

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
автоматики та роботехніки систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему " ЛАЗЕРНИЙ ВИПРОМІНЮВАЧ ДЛЯ
ФІЗІОТЕРАПЕВТИЧНОГО АПАРАТУ "**

спеціальність: 163 — "Біомедична інженерія"

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор
(науковий ступінь
та вчене звання)

(підпис)

Никифорова Л.Є.
(ПІБ)

Керівник бакалаврською кваліфікаційної роботи

К.Т.Н., доц.
(науковий ступінь
та вчене звання)

(підпис)

Опришко О.О.
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Купрейчук Є.П.
(ПІБ)

Київ — 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Затверджую
Завідувач кафедри
автоматики та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

д.т.н., проф. О.О. Опришко
(підпис) (ПБ)

" ___ " _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту
Купрейчуку Євгену Павловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 163 — "Біомедична інженерія"

1. Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи " _____ " затверджена наказом ректора НУБіП України від "12" 11 2024р. №2023 "С"
2. Термін подання завершеної роботи на кафедру — "1" червня 2025 р.
3. Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи:
 - 3.1. Завдання кафедри на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи.
 - 3.2. Нормативні документи по проектуванню біомедичних об'єктів.
 - 3.3. Наукова література з тематики бакалаврської кваліфікаційної роботи.
 - 3.4. Матеріали виробничої практики.
4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. МЕДИКО-ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОТИ

- 1.1. Аналіз сучасного стану даної проблеми (згідно теми)
- 1.2. Обґрунтування актуальності медико-технічної задачі, яку необхідно вирішити
- 1.3. Обґрунтування і вибір технічних підходів для вирішення задачі кваліфікаційної роботи

2. СТРУКТУРНА СХЕМА ПРИСТРОЮ (або системи)

2.1 Аналіз принципів побудови пристроїв та систем предметної області

2.2 Вибір та обґрунтування структурної (функціональної) схеми

пристрою (системи)

2.3 Вибір технічних засобів автоматизації

3. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ БЛОКІВ (у складі пристрою або системи)

3.1 Розробка принципової електричної схеми блоків

3.2 Фізичне або математичне моделювання роботи блоків

3.3 Обґрунтування і розробка елементів конструкції, технології

виготовлення блоку

4. ДЕТАЛЬНА РОЗРОБКА (певного вузлу медичного апарату, або біотехнічної системи, або алгоритму керування (узгоджується із керівником)).

5. РОЗРОБКА ПИТАНЬ ОХОРОНИ ПРАЦІ

Дата видачі завдання "24" березня 2025 року

**Керівник
бакалаврської
кваліфікаційної
роботи**

(підпис)

Опришко О.О.
(ПІБ)

**Завдання прийняв
до виконання**

(підпис)

Купрейчук Є.П.
(ПІБ)

ЗМІСТ

Вступ.....	2
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЛАЗЕРНУ ФІЗІОТЕРАПІЮ	
1.1. Принципи дії лазерного випромінювання на біологічні тканини.....	5
1.2. Види лазерів, що застосовуються у фізіотерапії	8
1.3. Показання та протипоказання до застосування лазеротерапії	12
РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКЦІЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА	
2.1. Основні компоненти лазерного випромінювача	15
2.2. Види лазерних випромінювачів за конструкцією та типом генерації	17
2.3. Системи охолодження та забезпечення стабільності випромінювання	21
2.4. Вимоги до безпеки при експлуатації лазерних випромінювачів	24
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ І ПАРАМЕТРИ ВИПРОМІНЮВАЧА	
3.1. Потужність, довжина хвилі та режим випромінювання.....	27
3.2. Управління інтенсивністю та частотою імпульсів	29
3.3. Сумісність із фізіотерапевтичним обладнанням	32
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА	
4.1. Перспективи вдосконалення конструкції та функціональності.....	35
РОЗДІЛ 5. ВИСНОВКИ	
5.1. Загальні підсумки дослідження та практичні рекомендації.....	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	37

Реферат

Розробка лазерного випромінювача для фізіотерапевтичного апарату Лазерні технології широко застосовуються у фізіотерапії завдяки їх здатності забезпечувати точне, контрольоване випромінювання, яке сприяє терапевтичним ефектам. Розробка лазерного випромінювача для фізіотерапевтичного апарату є актуальною задачею, спрямованою на створення безпечного, ефективного та економічно доступного обладнання для медичних закладів.

Методом розробки є створення лазерного випромінювача з регульованою потужністю та довжиною хвилі, що забезпечує стабільну роботу в умовах тривалого використання. Для фізіотерапії використовують напівпровідникові лазери, що працюють у режимі ближнього інфрачервоного спектру (780–980 нм). Ці довгі хвилі ефективно проникають в біологічні тканини, стимулюючи регенерацію клітин, зменшуючи корозію та покращуючи кровообіг.

Процес розробки охоплює кілька етапів: вибір типу лазера, проектування оптичної системи, розробка системи стабілізації потужності та охолодження. Особливу увагу приділено дотриманню стандартів медичної безпеки, зокрема ІЕС 60601-2-22, що регулює використання лазерів у медичних пристроях. Для цього впроваджуються системи захисту від сильного випромінювання та ергономічний дизайн для зручності медичного персоналу.

Розроблений лазерний випромінювач може бути інтегрований у фізіотерапевтичні апарати для лікування хронічного болю, травм м'яких тканин, артритів та інших патологій. Перспективи подальших досліджень включають підвищення енергоефективності, зменшення габаритів приладу та інтеграцію із системами телемедицини для дистанційного керування та моніторингу.

Ключові слова : лазерний випромінювач, фізіотерапія, напівпровідниковий лазер, медична безпека, біостимуляція.

Вступ

Лазерна терапія є одним із перспективних напрямів у фізіотерапії, що активно застосовується для лікування широкого спектру захворювань опорно-рухового апарату, нервової системи, а також для стимуляції процесів регенерації та знеболення. У сучасній медичній практиці використання лазерного випромінювання дозволяє досягати високої ефективності при мінімальному втручанні в організм пацієнта. Проте, ефективність лікування значною мірою залежить від технічних характеристик та конструктивних особливостей лазерного випромінювача, який є ключовим елементом фізіотерапевтичного апарату.

Незважаючи на досягнення в цій сфері, існуючі лазерні апарати мають низку обмежень — серед них недостатня гнучкість у налаштуванні параметрів випромінювання, обмежений спектр дії, складність у використанні та висока вартість. У зв'язку з цим актуальним є завдання розробки нового, більш ефективного, доступного та зручного у використанні лазерного випромінювача, який може бути інтегрований у фізіотерапевтичні апарати нового покоління.

Сучасні досягнення в галузі оптоелектроніки, мікроелектроніки та медичної інженерії створюють умови для вдосконалення технологій лазерної терапії. Зокрема, використання напівпровідникових лазерів, мікропроцесорного керування та адаптивного вибору режимів дозволяє підвищити ефективність впливу та розширити спектр клінічних застосувань.

Метою даної роботи є проєктування та розробка конструкції лазерного випромінювача для фізіотерапевтичного апарату, що забезпечує можливість регулювання основних параметрів випромінювання (потужності, довжини хвилі, режиму генерації) відповідно до потреб конкретного лікувального процесу. В процесі розробки будуть враховані ергономічні, енергетичні та безпекові вимоги до медичних пристроїв.

Актуальність цієї теми обумовлена потребою у підвищенні ефективності фізіотерапевтичного лікування, розширенні функціональності медичних приладів та зменшенні вартості їх впровадження у клінічну практику. Розробка сучасного лазерного випромінювача сприятиме не лише покращенню результатів лікування, а й розширенню можливостей фізіотерапевтичних методів у медичних закладах різного рівня.

Таким чином, дана робота спрямована на вирішення важливої техніко-медичної задачі — створення високоефективного та універсального лазерного випромінювача для фізіотерапевтичного застосування, що відповідає сучасним вимогам медичної техніки.

Розділ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЛАЗЕРНУ ФІЗІОТЕРАПІЮ

1.1. Принципи дії лазерного випромінювання на біологічні тканини

Лазерне випромінювання – це один із найперспективніших методів фізичного впливу на живі тканини, який знайшов широке застосування в медицині завдяки своїй точності, ефективності та мінімальній інвазивності. На відміну від традиційних методів, лазери дозволяють досягати локалізованої дії на патологічні вогнища, не зачіпаючи при цьому здорові тканини. Основні принципи взаємодії лазера з біологічними структурами базуються на фізичних і біофізичних процесах, які активуються при проходженні світлового потоку через тканини організму.

1. Фізичні основи взаємодії

Коли лазерне випромінювання потрапляє на поверхню біологічної тканини, частина його поглинається, частина відбивається, а ще частина розсіюється чи проходить углиб. Саме поглинання світлової енергії є критичним для запуску біологічних реакцій. Важливу роль у цьому відіграє довжина хвилі лазера: вона визначає, наскільки глибоко пройде випромінювання і які молекули (хромофори) його поглинуть.

