

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

**В.о. завідувача кафедри**  
автоматики та робототехнічних систем  
ім. акад. І.І. Мартиненка  
(назва кафедри)

к.т.н., доц. \_\_\_\_\_ О.О. Опришко  
(підпис) (ПІБ)

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025 р.

**БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на тему "Біомедична система для транскранеальної стимуляції"

Спеціальність: 163 - "Біомедична інженерія"

**Гарант освітньої програми**

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

\_\_\_\_\_ (підпис)

Никифорова Л.Є.  
(П.І.Б.)

**Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи**

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

\_\_\_\_\_ (підпис)

Никифорова Л.Є.  
(П.І.Б.)

**Виконав**

\_\_\_\_\_ (підпис)

Бургун Д.С.  
(П.І.Б.)

**КИЇВ – 2025**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**В.о. завідувача кафедри**  
автоматики та робототехнічних систем  
ім. акад. І.І. Мартиненка  
(назва кафедри)

к.т.н., доц. **О.О. Опришко**  
(підпис) (ПБ)

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту**

**Бургуну Дмитру Сергійовичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 163 - "Біомедична інженерія"

1. Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: «Біомедична система для транскранеальної стимуляції».

затверджена наказом ректора НУБіП України від "12" 11 2024 р. № 2023 "С"

2. Термін подання завершеної роботи на кафедру "31" травня 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 систем

3.3. Наукова література з тематики бакалаврської кваліфікаційної роботи.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

4.1. Аналіз стану медичної проблеми транскранеальної стимуляції

4.2. Дослідження електростимуляції мозоку як біологічного об'єкту .

4.3. Огляд відомих математичних моделей метод впливу на когнітивні функції людини

- 4.4. Вибір технічних засобів для системи транскранеальної стимуляції
- 4.5. Програмні засоби для реалізації системи транскранеальної стимуляції
- 4.5. Схеми біомедичної системи (структурна, функціональна, принципова електрична).
- 4.6. Кошторисні розрахунки.
- 4.7. Техніка безпеки і охорона праці.
- 5. Перелік графічних документів:
  - 5.1. Структурна і функціональна схеми біомедичної системи транскранеальної стимуляції
  - 5.2. Схема електрична принципова біомедичної системи транскранеальної стимуляції
  - 5.3. Алгоритм роботи приладу транскранеальної стимуляції

Дата видачі завдання "19" грудня 2024 року

**Керівник  
бакалаврської  
кваліфікаційної роботи**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Никифорова Л.Є.  
(П.І.Б.)

**Завдання прийняв до  
виконання**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Бургун Д.С.  
(П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота налічує 61 сторінка, 28 ілюстрацій, 12 таблиць та 26 джерел за переліком посилань.

Мета дипломної роботи: розробка біомедичної системи для транскраніальної стимуляції постійним струмом.

Методи: аналіз літературних джерел за темою, узагальнення знань про використання методу для покращення стану хворої та здорової людини. Розробка та моделювання головних ланцюгів приладу.

Отримані результати: підтверджено безпечність та можливість використання методу транскраніальної стимуляції постійним струмом, як метод лікування психічних розладів та метод впливу на когнітивні функції людини, сформовані медико-технічні дані та досліджено вплив струму на піделектродну область. Розроблено структурну схему системи та принципову електричну схему, виконані підрахунки номіналів елементів, розроблено алгоритм роботи інтерфейсу; виконано моделювання роботи приладу для ТМС.

*Ключові слова: транскраніальна стимуляція, прилад, біомедична система, алгоритм, інтерфейс, моделювання.*

## ABSTRACT

The thesis consists of 61 pages, 28 illustrations, 12 tables and 26 sources according to the list of references.

The purpose of the thesis: development of a biomedical system for transcranial direct current stimulation.

Methods: analysis of literary sources on the topic, generalization of knowledge about the use of the method to improve the condition of a sick and healthy person. Development and modeling of the main circuits of the device.

Results obtained: the safety and possibility of using the transcranial direct current stimulation method as a method of treating mental disorders and a method of influencing human cognitive functions were confirmed, medical and technical data were formed and the effect of the shock on the subelectrode area was studied. A structural diagram of the system and a schematic electrical diagram were developed, calculations of the element ratings were made, an interface operation algorithm was developed; modeling of the operation of the device for TMS was performed.

*Keywords: transcranial stimulation, device, biomedical system, algorithm, interface, modeling.*

## ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. ОГЛЯД СТАНУ БІОМЕДИЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ТРАНСКРАНЕАЛЬНОЇ СТИМУЛЯЦІЇ.	9
1.1. Аналіз сучасного стану проблеми	9
1.2 Класифікація методів транскранеальної стимуляції	11
1.3. Застосування транскраніальної стимуляції при різних захворюваннях мозоку	15
2. МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ МЕТОДУ ТРАНСКРАНІАЛЬНОЇ СТИМУЛЯЦІЇ ПОСТІЙНИМ СТРУМОМ	23
2.1 Основи методу транскраніальної стимуляції постійним струмом	23
2.2 Оцінка струмів, що протікають по скальпу та черепу та визначення потенціалу мозку в піделектродній області	25
3. РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРИЛАДУ	29
3.1 Технічні характеристики апарату	29
3.2 Структурна схема апарату	30
3.3 Розробка та моделювання принципової електричної схеми	32
4. МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕРФЕЙСУ	40
4.1. Технічне завдання для моделювання інтерфейсу приладу ТМС	40
4.2. Блок-схема роботи інтерфейсу	40
4.3. Розробка програми для інтерфейсу	42
4.4. Тестування роботи інтерфейсу	48
5. ОХОРОНА ПРАЦІ	51
5.1. Небезпека ураження людини електричним струмом	51
5.2. Біологічна безпека	
5.3. Небезпека пожежі	53
5.3. Розробка «Інструкції по техніці безпеки при експлуатації приладу для транскраніальної магнітної безпеки»	53
ВИСНОВКИ	58
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	59

## ВСТУП

Біомедичні системи для транскраніальної стимуляції становлять собою складні технологічні рішення, призначені для неінвазивного впливу на головний мозок через черепну коробку за допомогою електромагнітних, електричних або ультразвукових сигналів. Основна мета таких систем полягає у модуляції або активації нейронної активності з терапевтичною, діагностичною або дослідницькою метою. Завдяки швидкому розвитку нейротехнологій транскраніальна стимуляція набула широкого розповсюдження в різних галузях медицини та науки, включаючи неврологію, психіатрію, когнітивну нейронауку та реабілітаційну медицину.

До найпоширеніших методів транскраніального впливу відноситься транскраніальна магнітна стимуляція (ТМС), яка базується на використанні коротких магнітних імпульсів для активації або пригнічення нейронної активності. Цей підхід активно застосовується у лікуванні депресивних станів, хронічного больового синдрому, а також у реабілітації пацієнтів після перенесеного інсульту. Іншим поширеним методом є транскраніальна електрична стимуляція (ТЕС), яка передбачає передачу слабого електричного струму через електроди, розміщені на поверхні голови. Відомими підвидами ТЕС є стимуляція постійним струмом (tDCS) та стимуляція змінним струмом (tACS). Ці методики використовуються для покращення когнітивних здібностей, зменшення проявів тривожних розладів, а також як допоміжна терапія при хронічному болю.

Окрему увагу привертає транскраніальна ультразвукова стимуляція (ТУС), яка є порівняно новим напрямом досліджень. Вона ґрунтується на застосуванні фокусованого ультразвуку для модифікації нейронної активності. Хоча ця технологія перебуває на ранніх етапах вивчення, особливо в контексті нейродегенеративних захворювань, вона демонструє багатообіцяючі результати й активно досліджується науковими групами по всьому світу.

Будь-яка біомедична система для транскраніальної стимуляції складається з низки ключових компонентів. Основним елементом є генератор імпульсів, який

відповідає за створення електричних, магнітних або ультразвукових сигналів. Для передачі цих стимулів безпосередньо до мозку використовуються електроди або магнітні котушки, залежно від типу стимуляції. Роботою системи керує спеціальне програмне забезпечення, яке забезпечує гнучке налаштування параметрів впливу, таких як інтенсивність, тривалість та частота стимуляцій. Для контролю ефективності та безпеки впливу використовуються системи моніторингу, наприклад, електроенцефалографія (ЕЕГ), які дозволяють оцінити зміни в мозковій активності у відповідь на стимул.

Основними перевагами транскраніальної стимуляції є її неінвазивний характер, відносна безпечність при дотриманні встановлених протоколів, а також широкі можливості застосування в медичній практиці. Разом з тим, ця технологія має й низку недоліків. Ефективність стимуляції може суттєво змінюватися залежно від індивідуальних особливостей пацієнта, існує потреба в точному налаштуванні параметрів впливу, а також можуть спостерігатися короткотривалі побічні ефекти, такі як головний біль або запаморочення.

Узагальнюючи, можна сказати, що транскраніальні біомедичні системи є перспективним напрямом сучасної нейромедицини, здатним суттєво покращити якість життя пацієнтів з різноманітними неврологічними та психічними порушеннями. Продовження досліджень у цій сфері відкриває нові горизонти для застосування інноваційних методів стимуляції мозку в клінічній практиці.

## РОЗДІЛ 1.

# ОГЛЯД СТАНУ БІОМЕДИЧНОЇ ПРОБЛЕМИ ТРАНСКРАНІАЛЬНОЇ СТИМУЛЯЦІЇ

### 1.1 Принципи роботи транскраніальної стимуляції

Транскраніальна стимуляція головного мозку є сучасним методом неінвазивного впливу, що базується на фізичних принципах передачі слабких електричних, магнітних або механічних сигналів через череп. Основною метою цього методу є модулювання нейрональної активності з терапевтичною або дослідницькою ціллю, без необхідності хірургічного втручання. Його застосування охоплює широку сферу — від нейрореабілітації до лікування психоневрологічних станів.

Принципи роботи транскраніальної стимуляції ґрунтуються на здатності зовнішніх фізичних сигналів взаємодіяти з електрофізіологічними процесами в мозку. Відомо, що мозкова діяльність реалізується через електричні імпульси, які виникають у нейронах. Зовнішній вплив у вигляді контрольованого електричного струму або електромагнітного поля здатен змінювати мембранний потенціал клітин, унаслідок чого нейрони можуть активуватися або, навпаки, пригнічуватися. Така модуляція має значення при корекції дисфункцій мозкової активності, характерних для ряду неврологічних та психічних розладів.

Біофізична суть дії транскраніальних стимуляторів полягає в тому, що електричний або магнітний імпульс, спрямований через череп, викликає поляризацію нейрональних мембран. Це може призвести до генерації потенціалу дії або до зниження збудливості клітини, залежно від спрямування та сили впливу. Застосовуючи певну частоту, амплітуду, тривалість імпульсу і геометрію розташування електродів або котушок, можна досягати різного терапевтичного ефекту. У результаті змінюється синаптична активність, покращується пластичність мозку, що є особливо важливим у лікуванні хронічних болів, депресії, тривожних розладів, а також у нейрореабілітації після інсульту.

Серед найпоширеніших методів транскраніальної стимуляції варто виокремити транскраніальну стимуляцію постійним струмом (tDCS), транскраніальну магнітну стимуляцію (TMS) та транскраніальну стимуляцію змінним струмом (tACS). Метод tDCS передбачає подачу слабого постійного струму в діапазоні 1–2 мА між двома електродами, розташованими на шкірі голови. Відомо, що анод у такій схемі стимулює активність нейронів, тоді як катод її пригнічує. Метод є безболісним, не потребує складного обладнання і широко застосовується у дослідженнях когнітивних функцій.

Транскраніальна магнітна стимуляція (TMS) реалізується через генерацію короткочасного сильного магнітного імпульсу за допомогою індукційної котушки. Магнітне поле, проходячи крізь череп, створює електричний струм у корі головного мозку, що й призводить до активації нейронів у цільовій ділянці. Цей метод дозволяє точково впливати на певні структури мозку і має високий потенціал при лікуванні фармакорезистентної депресії, неврологічних розладів і хронічного болю.

Ще одним методом є tACS — транскраніальна стимуляція змінним струмом, яка подає синусоїдальний струм змінної частоти на мозкову тканину. Такий підхід дає змогу синхронізувати мозкову активність у певних частотних діапазонах, що може позитивно впливати на когнітивну продуктивність та загальну нейродинаміку.

З технічного погляду, система транскраніальної стимуляції є складним техніко-біомедичним пристроєм, до складу якого входять генератор струму або імпульсів, модуль живлення, мікропроцесорний контролер для регулювання параметрів стимуляції, електроди або магнітні котушки, а також програмне забезпечення, що забезпечує точне налаштування й контроль процесу. Система має забезпечувати стабільність параметрів струму або поля, відповідність медичним нормам безпеки, а також враховувати індивідуальні анатомічні характеристики пацієнта, які можуть впливати на розподіл струму в тканинах.

Щодо безпеки, то транскраніальна стимуляція зазвичай виконується в межах строго регламентованих протоколів. Сила струму або магнітного поля не

перевищує безпечні межі, щоб уникнути перегріву тканин або хімічного пошкодження шкіри. Сеанси стимуляції тривають у середньому від 10 до 30 хвилин і можуть проводитись курсами, залежно від клінічних цілей. Побічні ефекти, як правило, є мінімальними та короткочасними, але потребують моніторингу.

Медико-технічний огляд біомедичної системи для транскраніальної стимуляції є невід'ємною складовою безпечного клінічного використання таких пристроїв. Огляд включає в себе комплексну перевірку технічного стану обладнання, правильність функціонування електронних компонентів, цілісність електродів або котушок, а також відповідність програмного забезпечення встановленим стандартам. Крім того, надзвичайно важливою є оцінка ефективності подачі імпульсів, стабільності сигналу, відповідності робочих параметрів і дотримання заходів безпеки. Такі процедури повинні виконуватись виключно кваліфікованими спеціалістами, з обов'язковим документуванням кожного етапу технічної перевірки. Це дозволяє забезпечити не лише стабільність роботи системи, а й мінімізувати будь-які потенційні ризики для пацієнта.

Таким чином, транскраніальні біомедичні системи є складними технологічними комплексами, що вимагають ретельної технічної підтримки, професійної експлуатації та науково обґрунтованого підходу до вибору параметрів стимуляції. Їх медико-технічний огляд має фундаментальне значення для ефективного, безпечного і науково вивіреного застосування у медичній практиці.

## **1.2 Класифікація методів транскраніальної стимуляції**

Методи транскраніальної стимуляції головного мозку поділяються на кілька основних типів залежно від природи прикладеного впливу, форми сигналу, інтенсивності струму або поля, а також наявності чи відсутності імпульсного режиму. Класифікація цих методів дозволяє не лише систематизувати вже відомі підходи, але й окреслити їхні технічні і

функціональні характеристики, показники безпеки, клінічну ефективність та потенційні напрямки застосування. Найбільш поширеними є такі основні класи транскраніальної стимуляції: транскраніальна магнітна стимуляція (ТМС), транскраніальна електрична стимуляція (ТЕС), транскраніальна стимуляція постійним струмом (tDCS), транскраніальна стимуляція змінним струмом (tACS), транскраніальна стимуляція шумовим струмом (tRNS), а також експериментальні гібридні методи, які поєднують магнітні й електричні сигнали або інтегрують біозворотний зв'язок.

Транскраніальна магнітна стимуляція (ТМС) заснована на застосуванні коротких імпульсів магнітного поля високої інтенсивності, яке індукує електричний струм у тканинах мозку. Стимуляція здійснюється за допомогою спеціальної котушки, що прикладається до шкіри голови в певній анатомічній точці. ТМС є досить точним методом локального впливу, який дозволяє досліджувати функціональну організацію мозку, зокрема моторної кори, мовних і когнітивних центрів. ТМС поділяється на одноімпульсну, парно-імпульсну та повторювану (rTMS). Повторювана ТМС, у свою чергу, може бути високочастотною ( $\geq 5$  Гц), що має збудливу дію, або низькочастотною ( $\leq 1$  Гц), що пригнічує нейрональну активність. У клінічній практиці rTMS використовується, зокрема, для лікування депресії, хронічного болю, постінсультної афазії та інших порушень, і вже схвалена в багатьох країнах для застосування в психіатричній та неврологічній практиці.

