_p в кінці імпульса збудження слабо залежить від буферного газу, що є наслідком енерговкладу у розряд. Закінчення енерговкладу може мати місце при зменшенні опору розряду до значень, які набагато менші або опору тиратрона, або хвильового опору розрядного контура $P = (Lp / C_5)^{1/2}$, (2.2) де Lp- індуктивність розрядного контуру.

ЕСТЕФУКНУ

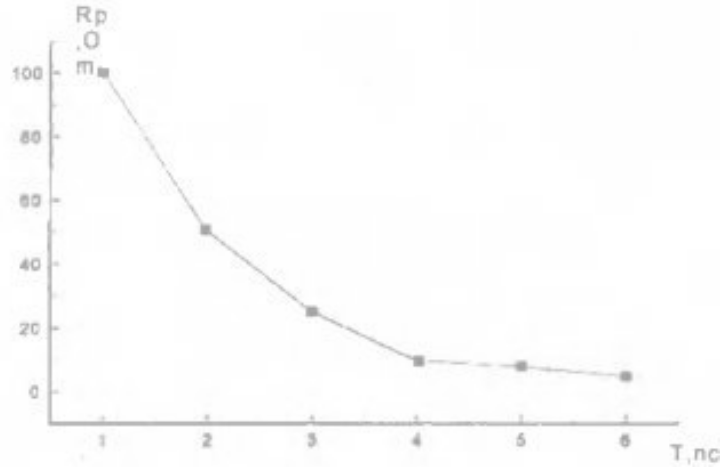


Рис. 2.6. Зміна активного опору розряду за час імпульсу збудження

Розподіл електричної енергії, вживаної від випрямляча, у різних елементах зарядного та розрядних контурів.

Енергія вживана від випрямляча розподіляється між розрядом, тиратроном і елементами зарядного контуру, визначається експериментально, за допомогою вимірювання електричної потужності, введеної у розряд, і потужності, що розсіюється тиратроном. Розглянемо результати дослідів і проведемо їх співставлення. Значення енергій C_p та C_{re}ь відповідно вкладених у розряд за час г $_{ex}$ імпульсу збудження і у міжімпульсний інтервал часу $г_{re}$ь розраховувались по осцилограмам розрядного струму і напруги на електродах ГРТ за формулами:

$$G_p = \int_0^{Re\,x} IpUpdt\,,\; G_{rel} = \int_{Re\,x}^{Re\,x+Rrel} IpUpdt \quad (2.3)$$

Середнє значення потужності, що введені у розряд, у різний інтервал часу, визначались як:

$$Q_p = G_p * f, Q_{rel} = G_{rel} * f \quad (2.4)$$

Середня за часом потужність Q_t що виділяється у тиратроні, вимірювалась калориметричним методом за нагрівом води, що охолоджувала тиратрон. Середня за часом потужність Q_t що розсіюється елементами зарядного контуру, визначається як:

ЕСТАФУЖКУ

$$Q_c = Q_r - (Q_p + Q_{rel} + Q_r), (2.5)$$

Результати вимірювання Q_p, Q_{rel} і розрахунку Q_t приведені у таблиці 1 і свідчать про те, що в умовах розглядаємого експерименту в тиратроні і елементах зарядного контуру губиться відповідно 27-30% і 13-20% потужності, вживаної від потужності.

Таблиця 2.1

№	*PNe, кПа*	*Ur, кВ*	*Ir, A*	*Qr, Вт*	*Qр, Вт*	*Qrel, Вт*	*Qt., Вт*	*Qc . Вт*
1	13.3	4.6	0.39	1800	820	130	480	370
2	6.7	4.6	0.39	1800	820	140	520	360
3	3.3	4.6	0.39	1800	820	150	550	230

Забезпечення збільшення крутості переднього фронту імпульсу напруги на електродах ГРТ

Корекція форми імпульсу напруги (збільшення крутості переднього фронту) булодо сягнено за допомогою коректуючого конденсатора C_2, який під'єднаний дорозрядного проміжка. Таке рішення часто застосовується у потужних генераторах

Ефективність вкладу енергії в активну зону ГРТ із тиратронною схемою збудження в діапазоні комутуємих енергій 0.03 - 0.3 Дж/імпульс знаходиться у межах 50-70%.

Вплив зарядного контура на генераційні характеристики лазерів

В подальшому під генерацією будемо вважати потужність генерації Р1 і ефективність перетворення у лазерне випромінення потужності, що вживається від випрямляча

ЕС ІТФ УЖНУ

При аналізі даних табл. (2) звертає на себе увагу значний енерговклад (Q_{rel} = 150Вт) у розряд між імпульсами збудження, які можуть суттєвим чином вплинути на процеси релаксації плазми і, як наслідок, на характеристики генерації. Наприклад, протікання струму по активному середовищу перед наступним імпульсом збудження може привести до додаткового заселення метастабільних рівнів і до обумовленого цим заселенням пониження енергії генерації в імпульсі.

Для перевірки існування від'ємного впливу струму перезарядки накопичуючого конденсатора на характеристики генерацій імпульсних лазерів на парах металів були проведені виміри потужностей генерації двох саморозігрівних лазерів на парах міді, відміна яких визначається тільки розташуванням розрядної трубки в схемі збудження. Співставлення результатів вимірів, приведених в табл. 2.1, однозначно свідчить про негативний вплив струму перезарядки на характеристики генерацій.

Вплив розрядного контура на генераційні характеристики лазерів

Згідно існуючих у середині 70-х років представленнях про механізм генерації лазерів на самообмежених переходах, у яких, в той час, в більшості вважалось, що питомий енергоз'єм лазерів однозначно визначався крутістю переднього фронту імпульсу струму або, говорячи другими словами, швидкістю наростання струму. По цій причині від'ємний вплив індуктивності розрядного контура L_2 (рис. 2.7) на характеристики генерації лазерів на самообмежених переходах, пов'язано в першу чергу з впливом цієї індуктивності на крутість переднього фронту імпульсу струму.