У тканинах головними хромофорами є вода, гемоглобін, меланін та білки. Наприклад, інфрачервоне випромінювання (780–1000 нм) краще поглинається водою, що дозволяє використовувати його для глибокої дії, тоді як червоне та ближнє інфрачервоне (600–700 нм) частіше застосовуються для стимулювальних та протизапальних ефектів.

2. Біофізичні ефекти лазерного випромінювання

Лазерна енергія, взаємодіючи з тканинами, може викликати кілька основних типів ефектів:

- Фотохімічний ефект

Цей ефект особливо актуальний для низькоінтенсивної лазерної терапії (НІЛТ). Світло певної довжини хвилі активує молекули всередині клітин, перш за все – в мітохондріях, де посилюється синтез АТФ (аденозинтрифосфату) – головного джерела енергії. Це веде до активації клітинного метаболізму, прискорення процесів регенерації, зниження запалення та покращення загального стану клітин.

- Термічний ефект

При більш інтенсивному лазерному впливі (наприклад, у хірургії або дерматології) спостерігається нагрів тканин. Локальне підвищення температури стимулює кровообіг, покращує обмін речовин, сприяє виведенню токсинів. У деяких випадках температура настільки висока, що відбувається коагуляція білків – це використовується для припікання або зупинки кровотеч.

- Механічний (фотомеханічний) ефект

Потужні лазерні імпульси можуть створювати механічні коливання або ударні хвилі в тканинах. Це сприяє покращенню мікроциркуляції, зменшенню набряків і стимуляції міжклітинного обміну. У м'яких тканинах ці ефекти також можуть запускати процеси розсмоктування патологічних утворень.

3. Залежність ефектів від параметрів лазера

Ефективність і тип біологічного впливу лазерного випромінювання визначаються кількома ключовими параметрами:

- Довжина хвилі: визначає глибину проникнення та спектр біологічної дії. Наприклад, червоне світло (630–700 нм) ефективно для поверхневих тканин, тоді як ближнє інфрачервоне (800–1000 нм) проникає глибше.

- Інтенсивність (потужність): низька інтенсивність стимулює клітини, середня – має протизапальну дію, висока – використовується для деструкції тканин.

- Тривалість впливу: впливає на накопичення енергії в тканинах. Короткі імпульси підходять для хірургічного різання, тоді як тривалі – для терапії.

- Режим випромінювання: безперервний чи імпульсний. Імпульсний режим часто застосовується при лікуванні захворювань серцево-судинної системи.

4. Фізіологічна відповідь організму

Після впливу лазера організм реагує комплексно. З'являється активне розширення капілярів, покращується лімфовідтік, зменшується в'язкість крові.

Це веде до покращення кисневого забезпечення тканин та зниження рівня запальних медіаторів. У серцево-судинній практиці це особливо важливо для покращення мікроциркуляції в ішемізованих ділянках міокарда.

Також лазер стимулює вироблення ендогенних біологічно активних речовин – таких як серотонін, ендорфіни, гістамін, що додатково покращує загальний стан пацієнта.

5. Важливість індивідуального підходу

Однією з ключових умов ефективного застосування лазерної терапії є правильний підбір параметрів відповідно до клінічного випадку. Наприклад, пацієнтам із серцево-судинними захворюваннями не завжди підходять високі потужності, а хворим з аутоімунними процесами варто обмежити час впливу.

Варто також враховувати протипоказання, серед яких – онкологічні захворювання, активні інфекції, вагітність, епілепсія.

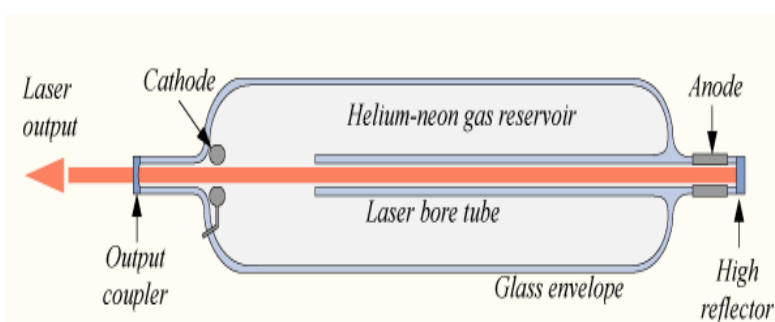
Висновок

Лазерне випромінювання є потужним інструментом сучасної медицини, який ґрунтується на чітких фізичних і біофізичних принципах. Його дія на біологічні тканини може бути як стимулювальною, так і деструктивною, залежно від режиму, параметрів та мети впливу. Саме завдяки можливості точно контролювати глибину, інтенсивність та спектр дії, лазерна терапія стала незамінним методом у лікуванні як гострих, так і хронічних патологій, зокрема в кардіології, неврології, дерматології та ортопедії.

1.2. Види лазерів, що застосовуються у фізіотерапії

Лазерна терапія — один із провідних напрямів сучасної фізіотерапії, що поєднує в собі наукову точність і клінічну ефективність. Для досягнення різноманітних лікувальних ефектів використовуються різні типи лазерів, кожен із яких має свої фізичні характеристики, глибину проникнення, біологічну активність та сферу застосування. Правильний вибір типу лазера є вирішальним для досягнення бажаного результату, тому знання про їхні особливості є ключовим для фахівців з реабілітації та фізичної терапії.

1. Гелій-неоновий лазер (He-Ne лазер)



Характеристики:

- Довжина хвилі: близько 632,8 нм

- Випромінювання: червоне світло
- Потужність: низька (до 15 мВт)
- Проникаюча здатність: до 8–10 мм

Застосування: гелій-неонові лазери є одними з перших, які почали використовуватися у медичній практиці. Завдяки своїй малій потужності та довжині хвилі, яка добре поглинається в поверхневих шарах тканин, вони ідеально підходять для стимуляції шкірного покриву, лікування ран, опіків, виразок, а також при хронічних дерматологічних захворюваннях. Цей тип лазера активізує обмін речовин у клітинах, пришвидшує загоєння і зменшує біль.

2. Інфрачервоні діодні лазери



Характеристики:

- Довжина хвилі: 780–980 нм
- Випромінювання: інфрачервоне
- Потужність: від 10 до 500 мВт (а іноді й вище)
- Проникаюча здатність: до 4–7 см

Застосування: це — один із найпопулярніших типів лазерів у сучасній фізіотерапії. Інфрачервоне випромінювання глибоко проникає у тканини, впливаючи на м'язи, суглоби, судини, зв'язки. Його часто використовують при остеохондрозі, артрозах, невралгіях, м'язових спазмах та для поліпшення мікроциркуляції. Залежно від режиму роботи, ці лазери можуть як знімати біль і запалення, так і стимулювати регенерацію тканин.

3. Напівпровідникові лазери

Характеристики:

- Випромінювання: червоне або ближнє інфрачервоне
- Потужність: змінна (від 10 до понад 1000 мВт)



- Компактні, економічні, довговічні

Застосування: це найпоширеніші в клінічній практиці лазери, завдяки їхній універсальності та зручності використання. Напівпровідникові лазери можуть працювати як в імпульсному, так і в безперервному режимах. Їх застосовують при широкому спектрі захворювань – від хронічного болю в спині до трофічних виразок. Велика перевага – можливість точно дозувати енергію та контролювати глибину дії.

4. Вуглекислотний лазер (CO₂ лазер)



Характеристики:

- Довжина хвилі: 10 600 нм
- Випромінювання: далеке інфрачервоне
- Висока потужність, сильна абсорбція водою
- Дія переважно поверхнева

Застосування: у фізіотерапії застосовується рідше, ніж в хірургії чи дерматології, однак може бути корисним у лікуванні шкірних патологій, де потрібна точна локальна дія. Наприклад, він ефективний при лікуванні рубців, папілом, кератозів. CO₂ лазери також застосовують у реабілітації післяопераційних ран для прискорення епітелізації.

6. Імпульсні лазери

Характеристики:

- Довжина хвилі: 1064 нм (Nd:YAG)
- Висока енергія імпульсу



Глибока дія, фотомеханічні ефекти Застосування: ці лазери мають змогу генерувати короткі, але дуже потужні імпульси, які створюють **ударні хвилі** в тканинах. Це використовується для глибокого знеболення, активації циркуляції, розсмоктування набряків та рубців. Зокрема, імпульсні лазери використовують у спорті для реабілітації після мікротравм та у косметології для стимуляції підшкірного колагену.

Висновок

Кожен вид лазера, що використовується у фізіотерапії, має свої унікальні властивості та показання. Від м'яких гелій-неонових лазерів до потужних імпульсних систем – усі вони створюють потужні можливості для лікування широкого спектру захворювань. Головне завдання лікаря – обрати відповідний тип лазера з урахуванням глибини ураження, чутливості тканин, клінічного стану пацієнта та мети терапії: зменшення болю, зняття запалення, стимуляція регенерації чи усунення рубцевої тканини. Таким чином, розуміння фізичних і терапевтичних особливостей різних лазерів є необхідною складовою успішного застосування лазерної терапії у сучасній фізіотерапевтичній практиці.