Транскраніальна електрична стимуляція (ТЕС) — це загальна категорія методів, в основі яких лежить вплив електричним струмом на головний мозок через електроди, розташовані на шкірі голови. До цієї категорії належать tDCS, tACS, tRNS та інші. ТЕС характеризується нижчою інтенсивністю стимуляції, але тривалішою дією, а також відносною простотою реалізації. Найпоширенішим і досить добре дослідженим є метод транскраніальної стимуляції постійним струмом (tDCS). У цьому випадку до голови пацієнта прикладаються два або більше електродів, через які подається слабкий постійний струм (зазвичай 1–2 мА) протягом 10–30 хвилин. Активація або гальмування

певної ділянки мозку залежить від полярності електродів: анод сприяє збудженню нейронів, тоді як катод — їх пригніченню. Цей метод широко застосовується як у дослідницьких цілях (для вивчення пам'яті, уваги, емоційної регуляції), так і в лікуванні депресії, тривожних розладів, хронічного болю, післяінсультної реабілітації, залежностей тощо. Перевагами tDCS є доступність, відсутність болю, низький рівень побічних ефектів і можливість використання в домашніх умовах під наглядом фахівця.

Транскраніальна стимуляція змінним струмом (tACS) є варіантом ТЕС, що базується на подачі синусоїдального струму низької інтенсивності з певною частотою, яка може відповідати або модулювати природну частоту осциляцій нейронної активності. Наприклад, стимуляція у діапазоні тета (4–8 Гц) або альфа (8–12 Гц) може впливати на стан уваги, сну, настрою або пам'яті. Основною метою tACS є вплив на ендогенну ритмічну активність мозку та її синхронізація, що відрізняє цей метод від tDCS. Хоча tACS перебуває на відносно ранньому етапі розвитку, попередні результати свідчать про його потенціал у терапії депресії, шизофренії, епілепсії та інших порушень.

Транскраніальна стимуляція шумовим струмом (tRNS) є ще одним перспективним методом у межах транскраніальної електростимуляції, який базується на подачі до головного мозку змінного струму зі спектром частот, що нагадує білий або рожевий шум. На відміну від tACS, де струм має чітку синусоїдальну форму з конкретною частотою, tRNS використовує сигнал з випадковими частотними коливаннями, що розподіляються у межах від 0.1 до 640 Гц або в деяких варіаціях до 1000 Гц. Вважається, що така стимуляція сприяє підвищенню нейропластичності завдяки ефекту стохастичного резонансу, коли слабкий шум допомагає нейронній системі краще сприймати або передавати сигнали. В експериментальних і клінічних дослідженнях tRNS продемонстрував здатність покращувати когнітивні функції, пам'ять, математичні здібності, знижувати біль та позитивно впливати на симптоматику депресії. Дослідники відзначають, що tRNS, порівняно з іншими видами електричної стимуляції, має ще менше побічних ефектів і часто сприймається учасниками як непомітна або

навіть приємна процедура, що розширює можливості його використання у клінічній практиці.

Окрему групу становлять комбіновані або гібридні методи транскраніальної стимуляції, які поєднують кілька механізмів впливу або інтегруються з іншими технологіями для досягнення вищої точності, адаптивності або ефективності. Наприклад, комбінація tDCS із функціональною магнітною томографією (fMRI) дозволяє точно визначити ділянки мозку для стимуляції на основі індивідуальної нейроанатомії. Інші підходи, як-от tDCS у поєднанні з електроенцефалографією (ЕЕГ), дають змогу відстежувати реакцію мозку в режимі реального часу і коригувати параметри стимуляції. У свою чергу, методи з біозворотним зв'язком (нейрофідбек) або інтеграція штучного інтелекту в алгоритми стимуляції дають змогу динамічно адаптувати інтенсивність і частоту імпульсів відповідно до змін у мозковій активності пацієнта. Такі системи можуть самонавчатися, виявляти закономірності в електричних сигналах мозку, оптимізувати терапевтичний ефект та уникати надлишкової стимуляції.

Слід також згадати новітні експериментальні напрямки, як-от транскраніальна ультразвукова стимуляція (tFUS), яка заснована на використанні фокусованих ультразвукових імпульсів для нелінійного впливу на активність нейронів. Цей метод ще перебуває в початкових стадіях випробування, проте демонструє високу просторову точність і потенційно глибше проникнення у підкіркові структури мозку порівняно з традиційними електричними або магнітними методами. Отже, класифікація методів транскраніальної стимуляції охоплює широку гаму технік, кожна з яких має свої унікальні характеристики, переваги, обмеження та області застосування. Вибір методу залежить від клінічної задачі, доступного обладнання, показань і протипоказань, а також індивідуальних особливостей пацієнта. З погляду інженерії біомедичних систем, кожен із цих методів вимагає точного проектування генератора сигналу, системи керування, електродного модуля та механізмів безпеки. Таким чином, розуміння класифікації стимуляційних

методів є ключем до ефективного проектування та застосування транскраніальних систем у сучасній медицині, нейронауці й когнітивній терапії.

Узагальнюючи, можна зробити висновок, що сучасна класифікація методів транскраніальної стимуляції дедалі більше тяжіє до інтегрованих, мультифункціональних платформ, які поєднують у собі переваги кількох видів впливу (електричного, магнітного, ультразвукового) і адаптуються до індивідуальних особливостей пацієнтів. Це стимулює розвиток нових архітектур біомедичних систем, в яких зростає роль інтелектуального керування, модулів зворотного зв'язку, систем персоналізації параметрів стимуляції. Крім того, з'являється потреба у створенні модульних платформ, що дозволяють змінювати режим впливу без заміни основного обладнання, просто перемикаючи тип стимуляції, що має величезне значення для універсалізації медичної техніки.

### **1.3. Застосування транскраніальної стимуляції при різних захворюваннях мозку**

#### **1.3.1. Транскраніальна стимуляція постійним струмом при obsesивно-компульсивному, посттравматичному стресовому та інших тривожних розладах**

Obsesивно-компульсивний розлад (ОКР) та посттравматичний стресовий розлад (ПТСР) часто співіснують і мають багато спільних рис. Обидва розлади характеризуються нав'язливими, стресовими думками, уникненням певних ситуацій та ритуальною поведінкою, яка допомагає зменшити тривогу. Вони також пов'язані з негативними думками та спогадами, що посилюють тривогу і призводять до сприйняття стимулів як загрозливих. Традиційні методи лікування, такі як фармакотерапія та психотерапія, часто виявляються недостатньо ефективними, що спонукає до пошуку нових підходів.

**Транскраніальна стимуляція постійним струмом (tDCS)** — це багатообіцяючий метод нейромодуляції, який показав свою ефективність у зниженні симптомів ряду психоневрологічних розладів. У контексті ОКР, ПТСР та інших тривожних розладів, tDCS привернула значну увагу. Опубліковані

дослідження, що стосуються застосування tDCS у пацієнтів з ОКР, ПТСП або тривожними розладами, були систематично проаналізовані. Результати пошуку виявили 14 статей, присвячених ОКР, одну статтю про споріднений розлад (розлад накопичення), дві про ПТСП і дві про інші тривожні розлади. У цих дослідженнях tDCS була спрямована на такі ділянки мозку, як дорсолатеральна префронтальна кора, орбітофронтальна кора (катодна стимуляція) або моторна область (анодна стимуляція), як показано на Рисунку 1.1.

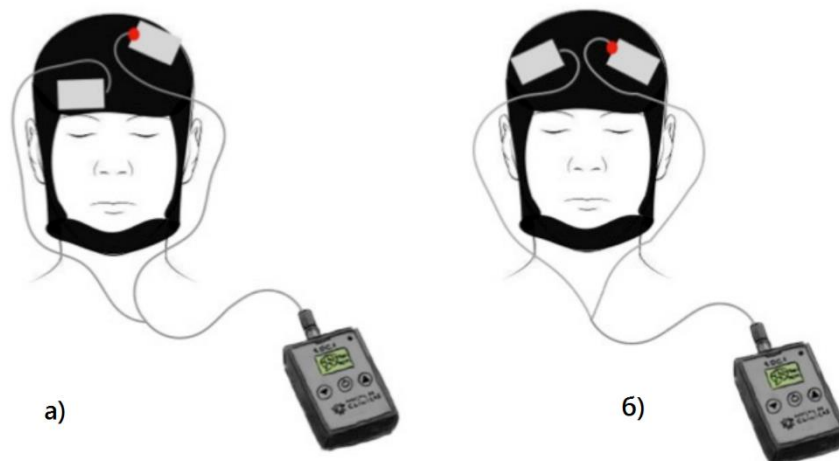


Рисунок 1.1 - Зони стимуляції: а) анодна стимуляція над лівою моторною ділянкою та катодна стимуляція над контралатеральною орбітальною областю; б) область дорсолатеральної префронтальної кори з анодною стимуляцією над лівою стороною.

Порівняно з іншими методами стимуляції мозку, tDCS має кілька значних переваг: вона недорога, проста у використанні і має мінімальну кількість побічних ефектів. Ці переваги є особливо важливими, оскільки дозволяють розглядати tDCS як потенційний метод для широкого домашнього застосування, на відміну від більш складних і дорогих процедур, таких як транскраніальна магнітна стимуляція (TMS) або глибока стимуляція мозку (DBS).

Дослідження, що вивчали клінічні ефекти tDCS у пацієнтів із розладами, стійкими до традиційного лікування, показали багатообіцяючі результати. Деякі дослідження повідомляли про зниження симптомів ОКР на понад 35% за шкалою YBOCS, що вважається клінічно значущим ефектом. Однак ці дані є

попередніми, і для визначення оптимальних параметрів стимуляції для різних підтипів розладів необхідні подальші дослідження. Існуючі дослідження характеризуються значною неоднорідністю щодо характеристик пацієнтів (підтипи, симптоми, супутнє медикаментозне лікування, вік) та параметрів стимуляції (розміщення електродів, сутність провокацій симптомів під час процедури).

Інформація про тривалість ефекту tDCS є обмеженою, оскільки це питання не було систематично вивчене. Однак два дослідження повідомили про збереження позитивних ефектів протягом трьох-семи місяців спостереження. Важливо відзначити, що деякі дослідження також вказували на позитивний вплив tDCS на супутні симптоми депресії та тривоги, які часто спостерігаються у пацієнтів з ОКР. Це може свідчити про спільні механізми порушень у мозкових мережах, що піддаються кортикальній стимуляції. Проте, висновки щодо позитивного впливу методу на ОКР слід інтерпретувати з обережністю. На основі цих позитивних попередніх звітів вже ініційовані рандомізовані клінічні випробування, які наразі активно набирають учасників по всьому світу.

### **1.3.2 Транскраніальна стимуляція постійним струмом як метод лікування депресії**

Депресивний розлад є однією з головних причин інвалідності в усьому світі, вражаючи близько 120 мільйонів людей. Серйозною проблемою у лікуванні депресії є розвиток резистентної до лікування депресії (ТРД), яка спостерігається у 15-35% пацієнтів і значно збільшує економічний тягар, оскільки вартість її лікування у шість разів вища за звичайну депресію.

Останніми роками накопичилися дані, що свідчать про ефективність транскраніальної стимуляції постійним струмом (tDCS) у лікуванні депресії та її потенційний антидепресивний механізм дії. Кілька відкритих та рандомізованих контрольованих досліджень показали, що tDCS ефективно зменшує депресивну симптоматику. Було продемонстровано, що ефективність однієї процедури tDCS

може бути порівнянна з дією середньої дози сертраліну (50 мг/добу) – поширеного антидепресанту.

Клінічні випробування також показали, що комбінація сертраліну та tDCS призводила до адитивного ефекту, який перевершував як фіктивну стимуляцію та плацебо, так і окреме застосування tDCS чи сертраліну. Це вказує на те, що комбінування tDCS з іншими видами лікування, зокрема антидепресантами, може покращити результати, а ефективність tDCS може бути порівнянною з ефективністю антидепресантів першої лінії, що може полегшити лікування ТРД.

Отримані дані також свідчать, що tDCS ефективна у пацієнтів з депресією легкого та середнього ступеня тяжкості, яка не є резистентною до лікування. Побічні ефекти tDCS здебільшого обмежуються головним болем, свербінням та почервонінням у місці стимуляції, які є значно менш серйозними порівняно з когнітивними ефектами інших методів стимуляції мозку.

Тривають дискусії щодо оптимального часу та частоти стимуляції для лікування tDCS. Ранні дослідження використовували меншу амплітуду (1 мА), тоді як сучасніші дослідження застосовують більшу амплітуду (2 мА), оскільки вищі амплітуди викликають більший когнітивний ефект. Щодо тривалості курсу, ранні дослідження застосовували tDCS один раз на день протягом 5 днів; пізніші — двічі на день протягом 5 днів поспіль або один раз на день протягом 10 днів. У наступному поколінні досліджень лікування тривало до 20 днів, а нещодавні дослідження продовжили курс до 6 тижнів або 30 процедур. Збільшена тривалість лікування призвела до підвищення ефективності, з ремісією симптомів, що тривала щонайменше 1 місяць.

Однак неоднорідність пацієнтів у різних дослідженнях tDCS ускладнює остаточне рішення щодо значення tDCS як методу лікування депресії. Оскільки багато досліджень мали відносно невеликий розмір вибірки, до їхніх результатів слід ставитися з обережністю. Крім того, лише в кількох дослідженнях вивчалось, чи зберігаються антидепресивні ефекти після гострої фази лікування. Таким чином, невідомо, чи є довготривалий антидепресивний ефект від tDCS, і чи потрібні підтримуючі процедури.

Все ще відсутній консенсус щодо оптимального розміщення електродів для досягнення найкращих результатів лікування, хоча спостерігалось зменшення депресивних симптомів при:

- анодній стимуляції лівої дорсолатеральної префронтальної кори та катодній стимуляції правої дорсолатеральної префронтальної кори;
- анодній стимуляції лівої дорсолатеральної префронтальної кори з нейтральною областю.

Незважаючи на те, що результати досліджень загалом були багатообіцяючими, необхідні додаткові дослідження, перш ніж tDCS можна буде широко застосовувати в клінічній практиці. Майбутні дослідження повинні бути спрямовані на встановлення оптимальних параметрів стимуляції для tDCS, а також на проведення адекватних, рандомізованих, контрольованих досліджень з більш тривалим періодом спостереження для встановлення довгострокових антидепресивних ефектів.

### **1.3.3. Транскраніальна стимуляція постійним струмом як метод впливу на когнітивні функції людини**

Останні 6-7 років показали, що електростимуляція може бути корисною не лише для пацієнтів, але й для здорових людей. У 2011 році стаття Дугласа Фокса в журналі «Nature» привернула широку увагу, повідомляючи, що tDCS здатна покращувати здатність до навчання, пам'ять та зменшувати схильність до ризику у здорових індивідів. З того часу кількість досліджень tDCS невпинно зростає, відкриваючи нові напрямки застосування цієї технології [18]. На сьогодні проведено тисячі наукових досліджень, у яких взяли участь понад 15 000 осіб, з них близько 500-600 — на здорових добровольцях. Характеристики стимуляції в цих дослідженнях подібні: вплив постійним струмом силою 1-2 міліампера протягом 20-30 хвилин на день, від одного до десяти днів поспіль. Ключовими завданнями цих досліджень є визначення оптимального часу застосування стимуляції, потужності електростимуляції та розташування електродів [19].

Дослідження показують, що стимуляція мозку за допомогою постійного струму покращує ряд когнітивних здібностей людини, включаючи багатозадачність та швидкість реакції. Для людей, чия робота вимагає значних інтелектуальних зусиль, здатність зосереджуватися на важливих завданнях є критично важливою, особливо в умовах численних відволікаючих факторів.

Перші дослідження нейростимуляції для покращення багатозадачності були проведені військовими базами ВПС США в Огайо. Виявилось, що когнітивні можливості навіть сильно втомлених військових значно зростали після процедури електростимуляції. Під час експериментів науковці вибрали кількох добровольців і попросили їх пройти тест НАСА (завдання AF-MATV), який перевіряє здатність людини виконувати кілька завдань одночасно (Рисунок 1.2). У рамках цього тесту добровольцю потрібно було не лише спостерігати за об'єктом у рухомому колі на екрані комп'ютера, але й відстежувати три інші завдання та реагувати на запити, що з'являлися на екрані [20].