Із дослідів, що проводились над діючими лазерами подібної конструкції, із збуджуючим повздовжнім та поперечним електричним розрядом, було виявлено: якщо збільшення крутості фронту імпульсу розрядного струму dlp/dt досягається за рахунок збільшення напруги на виході випрямляча до з її збільшенням проходить насичення енергоз'єму, яке при малих тисках речовини в активному середовищі (1- 10 Па) поступово переходить у спад.

Ескіз уклу

Представлення про значення dlp/dt, при яких проходить насичення енергоз'єму лазера досліджені експериментальним шляхом.

Вплив швидкості наростання струму dlp/dt на середню потужність генерації самонагрівного лазера в умовах, коли при зміні dlp/dt концентрація атомів речовини в розряді залишається без зміни. В експерименті використовувалась схема збудження, що представлена на рис. 2.7, що виключало вплив накопичуючого конденсатора на результати експерименту. Зміна швидкості наростання струму досягалась за рахунок короткочасного (одна-дві секунди) зміни напруги Ur на виході випрямляча (схеми Ларіонова) .При короткочасній зміні Ur і, як наслідок, рівня потужності, що введений у розряд, температура ГРТ, а, таким чином, і концентрація атомів у речовині залишались незмінними, так як час розігріву теплової ізоляції від 300° С до робочих температур складає порядка одної години.

Результати залежностей P1, від dlp/dt приведені на рис. 2.8, свідчать про те, що, починаючи з деяких значень dlp/dt, швидкість наростання струму не є параметром, що визначає енергію і середню потужність генерації в імпульсних лазерах.

Не дивлячись на ряд зпрощуючих припущень, при виводі умови (2.4.2.1), воно дозволяє, наприклад, зробити висновок про те, що ріст передімпульсної концентрації електронів, що мають місце при збільшенні частоти імпульсів збуджененя, має привести до зменшення напруги поля у розряді і, як правило, до погіршення генераційних характеристик джерела живлення імпульсного, імпульсно періодичного лазерів.

Оскільки питомий енергоз'єм і максимальна концентрація атомів на верхньому лазерному рівні пов'язані між собою, то і амплітуда імпульсу розрядного струму і, відповідно, його крутіст , не являються параметрами, однозначно визначающими енргію генерації лазера.

Даний висновок підтверджують результати праць [8] свідчать про зменшення амплітуди напруг на електродах ГРТ лазера на парах міді із ростом частоти повторення імпульсу збудження. Крім того, із умови (2.6),

Ескіз ужгу

$$v/\eta_{e0} r_p^2 \geq B_{kp} e^2 \pi v_1 L_c / m l_p, (\quad (2.6)$$

випливає, що узгодження розряду з джерелом збудження при інших рівних умовах може бути суттєво поліпшено шляхом збільшення папаметру R0/ViLc тільки за рахунок зменшенням передімпульсної концентрації електронів.

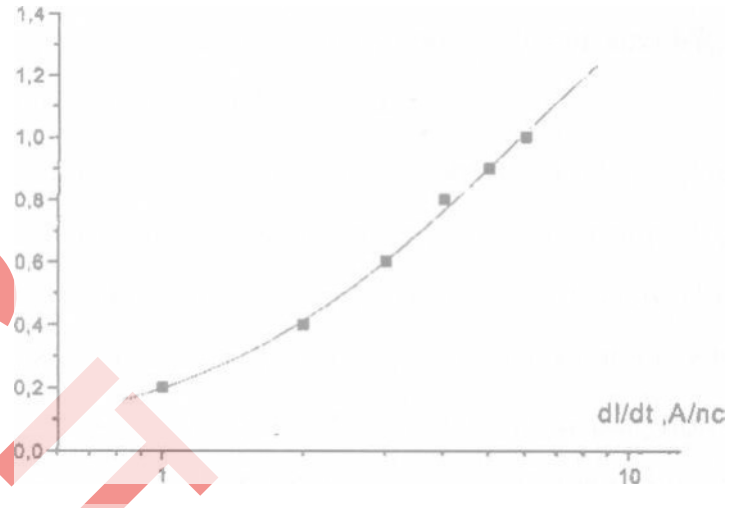


Рис. 2.7. Залежність середньої сумарної потужності генерації від крутості імпульсу струму в момент імпульсу генерації.

Даний висновок добре узгоджується із результатами роботи [7], згідно яким збільшення потужності генерації лазерів на парах міді при подачі в їх активне середовище водню пов'язаних із ростом швидкості потрійної рекомбінації. Очевидно, що збільшення швидкості потрійної рекомбінації електронів веде до пониження передімпульсної концентрації електронів.

Саме із зменшенням передімпульсної концентрації електронів пов'язано і поліпшення характеристик генерації гібридного лазера (CuBr/HBr) лазера [9] в порівнянні з лазерами галогенідів міді. Зменшення передімпульсної концентрації електронів в умовах [9] може проходити :

по розглянутому вище механізму через наявність в активному середовищі лазера атомів водню, що утворюються в результаті дисоціації молекул HBr;

через дисоціативне прилипання електронів до молекул Br_2 і HBr. Завершуючи розгляд особливостей впливу індуктивності розрядного контуру на характеристики генерації, коротко зупинимося на результатах досліджень

ЕСТФ УжГУ

впливу параметрів розрядного контуру на генерацію лазера на парах міді. Згідно цим дослідженням, проведеним на лазерах на парах міді з ГРТ діаметром 11мм і довжиною ЗО см, імпульсу генерації, тобто до росту фізичного ККД лазера, що розрахований у момент закінчення імпульсу генерації.