1.3. Показання та протипоказання до застосування лазеротерапії

Лазеротерапія – це сучасний, високотехнологічний метод лікувального впливу, який базується на застосуванні когерентного монохроматичного світлового випромінювання. Завдяки унікальним властивостям лазерного променя – високій спрямованості, можливості точно дозувати енергію, а також широкому спектру біологічних ефектів – лазеротерапія отримала широке поширення в клінічній практиці. Однак, як і будь-який медичний метод, її застосування потребує ретельного підбору показань та врахування протипоказань. Від цього безпосередньо залежить не лише ефективність лікування, а й безпека пацієнта.

Показання до лазеротерапії

Завдяки універсальності біофізичних механізмів дії, лазеротерапія застосовується при лікуванні захворювань найрізноманітніших органів і систем. Основні групи показань включають:

1. Захворювання опорно-рухового апарату

Лазеротерапія ефективно використовується при дегенеративно-дистрофічних, запальних та травматичних ураженнях суглобів і м'язів. До таких належать:

- остеохондроз;
- артрити і артрози;
- міжхребцеві грижі;
- міозити, бурсити, тендиніти;
- посттравматичні стани (розтягнення, забої, переломи в період реабілітації).

2. Кардіологічні захворювання

Лазеротерапія (особливо черезшкірна або внутрішньосудинна) активно використовується в комплексному лікуванні:

- ішемічної хвороби серця;
- стенокардії;
- артеріальної гіпертензії;
- порушень мікроциркуляції;
- реабілітації після інфаркту міокарда.

Завдяки покращенню реологічних властивостей крові, зменшенню гіпоксії та стимуляції тканинного обміну, лазерний вплив сприяє зниженню навантаження на серце та підвищенню ефективності медикаментозної терапії.

3. Неврологічна практика

- Застосовується при:
- невритах і невралгіях;
- радикулітах;
- синдромі хронічного болю;
- відновленні після інсульту.

Лазеротерапія чинить нейромодуючу дію, знижує біль, зменшує запальні реакції, активізує нейропластичні процеси.

4. Дерматологічні захворювання

Успішно застосовується при:

- трофічних виразках;
- псоріазі;
- екземі;
- фурункулах;
- акне;
- опіках і рубцях.

Лазерна енергія стимулює епітелізацію, має антибактеріальний і протизапальний ефект, прискорює загоєння.

5. Гінекологія та урологія

Ефективність доведена при лікуванні:

- хронічних запалень органів малого таза;
- ендометріозу;
- аднекситу;
- простатиту;
- еректильної дисфункції (у поєднанні з іншими методами).

6. Оториноларингологія та стоматологія

Лазери допомагають у лікуванні:

- хронічного тонзиліту;
- гаймориту;
- отиту;
- гінгівіту, пародонтиту;
- стоматиту, хейліту.

Вплив на слизову оболонку підсилює локальний імунітет, пришвидшує репаративні процеси та зменшує інтенсивність болю.

7. Ендокринологія та обмінні порушення

У ряді випадків лазеротерапія допомагає нормалізувати обмінні процеси, особливо при:

- цукровому діабеті (включаючи діабетичну ангіопатію та нейропатію);
- ожирінні (як супровід комплексного лікування).

Протипоказання до лазеротерапії

Хоча лазеротерапія вважається відносно безпечним методом, вона має ряд абсолютних і відносних протипоказань. Ігнорування цих факторів може призвести до небажаних реакцій і погіршення стану пацієнта.

Абсолютні протипоказання:

- Онкологічні захворювання – навіть у стані ремісії, оскільки лазер може стимулювати ріст пухлинних клітин.
- Активні форми туберкульозу – підвищення місцевого кровообігу може сприяти поширенню інфекції.
- Гострі інфекційні захворювання з гарячкою – через ризик посилення запального процесу.
- Епілепсія – імпульсне світло може спровокувати напад.
- Психічні розлади в стадії декомпенсації – через неможливість адекватного сприйняття процедур.
- Важкі порушення згортання крові – ризик кровотеч при деяких методах лазерного впливу.
- Імплантовані електростимулятори серця – деякі види лазерної терапії можуть спричинити їхнє збої в роботі.

Відносні протипоказання:

- Вагітність – лазеротерапія не рекомендується, особливо в І триместрі, через відсутність достатніх досліджень щодо безпеки.
- Індивідуальна гіперчутливість до світла – фотодерматози, порфірія.
- Тяжка серцева недостатність – потребує обережного підбору параметрів.
- Системні автоімунні захворювання – може спостерігатися непередбачувана реакція і загострення процесів.

- Період після хірургічного втручання – у перші дні лазерна терапія може бути небажаною через ризик розриву швів або стимуляції неадекватного рубцювання.

Висновок

Показання до лазеротерапії охоплюють широкий спектр патологій – від локальних запальних процесів до хронічних системних захворювань. Водночас правильне визначення протипоказань є ключовим аспектом, що забезпечує не лише ефективність, а й безпечність лікування. Медичний фахівець має не просто володіти знаннями про фізіологічні ефекти лазера, а й уміти індивідуально підходити до кожного пацієнта, з урахуванням його стану, супутньої патології та цілей терапії. Саме такий підхід робить лазеротерапію не просто модним методом, а серйозним клінічним інструментом з великою перспективою у сучасній медицині.

Розділ 2. КОНСТРУКЦІЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА

2.1. Основні компоненти лазерного випромінювача

Основні компоненти лазерного випромінювача

Лазерний випромінювач — це складна оптико-електронна система, яка створює вузьконаправлене, когерентне і монохроматичне світлове випромінювання. Його унікальні властивості — висока інтенсивність, чітка спрямованість, стабільна довжина хвилі — стають можливими завдяки чітко скоординованій роботі декількох основних елементів. Кожен компонент виконує свою специфічну функцію і є критично важливим для генерації та формування лазерного променя. Розглянемо ці елементи докладніше.

1. Активне середовище

Це серце лазера — речовина, в якій відбувається процес генерації фотонів. Саме активне середовище визначає довжину хвилі лазерного випромінювання і його загальні характеристики. Залежно від типу середовища лазери поділяють на:

- Газові лазери (наприклад, гелій-неонові, CO₂-лазери): використовують суміш газів як середовище. Їх перевага — стабільна робота та висока якість променя.
- Твердотільні лазери (наприклад, на кристалі Nd:YAG): активне середовище — це кристал або скло, активоване іонами рідкісноземельних елементів.
- Рідинні (барвникові) лазери: використовують органічні барвники, розчинені у рідині.
- Напівпровідникові лазери (діодні): найбільш компактні, базуються на p-n переходах у напівпровідниках.

Кожне середовище має свої особливості поглинання та випромінювання, що дозволяє підбирати лазер під конкретні клінічні або технічні завдання.

2. Джерело накачування

Щоб активне середовище почало випромінювати, необхідно ввести в нього енергію — цей процес називається "накачуванням". Джерела накачування можуть бути різними:

- Світлові (лампи-спалахи, інші лазери) — використовуються в твердотільних лазерах.
- Електричні розряди — переважно в газових лазерах.
- Хімічна реакція або ядерна енергія — застосовуються рідше, здебільшого у військових або промислових системах.

Цей компонент має забезпечити достатню кількість енергії для переходу атомів або молекул активного середовища в збуджений стан. Саме тут починається процес інверсії заселеності — необхідної умови для генерації лазерного променя.

3. Оптичний резонатор

Це система дзеркал, яка створює зворотний зв'язок у лазері. Найчастіше складається з двох дзеркал, розташованих по обидва боки активного середовища:

Одне дзеркало повністю відбиває світло (рефлектор).

Інше — частково прозоре, що дозволяє певній частині світла вийти у вигляді лазерного променя.

Оптичний резонатор відіграє ключову роль у когерентності випромінювання: фотони, що відбиваються між дзеркалами, взаємодіють з активним середовищем, підсилюючись завдяки стимульованому випромінюванню. Таким чином створюється узгоджене (когерентне) випромінювання з вузьким спектром.

4. Система охолодження

У процесі роботи лазера виділяється велика кількість тепла, особливо при високих потужностях. Надмірне нагрівання може викликати перегрів активного середовища, зміну його оптичних властивостей або навіть механічне пошкодження.

Системи охолодження бувають:

- Повітряні — для малопотужних пристроїв.
- Рідинні (водяні або з антифризом) — у більш потужних та промислових системах.
- Термоелектричні модулі (елементи Пельтьє) — у компактних лазерах, особливо діодних.

Правильна терморегуляція забезпечує стабільну роботу пристрою та довготривалий термін служби компонентів.

5. Система керування

Це електроніка, яка відповідає за точну настройку параметрів лазера: потужність, тривалість імпульсу, частоту, режим роботи (безперервний або імпульсний), фокусування тощо. Сучасні лазери часто мають вбудовані комп'ютерні модулі, які дозволяють не тільки керувати процесом, але й інтегрувати лазер у більші медичні або хірургічні системи.

У медичній практиці це особливо важливо, оскільки іноді потрібна ювелірна точність і можливість швидко адаптувати параметри до клінічної ситуації.