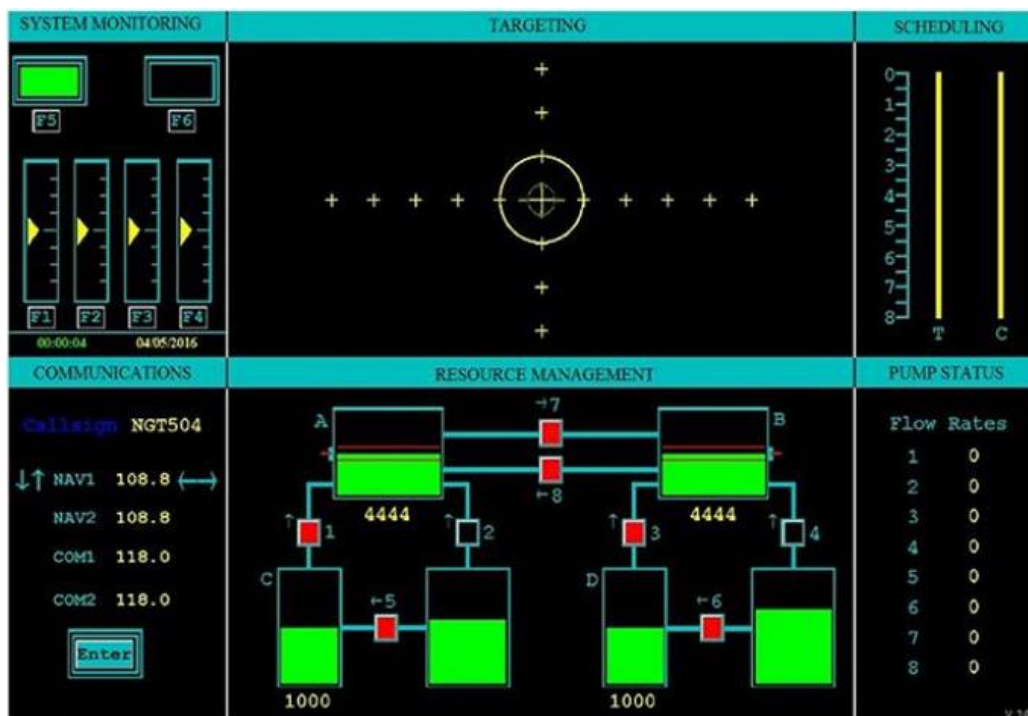


Рисунок 1.2 - Інтерфейс багатопараметричних завдань (завдання AF-MATV) [20].

Добровольців розділили на дві групи: одна група отримувала стимуляцію протягом 36 хвилин, а інша – лише 30 секунд (фіктивна стимуляція). «Результати

показали, що мікростимуляція покращує здібності людини, зокрема, її здатність виконувати кілька завдань одночасно», – зазначають науковці [20]. У 2015 році дослідження, що включало тест на уважність, продемонструвало, що внаслідок електростимуляції тім'яної кори відповіді добровольців були швидшими, ніж до стимуляції. У контрольній групі, де tDCS імітували, швидкість виконання завдання не змінилася [21].

Науковці з Гарварду та Оксфорду, серед інших інститутів, після проведення власних досліджень відзначили, що електростимуляція прискорює навчання та покращує пам'ять, причому покращення є суттєвим – до 20%. Ефект тримався протягом кількох місяців. В одному з експериментів 20 здорових добровольців проходили електростимуляцію дорсолатеральної префронтальної кори (DLPFC) – зони мозку, відповідальної за навчання (включаючи математичне). Контрольна група отримувала фіктивну стимуляцію для виключення ефекту плацебо. Стимуляцію проводили постійним струмом силою 1 міліампер протягом 30 хвилин два дні поспіль, під час процедури всі учасники вирішували математичні завдання. Через два дні після початку експерименту виявилось, що випробувані стали вирішувати завдання з меншою кількістю помилок і на 9% швидше, порівняно з контрольною групою. Крім того, їх вербальна робоча пам'ять покращилася на чверть [22]. Для оцінки довгострокових ефектів стимуляції, через 2 місяці після завершення дослідження вчені знову провели випробування. Виявилось, що ті, хто проходив tDCS, все ще демонстрували значно вищі результати. Більш того, вони вирішували завдання навіть швидше, ніж відразу після tDCS (після стимуляції швидкість вирішення була на 9% більшою, ніж у контрольної групи, а через 2 місяці – на 20% більшою).

Таким чином, можна зробити наступні висновки: по-перше, ефект електростимуляції залежить від стимульованої ділянки мозку, по-друге – від типу впливу (полярності електродів). Втім, варто зазначити, що tDCS ще не вивчена до кінця. Невідомі її довготривалі та етичні наслідки. Але вже існуючі результати спонукають вчених по всьому світу до подальших досліджень. У

США, Європі та Росії з'являються стартапи, що пропонують особисті набори для електростимуляції в домашніх умовах або в офісі. Отже, в майбутньому електростимуляція стане багатофункціональною технологією, яка застосовуватиметься не тільки для широкого спектра захворювань, а й для підтримки здорового способу життя.

### **Висновок до розділу 1**

Цей розділ надав узагальнену оцінку результатів сучасних досліджень використання транскраніальної електростимуляції постійним струмом (tDCS) як методу лікування афективних розладів та методу впливу на когнітивні функції людини. Були сформульовані основні переваги та недоліки, на які слід звернути увагу у майбутніх дослідженнях.

## РОЗДІЛ 2

# МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ МЕТОДУ ТРАНСКРАНІАЛЬНОЇ СТИМУЛЯЦІЇ ПОСТІЙНИМ СТРУМОМ

### 2.1 Основи методу транскраніальної стимуляції постійним струмом

Під час tDCS до голови прикладаються електроди, через які проходить слабкий постійний струм (0.5 - 2 мА), який впливає на роботу нервових клітин - нейронів. [23].

Механізм дії слабого постійного струму на організм людини добре вивчений. Прикладене до тканин зовнішнє електричне поле викликає в них струм провідності. Позитивно заряджені частинки (катіони) рухаються у напрямку до негативного полюса (катода), а негативно заряджені (аніони) - до позитивно зарядженого полюса (анода). Підійшовши до електрода, іони втрачають свій заряд і перетворюються в атоми, мають високу хімічну активність (електроліз). Взаємодіючи з водою, ці атоми утворюють продукти електролізу. Основними іонами-носіями заряду в живих тканинах є  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ . Відповідно, під анодом, внаслідок реакції атомарного хлору з водою, утворюється соляна кислота ( $\text{HCl}$ ). Під катодом, внаслідок взаємодії натрію і калію з водою, - луг ( $\text{KOH}$ ,  $\text{NaOH}$ ). Щільність струму провідності дорівнює добутку напруженості електричного поля і електропровідності тканин. З огляду на низьку електропровідність шкіри, рух заряджених частинок в тканини відбувається в основному по вивідних протоках потових залоз і волосяних фолікулів і - в меншій мірі - через міжклітинний простір епідермісу і дерми. В глибше розташованих тканинах максимальна щільність струму провідності спостерігається в рідких середовищах організму: крові, лімфі, периневральних просторах. Однак, через плазмолему проходить тисячна частка струму провідності, а переміщення іонів в клітині обмежені, найчастіше, простором компартмента. Найменшою провідністю володіє кістка. Таким чином, виникає скупчення іонів протилежного знаку по обидва боки клітинних мембран, міжтканинних

перегородок і фасцій. Такий перерозподіл іонів змінює поляризацію мембран нейронів і їх збудливість. [24].

Разом з тим, слід враховувати, що гранична чутливість нервових волокон до постійного струму мінімальна, в порівнянні з іншими видами струмів.

Під катодом при дії постійного струму спочатку відбувається зниження потенціалу спокою при незмінному критичному рівні деполяризації (КРД) збудливих мембран (рис. 1.1 а). Це обумовлено інактивацією потенціалзалежних калієвих іонних каналів і призводить до часткової деполяризації збудливих мембран. Разом з тим, при тривалому впливі струму відбувається інактивація і потенціалзалежних натрієвих іонних каналів, що призводить до позитивного зсуву КРД і зменшення збудливості тканин. [25]

Під анодом виникає активація потенціалзалежних калієвих іонних каналів. В результаті зростає величина потенціалу спокою при незмінному КРД, що призводить до часткової гіперполяризації збудливих мембран (рис. 2.1 б). В подальшому, внаслідок негативного зсуву КРД, пов'язаного з усуненням стаціонарної інактивації деякої кількості натрієвих каналів, збудливість тканин зростає [26]. Збудливість нейронів (здатність передавати нервовий імпульс) залежить від різниці потенціалів на їх мембрані; саме її і змінює tDCS. У разі позитивного заряду на електроді («аноді») - різниця потенціалів знижується, що збільшує ймовірність збудження нейрона в разі надходження зовнішнього сигналу. У разі негативного заряду електрода («катода») збудливість нейронів, навпаки, падає [24].

Відомо, що тривалі зміни в збудливості нейронів можуть змінювати структуру контактів між ними. Цей процес носить назву синаптичної пластичності і вважається основним механізмом, за допомогою якого реалізується феномен пам'яті і навчання.

Аби досягнути потрібного ефекту (наприклад, концентрації уваги або поліпшення здатності до навчання), необхідно вибрати зони мозку, відповідальні за ці функції, і розмістити на них електроди з відповідним зарядом. Час стимуляції має бути не надто довгим: як правило, достатньо 20-30 хвилин [25].

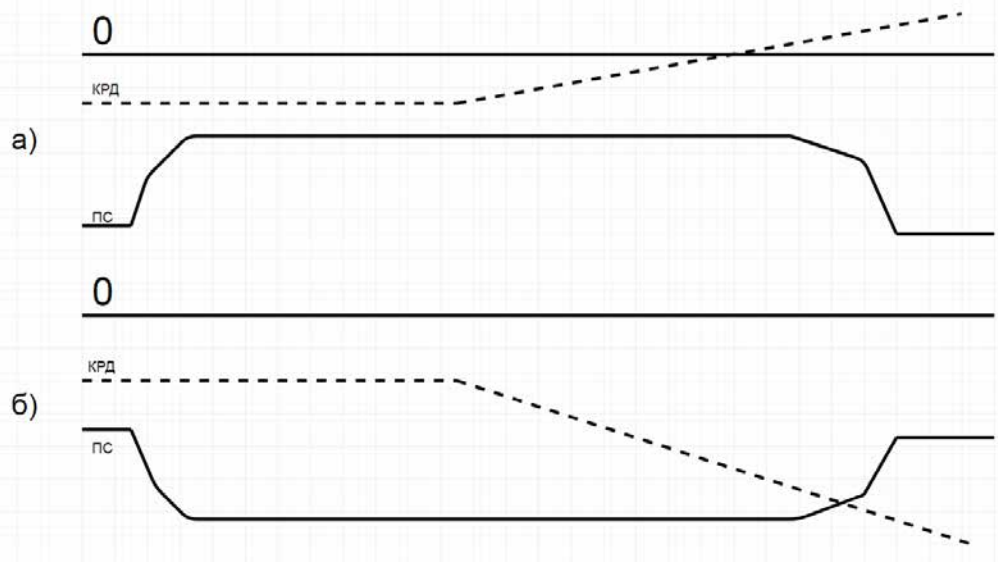


Рисунок 2.1 - Динаміка потенціалу спокою (ПС) та критичного рівня деполяризації (КРД) при тривалому впливі постійним струмом. а - під катодом (при підпороговій деполяризації), б - під анодом (при підпороговій гіперполяризації).

## 2.2 Оцінка струмів, що протікають по скальпу та черепу та визначення потенціалу мозку в піделектродній області

Опір протіканню електричного струму по скальпу від круглого електрода радіуса  $r_0$  до радіуса  $r_1$  можна розрахувати за наступною формулою:

$$R_{ск} = \int_{r_0}^{r_1} \frac{dr}{\lambda_{ск} \times S_{ск}} \quad (2.1)$$

де:  $\lambda_{ск}$  - провідність скальпа;

$S_{ск}$  - бічна площа циліндру скальпа радіуса –  $r$  (Рисунок 2.2)

Після підстановки виразу для площі бічної поверхні циліндру скальпа радіусом- $r$  та інтегрування отримаємо:

$$R_{ск} = \int_{r_0}^{r_1} \frac{dr}{\lambda_{ск} \times 2\pi \times r \times x_{ск}} = \frac{1}{\lambda_{ск} \times 2\pi \times x_{ск}} \quad (2.2)$$

де  $x_{ск}$  – товщина скальпу

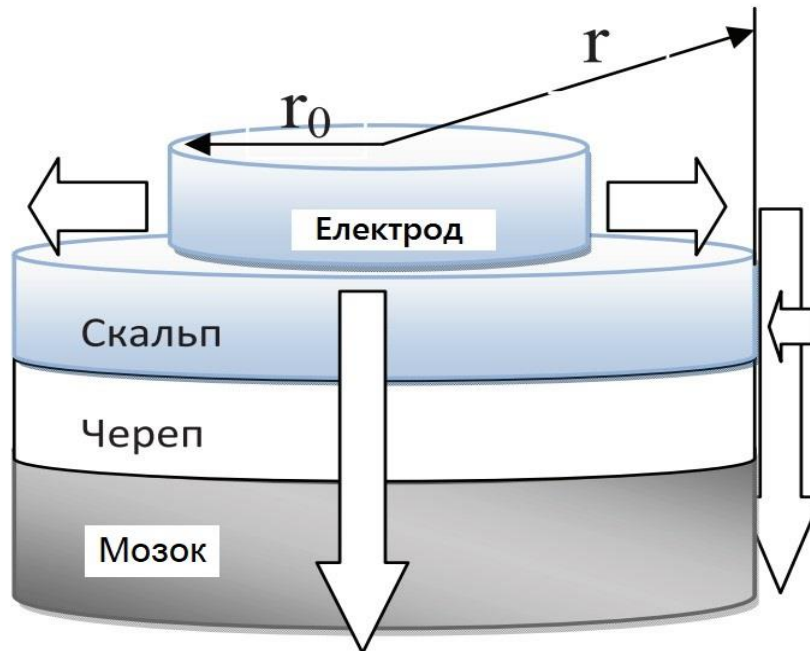


Рисунок 2.2 - Модель розповсюдження струму через скальп та череп [24]

Опір протіканню електричного струму через череп і скальп від круглого електрода радіуса  $r_0$  можна розрахувати за формулою:

$$R_{\text{череп}} = \frac{1}{\pi \times r_0^2} \times \left( \frac{x_{\text{череп}}}{\lambda_{\text{череп}}} + \frac{x_{\text{скальпа}}}{\lambda_{\text{скальпа}}} \right) \approx \frac{1}{\pi \times r_0^2} \times \left( \frac{x_{\text{череп}}}{\lambda_{\text{череп}}} \right) \quad ((2.3))$$

де:  $x_{\text{череп}}$  – товщина черепа;  $\lambda_{\text{череп}}$  – провідність черепа.

Для розрахунку струму, що протікає по скальпу за межами стимулюючого електрода, не будемо враховувати струмами, що протікають у мозок поблизу електрода (таке припущення правомірне при невеликих розмірах електрода, як буде показано нижче при радіусі електрода менше 30 мм). Наближено вважатимемо рівним нулю потенціал скальпа, який далеко від електрода і потенціал мозку. Це можливо, оскільки при розтіканні струму по скальпу поверхня черепа під скальпом і площа бічного циліндра скальпа стають великими, а, отже, опір маленькими. Протікаючи через маленькі опору, струм практично не створює різниці потенціалів. При таких наближень для відношення струму, що протікає по скальпу та потрапляє на мозок, можна оцінити за формулою:

$$K_1 = \frac{I_{\text{мозку}}}{I_{\text{черепу}}} = \frac{R_{\text{скальпу}}}{R_{\text{черепу}}} = \frac{\lambda_{\text{черепу}} \times r_0}{2 \times \lambda_{\text{скальпу}} \times x_{\text{скальпу}} \times x_{\text{черепу}}} \times \ln \left( \frac{r_1}{r_0} \right) \quad (2.4)$$

де:  $K_1$  - коефіцієнти затікання струму в залежності від розмірів електродів.

Візьмемо типові значення провідності та товщини черепа та товщини скальпу. Значення  $r_0$  візьмемо 100 мм (радіус голови). Такий довільний вибір можливий, оскільки дана величина стоїть під знаком логарифма і мало впливає на значення коефіцієнта  $K_1$ . У таких наближеннях вищенаведений вираз набуде вигляду:

$$K_1 = 1.7 \times 10^{-4} \times r_0^2 \times \ln\left(\frac{100}{r_0}\right) \quad (2.5)$$

де: радіус електрода  $r_0$  необхідно брати в міліметрах.