На основі аналізу експериментальних результатів можна зробити висновок, що для ефективної накачки верхнього лазерного рівня необхідно формувати на електродах імпульс напруги із максимально крутим переднім фронтом, для чого розряд накопичуючого конденсатора повинен мати аперіодичний характер.

Ця умова може бути забезпечена за рахунок збільшення ємності накопичуючого конденсатора. При цьому, для забезпечення високої ефективності перетворення енергії, що введена в розряд, енергію індукційного випромінювання імпульсу збудження (імпульсу напруги та струму) повинна утворюватись в момент закінчення імпульсу генерації.

Прагнення зменшити об'єм джерела живлення, значно збільшує вартість експлуатації. Наприклад, зменшення об'єму джерела живлення у чотири рази збільшує експлуатаційні витрати у п'ять разів, збільшення роботи у 2.5 разів збільшує витрати вдвічі так як у цих випадках джерело живлення робить у несприятливих умовах.

Ескіз ужну

Особливості роботи тиратронів у імпульсних лазерів

Найбільш широкого застосування в схемах збудження імпульсних лазерів на самообмежених переходах знайшли імпульсні водневі тиратрони, характеристики яких приведені у таблиці 2. Як вказувалось вище, втрати енергії в тиратронах, що працюють у схемах збудження імпульсних лазерів, можуть досягати 30-40% і, тому, суттєвим чином впливають на практичний коефіцієнт корисної дії. Втрати енергії тиратрона, зумовлені протіканням через нього імпульсного струму, і поділяються на три типи: стартові втрати C_{cm}; втрати у період провідності $G_{n\,p}$; післяімпульсні втрати $G_{n\,u}$

Величина стартових втрат визначається швидкістю наростання струму, гранично допустиме значення $(dl/dt)_{пред}$ якої вказується у паспортних даних тиратрона (табл. 2.2) і може бути використана для оцінки вживаності різного типу тиратронів у схемах збудження лазерів шляхом порівняння $(dl/dt)_{пред}$ з величиною (dl/dt), що визначається параметрами розрядного контуру.

В одному крайньому випадку, коли індуктивність L1, велика і швидкість наростання струму визначається тільки її значеннями, можна записати:

$$(di/dt)_c = (di/dt)_{Lc} = U0/Lc. (2.7)$$

Таблиця 2.2

Тип тиратрона	Максимальна напруга на аноді Uв пред, КВ	Максимальний струм анода Ia пред ,А	Максимальна швидкість наростання анодного струму (dl/dt) пред, А/мкс	Довжина імпульсу $T_и$,мкс	Гранична зворотня напруга на аноді U звр пред, кВ
ТГИ1-500/16	16	500	2000	0.5-10	3.2
ТГИ1-1000/25	25	1000	4000	50	5

Співвідношення (2.7) визначає гранично можливу швидкість наростання струму у розрядному контурі з індуктивністю L1 при перед імпульсній напрузі на накопичуючому конденсаторі C_0.

Використовуючи типові для самонагрівних лазерів значення L1=1.5мкГн, U0=3кВ, із (2.6) отримаємо, що величина $(di/dt)_{Lc}=4.5*10^3$ А/мкс і перевищує граничну крутість фронту імпульсу струму для тиратрона ТГИ1-1000/25 на 500 А/мкс, а для ТГИ1-500/16 - на порядок. Ця обставина є одною причин, що тиратрони ТГИ1-1000/25 знаходять більш широке застосування в порівнянні з тиратронами ТГИ1-500/16 навіть у тих лазерах, в яких амплітудні значення розрядного струму не перевищують декількох сот ампер. Крім того, відмічена вище відмінність між $(dl/dt)_{пред}$ і $(di/dt)_{Lc}$ для тиратрона ТГИ1-1000/25

ЕСТФ УКГУ

означає, що в області низьких тисків буферного газу швидкість наростання струму у розрядному контурі може перевищувати допустиме значення, приводячи тим самим до різкого збільшення стартових втрат у тиратроні.

При напругах на випрямлячі 2-5.5 кВ швидкість наростання струму в достатньо широкому діапазоні тиску газу активного середовища (неона) перевищує гранично допустиму для тиратрона ТГИ1-1000/25 значення $4*10^3$ А/мкс, не приводячи, однак, до недозволеного росту втрат енергії в тиратроні. Це пояснюється тим, що в умовах вище розглянутого експеримента передімпульсна напруга U_0, поряд із швидкістю наростання струму що визначає величину стартових втрат, значно менша свого граничного значення 10 кВ.

У загальному випадку, тиратрон ТГИ1-500/16 не придатний для роботи із лазерами з ГРТ діаметром більше ніж 3 см при тиску активної речовини, наприклад N6, меншої 4 кПа, а при таких же умовах, тиратрон ТГИ1-1000/25 працює без відмов.

З вищенаведених міркувань в якості комутуючого елемента в блоці живлення імпульсного лазера будемо використовувати тиратрон ТГИ1-1000/25, який володіє великим рядом переваг перед іншими тиратронами.

Вплив тиратрона на частоту слідування імпульсу збудження і підвищеної комутуючої потужності

Збільшення потужності блоку збудження лазерів на самообмежених переходах здійснюється або за рахунок збільшення частоти f повторення імпульсів збудження при тому ж рівні енергії \Wт , що комутується тиратроном за один імпульс, або за рахунок збільшення $\backslash W_т$ при незмінному значенні *i,* або за рахунок збільшення того і другого одночасно. Гранична частота повторення визначається часом встановлення електричної міцності тиратрона. За цей час струм, що протікає через тиратрон, немає перевищувати деякого допустимого значення I_{Tmax}.