6. Оптична система (формував променя)

Після того, як лазерне випромінювання виходить із резонатора, воно проходить через систему лінз, призм або волоконно-оптичних кабелів, які формують, фокусують або направляють промінь у потрібну точку.

Цей компонент є критично важливим у хірургії, дерматології та офтальмології, де промінь повинен точно впливати на визначену ділянку

тканини. У деяких пристроях можливе навіть регулювання форми променя — наприклад, перехід від точкового до розсіяного.

Висновок

Кожен із наведених компонентів є не просто частиною конструкції, а виконує конкретну роль у складному ланцюгу перетворень енергії в потужний, точно контрольований лазерний промінь. Саме завдяки взаємодії активного середовища, джерела накачування, резонатора та допоміжних систем, сучасні лазерні випромінювачі можуть забезпечувати надзвичайну точність, надійність та гнучкість у використанні.

2.2. Види лазерних випромінювачів за конструкцією та типом генерації

Види лазерних випромінювачів за конструкцією та типом генерації

Лазерні випромінювачі, які є основою всієї лазерної техніки, значно варіюються за своєю конструкцією, принципом дії та параметрами генерації. Залежно від типу активного середовища, способу накачування та режиму випромінювання, вони мають різні технічні характеристики й сфери застосування. Розуміння цих відмінностей критично важливе як для технічної реалізації лазерних систем, так і для медичного, промислового чи наукового використання.

1. Класифікація за типом активного середовища

Однією з найпоширеніших класифікацій є поділ лазерів за типом середовища, у якому відбувається генерація когерентного випромінювання.

1.1. Газові лазери

Газові лазери використовують газоподібне активне середовище, збуджене електричним струмом або розрядом.

- Гелій-неоновий лазер (He-Ne)
 - Один із перших стабільних лазерів.
 - Генерує червоне світло з довжиною хвилі 632.8 нм.
 - Широко використовується у науці, оптичних приладах, метрології.
 - Має вузький промінь і високу стабільність.

- Вуглекислий лазер (CO₂)
 - Працює в інфрачервоному діапазоні (~10.6 мкм).
 - Має високу потужність та ефективність.
 - Застосовується в хірургії, різанні металу, гравіруванні, обробці матеріалів.
 - Має хороше співвідношення енерговитрат до потужності.
- Аргоновий лазер
 - Випромінює у синьо-зеленій частині спектра.
 - Використовується в офтальмології, особливо для фотокоагуляції сітківки.
 - Дає яскравий і сфокусований промінь.
 - Також застосовується в голографії та наукових дослідженнях.

1.2. Твердотільні лазери

Мають тверде активне середовище — кристал або скло, доповане рідкісноземельними іонами.

- Nd:YAG-лазер (на ітрієво-алюмінієвому гранаті з неодимом)
 - Генерує інфрачервоне випромінювання 1064 нм.
 - Широко застосовується в хірургії, стоматології, офтальмології.
 - Підходить для різання, зварювання, коагуляції тканин.
 - Працює як у безперервному, так і в імпульсному режимі.
- Рубіновий лазер
 - Перший створений твердотільний лазер (1960 р.).
 - Працює на основі кристалу корунду з іонами хрому.
 - Випромінює червоне світло (~694 нм).
 - Має низьку ефективність, але важливий у наукових цілях та історичних дослідженнях.

1.3. Рідинні лазери

Активне середовище — барвники, розчинені у рідині (наприклад, етанолі або воді).

- Працюють у широкому спектрі довжин хвиль (від УФ до ІЧ).
- Змінюючи барвник, можна змінювати довжину хвилі випромінювання.
- Потребують зовнішнього збудження, зазвичай іншим лазером.
- Часто використовуються як лазерні підсилювачі.
- Застосовуються у спектроскопії, наукових дослідженнях, медичних технологіях.

1.4. Напівпровідникові лазери (лазерні діоди)

Засновані на p-n переходах у напівпровідниках.

- Компактні та енергоефективні.
- Використовуються у CD/DVD-програвачах, лазерних принтерах, оптичному зв'язку.
- У медицині — для лазеротерапії, видалення волосся, лікування судинних патологій.
- Забезпечують широкий спектр довжин хвиль, залежно від матеріалу.
- Можуть працювати у безперервному або імпульсному режимі.

1.5. Волоконні лазери

Активне середовище — оптичне волокно, леговане іонами (ербій, ітербій, тулій тощо).

- Забезпечують високу якість променя та надійне охолодження.
- Відзначаються високою стабільністю роботи.
- Застосовуються у промисловості для точного зварювання, різання, мікрообробки.
- У медицині — для мінімально інвазивних операцій, ендоскопічної хірургії.
- Підходять для високочастотних операцій у телекомунікаціях.

Висновок

Різноманіття конструкцій лазерних випромінювачів та типів генерації дає змогу точно адаптувати лазерну систему під конкретні потреби – від точкової терапії до хірургічного втручання або індустріальної обробки матеріалів. Кожен тип має свої унікальні переваги і обмеження, які необхідно враховувати при виборі лазера для тієї чи іншої задачі. Саме гнучкість конструкції та контроль параметрів генерації робить лазер одним із найбільш універсальних інструментів сучасної науки та медицини.

2.3. Системи охолодження та забезпечення стабільності випромінювання

У сучасних лазерних системах, особливо в медичному та науковому середовищі, стабільність випромінювання та ефективне охолодження лазерного джерела є критично важливими компонентами, що безпосередньо впливають на точність, безпеку та ефективність процедури. Під час роботи лазера, зокрема

при високих потужностях або тривалих сеансах, відбувається значне нагрівання активного середовища, оптики, резонаторів та допоміжних елементів, що може викликати зміщення довжини хвилі, нестабільність потужності, а в деяких випадках — перегрів і пошкодження системи. Саме тому для надійної роботи необхідно впроваджувати ефективні системи охолодження та технології стабілізації випромінювання.

1. Значення температурної стабільності для лазерного випромінювання

Температура є одним з головних факторів, що впливають на оптичні властивості активного середовища та ефективність лазерної генерації. При нагріванні змінюються:

- Рівень інверсії населення енергетичних рівнів – що безпосередньо впливає на інтенсивність випромінювання.
- Показник заломлення середовища – що може викликати деформації оптичного пучка.
- Резонансна довжина хвилі – що змінює спектральні характеристики випромінювання.
- Якість фокусування та вирівнювання променя – що критично для мікрохірургії та терапевтичного впливу.

Високоточні медичні маніпуляції, наприклад, в офтальмології або нейрохірургії, вимагають мікронної точності, тому навіть незначні теплові коливання можуть стати причиною небажаних результатів.

2. Типи систем охолодження

Існує кілька основних підходів до охолодження лазерних систем, кожен з яких має свої переваги та специфіку застосування:

- Пасивне охолодження

Це найпростіший метод, що полягає у використанні тепловідвідних матеріалів — металевих радіаторів, ребристих поверхонь або теплопровідних підкладок. Такий спосіб ефективний при низьких або помірних потужностях, наприклад у портативних діодних лазерах або в косметології.

- Активне повітряне охолодження

Використовується вентилятори або турбіни для створення потоку повітря через нагріті компоненти. Це забезпечує більший тепловідвід, але може створювати шум і потребує наявності чистих повітряних фільтрів. Часто застосовується в апаратній фізіотерапії та стоматологічних лазерах.

- Рідинне охолодження

Це найбільш ефективна система для високопотужних лазерів.

Використовуються замкнені контури з дистильованою водою або спеціальними охолоджуючими рідинами, що циркулюють через теплообмінники, охолоджувачі та активне середовище. Рідинне охолодження забезпечує стабільну температуру навіть при тривалих або безперервних сеансах, як у хірургічних CO₂-лазерах або твердотільних лазерах Nd:YAG.

- Термопельтьє (елементи Пельтьє)

Застосовуються у компактних лазерах, де критично важлива точність температури (наприклад, у спектроскопії чи косметичних апаратах). Елементи Пельтьє можуть охолоджувати або нагрівати активне середовище, підтримуючи необхідний температурний режим з точністю до десятих часток градуса.

3. Забезпечення стабільності випромінювання

Стабільність випромінювання визначає якість терапевтичного або хірургічного впливу. До основних критеріїв стабільності відносяться:

- Постійна довжина хвилі – важлива для вибіркового поглинання хромофорами.
- Стабільна інтенсивність – запобігає перепадам енергії, які можуть викликати опіки або неефективний вплив.
- Фокусування та геометрія променя – гарантує точність прицільного впливу.

Щоб забезпечити ці характеристики, застосовуються такі підходи:

- Температурна стабілізація активного середовища

Завдяки охолодженню підтримується сталий енергетичний рівень та спектральна стабільність.

- Оптичні стабілізатори

У лазерні системи вбудовуються фільтри, інтерферометри, стабілізатори положення дзеркал, які контролюють геометрію пучка та резонансну довжину хвилі.

- Автоматичне керування потужністю

Сучасні лазери оснащені модулями зворотного зв'язку, які в режимі реального часу коригують параметри випромінювання згідно із заданими протоколами.