Для відношення струму, що протікає в мозок, і струму, що подається на електрод, буде вірна оцінка:

$$K_2 = \frac{I_{\text{мозку}}}{I_{\text{електроду}}} = \frac{R_{\text{електроду}}}{R_{\text{черепу}}} = \frac{\left(\frac{1}{R_{\text{скальпу}}} + \frac{1}{R_{\text{черепу}}}\right)^{-1}}{R_{\text{черепу}}} = \frac{1}{1+K_1^{-1}} \approx K_1 \quad (2.6)$$

Розрахуємо тепер потенціал мозку. Опір, що виникає між частиною мозку під електродом і віддаленій від електрода областю мозку, може бути оцінений по формулі:

$$R_{\text{мозку}} = \int_{r_0}^{\infty} \frac{dr}{\lambda_{\text{мозку}} \times S(r)} = \frac{1}{\pi \times r_0 \times \lambda_{\text{мозку}}} = \frac{1180}{r_0} \text{ (Ом)} \quad (2.7)$$

де:  $S(r) = 2\pi r^2$  – площа полусфери радіусом  $r$ .

Для потенціалу справедливий наступний вираз:

$$U = I_{\text{мозку}} \times R_{\text{мозку}} = K_2 \times I_{\text{електроду}} \times R_{\text{мозку}} \approx K_1 \times I_{\text{електроду}} \times R_{\text{мозку}} = 0.2 \times I_{\text{електроду}} \times r_0 \times \ln\left(\frac{100}{r_0}\right) \quad (2.8)$$

Розрахуємо значення потенціалу для сили струму 0.53 мА.

$$U = 0.2 \times 0.53 \times 13 \times \ln 7.6 = 2.81 \text{ (мВ)}$$

Тут ми припускаємо, що максимально допустима щільність струму на стимулюючих електродах не повинна перевищувати 0,1 мА/см<sup>2</sup>.

Втратами струму в кабелі довжиною в один метр та діаметром 1.784 мм виготовленого з алюмінію можна знехтувати, через достатньо мале значення

(0.005 В (0.053 %)). Для роботи приладу необхідні набори з електродами для контактного гелю (електродні системи, довжина провідників 1,2 метра).

Електроди фіксуються в люверсах еластичних шоломів. Провідники електродів зібрані в загальний кабель і мають груповий роз'єм для з'єднання з приладом. Видно, що потенціали в піделектродному просторі мозку цілком порівнянні з природними повільними потенціалами [23].

Це дозволяє зробити висновок про безпеку стимуляції. Такі потенціали викликають струми і біохімічні процеси, описані вище, і можуть істотно впливати на когнітивні стратегії, що підтверджує ефективність методу.

### **Висновок**

В ході виконання роботи на основі аналізу наукових та літературних джерел, було сформовано основні медико-технічні особливості методу транскраніальної стимуляції постійним струмом та досліджено вплив малого постійного струму на тканини та рідини організму.

В роботі представлені формули для розрахунку та оцінки струмів, що протікають по скальпу та черепу, також відношення струму, що протікає в мозок і струму, що подається на електрод. Наведені розрахунки підтверджують безпеку та ефективність методу транскраніальної стимуляції постійним струмом та дають можливість сформулювати основні технічні особливості приладу, що розробляється у наступному розділі.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРИБАДУ

#### 3.1 Технічні характеристики апарату

У даному підрозділі приведено технічні характеристики приладу для транскраніальної стимуляції постійним струмом (таблиця 3.1). Живлення приладу здійснюється безпечною наднизькою напругою за допомогою електричної батарейки номінальною вихідною напругою 9 В.

Таблиця 3.1 Технічні характеристики апарату

Вид струму	Постійний
Діапазон установки вихідного струму	0.5 - 2 мА
Дискретність установки вихідного струму	0.5 мА
Похибка установки параметрів вихідного струму	Не перевищує 2%
Напруга живлення	“Тип Крона” 9 В
Діапазон установки часу процедури стимуляції	5-35 хв
Дискретність установки часу процедури стимуляції	5 хв
Діапазон робочих температур	18-30°C
Клас електробезпеки	IP30

За своїм конструктивним виконанням прилад для транскраніальної стимуляції постійним струмом повинен відповідати технічним вимогам, що пред'являються до електромедичної апаратури. При розробці стимулятора необхідно застосовувати радіокомпоненти, що забезпечують високу надійність, малі габарити, вагу та економічність пристрою. Складові конструкції

стимулятора повинні бути виготовлені з корозійностійких матеріалів або захищені від корозії спеціальними покриттями. Стимулятор повинен бути стійкий до дезінфекції одним із застосовуваних у лікувальних установах засобів. Конструкція його повинна бути технологічна при виробництві, забезпечувати зручність в роботі та бути ремонтпридатною, а також забезпечувати повну електробезпечність персоналу і пацієнтів. [26]

При виготовленні конструкцій радіоелектронної апаратури широко використовують друковані плати, що виконують функції несучих конструкцій і електричного з'єднання для провідників. Друковані схеми знижують трудомісткість монтажно-збиральних і регулювальних робіт, дозволяють збільшити обсяги виробництва апаратури, зменшити її вагу та розміри, зменшити кількість помилок при монтажі і контрольних іспитах, знизити вартість виробів [27].

### **3.2 Структурна схема апарату**

На рисунку 3.1 представлена структурна схема апарату для транскраніальної стимуляції постійним струмом.

Схему приладу умовно можна розділити на два каскади. Перший - RC-ланцюг завдання часу, за допомогою якого пацієнт або лікар може встановлювати тривалість процедури з дискретністю у 5 хвилин. Другий – ланцюг завдання значення вихідного струму для стимуляції з дискретністю у 0.5 мА. При ввімкненні комутатора (К) напруга живлення (НЖ) потрапляє на відповідні виводи таймеру (Т), який спроектований на базі інтегральної схеми NE555, що є універсальним таймером - пристроєм для формування (генерації) одиночних і повторюваних імпульсів зі стабільними часовими характеристиками. Точність таймера не залежить від зміни напруги живлення і становить не більше 1% від розрахункового значення. Мікросхема NE555 має всього один вихід з струмом до 200 мА.

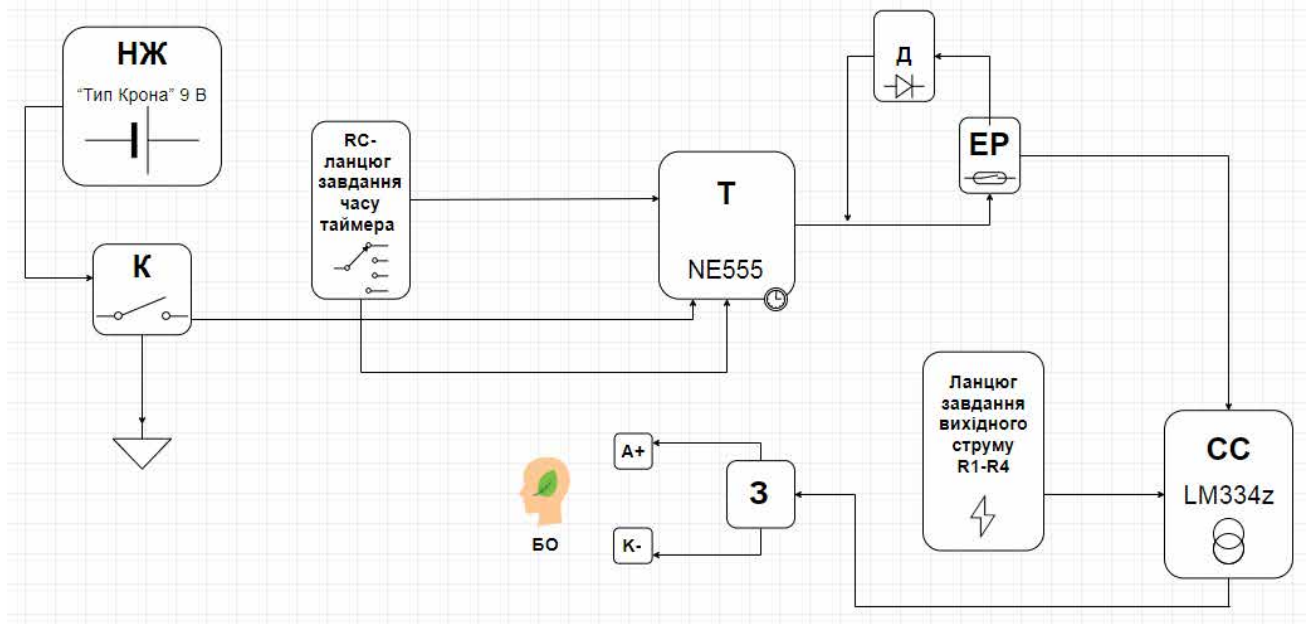


Рисунок 3.1 - Структурна схема приладу для транскраніальної стимуляції постійним струмом.

Це значно більше, ніж у звичайних інтегральних мікросхем. Він здатний управляти, наприклад, світлодіодами (з струмообмежувальним резистором), невеликими лампочками, п'єзоелектричним перетворювачем, динаміком (з конденсатором), або навіть малопотужними двигунами постійного струму. В нашому випадку це електромагнітне реле (ЕР) із захисним діодом (Д). Електромагнітне реле спрацює після формування імпульсу заданої тривалості та закриється, коли конденсатор в ланцюзі завдання часу повністю насичиться. Реле під'єднане до стабілізатору струму (СС), який реалізований на базі трьохконтактного джерела з відмінною стабілізацією струму і широким діапазоном динамічної напруги від 1 до 40В. Установка струму здійснюється зовнішніми резисторами R1-R4 без необхідності інших частин. Номінальна точність струму  $\pm 2\%$ . Струм проходить через запобіжник (З), який в разі перевищення порогового значення сили струму забезпечує безпеку пацієнта. Останньою ланкою є два електроди (анод та катод), які встановлюються на шкіру голови пацієнта.

### 3.3 Розробка та моделювання принципової електричної схеми

У якості середовища для розробки принципової електричної схеми медичного таймеру було обрано програму Electronic Workbench.

На рисунку 3.2 зображена принципова електрична схема реле часу приладу для транскраніальної стимуляції постійним струмом в Electronic WorkBench.

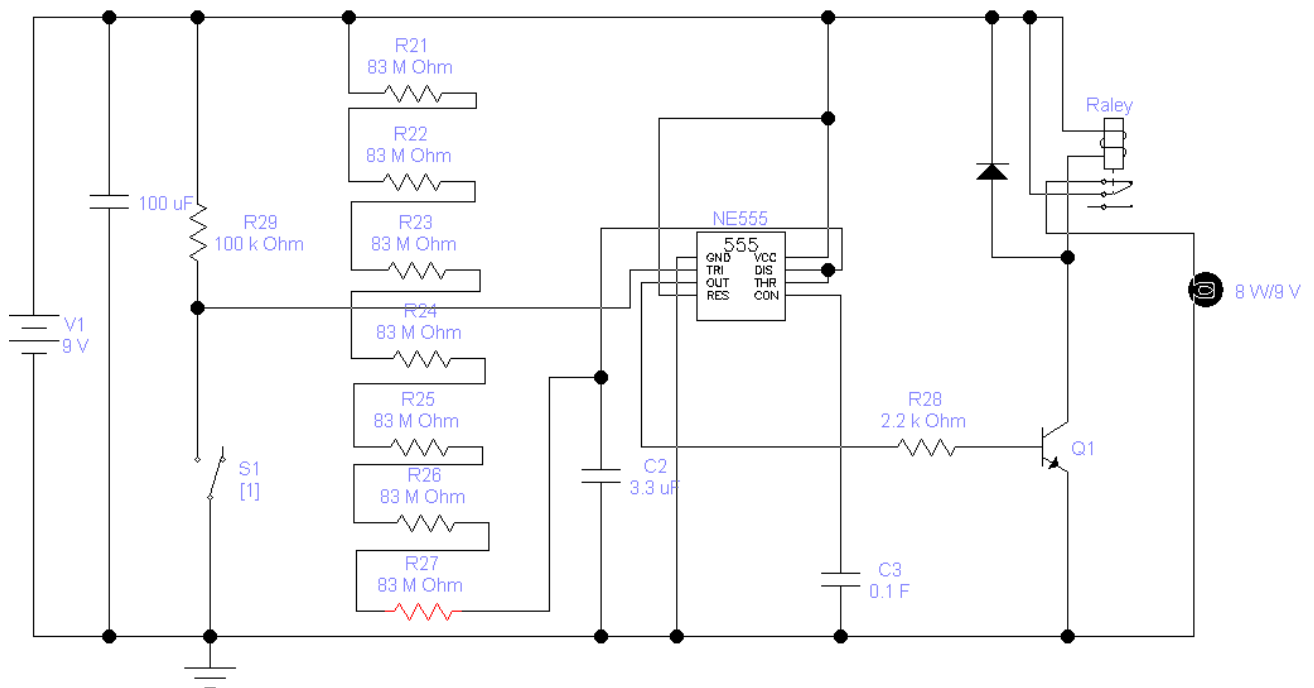


Рисунок 3.2 - Принципова електрична схема реле часу приладу для транскраніальної стимуляції постійним струмом.

Electronic WorkBench дозволяє перевірити і проаналізувати роботу електронних схем без їх складання. Програма Electronics Workbench призначена для розробки, імітації, налагодження і тестування принципових електричних схем та дозволяє знімати різні характеристики і параметри і має низку переваг перед своїми аналогами, головними з яких є простота і надійність. [28]

Інтегральна мікросхема NE555 розроблялася як таймер і містить в собі комбінацію аналогових і цифрових елементів в одному кристалі. Внутрішня будова NE555 включає в себе п'ять функціональних вузлів, які можна бачити на рисунку 3.3. Зовнішній вигляд мікросхеми представлений на рисунку 3.4 [29].

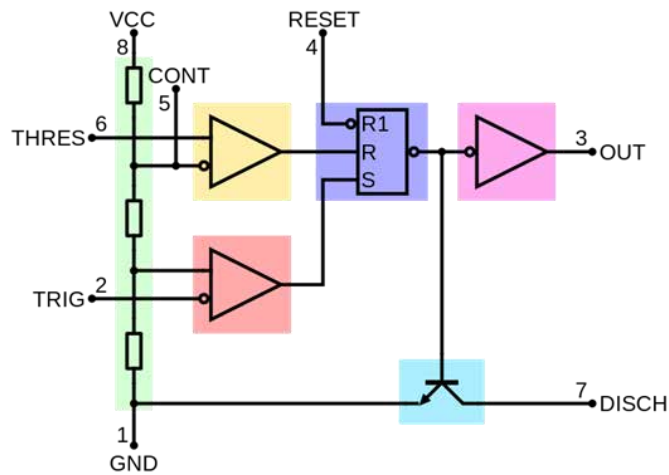


Рисунок 3.3 - Внутрішня будова таймеру NE555

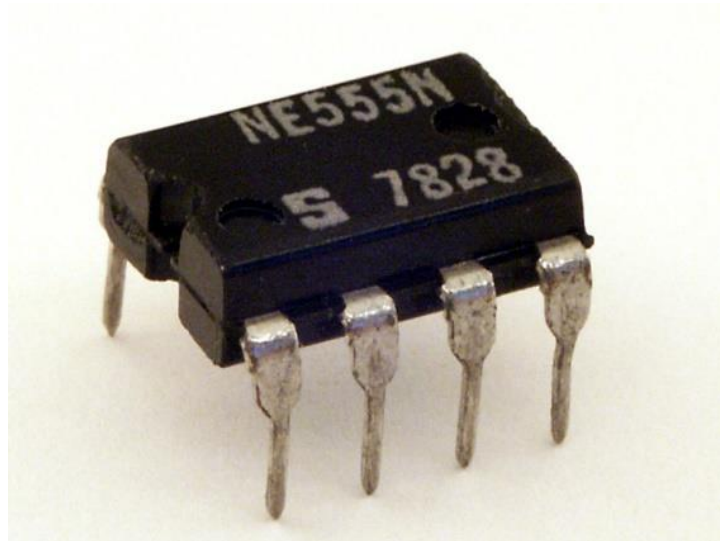


Рисунок 3.4 - Зовнішній вигляд мікросхеми NE555[29]

На вході розташований резистивний дільник напруги, який формує дві опорні напруги для прецизійних компараторів. Вихідні контакти компараторів надходять на наступний блок - RS-тригер з зовнішнім виводом для скидання, а потім на підсилювач потужності. Останнім вузлом є транзистор з відкритим колектором, який може виконувати кілька функцій, в залежності від поставленого завдання.

Основні характеристики інтегрального таймера NE555 наступні:

- Максимальна частота більш ніж 500 кГц.
- Довжина одного імпульсу від 1 мсек до години.

- Може працювати в режимі моностабільного мультавбратора.
  - Високий вихідний струм (до 200 мА).
  - Регульована скважність імпульсу (відношення періоду імпульсу до його тривалості).
  - Сумісність з TTL рівнями.
  - Температурна стабільність 0,005% на 1 градус Цельсія.
- Розташування виводів незалежно від корпусу – стандартне (Рисунок 3.5).