ПЕРЕГЛЯНУТО

При заданій частоті f граничне значення \W_T визначається допустимою для тиратрона величиною потужності, що розсіюється на її електродах, при перевищенні якої проходить перегрів тиратрона і, у кінці, вихід його із ладу .

Один із способів збільшення частоти слідування імпульсу збудження і рівня комутуємої потужності зводиться до включення декількох однотипних блоків збудження на одну ГРТ. При цьому кожний з модулів має свій особистий зарядний дросель і накопичуючий конденсатор. Особливість такого способу полягає в тому, що при використанні тиратронів і конденсаторів з низьким граничним значенням частоти повторення імпульсу ця схема дозволяє одержати практично довільні затримки між імпульсами збудження. Кожний із двох накопичуючих конденсаторів заряджається через своє зарядне коло, що складається із дроселя і діода і розряджаються через свій тиратрон.

У даному випадку, для досягнення комутуємої потужності обмежимось одним тираороном і, відповідно, одним зарядним колом.

Пристрій управління

Один із блоків джерела живлення імпульсного лазера є пристрій управління на мікросхемі DD1, DD2, DD3.

На мікросхемі DD1 зібраний автоколивальний мультивібратор з часозадаючою RC-ланкою. Чекаючий мультивібратор, побудований на мікросхемі DD3, служить для формування вихідних імпульсів з заданою тривалістю. Тривалість імпульсів регулюється змінним опором R4. Діод VD1 служить для зменшення часу возстановлення. Інвертори мікросхеми DD2 служать для загострення фронтів запускаючих і вихідних імпульсів мультивібратора. Імпульси від чекаю чого мультивібратора подаються на узгоджуючі каскади - емітерний повторювач на транзисторі VT1, каскад з спільною базою на транзисторі VT2 і емітерний повторювач на VT3. Вихідний каскад побудований на транзисторі VT4. Пристрій управління призначений для управління тиристором VS1.

Ескіз ужгу

2.2. Розрахунок окремих блоків пристрою

Розрахунок необхідності радіатора для схеми Ларіонова. Допустима потужність розсіювання діода без радіатора $P_{ДОП}$=5Вт. Реальнарозрахована потужність розсіювання знаходиться по формулі

$$I_{сер} = \frac{P}{3U_в} = \frac{2500}{3 \cdot 500} = 1.7A \quad (2.8)$$

$$P_{розс} = I_{сер} * U_д = 1.7A * 1B = 1.7Вт \ (2.9), де$$

$I_{сер}$- середній струм діода;

$U_д$ напруга діода.

Тобто, для даної частини електричної схеми немає необхідності використання радіатора. Дані діоди вибрані з досить жорстких умов з великим запасом.

Розрахунок необхідності радіатора для транзисторного ключа

Допустима потужність розсіювання транзистора КТ838А без радіатораP=5Вт.

Реальна розрахована потужність розсіювання проводиться по формулі

$$P_{розс} = I_{к1} * U_{нас-к-е} * \frac{t_i}{T}, (2.10), де$$

t_i- тривалість $3 * 10^{-6}$;

T - період імпульса, - дорівнює 10^{-4};с;

$U_{нас-к-е}$ - напруга насичення між колектором і емітером;

Ik1 струм колектора одного

$$I_к = \frac{CU_в}{t} = \frac{2 * 10^{-6} * 5 * 10^2}{3 * 10^{-6}} \ A \ (2.11)$$

$$I_{к1} = \frac{3 * 10^2}{4} = 80A \ (2.12)$$

$$P_{розс} = 80 * 1 * \frac{3 * 10^{-6}}{10^{-4}} 2.5Вт$$

ЕС ІТФ УжНУ

Так як транзистори вибрані з таких же жорстких умов із запасом, як і діоди, і $P_{розс}$=2.5Вт, то для них немає необхідності застосовувати радіатор. Для цих транзисторів вистачає зовнішнього охолодження.

Розрахунок транзисторного ключа

Транзисторний ключ виконаний на транзисторах VT2-VT5.

Розрахунок транзисторного ключа треба розпочати згідно аналізу умов, що вказані у технічному завданні.

Згідно ТЗ робоча вихідна ємність C_4 та робоча вихідна напруга U_p блоку живлення складає відповідно 5 нФ, та 10 кВ (що потрібно для нормальної роботи лазера).

Оцінимо вихідну енергію імпульсу блоку живлення згідно формули :

$C_p \cdot U_p^2 / 2 = E_{вих}$ (2.13), де

C_p - робоча вихідна ємність і дорівнює 5 нФ ;

U_p^2-робоча вихідна напруга і дорівнює 10 кВ;

$E_{вих}$ - робоча вихідна енергія джерела живлення.

Енергія, що виділяється на конденсаторі Сі згідно закону фізики про збереження енергії повинна дорівнювати енергії $E_{вих}$:

$C_p \cdot U_p^2 / 2 = (C_1 \cdot U_1^2) / 2$ (2.14), де

де C_1 - ємність конденсатора C_1,

U_1 спад напруги на конденсаторі C_1.

Спад напруги U_1 на конденсаторі C_1.задається випрямлячем (сх. Ларіонова), і складає величину 500В. Підкладемо числові значення у формулу (2.14):

$$5 * \frac{10^{-9} * (1 * 10^4)^2}{2} = c_1 (2.15)$$

$$0.25 = c_1 * \frac{(500)^2}{2} (2.16)$$

тобто робоча вихідна енергія джерела живлення $E_{вих}$ =0.25Дж.