- Герметичність та чистота оптичних компонентів

Пил, волога або мікрозабруднення можуть спричинити коливання променя, а також сприяти перегріву. Тому сучасні системи оснащуються фільтрами та антикондесатними бар'єрами.

4. Комплексна взаємодія систем

Система охолодження та стабілізації випромінювання не існує окремо – це інтегрований підхід. Ефективне охолодження не лише знижує температуру, а й забезпечує стабільну роботу оптичного резонатора, запобігає деградації дзеркал, подовжує термін служби джерела. У медичних лазерах, наприклад, з перемикачем Q-Switch, стабільність випромінювання особливо критична, оскільки енергія в імпульсі надзвичайно велика, а час дії – мікросекунди. Найменша нестабільність може змінити ефект у тканині, викликати надмірну травматизацію або зниження ефективності впливу.

5. Виклики та перспективи

Із розвитком технологій, вимоги до стабільності та температурного контролю лише зростають. З'являються нові матеріали з кращими тепловими характеристиками, вдосконалюються алгоритми керування та моніторингу. Системи охолодження стають не лише ефективнішими, а й компактнішими, тихішими та більш екологічними. У перспективі – використання

інтелектуальних систем, які автоматично підлаштовуюватимуть режими охолодження та стабілізації відповідно до типу процедури, стану пацієнта або навіть конкретної анатомічної ділянки.

Висновок

Забезпечення стабільності лазерного випромінювання та ефективного охолодження — це не просто технічна вимога, а необхідна умова безпечного й результативного використання лазерних технологій у медицині. Надійна терморегуляція, контроль параметрів і запобігання перегріву дозволяють підтримувати якість випромінювання на постійному рівні, що критично важливо для досягнення прогнозованого клінічного результату. У поєднанні з правильно підібраними параметрами лазерної дії, це формує основу сучасної, високоточної та щадної терапії.

2.4. Вимоги до безпеки при експлуатації лазерних випромінювачів

Лазерні технології широко використовуються в сучасній медицині, промисловості, науці та побуті. Проте, поряд із високою ефективністю, лазери становлять потенційну небезпеку для здоров'я людей та цілісності обладнання, якщо не дотримуватись відповідних норм безпеки. Безпечна експлуатація лазерних випромінювачів ґрунтується на чіткому дотриманні фізичних, технічних, організаційних та гігієнічних вимог, встановлених міжнародними стандартами, а також національними нормативними актами.

1. Класифікація лазерів за рівнем небезпеки

Основою для формулювання вимог до безпеки є класифікація лазерів відповідно до їх потужності та рівня потенційного ризику для людини. Найбільш загальноприйнята система класифікації регламентована стандартом ІЕС 60825-1, що виділяє такі класи:

- Клас 1 – безпечні в умовах нормальної експлуатації; не потребують спеціальних заходів захисту.
- Клас 1М – безпечні лише за умови недивлення в промінь через оптичні прилади (лупи, телескопи).

- Клас 2 – лазери видимого спектра (400–700 нм), безпечні при короткочасному впливі (до 0,25 с), за рахунок рефлекторного моргання.
- Клас 2М – подібні до класу 2, однак небезпечні при використанні оптичних засобів.
- Клас 3R – випромінювання становить помірний ризик, можливе пошкодження зору при тривалому або прямому опроміненні.
- Клас 3В – небезпечні для зору при прямому або дзеркально відбитому промені; зазвичай не спричиняють шкоди при дифузному відбитті.
- Клас 4 – потужні лазери, які є небезпечними для очей і шкіри навіть при розсіяному відбитті; можуть викликати пожежі.

Ця класифікація лежить в основі визначення обсягу заходів захисту та організації робочих місць.

2. Загальні принципи безпеки при роботі з лазерами

Ефективний захист при експлуатації лазерів передбачає впровадження системи інженерно-технічних, адміністративних та індивідуальних заходів:

- Ідентифікація джерела лазерного випромінювання – кожен лазерний пристрій має бути чітко маркований згідно з його класом безпеки.
- Контроль зони опромінення – має бути чітко визначена зона небезпечного випромінювання (так звана *лазерна зона*), в якій дозволений доступ лише навченому персоналу.
- Організація робочого простору – у приміщеннях, де використовуються лазери класу 3В або 4, повинні бути встановлені блокувальні пристрої, світлові індикатори активності, попереджувальні знаки та екрани.
- Мінімізація експозиції – слід уникати прямого погляду в промінь, а також використання відбивних поверхонь; лазерний промінь має бути спрямований нижче рівня очей.
- Застосування коліматорів та обмежувачів променя – для уникнення небажаного розсіювання світла.
- Регулярне технічне обслуговування – перевірка працездатності, герметичності корпусів, систем охолодження та блокувань.

3. Індивідуальні засоби захисту

Одним із ключових елементів безпеки є індивідуальні засоби захисту (ІЗЗ), особливо при роботі з лазерами високих класів (3В, 4):

- Лазерні захисні окуляри – підбираються відповідно до довжини хвилі лазера та щільності оптичного загасання (OD). Наприклад, при роботі з лазером на 1064 нм необхідно використовувати окуляри, які блокують це випромінювання, не спотворюючи навколишнє освітлення.
- Захисний одяг – для уникнення опіків шкіри або пошкоджень при потраплянні розсіяного випромінювання.
- Рукавички та маски – при використанні лазерів у хірургії, стоматології або дерматології.

4. Вентиляція та фільтрація

Під час взаємодії лазерного променя з біологічними тканинами або матеріалами утворюються токсичні аерозолі, димові хмари та гази (наприклад, вуглекислий газ, акролеїн, формальдегід). Тому важливо:

- Встановлювати витяжну вентиляцію локальної дії над робочим місцем.
- Використовувати фільтрувальні системи HEPA або з вугільними фільтрами.
- Забезпечити регулярну очистку та обслуговування фільтрів згідно з регламентом.

5. Пожежна безпека

Потужні лазери можуть бути джерелом займання, особливо в присутності горючих речовин або пилу:

- Забороняється використовувати лазери поблизу легкозаймистих матеріалів.
- Робоче місце має бути обладнане засобами пожежогасіння (вогнегасники, автоматичні системи).
- Усі електричні з'єднання та системи живлення повинні відповідати нормам пожежної безпеки.

6. Підготовка та навчання персоналу

Безпека при роботі з лазерами безпосередньо залежить від рівня підготовки персоналу:

- Всі оператори повинні проходити спеціальне навчання та періодичну атестацію.
- Необхідно вести журнал обліку інструктажів з техніки безпеки.
- Працівники повинні бути ознайомлені з планом евакуації, розташуванням засобів пожежогасіння, кнопками аварійного відключення.

7. Нормативна база та документообіг

В Україні безпеку лазерних пристроїв регламентують такі нормативні акти:

- ДСТУ ІЕС 60825-1: Вимоги до безпеки лазерних виробів.
- Санітарні норми та правила (ДСанПіН), що регламентують допустимі рівні опромінення.
- Технічні регламенти безпеки згідно з Законом України "Про охорону праці".
- Внутрішні інструкції з охорони праці, затверджені в медичних закладах або на підприємствах.

Висновок

Експлуатація лазерних випромінювачів вимагає високого рівня відповідальності та чіткого дотримання вимог безпеки. Поєднання адміністративних, технічних, санітарно-гігієнічних і персональних заходів дозволяє мінімізувати ризики для здоров'я та життя персоналу, а також гарантує ефективне й безпечне застосування лазерних технологій у практиці. Успішне впровадження цих вимог можливе лише за умови системного підходу до підготовки персоналу, контролю середовища, вибору відповідного обладнання та суворого дотримання регламентів.

Розділ 3. ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ І ПАРАМЕТРИ ВИПРОМІНЮВАЧА

3.1. Потужність, довжина хвилі та режим випромінювання

Основними характеристиками лазерного випромінювача є потужність, довжина хвилі та режим випромінювання, які визначають ефективність і

безпеку терапії. У цій статті розглянуто ці параметри та їх значення у фізіотерапевтичних апаратах.

Потужність лазерного випромінювача

- Потужність лазерного випромінювача є однією з ключових характеристик, яка визначає інтенсивність впливу на тканини. У фізіотерапії зазвичай використовують низькоінтенсивне лазерне випромінювання (Low-Level Laser Therapy, LLLT) або високоінтенсивне лазерне випромінювання (High-Intensity Laser Therapy, HILT). Потужність вимірюється у ватах (Вт) або міліватах (мВт) і впливає на глибину проникнення променя та його терапевтичний ефект.

- Низькоінтенсивна лазерна терапія (LLLT): Потужність таких апаратів зазвичай становить від 1 до 100 мВт. Наприклад, апарат АФЛ-1, який використовується в дерматології, стоматології та ортопедії, має потужність випромінювання на виході 20 мВт. Низька потужність забезпечує м'який вплив, стимулюючи регенерацію тканин, зменшуючи запалення та біль без термічного пошкодження.

- Високоінтенсивна лазерна терапія (HILT): Такі апарати, як ВТЛ Лазер Високої Інтенсивності, мають потужність до 12–20 Вт. Висока потужність дозволяє глибше проникнення в тканини, що ефективно для лікування глибоко розташованих уражень, таких як травми м'язів, тендинопатії чи дегенеративні захворювання суглобів.