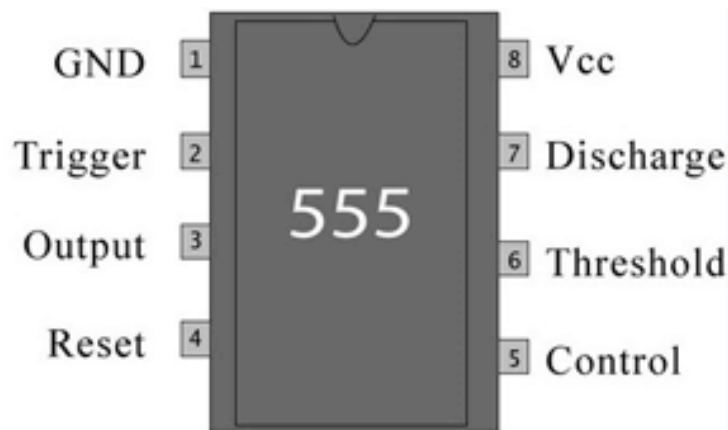


Рисунок 3.5 - Розташування виводів мікросхеми

Перший (GND) та восьмий (Vcc) вивід відносно ключа це відповідно заземлення та живлення що підключається до мінуса та плюса джерела живлення.

- №2 - Запуск (Trigger)

Тригер спрацьовує, якщо на вході напруга впаде нижче  $1/3$  напруги живлення. Даний вивід має високий вхідний опір, більше 2 МОм. До нього підключений елемент комутації, наприклад, кнопка.

- №4 – Скидання (Reset)

Якщо напруга на цьому виводі нижче 0,7 вольт, то відбувається скидання внутрішнього компаратора. У разі невикористання, на даний вивід таймера NE555 необхідно подати напругу живлення.

- №5 – Контроль (Control)

Може використовуватися для регулювання тривалості імпульсів на виході шляхом подачі напруги  $2/3$  від напруги живлення. Якщо вивід не використовується, то його бажано підключити до мінуса джерела живлення через конденсатор  $0,01$  мкФ.

- №6 - Стоп (Threshold)

Зупиняє роботу таймера, якщо напруга на цьому висновку буде вище  $2/3$  напруги харчування. Висновок має високий вхідний опір, більше  $10$  МОм.

- №7 – Розряд (Discharge)

Вивід через внутрішній транзистор підключається до «землі», коли внутрішній тригер знаходиться в активному стані. Вивід (відкритий колектор) використовується в основному для розрядки конденсатора, що задає тривалість генерації.

- №3 - Вихід

Мікросхема NE555 має всього один вихід з струмом до  $200$  мА. Це значно більше, ніж у звичайних інтегральних мікросхем. Висновок здатний управляти, наприклад, світлодіодами (з струмообмежувальним резистором), невеликими лампочками, п'єзоелектричним перетворювачем, динаміком (з конденсатором), електромагнітним реле (із захисним діодом) або навіть малопотужними двигунами постійного струму. Якщо потрібно більш високий вихідний струм, то можна підключити відповідний транзистор в якості підсилювача.

Перемикання займає близько  $0,1$  мкс.

Схема працює наступним чином. На вхід таймера (TRIG) подають одиночний імпульс низького рівня, який призводить до перемикання мікросхеми і появи на виході (OUT) сигналу високого рівня. Тривалість сигналу розраховується в секундах за формулою:

$$t = 1.1 \times R \times C \quad (3.1)$$

За допомогою послідовно підключених резисторів можна збільшувати час задання імпульсів тобто тривалість процедури тринсканіальної стимуляції постійним струмом. Тривалість сигналу буде розраховуватись за формулою:

$$t = 1.1 \times C_3 \times (R_{21} + \dots + R_{27}) \quad (3.2)$$

Після закінчення заданого часу (t) на виході формується сигнал низького рівня (початковий стан).

$$t_1 = 1.1 \times 3.3 \times (83) \approx 300 \text{ (сек)}$$

$$t_7 = 1.1 \times 3.3 \times (83 \times 7) \approx 2100 \text{ (сек)}$$

Напруга джерела живлення не впливає на тривалість імпульсів. Чим більша напруга живлення, тим вища швидкість заряду конденсатора і тим більша амплітуда вихідного сигналу. Додатковий імпульс, який можна подати на вхід після основного, не вплине на роботу таймера, поки не закінчиться час t.

Таким чином, за допомогою одиночних сигналів на вході і параметрів ланцюга завдання часу можна отримувати на виході імпульси прямокутної форми з чітко заданою тривалістю. Розрахунки наведені у таблиці 3.2:

Таблиця 3.2 Розрахунки номіналів резисторів, що задають тривалість процедури.

Тривалість стимуляції	Опір послідовно підключених резисторів
300 с (5хв)	83 МОм (R21)
600 с (10хв)	166 МОм (R21+R22)
900 с (15хв)	249 МОм (R21+R22+R23)
1200 с (20хв)	332 МОм (R21+R22+R23+R24)
1500 с (25хв)	415 МОм (R21+R22+R23+R24+R25)
1800 с (30хв)	498 МОм (R21+R22+R23+R24+R25+R26)
2100 с (35хв)	581 МОм (R21+R22+R23+R24+R25+R26+R27)

Електромагнітне реле керує стабілізатором струму, електрична схема якого наведена на рисунку 3.6.

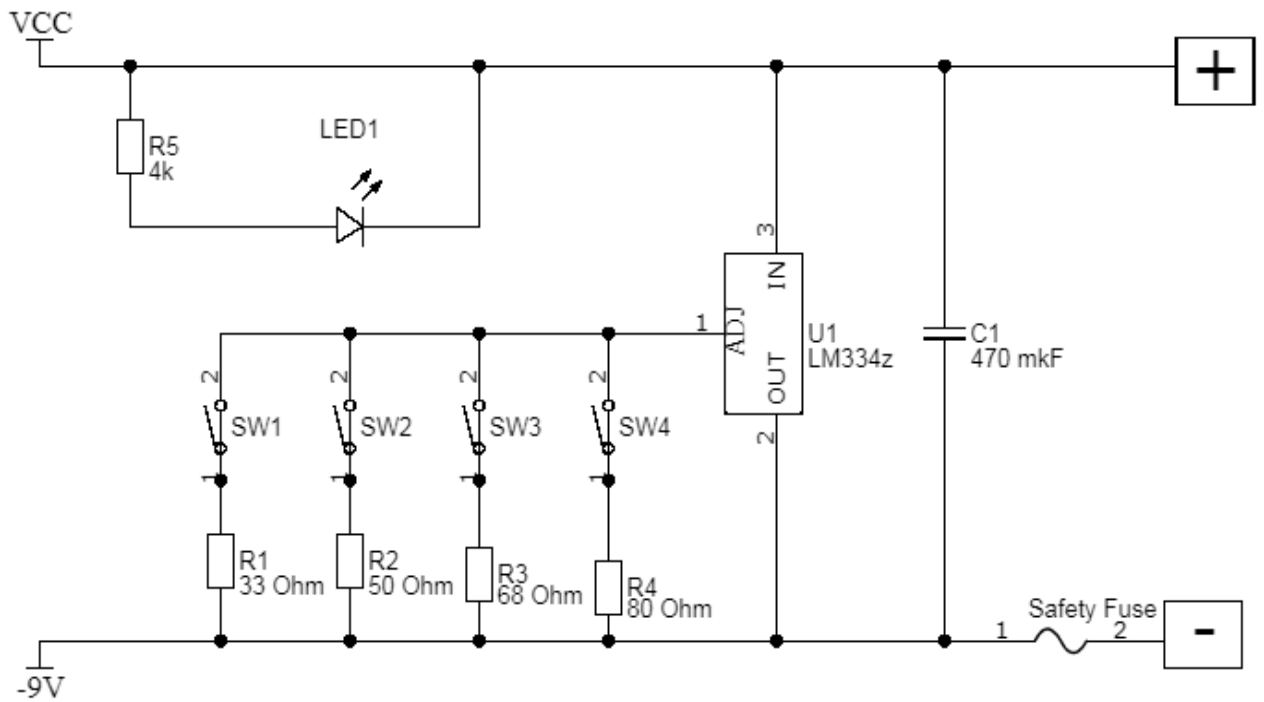


Рисунок 3.6 - Електрична схема стабілізатора постійного струму.

При ввімкненні, світлодіод LED1, що послідовно з'єднаний з резистором R5 номіналом 4 кОм, буде сигналізувати про роботу апарата.

Схема включає в себе резистивний ланцюг R1-R4 з'єднаний з комутаторами SW1-SW4. Пацієнт або лікар може обрати значення вихідного струму для подальшої стимуляції, натиснувши на один із комутаторів. Конденсатор C1 номіналом 470 мкФ відповідає за плавний початок та кінець роботи апарату. [30]

Відповідно до рисунку 3.7, на якому зображено графік залежності вихідного струму  $I_{set}$  від напруги, було встановлено значення резистору R3 (68 Ом), при якому вихідний струм становить рівно 1 мА. Номінальне значення інших резисторів визначалося експериментальним шляхом ( $R1 = 33$  Ом,  $R2 = 50$  Ом,  $R4 = 80$  Ом)

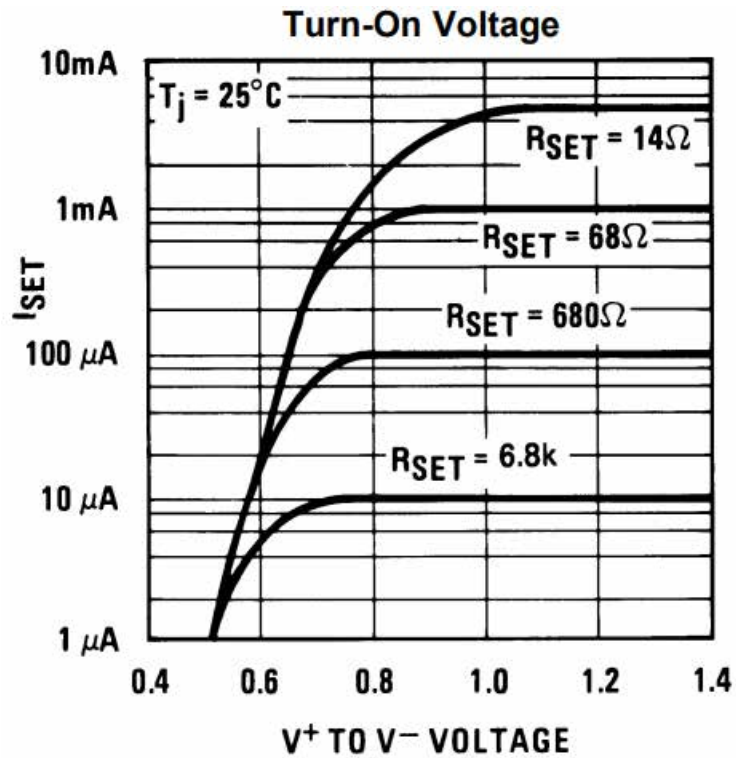


Рисунок 3.7 - Графік залежності вихідного струму  $I_{set}$  від напруги  $V^+$  to  $V^-$  VOLTAGE. [31]

Експериментальні значення також було підтверджено за допомогою розрахунків. У відповідності зі стандартним підключенням, яке зображено на рисунку 3.8, значення вихідного струму  $I_{set}$  визначається за формулою: [32]

$$I_{set} = \frac{67.7 \text{ mV}}{R_{set}}$$

Для сили струму в 2 мА:

$$R_{set} = \frac{67.7}{2} = 33 \text{ (Ом)}$$

Таким чином було підтверджено розрахунки опорів стабілізатора струму, що отримали експериментально.

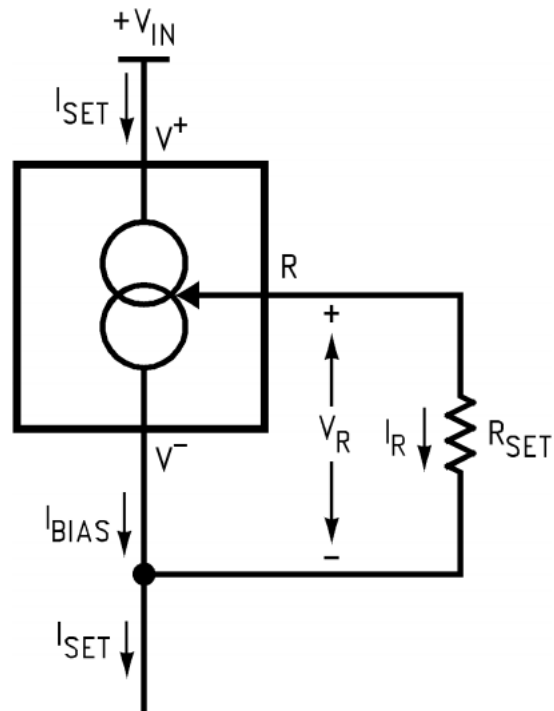


Рисунок 3.8 - Стандартне підключення елементу LM334z в якості стабілізатора струму. [32]

## Висновок

Визначивши головні технічні характеристики апарату, було розроблено структурну схему апарату та принципову електричну схему реле часу та стабілізатора струму. За допомогою підбору номіналів компонентів та відповідних розрахунків, було визначено та представлено оптимальні значення кожного елемента схеми.

Прилад дає можливість проведення безпечної стимуляції фіксованим значенням постійного струму з тривалістю, що визначається лікарем.

Надійність, простота конструкції та експлуатації, мала вага, габарити, економічність радіокомпонентів – визначають розроблений прилад та є його головними перевагами.

В ході моделювання та перевірки роботи розробленої схеми, було експериментально підтверджено можливість використання програми Electronic Workbench.

## РОЗДІЛ 4

### МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕРФЕЙСУ

#### 4.1. Технічне завдання для моделювання інтерфейсу приладу ТМС.

Вимоги до функціональних характеристик:

Програмний продукт повинен забезпечувати можливість виконання наступних дій :

- мати можливість зберігати дані про пацієнтів;
- налаштовувати потрібну частоту, інтенсивність та час проведення процедури при обраній методиці лікування;
- давати можливість налаштовувати частоту, інтенсивність та час проведення процедури вручну.

#### 4.2. Блок-схема роботи інтерфейсу.

Алгоритм роботи програми представлений на рис. 2.1.

Перший блок це старт процесу. Далі слідує введення параметрів: прізвище, ім'я, вік, діагноз. На цьому етапі відбувається збір основної інформації про пацієнта: його особистих даних та медичного діагнозу.

Визначення методу лікування - після введення даних відбувається етап визначення, який саме метод лікування буде застосовано.

Метод лікування обирають зі встановленого списку: якщо "так" (метод лікування обирається зі встановленого списку), процес переходить до блоку "Введення значень частоти, інтенсивності, часу". Якщо "ні" (метод лікування не обирається зі встановленого списку, що може означати індивідуальне налаштування або ручне введення), процес також переходить до блоку "Введення значень частоти, інтенсивності, часу". Це трохи нетипово, оскільки зазвичай гілка "ні" веде до альтернативного процесу або завершення. Можливо, в даному контексті, якщо метод не зі списку, то його параметри все одно необхідно ввести вручну, або це спрощення схеми.

Введення значень частоти, інтенсивності, часу. На цьому етапі відбувається введення специфічних параметрів для обраного або визначеного методу лікування, таких як частота, інтенсивність та тривалість процедури.

Наступний блок ухвалення рішення, який перевіряє повноту введених даних. Якщо "так" (всі необхідні дані введені), процес переходить до блоку "Очікування натискання кнопок". Якщо "ні" (не всі дані введені), потік повертається до блоку "Введення значень частоти, інтенсивності, часу", що вказує на необхідність повторного або додаткового введення.

Далі йде блок очікування натискання кнопок. Система перебуває в режимі очікування, ймовірно, для початку процедури або підтвердження її готовності.

Блок ухвалення рішення «Кнопка натиснута»: якщо "так" (кнопка натиснута), процес переходить до блоку "Виведення даних". Якщо "ні" (кнопка не натиснута), процес залишається в режимі "Очікування натискання кнопок", утворюючи цикл.

Блок виведення даних. Після завершення процедури (або її етапу) відбувається виведення відповідних даних (наприклад, результатів, параметрів, тривалості сеансу).

Блок збереження даних. Виведені дані зберігаються, що важливо для ведення медичної документації, аналізу ефективності лікування тощо.

Останній блок – завершення процесу.