Виразимо із формули (2.16) ємність конденсатора C_1

ПСТБ УЖНУ

C_1.= 2 мкф

Визначимо максимальний струм, що протікає через транзистори VT2..VT5

$$I_k = \frac{CU_B}{N_{ti}} (2.17) \text{ де}$$

N - кількість транзисторів включених у схемі із спільною базою;

$$\mathbf{4I_k = 250A}$$

Розрахуємо індуктивність котушки індуктивності *L1*. Для цього скористаємося формулою

$$\mathbf{\sqrt{L_1/C_1} = U_1/I_k \ (2.18)}$$

де $\mathbf{L_1}$ - індуктивність котушки

Підставимо числові значення у формулу (2.19):

$$\sqrt{L_1/C_1} = 500/20 = 25 \text{ Ом.}$$

Нами отримане рівняння з одним невідомим. Тому:

$$L_1 = 25^2 * c_1 = 625 * 3.6 * 10^{-5} = 2.25 * 10^{-2} \text{ Гн}$$

Визначивши значення накопичуючої ємності та котушки індуктивності, можна вирахувати час перезарядки *C1* згідно формули

$$\tau = \pi * \sqrt{L_1/C_1} \ (2.20), \text{де}$$

τ – час перезарядки C1

Звідси:

$$\tau = 3.14 * (0.5 * 10^{-6} * 2 * 10^{-6})^{1/2} = 3.14 * 10^{-6} \text{ С.}$$

Для оцінки струму бази VT2..VT5 або емітерного струму VT1 скористаємось формулою

$$I_{бVT2..VT5} = I_{max}/\beta \ (2.21), \text{де}$$

$I_{бVT2..VT5}$ - струм бази VT2..VT5

β- коефіцієнт передачі струму для VT2..VT5

Підставимо значення β та I_{max} у формулу (2.21):

$$I_{бVT2..VT5} = 80/4 = 20 \text{ А.}$$

Струм, що протікає через базу VT1.

Ескіз дружку

$I_{бVT1} = I_{K.max} / \beta$ (2.22), де

$I_{бVT1}$- струм базиVTI.

Звідси:

$$I_{бVT1} = \frac{20}{4} = 5 \text{ А}$$

Так як транзистори однакові та не ідеальні, то невеликий розкид параметрів приводить до зменшення ККД блоку живлення. Тому потрібно забунтувати емітери транзисторів VT2..VT5. Номінал шунтуючого резистора розраховується по формулі

$$R_E = K_p * U_k / I_{K.max} (2.23) \text{ де,}$$

R_E –опір шунтуючого резистора;

K_p –коефіцієнт пропорційності і вибирається у межах $(\frac{1}{5} \div \frac{1}{10})$.

Підклавши у формулу (2.23) відповідні значення, в кінцевому результаті ми отримаємо опір емітера:

$$R_E = \frac{1}{10} \cdot \frac{5}{5} = 0.1 \text{Ом.}$$

Проаналізувавши вищенаведені міркування, тобто оцінивши параметри транзисторів, для транзисторного ключа ми можемо застосувати транзистор марки КТ838А.

ЕС ІПФ УжНУ

2.3. Вибір елементної бази та обґрунтування технічних рішень

Цей розділ присвячений критично важливому етапу розробки блоку живлення: вибору конкретних електронних компонентів та обґрунтуванню прийнятих технічних рішень. Правильний вибір елементної бази не лише забезпечує функціональність та відповідність технічним вимогам, але й впливає на надійність, габарити, вартість та ремонтопридатність кінцевого пристрою.

2.3.1. Вибір силових компонентів

Силові компоненти є серцем блоку живлення імпульсного лазера, оскільки вони відповідають за накопичення, комутацію та доставку значних обсягів енергії. Їх вибір ґрунтується на розрахункових параметрах (напруга, струм, енергія імпульсу, частота повторення) та вимогах до надійності.

- *Високовольтний випрямляч:* Для формування високої напруги живлення використовуються діодні мости та високовольтні діоди. Важливо враховувати максимальну зворотну напругу діодів, прямий струм та імпульсні перевантаження. Часто обирають діоди з підвищеним запасом по напрузі та швидким відновленням. Наприклад, для схем з напругою до кількох кіловольт можуть використовуватись діоди серії MUR (наприклад, MUR1560, MUR2060) або спеціалізовані високовольтні випрямлячі. Для дуже високих напруг (понад 10 кВ) застосовують послідовне з'єднання діодів або спеціалізовані високовольтні збірки.
- *Накопичувальні конденсатори:* Це ключові елементи для зберігання енергії. Вибір конденсаторів залежить від розрахованої енергії в імпульсі та максимальної напруги зарядки. Для імпульсних застосувань перевагу віддають конденсаторам з низькою індуктивністю, низьким еквівалентним послідовним опором (ESR) та високою імпульсною стійкістю. Це можуть бути спеціалізовані імпульсні конденсатори (наприклад, металоплівкові поліпропіленові або електролітичні з високою імпульсною здатністю), що розраховані на багато тисяч циклів

ЕС ІТФ УжНУ

заряд-розряд. Важливо враховувати їх габарити та термін служби при високих струмах.

- *Високовольтні ключі (комутатори):* Для розряду накопичувальної ємності в навантаження (лазер) використовуються швидкодіючі силові ключі.

  Найчастіше це:

  - IGBT-транзистори (Insulated Gate Bipolar Transistor): Завдяки високій швидкодії, здатності комутувати великі струми та напруги, а також порівняно низьким втратам, IGBT є популярним вибором для імпульсних застосувань з частотою до кількох десятків кГц. Вибір IGBT залежить від максимального імпульсного струму, колекторної напруги та втрат на перемикання. Важливо враховувати вимоги до драйвера затвора IGBT.
  - Тиристори (SCR - Silicon Controlled Rectifier): Застосовуються для комутації дуже великих струмів та напруг, особливо у схемах з природною комутацією або коли потрібна дуже висока імпульсна стійкість. Однак, їхнім недоліком є складність примусового вимкнення та менша швидкодія порівняно з IGBT у високочастотних додатках.
  - MOSFET-транзистори: Використовуються для низьких і середніх напруг та високих частот. У високовольтних імпульсних джерелах їх застосування обмежене через високий опір у відкритому стані при високих напругах.
  - Твердотільні реле (SSR) або контактори: Можуть застосовуватись для комутації мережевої напруги або для захисних функцій, де не потрібна висока швидкість перемикання.