- Правильний підбір потужності є критично важливим, оскільки занадто висока потужність може спричинити опіки або пошкодження тканин, а занадто низька – не забезпечить бажаного терапевтичного ефекту. Дози опромінення підбираються індивідуально залежно від стану пацієнта та мети терапії.

Довжина хвилі лазерного випромінювання

- Довжина хвилі визначає спектральний діапазон лазерного променя і впливає на його взаємодію з біологічними тканинами. Лазерне випромінювання у фізіотерапії зазвичай працює у видимому (400–700 нм) або інфрачервоному

(700–1100 нм) діапазонах. Кожна довжина хвилі має свої особливості поглинання та проникнення в тканини.

- Видимий діапазон (наприклад, 632,8 нм): Лазери з такою довжиною хвилі, як у апараті АФЛ-1, використовуються для поверхневого впливу, наприклад, у дерматології чи рефлексотерапії. Червоний лазер (635–650 нм) ефективний для стимуляції поверхневих тканин і зменшення запальних процесів.

- Інфрачервоний діапазон (780–1064 нм): Інфрачервоні лазери, такі як у апаратах «Ліка-терапевт М» або ВТЛ (з довжиною хвилі 980–1064 нм), здатні проникати глибше в тканини (до 5–10 см), що робить їх ефективними для лікування суглобів, м'язів і хребта,. Наприклад, довжина хвилі 1064 нм у НІЛТ-терапії створює фотомеханічні хвилі, які стимулюють мікроциркуляцію та блокують больові сигнали.

- Вибір довжини хвилі залежить від глибини ураження та типу тканини. Наприклад, довжини хвиль 800–1100 нм мають високе поглинання в тканинах, насичених рідиною, що сприяє ефективному лікуванню глибоких патологій.

Режим випромінювання

- Режим випромінювання лазера може бути безперервним або імпульсним, що також впливає на терапевтичний ефект.

- Безперервний режим: У цьому режимі лазер випромінює постійний потік світла, що забезпечує стабільний нагрів тканин і підходить для тривалого впливу. Наприклад, апарат АФЛ-1 працює в безперервному режимі з автоматичною витримкою часу від 1 до 999 секунд, що дозволяє точно дозувати опромінення. Безперервний режим ефективний для зменшення хронічного болю та стимуляції регенерації тканин.

- Імпульсний режим: Імпульсне випромінювання характеризується короткими спалахами світла, що зменшує термічне навантаження на тканини. Апарат «Стержень – ЛУ» використовує імпульсні інфрачервоні лазери з потужністю в імпульсі 12–15 Вт, що дозволяє проводити терапію малих

суглобів і дитячу фізіотерапію. Імпульсний режим сприяє створенню фотомеханічних хвиль, які ефективно блокують больові рецептори.

- Режим випромінювання вибирається залежно від мети терапії. Наприклад, імпульсний режим частіше застосовується для гострих станів, тоді як безперервний – для хронічних патологій.

Безпека та особливості застосування

Використання лазерних випромінювачів у фізіотерапії потребує дотримання суворих правил безпеки. Лазерне випромінювання, особливо у видимому (380–1400 нм) та інфрачервоному діапазонах, може бути небезпечним для сітківки ока або шкіри, якщо не застосовувати захисні окуляри чи щитки. Апарати повинні мати захисний кожух, а персонал – використовувати засоби індивідуального захисту. Крім того, перед початком терапії необхідна консультація лікаря, оскільки лазерна терапія має протипоказання, такі як онкологічні захворювання чи гострі інфекційні процеси.

Висновок

Лазерні випромінювачі у фізіотерапевтичних апаратах є потужним інструментом для лікування широкого спектра захворювань. Потужність (від 1 мВт до 20 Вт), довжина хвилі (від видимого до інфрачервоного діапазону) та режим випромінювання (безперервний або імпульсний) визначають глибину проникнення, терапевтичний ефект і безпеку процедури. Правильний підбір цих параметрів дозволяє досягти максимальної ефективності при лікуванні болю, запалень і травм, мінімізуючи ризик побічних ефектів. Лазерна терапія продовжує розвиватися, пропонуючи нові можливості для фізіотерапії завдяки вдосконаленню апаратних технологій.

3.2. Управління інтенсивністю та частотою імпульсів

Одним із ключових аспектів їхньої роботи є управління інтенсивністю та частотою імпульсів, що дозволяє адаптувати терапію до конкретних клінічних

потреб. Ці параметри впливають на ефективність, безпеку та терапевтичний ефект. У цій статті розглянуто факти, параметри, можливі схеми та елементи конструкції, які забезпечують управління інтенсивністю та частотою імпульсів у лазерних апаратах.

Факти та параметри

- Інтенсивність випромінювання:

Інтенсивність лазерного випромінювання вимірюється у ватах на квадратний сантиметр (Вт/см²) і визначає кількість енергії, що передається тканинам за одиницю часу. У фізіотерапії найпоширеніші значення інтенсивності для низькоінтенсивної лазерної терапії (LLLT) коливаються від 0,01 до 0,1 Вт/см², тоді як для високоінтенсивної терапії (HILT) – від 1 до 10 Вт/см².

Наприклад, апарат BTL-6000 High Intensity Laser має максимальну інтенсивність до 12 Вт/см², що дозволяє глибоке проникнення в тканини (до 10 см) для лікування суглобів і м'язів.

Управління інтенсивністю здійснюється через регулювання вихідної потужності лазера (від 1 мВт до 20 Вт залежно від моделі) та площі опромінення.

$$I = \frac{P}{A}$$

Де I – інтенсивність (Вт/см²), P – потужність (Вт), A – площа опромінення (см²). Наприклад, для $P = 0,01$ Вт, $A = 1$ см², $I = 0,01$ Вт/см².

- Частота імпульсів:

Частота імпульсів у фізіотерапевтичних лазерах варіюється від 1 Гц до 10 кГц. Низькі частоти (1–100 Гц) ефективні для стимуляції регенерації тканин і зменшення болю, тоді як високі частоти (1–10 кГц) застосовуються для створення фотомеханічного ефекту, що блокує больові сигнали.

Наприклад, апарат «Ліка-терапевт М» дозволяє налаштування частоти від 10 до 5000 Гц, що дає змогу адаптувати режим до гострих або хронічних станів.

Тривалість імпульсу (ширина імпульсу) зазвичай становить від 50 нс до 500 мкс, що впливає на термічне навантаження тканин.

$$P_{\text{avg}} = P_{\text{peak}} \cdot D$$

Де P_{avg} – середня потужність, P_{peak} – пікова потужність, D – коефіцієнт заповнення (0–1). Наприклад, для $P_{\text{peak}} = 1$ Вт, $D = 0,5$, $P_{\text{avg}} = 0,5$ Вт.

- Терапевтичний ефект:

Низькочастотні імпульси (10–100 Гц) стимулюють біохімічні процеси, такі як синтез АТФ і регенерація клітин.

Високочастотні імпульси (1–10 кГц) створюють фотомеханічні хвилі, які ефективні для знеболення та зменшення запальних процесів.

$$f = \frac{1}{T}$$

Де f – частота (Гц), T – період (с). Наприклад, для $T = 0,001$ с, $f = 1000$ Гц.

Висновок

Управління інтенсивністю та частотою імпульсів у лазерних фізіотерапевтичних апаратах є критично важливим для забезпечення ефективності та безпеки терапії. Інтенсивність (0,01–10 Вт/см²) і частота (1 Гц–10 кГц) визначають глибину впливу та тип терапевтичного ефекту. Схеми управління, такі як ШІМ, частотна модуляція та системи зворотного зв'язку, разом із конструктивними елементами (лазерні діоди, мікроконтролери, драйвери, оптика) забезпечують точне налаштування цих параметрів. Сучасні апарати, такі як VTL-6000 або «Ліка-терапевт М», демонструють високий рівень автоматизації та безпеки, що робить лазерну терапію доступною та ефективною для широкого спектра медичних застосувань.

3.3. Сумісність із фізіотерапевтичним обладнанням

Лазерні випромінювачі є ключовими компонентами фізіотерапевтичних апаратів, які використовуються для лікування запалень, болю та регенерації тканин. Сумісність лазерних випромінювачів із фізіотерапевтичним обладнанням визначає можливість їх інтеграції в комплексні терапевтичні системи, такі як магнітотерапія, ультразвук чи електростимуляція. Цей документ описує факти, параметри, схеми та елементи конструкції, що забезпечують сумісність лазерних випромінювачів із іншими фізіотерапевтичними пристроями.

Факти та параметри

- Інтеграція з іншими методами: Лазерна терапія часто комбінується з магнітотерапією (наприклад, апарат VTL-4000) або ультразвуковою терапією для посилення терапевтичного ефекту. Наприклад, комбінація лазера з магнітним полем (0,1–0,5 Тл) підвищує мікроциркуляцію в тканинах.
- Стандарти інтерфейсів: Лазерні випромінювачі сумісні з фізіотерапевтичними апаратами через стандартні інтерфейси, такі як USB, RS-485 або Bluetooth, що забезпечують синхронізацію параметрів (інтенсивність, частота).
- Безпека: Сумісність передбачає відповідність стандартам безпеки (наприклад, ІЕС 60601-1 для медичного обладнання), щоб уникнути електромагнітних перешкод або термічного впливу.