### **Загальний опис процесу.**

Схема описує типовий цикл роботи з медичним обладнанням, що включає:

- ✓ Ініціалізацію (збір даних про пацієнта).
- ✓ Конфігурацію (визначення методу лікування та введення його параметрів).
- ✓ Підтвердження (перевірка повноти даних).
- ✓ Виконання (очікування команди для початку процедури).
- ✓ Завершення (виведення та збереження даних після виконання).

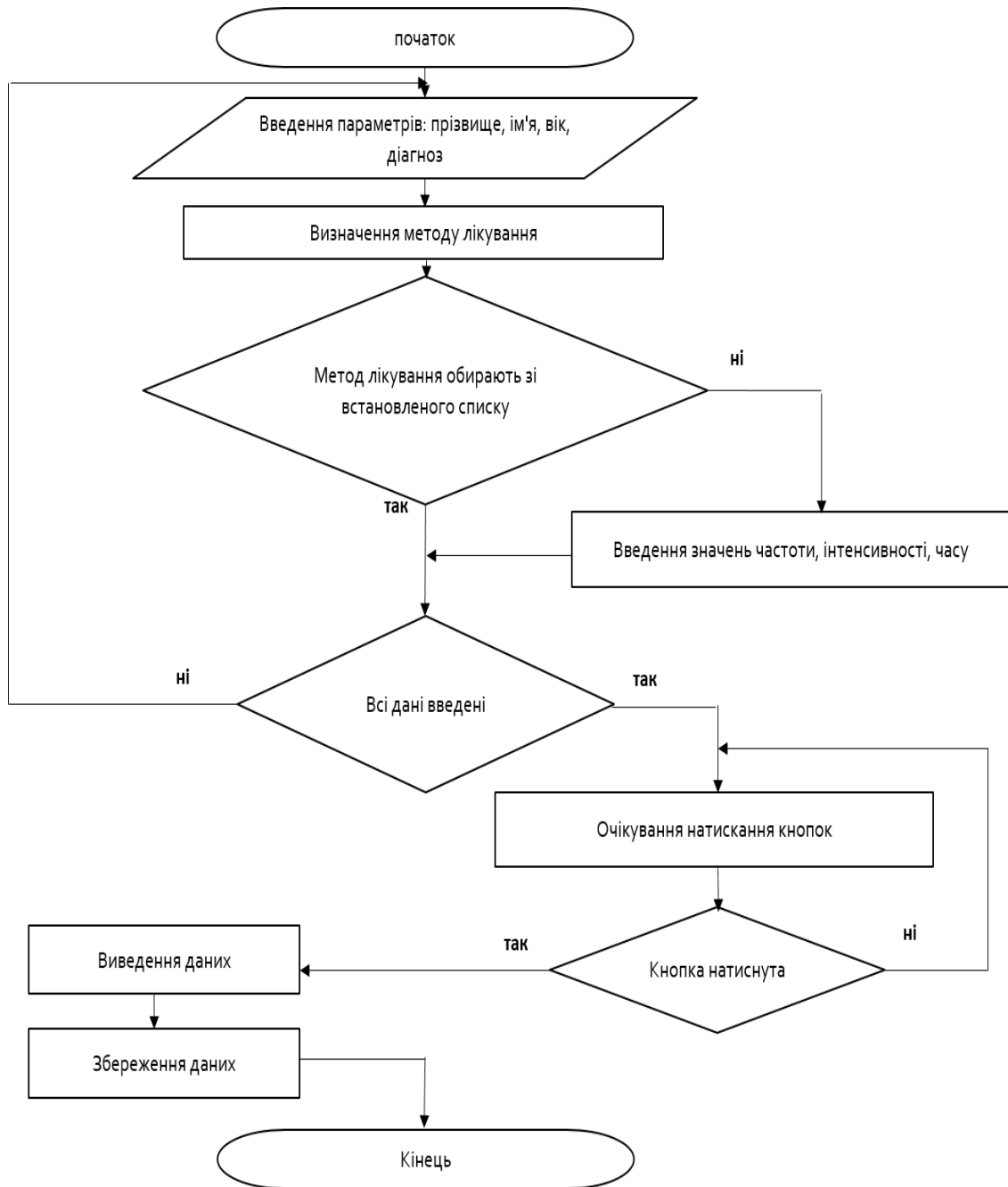


Рисунок 4.1 – Блок-схема роботи інтерфейсу

### 4.3. Розробка програми для інтерфейсу.

Було створено передню панель на рис.4.2, на якій розташовуємо таблицю з базою даних, куди будуть записуватися данні про пацієнтів (дата, час, прізвище, ім'я, вік, діагноз, методика лікування та частота, інтенсивність та час проведення процедури, що буде відповідати методиці лікування або введено вручну). Також є кнопка, за допомогою якої будуть зберігатися дані на

комп'ютері (OK Button 2) та лічильник рядків, за допомогою якого пацієнти повинні записуватися по порядку. Зверху знаходиться кнопка при натисканні якої пацієнт вноситься до списку (OK Button).

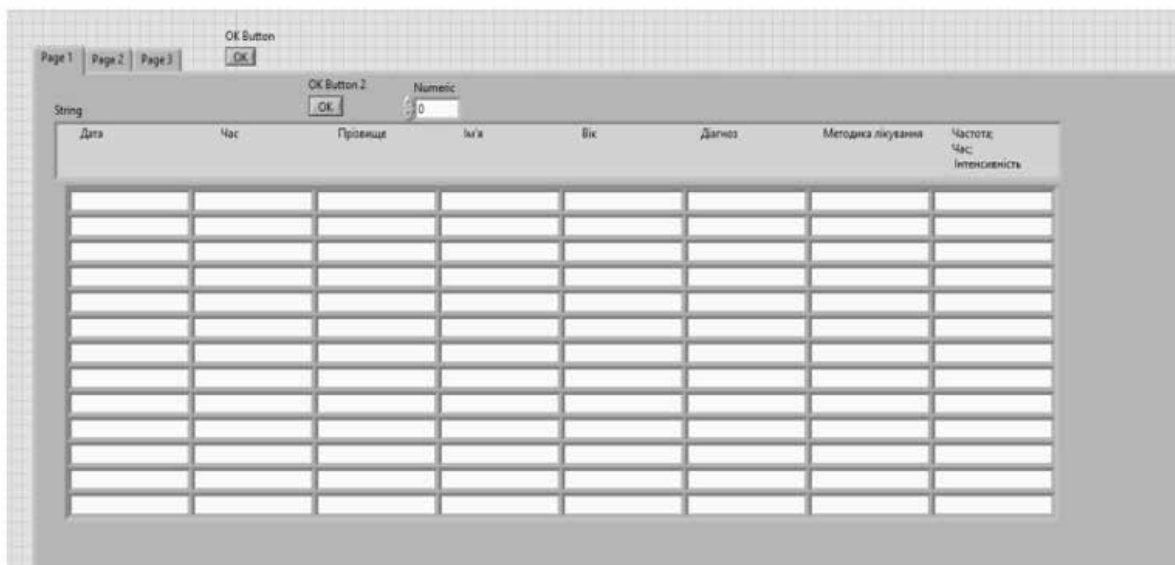


Рисунок 4.2 – Передня панель програмного продукту Створений кластер на рис.4.3, де записуються дані.

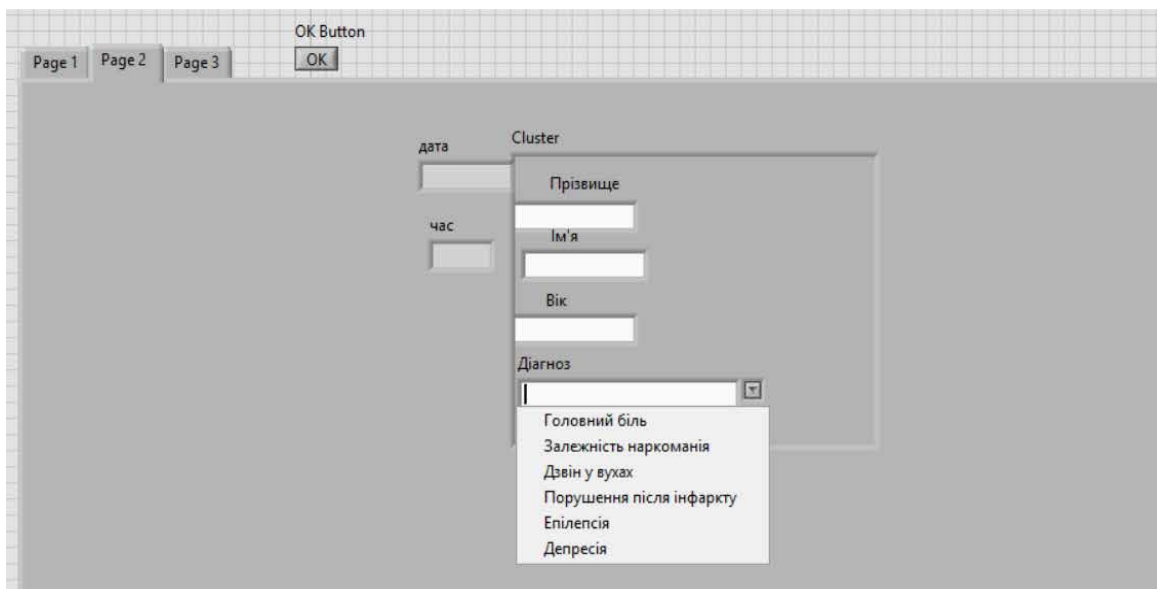


Рисунок 4.3 – Вкладка внесення особистих даних

На вкладці для внесення особистих даних можна записувати прізвище, ім'я та діагноз, які будуть вноситися до таблиці. Діагноз вноситься відповідно до характеристик та можливостей приладу для ТКМС. Дата та час вводиться

автоматично, відповідно до комп'ютера.

Кластер на рис. 2.4, де знаходиться дві кнопки - «За протоколом», «Власний протокол». При натисканні кнопки «За протоколом» лікар обирає одну з запропонованих методик лікування і частота, час та інтенсивність встановлюється автоматично. При натисканні на кнопку «Власний протокол» є можливість самостійно обрати частоту, інтенсивність та час проведення процедури.

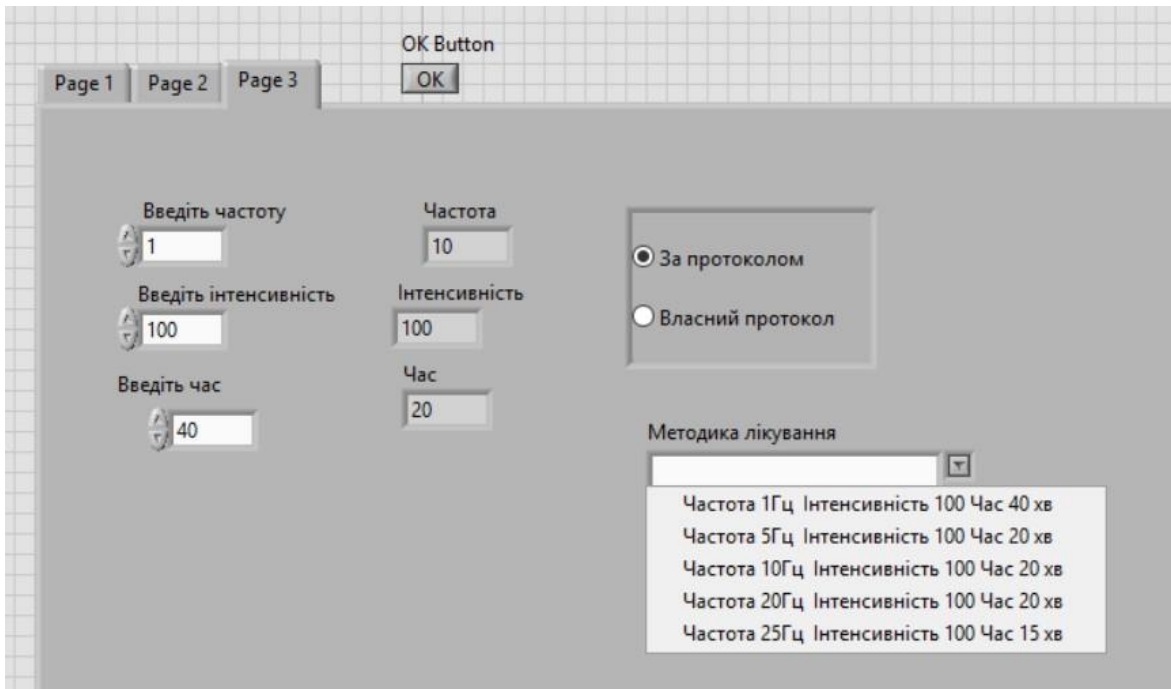


Рисунок 4.4 – Вкладка для встановлення методики лікування

Структура програми покладена в цикл на рис. 2.6. Кластер, який ми створили в якому знаходиться дані про прізвище, ім'я, вік та діагноз ділимо по окремих осередках, щоб потім під'єднати до наступного циклу окремо. Створення запису дати та часу показано на рис. 4.7. Створили наступний цикл на рис. 4.8 за допомогою якого буде формуватися таблиця з базою даних.

Щоб дані записувалися відповідно в таблицю створюється лічильник, який під'єднується для того, щоб рядки записувалися по черзі та під'єднується значення стовбчика, в який повинні записувати дані. Під'єднуються відповідні позначення з кластера та інші.

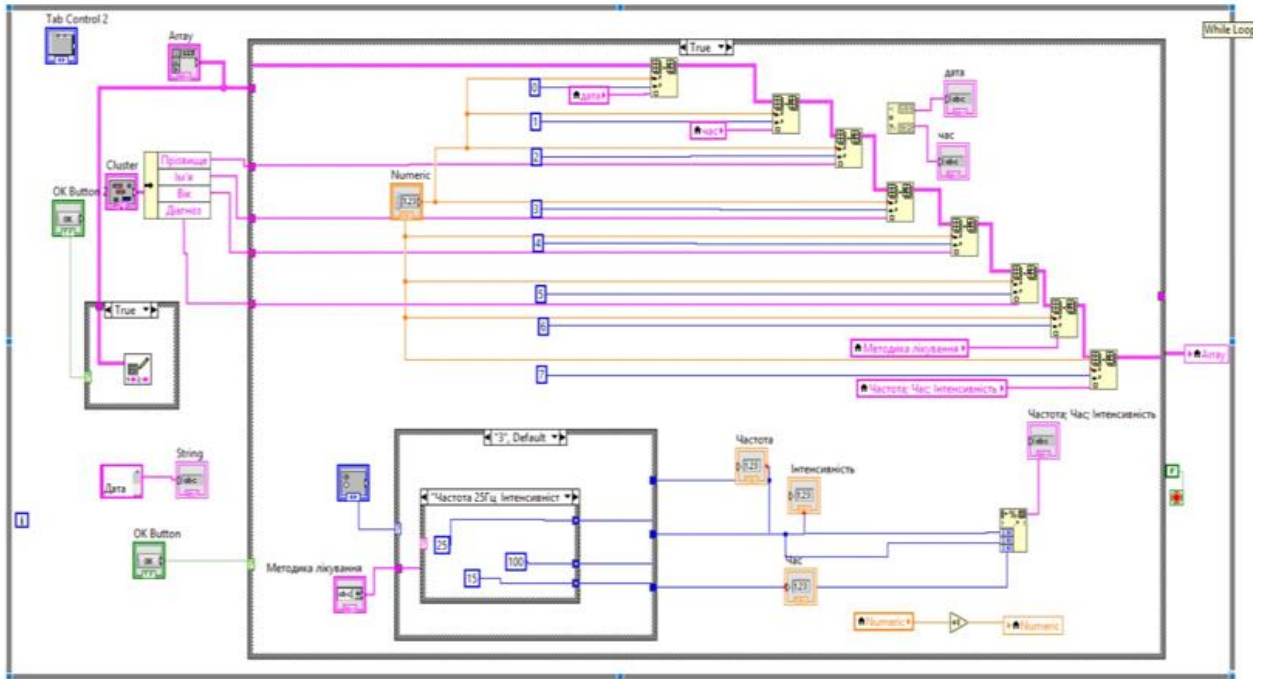


Рисунок 4.5 – Загальний вигляд BLOCK DIAGRAM

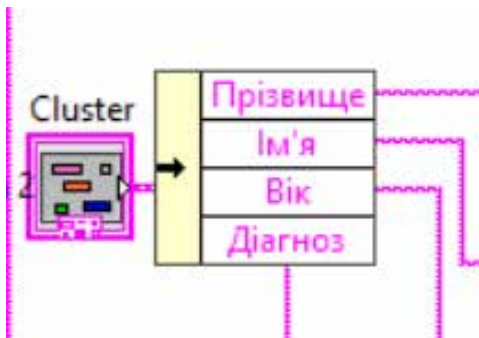


Рисунок 4.6 – Кластер

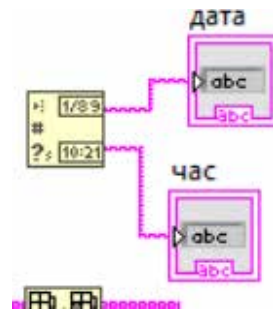


Рисунок 4.7 – Дата та час

Для того, щоб методика лікування вводилась автоматично або самостійно, було створено окремий цикл на рис. 4.9, який знаходиться в попередньому. До нього під'єднується кнопка, яка переключає автоматичний режим та список методики лікування. В цьому циклі створюється ще один, щоб записати всі методики лікування, які може запропонувати програма. В ньому знаходяться значення частоти, інтенсивності та часу проведення процедури.