Ескіз ужгу

2.3.2. Вибір пасивних компонентів та компонентів фільтрації

- *Резистори:* Вибір номіналу, потужності та типу (дротяні, металоплівкові, вуглецеві) залежить від їхньої функції у схемі. У силових колах використовуються потужні резистори з відповідним розсіюванням тепла. У вимірювальних дільниках — прецизійні резистори.

- *Конденсатори (несилові):* Для фільтрації живлення, розв'язуючих кіл, формування тимчасових затримок. Вибираються за типом (електролітичні, керамічні, плівкові), ємністю, робочою напругою та ESR.

- *Фільтри електромагнітних завад (ЕМЗ):* Оскільки блок живлення імпульсного лазера генерує значні електромагнітні перешкоди, необхідні заходи з EMC. Це включає використання фільтрів мережевого живлення (LC-фільтри, синфазні дроселі), екранування, правильне розведення друкованої плати та заземлення. Компоненти фільтрів вибираються на основі вимог стандартів EMC та аналізу джерел завад.

2.3.3. Обґрунтування технічних рішень

Кожен вибір компонента чи схемного рішення має бути обґрунтований з точки зору:

- Відповідності розрахунковим параметрам: Компоненти повинні мати достатній запас по напрузі, струму, потужності для забезпечення надійної роботи. Зазвичай рекомендується запас 20-30% і більше для критичних параметрів
- Надійності та довговічності: Вибір компонентів від перевірених виробників, що відповідають промисловим стандартам, з урахуванням терміну служби при заданих умовах експлуатації (температура, вологість, вібрації).
- Вартісної ефективності: Оптимальне співвідношення ціни та якості. Уникнення надмірно дорогих рішень, якщо їхні переваги не є критичними для даної задачі.
- Габаритів та ваги: Відповідність встановленим обмеженням щодо розмірів та маси пристрою.

ПСПФУКНУ

- Енергоефективності: Вибір компонентів з низькими втратами, особливо для силових елементів, для зменшення тепловиділення та підвищення ККД.
- Доступності: Можливість придбання компонентів на ринку та їх заміни у випадку ремонту.

Обґрунтування технічних рішень також включає аналіз альтернативних варіантів та пояснення, чому саме обране рішення є оптимальним для даної розробки. Наприклад, якщо для комутації обрано IGBT замість тиристора, необхідно пояснити переваги IGBT (швидкість, керованість) та те, як це впливає на ефективність лазера. Якщо використано мікроконтролер, варто вказати, які саме функції він виконує і чому це ефективніше, ніж, наприклад, дискретна логіка.

ЕС ІТФ УжНУ

Висновки

У результаті виконання роботи було здійснено повний цикл розробки структурної та принципової схем блоку живлення для імпульсного лазера. На основі аналізу технічних вимог до роботи лазерного випромінювача сформовано перелік основних функціональних вузлів джерела живлення, що забезпечують стабільну та надійну подачу енергії до лазерного елементу.

На етапі проектування структурної схеми було виділено ключові компоненти: вхідний фільтр, випрямляч, перетворювач напруги (DC/DC-конвертер), імпульсний формувач та система керування. Така модульна структура дозволяє забезпечити ефективну локалізацію функцій, оптимізувати електричні параметри кожного етапу перетворення енергії та спростити подальше обслуговування системи.

При розробці принципової електричної схеми особливу увагу приділено вибору елементної бази, здатної працювати в умовах високих струмів і напруг, а також при значних імпульсних навантаженнях. Для забезпечення швидкої та точної генерації імпульсів високої напруги реалізовано схему керованого формувача з використанням силових ключів (MOSFET або IGBT), що працюють у режимі перемикання. Система керування дозволяє задавати параметри імпульсів (тривалість, частоту, амплітуду) в широкому діапазоні, що критично для різних режимів роботи імпульсного лазера.

Особливо важливим аспектом є захист системи від перенапруги, короткого замикання та перегріву, який було реалізовано шляхом введення відповідних захисних вузлів. Це дозволяє підвищити загальну надійність і довговічність пристрою в умовах інтенсивної експлуатації.

Таким чином, виконана розробка демонструє технічну доцільність і функціональну ефективність спроектованого блоку живлення. Він здатен забезпечувати стабільну роботу імпульсного лазера, відповідно до заданих параметрів. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого виготовлення прототипу та впровадження в практичні застосування, зокрема в галузях медицини, матеріалообробки та наукових досліджень.

Ескіз УКТУ

Список використаних джерел

1. Бохан П. А., Пащенко В.В. Імпульсні лазери на парах металів.- Квантова електроніка 1976.Т.3№6-1239-1244 с.

2. Бохан П.А., Соломонов В.Й., Пащенко В. В. Квантова електроніка, 1980 Т. 7. №6. с.1264-1269.

3. Короткий довідник конструктора РЕА / під редакцією Варламова Г.Г, Київ вид.: Радянськее радіо, 1972 р.

4. Проектування електронних пристроїв, під редакцією Воробьева Н.И./ вид.: Вища школа 1982 г.

5. Надійність електронних схем / Під редакцією Пацюра И.В., вид.: Світ, 1997г.

6. Довідник радіолюбителя - конструктора /Під редакцією Семенова И.П., вид.: Радіо та зв'язок, 1983 г.