Параметри сумісності

- Живлення: Лазерні випромінювачі потребують стабільного живлення (5–24 В, 0,5–10 А залежно від потужності). Наприклад, апарат «Ліка-терапевт М» працює від 220 В із трансформатором для стабілізації струму.

- Довжина хвилі: Лазери з довжиною хвилі 635–1064 нм (наприклад, 980 нм у VTL-6000) сумісні з оптичними системами інших апаратів, що використовують інфрачервоне випромінювання.

- Частота імпульсів: Частоти 1–10 кГц дозволяють синхронізувати лазер із імпульсними режимами електростимуляторів (наприклад, частота 50–100 Гц для TENS).

- Інтерфейси управління: Сучасні апарати підтримують протоколи Modbus або CAN для інтеграції з іншими пристроями.

Можливі схеми сумісності

Схема інтеграції з магнітотерапією

Лазерний випромінювач може бути інтегрований із магнітотерапевтичним апаратом через єдиний блок управління. Схема включає:

- Мікроконтролер: Синхронізує частоту лазерних імпульсів (10–1000 Гц) із частотою магнітного поля (1–50 Гц).
- Драйвер: Керує лазером і магнітними котушками.
- Інтерфейс зв'язку: RS-485 або Bluetooth для передачі даних між пристроями.

Схема комбінації з ультразвуковою терапією Лазер і ультразвук комбінуються для глибокого впливу на тканини. Схема:

- Контролер синхронізації: Координує роботу лазера (наприклад, 980 нм, 10 Вт) і ультразвукового випромінювача (1–3 МГц).
- Оптична система: Фокусує лазерний промінь на ту ж ділянку, що й ультразвук.

Система безпеки: Перевіряє сумарну енергію для уникнення перегріву тканин.

Схема з електростимуляцією Лазер синхронізується з імпульсами електростимулятора (TENS або EMS). Схема:

- Мікроконтролер: Задає частоту лазера (50–1000 Гц) відповідно до частоти електростимуляції (50–150 Гц).
- Датчик зворотного зв'язку: Контролює інтенсивність обох систем.
- Інтерфейс: USB або CAN для обміну даними.

Опис блоку схеми

Блок-схема ілюструє інтеграцію лазерного випромінювача з фізіотерапевтичним обладнанням, включаючи центральний контролер, лазерний діод, модуль магнітотерапії, ультразвуковий аплікатор і пристрій електростимуляції. Схема використовує з'єднання RS-485 або Bluetooth. Графіки синхронізованих імпульсів демонструють узгодженість частот.

Елементи схеми:

- Центральний контролер: Основний модуль управління, синхронізує всі пристрої. Розташований у центрі схеми.
- Лазерний діод: Генерує випромінювання (довжина хвилі 635–1064 нм).
- Модуль магнітотерапії: Виробляє магнітне поле (0,1–0,5 Тл).
- Ультразвуковий аплікатор: Генерує ультразвук (1–3 МГц).
- Пристрій електростимуляції: Забезпечує імпульси TENS/EMS (50–150 Гц).
- З'єднання: RS-485 або Bluetooth.

Розділ 4. РОЗРОБКА ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА

4.1. Перспективи вдосконалення конструкції та функціональності

Одним із ключових напрямів удосконалення сучасних фізіотерапевтичних приладів є покращення конструкції та функціональних можливостей лазерного випромінювача — основного елементу системи лазерної терапії. Саме він визначає якість, точність та безпечність лікувального впливу, що здійснюється на організм пацієнта. Перспективи вдосконалення цього компонента напряму пов'язані з новітніми технологічними досягненнями в галузі електроніки, оптики та біомедичної інженерії.

Перш за все, актуальною є розробка модульної конструкції лазерного випромінювача, яка дозволить оперативно замінювати або доповнювати окремі вузли пристрою в залежності від клінічних потреб. Такий підхід забезпечує гнучкість у використанні пристрою, підвищує його ремонтпридатність та економічну ефективність.

Другим напрямом є інтеграція інтелектуальних систем керування. Завдяки використанню мікропроцесорів та сенсорних інтерфейсів з алгоритмами штучного інтелекту можливо реалізувати автоматичний підбір параметрів терапії залежно від зони впливу, типу захворювання та індивідуальних характеристик пацієнта.

Також перспективною є мініатюризація лазерного випромінювача із збереженням потужності випромінювання, що дозволить інтегрувати його в портативні або носимі фізіотерапевтичні прилади. Це створює умови для амбулаторного та домашнього використання пристроїв, що особливо актуально у випадках хронічних захворювань або обмеженої мобільності пацієнтів.

Одним із важливих аспектів є також підвищення безпеки та надійності лазерного випромінювача. Наприклад, впровадження багаторівневої системи захисту (оптичні фільтри, аварійне відключення, температурний контроль) значно зменшує ризики опіків або перевантаження тканин. У новітніх моделях передбачено контроль температури поверхні аплікатора, що виключає перегрів навіть при тривалій роботі.

Прикладом ефективного вдосконалення є система MLS® Laser Therapy, яка поєднує два типи лазерного випромінювання з різними довжинами хвиль у пульсуючому та безперервному режимах. Це дозволяє досягати більш вираженого терапевтичного ефекту — зменшення болю, набряку та прискорення загоєння. Інші приклади включають лазерні системи BTL та Zimmer, які вже мають попередньо налаштовані програми для різних патологій, що спрощує роботу медичного персоналу.

Враховуючи потреби сучасної медицини, доцільно впроваджувати багатофункціональні дисплеї з графічним інтерфейсом, які не лише відображають параметри роботи, але й містять інтерактивні підказки, інструкції, а також можливість оновлення програмного забезпечення.

Окрім вищезазначених напрямів, значний потенціал мають технології оптичного зондування та зворотного біофізичного зв'язку, які дозволяють у режимі реального часу оцінювати реакцію тканин на вплив лазерного випромінювання. Це забезпечує підвищення точності та персоналізації лікування.

Розширення функціональності можливе також за рахунок впровадження мультиспектрального лазерного впливу, коли один прилад генерує кілька довжин хвиль одночасно. Це дозволяє впливати на різні шари тканин і біохімічні процеси синергетично, підвищуючи клінічну ефективність терапії.

Сучасні апарати також все частіше орієнтовані на бездротове підключення до комп'ютерних систем, електронних медичних карток або мобільних застосунків. Це відкриває можливості для дистанційного моніторингу процедур, аналітики ефективності та хмарного збереження даних.

Значний інтерес викликає також розробка адаптивних лазерних насадок, здатних змінювати геометрію або фокусну відстань випромінювання в залежності від зони впливу.

Ще одним напрямом розвитку є екологічність та енергоефективність пристроїв. Удосконалення елементної бази дозволяє зменшити енергоспоживання при збереженні високої потужності випромінювання, що особливо актуально для мобільних і автономних приладів.

Крім цього, зростає інтерес до біосумісних матеріалів корпусу та контактних елементів лазерних аплікаторів, що забезпечують гігієнічність, запобігають алергічним реакціям та відповідають вимогам стерилізації.

Таким чином, перспективи вдосконалення конструкції та функціональності лазерного випромінювача охоплюють широку сферу інженерних, програмних та клінічних інновацій. Їх реалізація дозволить створити більш ефективні, універсальні та безпечні засоби для лазерної терапії, що відповідатимуть високим вимогам сучасної медичної практики та сприятимуть розширенню доступу до якісної фізіотерапії.

Розділ 5. ВИСНОВКИ

5.1. Загальні підсумки дослідження та практичні рекомендації

Дослідження, проведене в рамках бакалаврської кваліфікаційної роботи, присвячене розробці лазерного випромінювача для фізіотерапевтичного апарату, дозволило комплексно проаналізувати сучасні підходи до створення таких пристроїв, їх технічні характеристики, конструктивні особливості та вимоги до безпеки. Основні результати та висновки дослідження можна узагальнити наступним чином:

1. Актуальність теми та медико-технічне обґрунтування: Лазерна терапія є перспективним напрямом фізіотерапії, що забезпечує ефективне лікування широкого спектра патологій завдяки точному та контрольованому впливу на біологічні тканини. Розробка лазерного випромінювача з регульованою потужністю, довжиною хвилі та режимом роботи є актуальною задачею, що сприяє підвищенню ефективності фізіотерапевтичних процедур, зниженню їхньої вартості та розширенню доступності для медичних закладів.
2. Аналіз сучасного стану: Проведений огляд літератури та сучасних лазерних систем показав, що напівпровідникові лазери з довжиною хвилі 780–980 нм є оптимальними для фізіотерапії завдяки глибокому проникненню в тканини, біостимулюючому ефекту та енергоефективності. Водночас, обмеженнями існуючих систем є недостатня гнучкість у налаштуванні параметрів, складність інтеграції з іншими фізіотерапевтичними методами та висока вартість.
3. Технічна розробка: Запропонована структурна схема лазерного випромінювача включає активне середовище (напівпровідниковий лазер), оптичний резонатор, систему охолодження, блок керування та оптичну систему формування променя. Розроблено принципову електричну схему, яка забезпечує стабільну роботу пристрою, а також проведено моделювання основних блоків, що підтвердило їхню ефективність. Особлива увага приділена системі охолодження (з використанням термоелектричних модулів Пельтьє) та стабілізації випромінювання, що гарантує надійність і безпеку при тривалому використанні.
4. Безпека та сумісність: Розроблений лазерний випромінювач відповідає стандартам безпеки (зокрема, ІЕС 60601-2-22), що включають захист від надмірного випромінювання, ергономічний дизайн та системи аварійного

відключення. Пристрій сумісний з іншими фізіотерапевтичними системами (магнітотерапія, ультразвук, електростимуляція) завдяки стандартним інтерфейсам (RS-485, Bluetooth) та синхронізації параметрів.