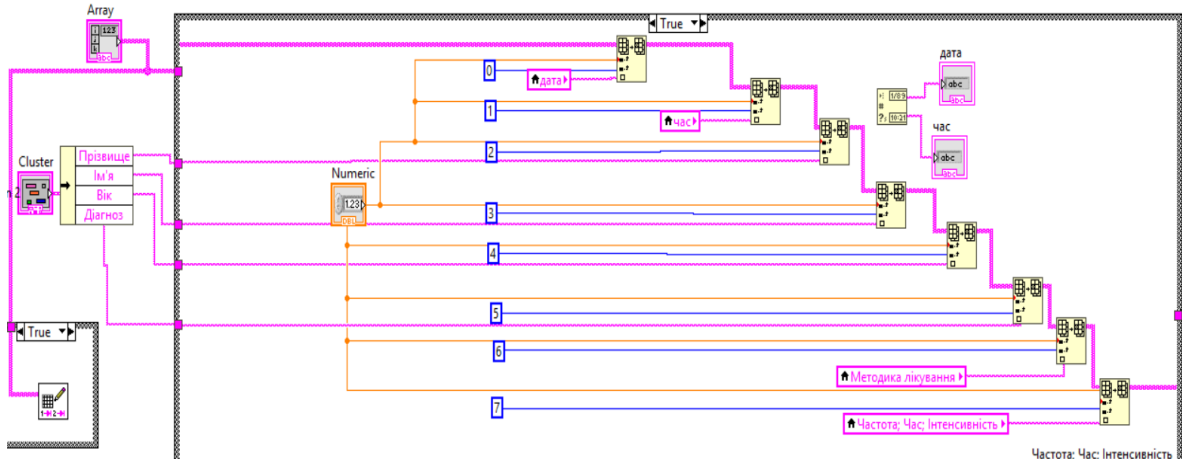


Рисунок 4.8 – Запис в матрицю

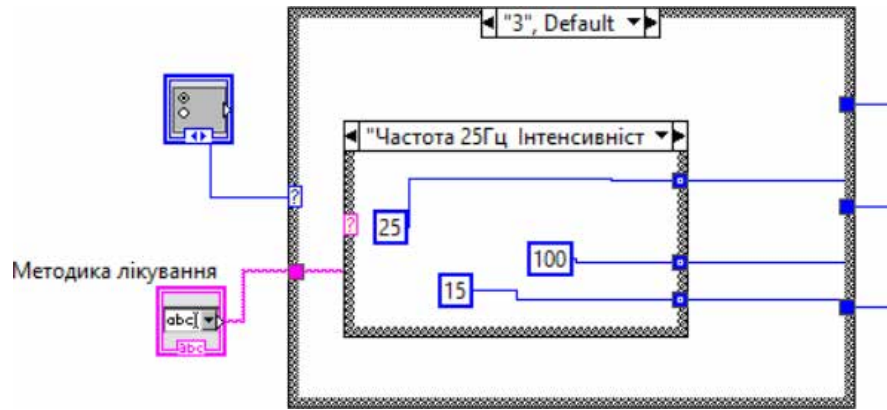


Рисунок 4.9 – Методика лікування вводиться автоматично

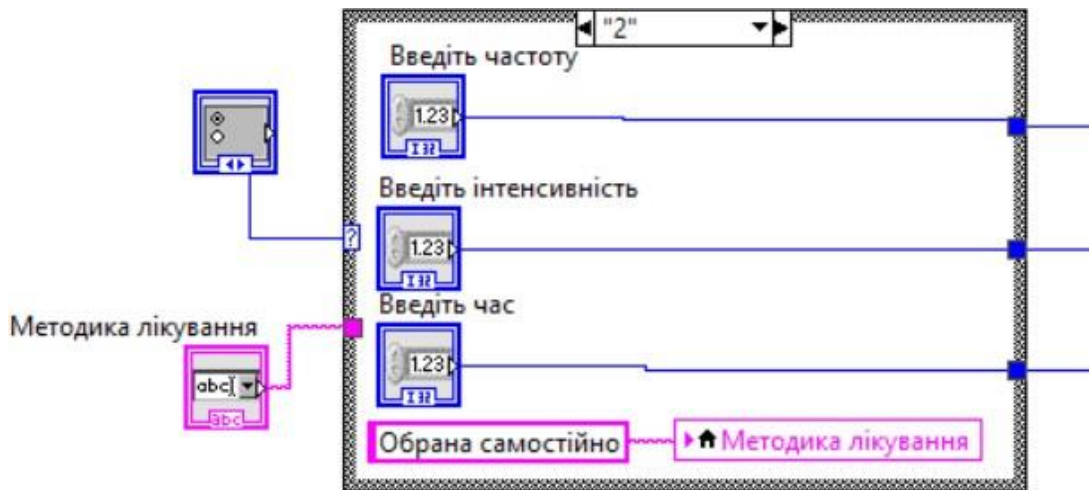


Рисунок 4.10 – Методика лікування вводиться самостійно

Якщо методика лікування вводиться самостійно в циклі на рис. 4.10, є числові індикатори, які під'єднані до виведення значень частоти,

інтенсивності та часу. В таблиці в значенні «Методика лікування» буде виведено «Обрана самостійно». Цикл, в якому обирається методика лікування, під'єднується до виведення значень частоти, інтенсивності та часу та потім об'єднується в одне значення на рис. 4.11, щоб його можна було занести в базу даних в одну клітинку, а не в три різні.

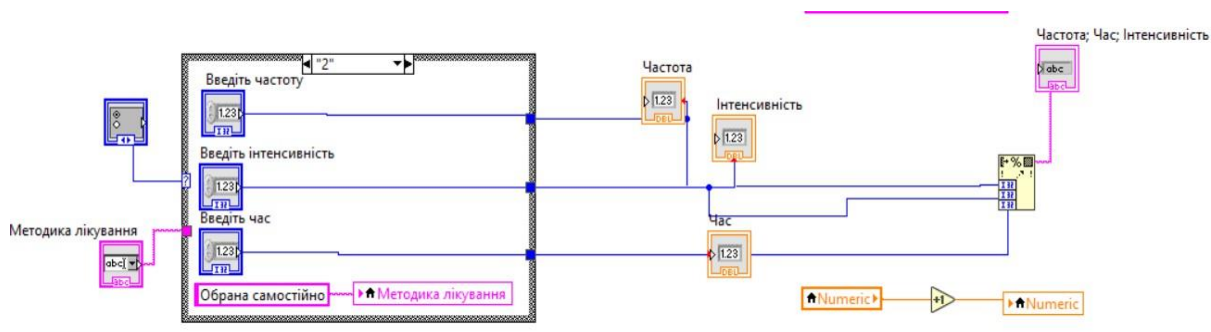


Рисунок 4.11 – Частота, інтенсивність та час

В першому циклі на рис. 4.5 є ще один для того, щоб дані можна було зберегти після використання програми при натисканні на кнопку, зображену на рис. 4.12. В першому циклі на рис. 4.5 є ще один для того, щоб дані можна було зберегти після використання програми при натисканні на кнопку, зображену на рис. 4.12.

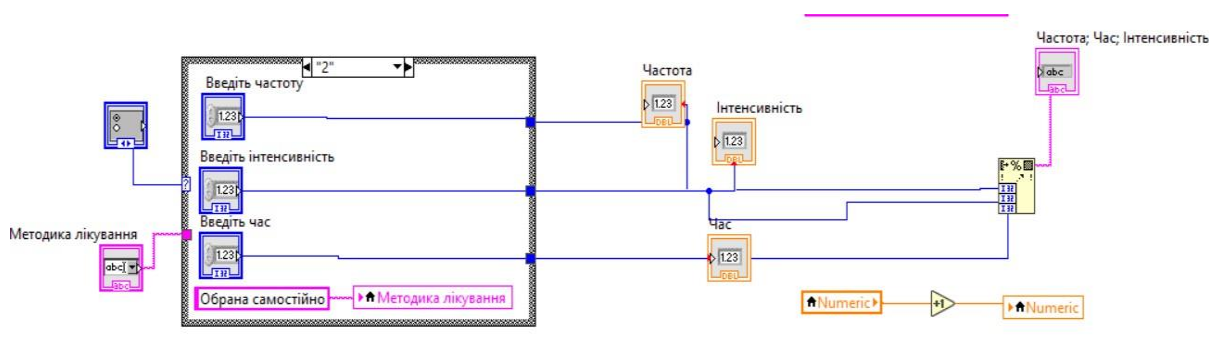


Рисунок 4.12 – Збереження даних

Кнопка на рис. 4.13, яка під'єднана до циклу з обробкою персональних даних, потрібна для того, щоб при натисканні на ней дані, які вводив лікар записалися в таблицю.

## 4.4 Тестування роботи інтерфейсу

Згідно вимог до користувача програмного продукту, вхідні дані повинні відповідати дійсності (тобто не нульові, не від'ємні та інше), а допоміжні функції можуть бути викликані під час розрахунку. В залежності від вибору і введеної інформації користувача, програма має виводити відповідну інформацію та коректно відпрацьовувати всі блоки.

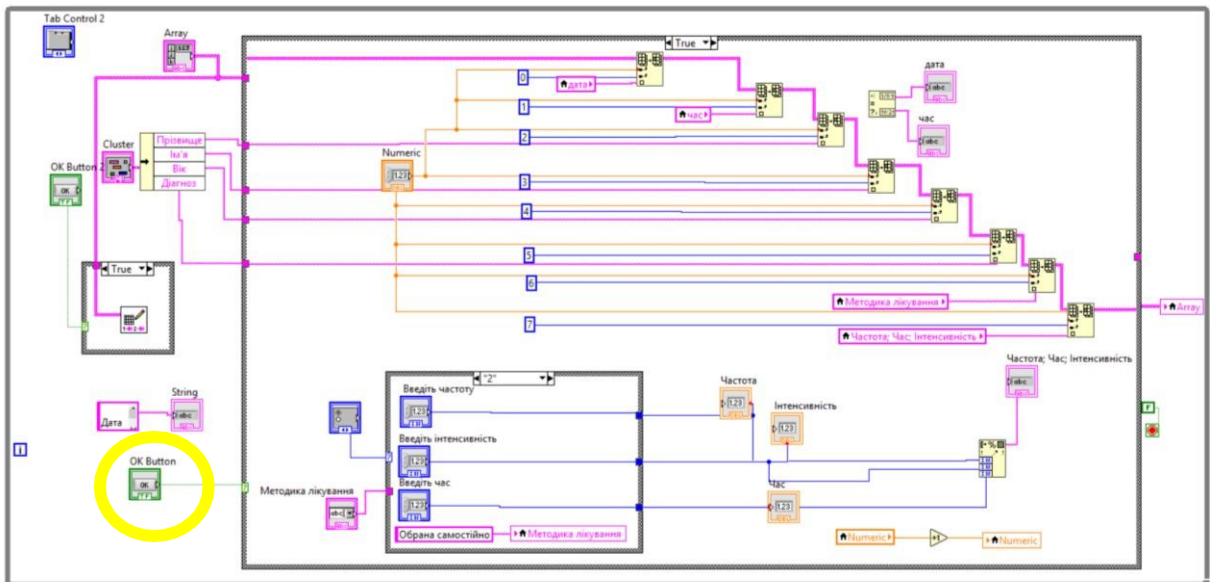


Рисунок 4.13 – Кнопка

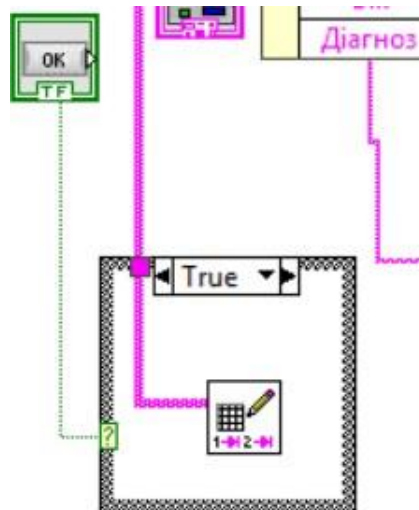


Рисунок 4.14 – Введення даних

Натискання перемикача між власним протоколом та проколом, який вже занесений до програми робиться користувачем. Якщо методика обрана самостійно, то треба ще ввести значення інтенсивності, частоти та часу на рис.

4.15.

The screenshot shows a software window with three pages (Page 1, Page 2, Page 3) and an OK button. The main area contains several input fields and controls:

- Input field: "Введіть частоту" (Enter frequency) with value 1.
- Input field: "Введіть інтенсивність" (Enter intensity) with value 100.
- Input field: "Введіть час" (Enter time) with value 40.
- Input field: "Частота" (Frequency) with value 10.
- Input field: "Інтенсивність" (Intensity) with value 100.
- Input field: "Час" (Time) with value 20.
- Radio buttons: "За протоколом" (Selected) and "Власний протокол" (Own protocol).
- Dropdown menu: "Методика лікування" (Treatment method) with selected value "Частота 10Гц Інтенсивність".

Рисунок 4.15 – Введення методики лікування

Отже була обрана методика, яка є в протоколі, отже частота, інтенсивність та час проведення процедури вписуються автоматично.

Далі за алгоритмом програми всі дані, які були внесені, повинні записатися до таблиці при натисканні кнопки на рис. 4.16.

The screenshot shows a software window with three pages (Page 1, Page 2, Page 3) and two OK buttons. Below the buttons is a table with the following columns: Дата, Час, Прізвище, Ім'я, Вік, Дагноз, Методика лікування, and Частота; Час; Інтенсивність. The table contains three rows of data:

Дата	Час	Прізвище	Ім'я	Вік	Дагноз	Методика лікування	Частота; Час; Інтенсивність
17.04.2020	4:47	Поталінсва	Марія	21	Депресія	Обрана самостійно	1 100 40
17.04.2020	4:48	Іванов	Олег	40	Залежність	Частота 20Гц	20 100 20
17.04.2020	4:48	Копалева	Олена	28	Дзвін у вухах	Частота 10Гц	10 100 20

Рисунок 4.16 – Запис в таблицю

Пацієнт записаний вірно відповідно до введених даних. В таблиці можна побачити, що коли методика обирається самостійно всі дані також

коректно записуються.

Якщо користувачу потрібно зберегти дані при натисканні кнопки, з'являється вікно для зберігання у потрібне місце на комп'ютері на рис.2.17.

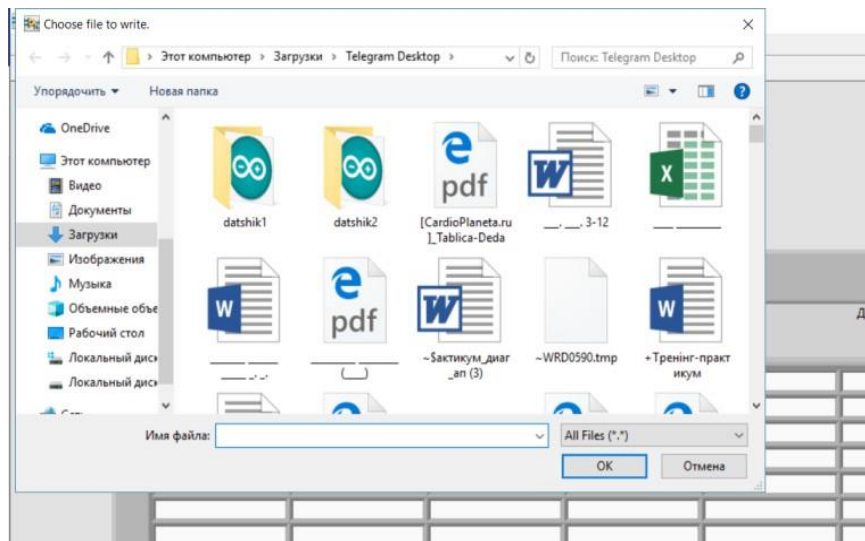


Рисунок 4.17 – Збереження таблиці

При натисканні на кнопку для збереження всю базу даних дійсно можна зберегти.