7. Бутурлакин О.П., Овчаренко В.В., Федак В.В., Методичні рекомендації до виконання розрахунків по оцінці показників надійності радіоелектронної апаратури. Методична розробка для студентів інженерних спеціальностей.УжНУ, 2001,-56 с.

8. Кузьміна Е.А. Методичні рекомендації до виконання організаційно-економічного розділу дипломного проекту: метод. Розробка для студентів інженерних спеціальностей / Е.А. Кузьміна. – Ужгород: УжДУ, 2000. — 26 с.

9. Нестеренко А.Д., Сучасні силові електронні перетворювачі. Київ: Техніка, 2005. (або аналогічні сучасні видання з силової електроніки та імпульсних перетворювачів).

10. Райнс М.Г., Джерела живлення. Теорія та розрахунок. М.: Мір, 1999.

11. Месяц Г.А., Імпульсна енергетика та електроніка. М.: Наука, 2004.

12. Книш Ю.М., Високовольтні джерела живлення. М.: Радіо ти зв'язок, 1980.

13. K. Frank, J. Christiansen, C. Schultheiss (Eds.), Pulsed Power Systems: Principles and Applications. Springer, 2011.

ПСТФ УжНУ

14. B. Jayant Baliga, Fundamentals of Power Semiconductor Devices. Springer, 2008.

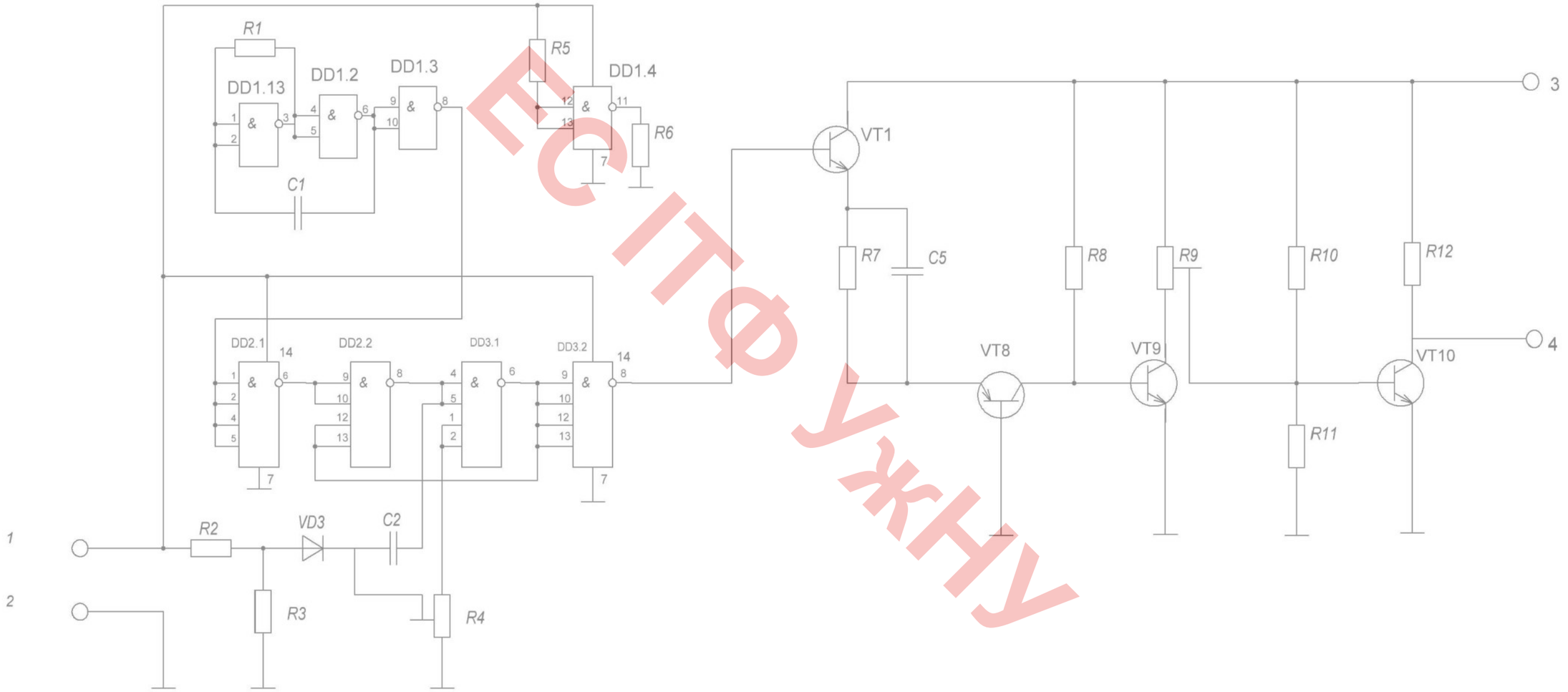
15. Sarjeant W.J., Dollinger R.E., Electrical Power Engineering. Marcel Dekker, 1995.

ЕС ІТФ УжНУ

КБР.ЕС.9469680.001.Е1

ЕС ІТФ УжНУ

Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	КБР.ЕС.9469680.001.Е1		
Розробив		Конюк С. В.			Блок живлення для імпульсного лазера	Літера: У	Маса:	Масштаб: 1 : 1
Перевірив		Заяць Т. М.				Аркуш 1		Аркушів 1
Т. контр.					Структурна схема	УжНУ, ІТФ, гр. ЕС, 4 курс		
Н. контр.		Папп О.М.						
Затвердив		Заяць Т. М.						



ЕС ІТФ УжНУ

					КБР.ЕС.9469680.001Е2	
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Блок живлення для імпульсного лазера	Літера: У; Маса: ; Масштаб: 1 : 1; Аркуш 1; Аркушів 1
Розробив		Конюк С. В.				
Перевірив		Заяць Т. М.				
Т. контр.					Структурна схема	УжНУ, ІТФ, гр. ЕС, 4 курс
Н. контр.		Папп О.М.				
Затвердив		Заяць Т. М.				