5. Перспективи вдосконалення: Запропоновано низку інноваційних рішень, таких як модульна конструкція, інтеграція інтелектуальних систем керування з алгоритмами штучного інтелекту, мультиспектральний вплив, мініатюризація та використання біосумісних матеріалів. Ці вдосконалення спрямовані на підвищення енергоефективності, портативності, безпеки та персоналізації терапії.

Ексимерний лазер

1. Загальна інформація

Ексимерний лазер — це тип імпульсного газового лазера, який використовує збуджені димери (ексимери) для генерації ультрафіолетового (УФ) випромінювання. Назва "ексимер" походить від слів "excited" (збуджений) та "dimer" (димер), оскільки активне середовище такого лазера формується за рахунок нестабільних молекул, які існують лише у збудженому стані. Ці молекули утворюються внаслідок короткочасної взаємодії інертного газу (наприклад, криптону Kr) з галогеном (наприклад, фтором F₂ або гідрогенфторидом HF).

Найбільш поширеним типом ексимерного лазера є **KrF-лазер**, в якому активне середовище утворюється при взаємодії криптону (Kr) та фтору (F₂). У результаті збудження утворюється молекула KrF*, яка є стабільною лише у збудженому стані. При поверненні до основного енергетичного рівня ця молекула розпадається, випромінюючи фотон ультрафіолетового світла з довжиною хвилі **248 нм**.

Ключові особливості KrF-ексимерного лазера:

- **Довжина хвилі:** 248 нм (глибокий ультрафіолет), що робить його корисним у мікроелектроніці та літографії.
- **Імпульсний режим роботи:** випромінювання здійснюється у вигляді коротких (20–100 нс) потужних імпульсів.
- **Висока пікова потужність:** лазер може генерувати імпульси з енергією

до кількох джоулів.

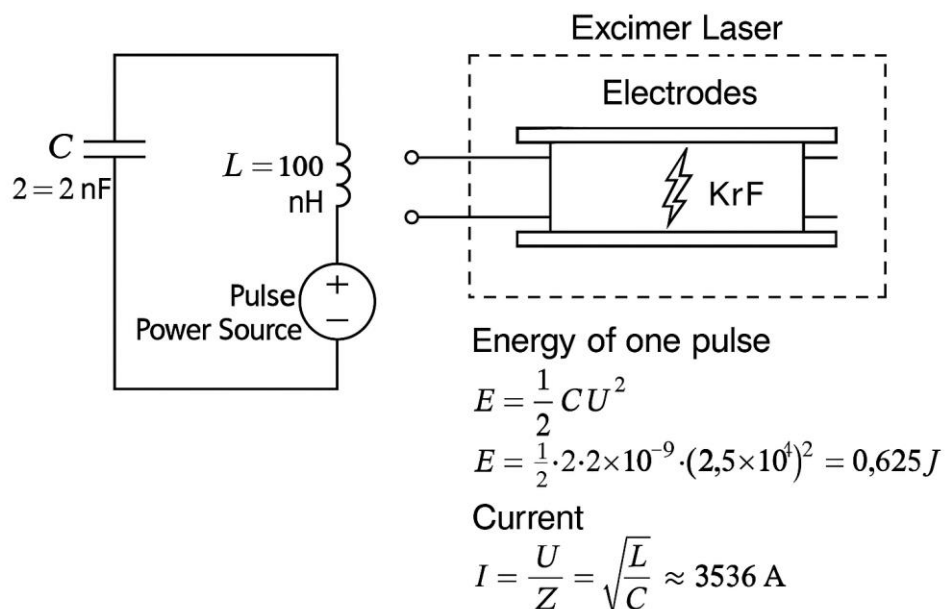
- **Газова суміш:** зазвичай включає криптон (Kr), фтор (F₂) і буферний газ (наприклад, неон або гелій).
- **Розрядна камера:** енергія імпульсу подається через електроди, де виникає електричний розряд у газовій суміші.

Ексимерні лазери знайшли широке застосування в таких галузях:

- **Мікроелектроніка та фотолітографія** (виробництво мікросхем),
- **Офтальмологія** (рефракційна хірургія — лазерна корекція зору),
- **Наукові дослідження** (спектроскопія, фотохімія),
- **Матеріалообробка** (точне травлення, мікрообробка поверхонь).

2. Схема з'єднання

Нижче зображено базову електричну схему живлення та лазерного розряду:



3. Розрахунки

Обрані параметри:

- Ємність: $C = 2 \text{ нФ}$
- Індуктивність: $L = 100 \text{ нГн}$
- Напруга: $U = 25 \text{ кВ}$

Енергія одного імпульсу:

$$E = 1/2 * C * U^2 = 0.625 \text{ Дж}$$

$$\text{Імпеданс: } Z = \sqrt{L / C} \approx 7.07 \text{ Ом}$$

$$\text{Струм імпульсу: } I = U / Z \approx 3536 \text{ А}$$

4. Принцип дії

Конденсатор заряджається до високої напруги (~25–30 кВ), після чого розряджається через індуктивність на електроди розрядної камери, заповненої газовою сумішшю. В результаті утворюється короткий високострумний імпульс, який ініціює розряд, що приводить до генерації УФ-випромінювання.

5. Висновок

Наведена схема є основою для побудови лабораторного або промислового ексимерного лазера. Всі розрахунки враховують короткочасний імпульсний режим роботи та орієнтовані на роботу лазера типу KrF.

Список використаних джерел

1. ДСТУ ІЕС 60825-1:2014. Безпека лазерних виробів. Частина 1. Класифікація обладнання, вимоги та настанови користувача. – Київ: Держспоживстандарт України, 2014. – 68 с.
2. ДСТУ ІЕС 60601-2-22:2014. Медичне електричне обладнання. Частина 2-22. Особливі вимоги до безпеки та основних характеристик діагностичних і терапевтичних лазерних приладів. – Київ: Держспоживстандарт України, 2014. – 45 с.
3. Біомедична інженерія: Підручник / За ред. В. О. Шаповалова. – Київ: Видавничий дім «Професіонал», 2018. – 432 с.
4. Лазерна терапія в медицині: Монографія / О. В. Ковальчук, І. С. Сидорук. – Львів: ЛНМУ, 2020. – 280 с.
5. Chung, H., Dai, T., Sharma, S. K., et al. The Nuts and Bolts of Low-level Laser (Light) Therapy. *Annals of Biomedical Engineering*, 2012, Vol. 40, No. 2, pp. 516–533.
6. Karu, T. I. Photobiology of Low-Power Laser Effects. *Health Physics*, 1989, Vol. 56, No. 5, pp. 691–704.
7. Hamblin, M. R., Demidova, T. N. Mechanisms of Low-Level Light Therapy.

Proceedings of SPIE, 2006, Vol. 6140, pp. 1–12.

8. Гнатюк, М. С. Основи лазерної техніки в медицині: Навчальний посібник. – Київ: НУБіП України, 2019. – 156 с.
9. BTL Industries. *High Intensity Laser Therapy: Technical Specifications*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.btlnet.com/products/laser-therapy/high-intensity-laser> (дата звернення: 15.03.2025).
10. Скрипник, Ю. А., Опришко, О. О. Сучасні методи проектування біомедичних пристроїв: Навчальний посібник. – Київ: НУБіП України, 2023. – 204 с.
11. Mester, E., Mester, A. F., Mester, A. The Biomedical Effects of Laser Application. *Lasers in Surgery and Medicine*, 1985, Vol. 5, No. 1, pp. 31–39.
12. Ткачук, В. П. Лазерні технології в фізіотерапії: Навчальний посібник. – Харків: ХНМУ, 2021. – 190 с.
13. International Electrotechnical Commission. *IEC 60601-1: Medical Electrical Equipment – General Requirements for Basic Safety and Essential Performance*. – Geneva: IEC, 2012. – 395 p.
14. Пономаренко, Г. М. Фізіотерапія: Підручник. – Київ: Медицина, 2017. – 512 с.
15. MLS® Laser Therapy: Clinical Applications and Technical Overview. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.asalaser.com/en/mls-laser-therapy> (дата звернення: 20.03.2025).