## Висновки

У розділі було розроблено зручний інтерфейс у середовищі LabView. Даним інтерфейсом буде зручно користуватися людині без спеціальної освіти та обрати методики лікування згідно свого діагнозу, який є у програмі. Також розширений інтерфейс з можливістю обрати параметри вручну дає можливість лікарю встановлювати, базуючись на його розсуд.

Для перевірки роботи інтерфейсу сумісно з приладом ТМС потрібно змодельовати роботу самого приладу.

## РОЗДІЛ 5

### ОХОРОНА ПРАЦІ

Під час роботи працівники будуть зіштовхуватися з різноманітними шкідливими факторами, які будуть негативно впливати на їх здоров'я, внаслідок чого буде зменшуватися продуктивність праці, що є надважливим в нашому випадку.

#### 5.1 Небезпека ураження людини електричним струмом

В процесі роботи приладу для транскраніальної стимуляції постійним струмом, можуть бути пробої в електриці, а значить, з'являється безпосередній електричний контакт з пристроєм. Виникає небезпека ураження електричним струмом внаслідок появи електричного потенціалу між електричним струмом та тілом людини в результаті пробоя електричної схеми вхідного ланцюга або прямому дотику проводів пристрою з пошкодженою ізоляцією до струмоведучих частин. Так само ураження електричним струмом може виникнути при дотику самої людини до електричних частин.

Таблиця 5.1 – Основні небезпеки електричного характеру

№	Найменування функціонального блоку	Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
1.	Блок завдання вихідного струму	Постійний струм	Недостатній захист дротів від теплового впливу	ураження електричним струмом
2.	Батарейка	Пошкодження захисної оболочки та виток електроліту	Механічна деформація.	ураження електричним струмом

Таблиця 5.2. Реальні та нормативні фактори безпеки

№	Фактор безпеки	Реальне значення	Нормативні значення
21.	Максимальна сила струму	2 мА	5 мА
32.	Пошкодження захисної оболочки	Можливе	Не допускається

Таблиця 5.3 – Заходи з забезпечення безпеки роботи стимулятора

№	Група номенклатурних заходів з ОП	Вид заходу	Критерій вибору
1.	Технічні засоби	Захист батареї від теплового впливу. Недопускання механічних деформацій. Використання низької напруги живлення Обмеження тривалості за допомогою реле часу Індикація рівня заряду батарейки через світлодіод. Наявність запобіжника перед електродами.	Уникнення враження струмом; уникнення витoku електроліту.
2.	Організаційні заходи	інструкція з експлуатації, навчання персоналу;	Забезпечення ознайомленості з приладом;
3.	Режимні заходи	перевірка несправностей спеціалістом	уникнення контакту з елементами під напругою;
4.	Експлуатаційні заходи	перевірка на цілісність батарейки та моніторинг індикації заряду;	забезпечення безпечної роботи з об'єктом;
5.	ЗІЗ	не передбачені;	

## 5.2 Біологічна безпека

Таблиця 5.4 – Основні біологічні небезпеки

Джерело небезпеки	Причини небезпеки
Нашкірні електроди для стимуляції	Тривалий контакт з електродами та виникнення алергічної реакції

Таблиця 5.5 - Реальні та нормативні фактори небезпеки

№	Фактор небезпеки	Реальне значення	Нормативні значення
21.	Максимальний час стимуляції	35 хв.	45 хв

Таблиця 5.6 – Заходи з забезпечення безпеки

№	Група номенклатурних заходів з ОП	Вид заходу	Критерій вибору
1.	Експлуатаційні заходи	Обов'язкове використання електролітичної рідини для змочування губчатої підкладки	Уникнення ураження негативною дією струму.
2.	Організаційні заходи	Обов'язкова консультація вузького спеціаліста перед призначенням процедури та у разі скарг пацієнта	Забезпечення безпеки пацієнта ;

## 5.3 Небезпека пожежі

У блоці завдання часу процедури можливі загоряння. Причини їх виникнення та способи уникнення наведено в таблицях.

Таблиця 5.7 – Основні небезпеки пожежі

№	Найменування функціонального блоку	Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
1.	Блок завдання часу	Транзистор ВС109С	Пробій захисного діоду КД522	загоряння приладу, виникнення пожежі
2.	Батарейка	Попадання електроліту на плату приладу	Неправильна експлуатація	загоряння приладу, виникнення пожежі

Таблиця 5.8 - Реальні та нормативні фактори небезпеки

№	Фактор небезпеки	Реальне значення	Нормативні значення
1.	Пошкодження захисної оболочки	Можливе	Не допускається

Таблиця 5.9 – Заходи з забезпечення охорони праці

№	Група номенклатурних заходів з ОП	Вид заходу	Критерій вибору
1.	Технічні засоби	Ізоляція частин під напругою та недопуск механічних пошкоджень;	захист від короткого замикання;
2.	Організаційні заходи	інструкція з експлуатації для персоналу;	Забезпечення ознайомленості з приладом;
3.	Режимні заходи	вимкнення приладу при поломці;	Захист приладу від поломки;
4.	Експлуатаційні заходи	Технічний огляд приладу перед стимуляцією	своєчасне виявлення дефектів, які можуть призвести до загоряння;
5.	ЗІЗ	не передбачені;	

Клас пожежі : А.

## **5.4 Розробка «Інструкції з техніки безпеки при експлуатації транскранеального стимулятора»**

Розробка детальної та зрозумілої Інструкції з техніки безпеки при експлуатації транскранеального стимулятора є критично важливим етапом для забезпечення безпеки пацієнтів та медичного персоналу. Ця інструкція повинна охоплювати всі аспекти використання пристрою, від підготовки до можливих надзвичайних ситуацій, і має бути доступною для ознайомлення всім, хто працює з обладнанням.

Основні розділи інструкції:

### **1. Загальні положення:**

- Призначення інструкції та її обов'язковість для виконання.
- Кваліфікаційні вимоги до персоналу, який допускається до роботи з транскранеальним стимулятором (ТКС).
- Відповідальність за порушення вимог інструкції.
- Визначення термінів, що використовуються в інструкції (наприклад, "транскранеальна стимуляція", "протипоказання", "побічні ефекти").

### **2. Вимоги безпеки перед початком роботи:**

- Перевірка цілісності та справності обладнання (кабелі, електроди, корпус пристрою).
- Перевірка наявності та актуальності медичної документації пацієнта (історія хвороби, згода на процедуру).
- Перевірка відсутності абсолютних протипоказань до проведення ТКС у пацієнта (наприклад, наявність металевих імплантів у голові, епілепсія в анамнезі, вагітність).
- Підготовка робочого місця: забезпечення достатнього освітлення, відсутність сторонніх предметів, заземлення обладнання.
- Використання засобів індивідуального захисту (за потреби).

### **3. Вимоги безпеки під час роботи:**

- Дотримання протоколів проведення процедури ТКС (розташування електродів, параметри стимуляції, тривалість сеансу) відповідно до рекомендацій виробника та медичних стандартів.

- Постійний моніторинг стану пацієнта під час процедури (візуальний контроль, вербальний контакт).

- Негайне припинення процедури у разі виникнення будь-яких незвичайних реакцій або скарг пацієнта (наприклад, сильний дискомфорт, запаморочення, судоми).

- Заборона відволікатися від роботи та залишати пацієнта без нагляду під час сеансу.

- Дії при виникненні нештатних ситуацій (відключення електроенергії, несправність приладу).

#### **4. Вимоги безпеки після закінчення роботи:**

- Відключення пристрою від мережі та його очищення (дезінфекція електродів).

- Документування проведеної процедури в медичній карті пацієнта.

- Зберігання обладнання у спеціально відведеному місці відповідно до рекомендацій виробника.

- Повідомлення керівництва про виявлені несправності або проблеми під час роботи.

#### **5. Дії в аварійних ситуаціях:**

- Послідовність дій при виникненні пожежі.

- Послідовність дій при ураженні електричним струмом.

- Надання першої домедичної допомоги при судомах, непритомності або інших гострих станах, що можуть виникнути під час процедури.

- Контактні дані відповідальних осіб та екстрених служб.

#### **Особливості розробки та впровадження:**

- До розробки інструкції слід залучати кваліфікованих фахівців: лікарів, інженерів медичної техніки, фахівців з охорони праці.

– Інструкція повинна бути написана зрозумілою мовою, без складних медичних чи технічних термінів, або з обов'язковим їх поясненням.

– Інструкція повинна регулярно переглядатися та оновлюватися відповідно до змін у законодавстві, рекомендаціях виробника обладнання та нових наукових даних.

– Весь персонал, який працює з ТКС, повинен пройти обов'язкове навчання з техніки безпеки та бути ознайомленим з цією інструкцією під особистий підпис. Регулярні тренінги та перевірки знань є обов'язковими.

– Інструкція повинна бути легкодоступною на робочому місці, бажано у роздрукованому вигляді та в електронному форматі.

Ретельна розробка та неухильне дотримання цієї інструкції є запорукою безпечного та ефективного використання транскранеального стимулятора в медичній практиці.

## **Висновок**

У даному розділі було розглянуто потенційно небезпечні і шкідливі виробничі фактори, створені конструкцією розробленого об'єкту та їх усунення. Основну небезпеку становить електрична небезпека.

У результаті оцінки потенційних небезпек розроблено інструкцію з техніки безпеки при експлуатації даного об'єкту.

## ВИСНОВКИ

У рамках виконання дипломної роботи було розроблено біомедичну систему для транскраніальної стимуляції (ТКС), яка має значний потенціал для застосування в медичних і нейрореабілітаційних практиках. Запропонована система включає кілька ключових компонентів: блок керування стимуляцією, електроди для подачі електричних імпульсів, систему зворотного зв'язку для моніторингу мозкової активності, а також програмне забезпечення для налаштування параметрів стимуляції та їх динамічного коригування в реальному часі. За допомогою ТМС проводиться профілактика таких захворювань як : депресія, епілепсія, екстрапірамідні рухові розлади, хронічний біль та профілактика після інфаркту. Дія на організм відбувається за рахунок потенціалу дії, що виникає в нейроні під впливом імпульсу ТМС, поширюється по аксону і здатний через синапси активізувати безліч оточуючих нейронів різних модальностей.

Стандартний прилад для ТМС складається з блоку живлення, блоку керування, кабелю, який з'єднує блок керування з індуктором та сам індуктор. Транскраніальна магнітна стимуляція досягається за рахунок швидкого розрядного струму від конденсатора великої ємності в котушку для створення імпульсних магнітних полів 1-10 мТл.

Розроблена схема в середовищі MicroCap дає змогу побачити принцип роботи приладу. Створений інтерфейс в середовищі LabView буде зручним у використанні лікарям у стаціонарі за рахунок бази даних та можливістю обирати методику лікування та людям без медичної освіти вдома, тому що є вбудовані в програму методики лікування зі зрозумілими параметрами.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Опис магнітного стимулятора "Нейро-МС/Д". Архівна копія від 4 березня 2016 року на Wayback Machine neurosoft.com
2. Застосування ТМС в реабілітації [Електронний ресурс] – Режим доступу <http://www.mif-ua.com/archive/>
3. Транскараниальна магнітна стимуляція [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://nodus.ua/tsentr/>
4. Stahnisch F. W. Concept of neuronal plasticity: the ambiguity lives on / F. W. Stahnisch, R. Nitsch, Santiago Ramon y Cajal's // Trends Neurosci. – 2002. – Vol. 25, № 11. – P. 589 – 591.
5. Zilles K. Neuronal plasticity as an adaptive property of the central nervous system / K. Zilles // An. Anat. – 1992. – Vol. 174, № 5. – P. 383–391.
6. Pittenger C. Disorders of memory and plasticity in psychiatric disease / C. Pittenger // Dialogues Clin. Neurosci. – 2013. – Vol. 15, № 4. – P. 455–463.
7. Spalding K. L. Dynamics of hippocampal neurogenesis in adult humans / K. L. Spalding, O. Bergmann, K. Alkass et al. // Cell. – 2013. – Vol. 153, № 6. – P. 1219–1227.
8. Sairanen M. Brain-derived neurotrophic factor and antidepressant drugs have different but coordinated effects on neuronal turnover, proliferation, and survival in the adult dentate gyrus / M. Sairanen, G. Lucas, P. Ernfors et al. // J. Neurosci. – 2005. – Vol. 25, № 5. – P. 1089–1094.
9. Martinez A. TrkB and TrkC signaling are required for maturation and synaptogenesis of hippocampal connections / A. Martinez, S. Alcantara, V. Borrell [et al.] // J. Neurosci. – 1998. – Vol. 18, № 18. – P. 7336–7350.
10. Doron R. A novel herbal treatment reduces depressive-like behaviors and increases BDNF levels in the brain of stressed mice / R. Doron, D. Lotan, N. Einat [et al.] // Life Sci. – 2014. – Vol. 94, N 2. – P. 151 – 157.

11. Dwivedi Y. Brain-derived neurotrophic factor: role in depression and suicide / Y. Dwivedi // *Neuropsychiatr. Dis. Treat.* – 2009. – Vol. 5. – P. 433–449.
12. Bondy B. Pathophysiology of depression / B. Bondy // *Dialogues in clinical neuroscience.* – 2002. – Vol. 4, № 1 – P. 7–20.
13. Shakesby A. C. Overcoming the effects of stress on synaptic plasticity in the intact hippocampus: rapid actions of serotonergic and antidepressant agents. A. C. Shakesby [et al.] // *J. Neurosci.* – 2002. – Vol. 22. – P. 638–44
14. Vernieri F., Maggio p., Tibuzzi F. et al. High frequency repetitive transcranial magnetic stimulation decreases cerebral vasomotor reactivity. *Clin Neurophysiol* 2009; 120(5):1188–1194.
9. Dileone M., profice p., pilato F. et al. Repetitive transcranial magnetic stimulation for ALS. *CNS Neurol Disord Drug Targets* 2010; 9(3): 331–334.
10. Rossia S., Hallett M., Rossini p.M., Pascual-Leone A. and The Safety of TMS Consensus Group. Safety, ethical considerations, and application guidelines for the use of transcranial magnetic stimulation in clinical practice and research. *Clin Neurophysiol* 2009; 120(12): 2008–2039.
11. Kim D. R. et al. A survey of patient acceptability of repetitive transcranial magnetic stimulation (TMS) during pregnancy // *Journal of affective disorders : журнал.*— 2011.—Vol. 129, no. 1.—P. 385—390.
12. ↑ Kim D. R. et al. An open label pilot study of transcranial magnetic stimulation for pregnant women with major depressive disorder // *Journal of Women's Health: журнал.*— 2011.—Vol. 20, no. 2.—P. 255—261.
13. Gahr M. et al. Successful treatment of major depression with electroconvulsive therapy in a pregnant patient with previous non-response to prefrontal rTMS. // *Pharmacopsychiatry: журнал.*— 2012.—Vol. 45, no. 2.—P. 79—80.
14. Fregni F., Otachi p.T., Do Valle A. et al. A randomized clinical trial of repetitive transcranial magnetic stimulation in patients with refractory epilepsy. *Ann Neurol* 2006; 60(4): 447–455.
15. Патент на Нейро МС/Д 2011р. RU 211618390
20. Eldaief M., press D., Pascual Leone A. Transcranial magnetic stimulation in

- neurology. *Neurology. Clinical practice* 2013; Dec: 519–525.
21. Rotenberg A. prospects for clinical applications of transcranial magnetic stimulation and real-time EEG in epilepsy. *Brain Topogr* 2010; 22: 257–266
  22. Santiago-Rodríguez E., Cárdenas-Morales L., Harmony T. et al. Repetitive transcranial magnetic stimulation decreases the number of seizures in patients with focal neocortical epilepsy. *Seizure* 2008;17(8):677–683
  27. Najib U., Bashir S., Edwards D. et al. Transcranial Brain Stimulation: Clinical Applications and Future Directions. *Neurosurg Clin N Am* 2011; 22(2): 233–258.
  28. Classen J. Transcranial magnetic stimulation. Hand-on course manual. EFNS congress 2014; 12 p.
  29. Miniussi C., Cappa S.F., Cohen L.G. et al. Efficacy of repetitive transcranial magnetic stimulation/transcranial direct current stimulation in cognitive neurorehabilitation. *Brain Stimul* 2008; 1: 326–336.
  30. Mansur C.G., Fregni F., Boggio p.S. et al. A sham stimulation controlled trial of rTMS of the