Поз. позна-чення	Найменування	Кіл.	Примітки
	Конденсатори КМ-6 ОЖО. 460 208 ТУ		
С1, С2	КМ-6А-25В-0,01мкФ± 10%	2	
С3	КМ-6А-25В-0,1мкФ± 10%	1	
	Мікросхеми		
DD1	К555ЛАЗ вКО.348.289-01 ТУ	1	
DD2,DD3	К555ЛА1 вКО. 348.289-01 ТУ	2	
	Резистори С2-33 ОЖО.467.104ТУ		
	СП-2ВБ. ОЖО. 468.3ЮТУ		
R1	С2-33-0,25-150 Ом ±5%	1	
R2	С2-33-0,25-100к Ом ± 5%>	1	
R3	С2-33-0,25-150 Ом ± 5%	1	
R4	СП-2ВБ-0,5вт-47кОм ± 20% - А	1	
R5	С2-33-0, 25-10кОм ±5%>	1	
R6	С2-33-0, 25-1кОм ± 5%	1	
R7	02-33-0,25-150 Ом ±5%>	1	
R8	С2-33-0,25-100к Ом ±5%	1	
R9	СП-2ВБ-0,5вт-47кОм ± 20% - А	1	
R10	С2-33-0, 25-1,3кОм ±5%о	1	
R11	С2-33-0, 25-1,3 кОм ±5%>	1	
R12	02-33-0, 25-2 кОм ±5%	1	
	Діоди		
VD1	КД514 ТТ3.362.124 ТУ	1	

ЕСТФ УжНУ

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КРБ.ЕС.9469680.001.ПЕ		
Розробив		Конюк С.В.			Блок живлення для імпульсного лазера	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Заяць Т. М.				У	1	2
Т/Контр.								
Н/Контр.		Папп О.В.			Перелік елементів	УжНУ, ІТФ, 4 курс група ЕС		
Затвердив		Заяць Т. М.						

Поз. Позначення	Найменування	Кіл.	Примітки
	Транзистори		
VT1	КТ 325Б аА О.336.047 ТУ	1	
VT2	КТ3123А аАО.336.726 ТУ	1	
VT3	КТ603А аАО.336.192 ТУ	1	
VT4	КТ805БМ аАО.336.341 ТУ	1	

ЕС ІТФ УжНУ

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Назва		Примітка
				Документація		
4			КРБ.ЕС.9469680.001.СП	Специфікація		
4			КРБ.ЕС.9469680.001.ПЗ	Пояснювальна записка		
3			КРБ.ЕС.9469680.001.Е1	Структурна електрична схема		
3			КРБ.ЕС.9469680.001.Е2	Принципова електрична схема		
4			КРБ.ЕС.9469680.001.ПЕ	Перелік елементів		

ЕС ІТФ УжНУ

КРБ.ЕС.9469680.001.СП

Зм	Арк.	№ докум.	Підпис				
Розробив		Конюк С.В.			Блок живлення для імпульсного лазера	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Заяць Т. М.				У	1	1
Т.Контр.								
Н.Контр		Папп О.В.			Специфікація	УжНУ , ІТФ, ЕС 4 курс		
Затверд.		Заяць Т. М.						

Додаток 1

Завідувачу кафедри ЕС ІТФ ДНВЗ УжНУ

к.ф-м.н, Заяць Тарас Михайлович

Студента (-ки) 4 курсу

спеціальності 141 Електроніка

Конюк С.В

(прізвище, ініціали)

ЕС ІТФ УжНУ

ЗАЯВА

щодо самостійного виконання
навчальної/кваліфікаційної роботи здобувачем освіти

Я, Конюк Станіслав Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові),

Студент(-ка) денна інженерно-технічний, 4

(форма навчання, факультет, курс)

заявляю: моя письмова робота на тему: Блок живлення для імпульсного лазера

виконана самостійно і в ній не міститься елементів плагіату.

Всі запозичення з друкованих та електронних джерел, а також із захищених раніше робіт мають відповідні посилання. Я ознайомлений(а) з діючим Положенням, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску навчальної/кваліфікаційної роботи до захисту та притягнення до академічної відповідальності.

18.06.2025 Конюк

Дата Підпис

Додаток 2.

ДОВІДКА

про результати перевірки на унікальність кваліфікаційної, навчальної (курсової) роботи

ЕС ІТФ УжНУ

Автор роботи	Конюх Станіслав Васильович
Назва роботи	Блок живлення для імпульсного лазера
Спеціальність	171 Електроніка
Курс	4
Факультет	інженерно-технічний
Кафедра	Електронні системи
Керівник роботи	Заець Тарас Михайлович
Роботу перевірено в програмі	Unicheck
Додано до бази даних	
Ідентифікаційний номер роботи	
Результати перевірки	
Показник унікальності тексту через перевірку роботи у внутрішній базі кафедри ЕС ІТФ ДНВЗ УжНУ	94,7
Показник унікальності тексту в мережі Інтернет	

Відповідальна особа/
Науковий керівник роботи — Заець Т.М.
(прізвище, ініціали)

18.06.25
Дата

Підпис

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Студент : Конюх С.В

Співавтор:

Назва: Блок живлення для імпульсного лазера

Науковий керівник: Ігор Михайлович Юркін

Підрозділ: Department

Коефіцієнт подібності 1:2.3%

Коефіцієнт подібності 2:0.6%

Мікропробіли: 0

Заміна букв: 74

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-06-20 10:28:01.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☑ **Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.**

☐ **Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.**

☐ **Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.**

Обгрунтування:

Робота може бути допущена до захисту

(Юркін І.М.)

Дата експерт

ЕС ІТФ УКНУ