
СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 615.47

Я.С. КУЗЬМІНОВ, О.В. КАРАСЬ, В.С. ПАВЛОВ

ІНТЕЛЕКТУАЛІЗОВАНА СИСТЕМА ІНТЕРВАЛЬНОЇ ГІПОКСИЧНОЇ ТЕРАПІЇ З БІОЗВОРОТНИМ КОНТРОЛЕМ У РЕАБІЛІТАЦІЇ ВІЙСЬКОВИХ

*Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе 95, 21021, Вінниця,
Україна, e-mail: karas@vntu.edu.ua*

Анотація. В умовах повномасштабної війни та постпандемічного періоду Україна стикається з безпрецедентним зростанням кількості пацієнтів із травмами, порушеннями опорно-рухового апарату, післяінсультними та постковідними станами. Однією з перспективних методик сучасної фізичної реабілітації є інтервальна гіпоксична терапія (ІГТ), яка здатна активізувати адаптаційні резерви організму, поліпшити метаболічні та нейрогуморальні процеси, стимулювати регенерацію та підвищити стійкість до навантажень. Однак в Україні на сьогодні майже відсутнє серійне виробництво апаратів ІГТ, що відповідають сучасним вимогам безпеки, адаптивності та інтеграції з біозворотним зв'язком.

Ключові слова: інтервальна гіпоксична терапія; біозворотний зв'язок; метаболографія; гіпоксично-гіпероксичні протоколи; реабілітація військовослужбовців; кардіореспіраторна реабілітація; нейрореабілітація; медичний реабілітаційний комплекс; проектування медичних виробів.

Abstract. In the context of full-scale war and the post-pandemic period, Ukraine faces a sharp increase in the number of patients with musculoskeletal injuries, post-stroke and post-COVID conditions, as well as neuropsychological disorders. Intermittent hypoxic therapy (IHT) is a promising modality of modern physical rehabilitation that can activate adaptive reserves, improve metabolic and neurohumoral regulation, and enhance resistance to physical and psycho-emotional stress. However, there is almost no domestically produced IHT equipment that meets contemporary requirements of safety, adaptability and integration with biofeedback systems.

Keywords: intermittent hypoxic therapy; biofeedback; metabolic cart; hypoxic-hyperoxic exposure; rehabilitation; military medicine; cardiopulmonary rehabilitation; medical device design.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-50-2-104-113

ВСТУП

У сучасних умовах значного зростання потреб у фізичній та нейрореабілітації — внаслідок військових дій, пандемії COVID-19, а також демографічного старіння — виникає нагальна необхідність впровадження інноваційних, ефективних і технологічно доступних методів терапії [1. 2]. Серед них особливе місце займає інтервальна гіпоксична терапія (ІГТ), як метод, що дозволяє стимулювати адаптаційні механізми організму, покращити функціональний стан кардіореспіраторної та нервової системи, а також впливати на обмінні процеси.

Метою роботи є представлення нової технічної концепції системи інтервальної гіпоксичної терапії з функціональним біозворотним контролем, розробленої з урахуванням потреб реабілітаційної медицини, зокрема військової. Система включає генератор газової суміші на базі системи з мембранним модулем, інтерфейсне та комп'ютерне управління (Linux/WEB), метаболограф для діагностики та моніторингу, а також велоергометр типу AirBike для реалізації як пасивних, так і активних протоколів. Забезпечується автоматична корекція подачі суміші на основі даних з пульсоксиметрів, датчиків потоку, O₂, CO₂ та фізіологічних параметрів користувача.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Порівняльний аналіз показав, що запропонована система має конкурентну перевагу завдяки мобільності, масштабованості, вартості до 5 000 USD (включаючи метаболограф), та можливості адаптації протоколів у режимі реального часу. Представлено огляд аналогів, зокрема систем Reoxy та CardioScan AirZone, а також вказано на практичну ефективність методики у роботі з військовослужбовцями в умовах клінічної реабілітації [3, 4, 5].

Результати можуть бути використані в практиці медичних центрів, реабілітаційних установ, а також у рамках розробки національних технологій для забезпечення потреб сил оборони та цивільного населення.

За останні десятиліття ефективність ІГТ була підтверджена низкою досліджень у контексті спортивної медицини, геріатрії, кардіології та неврології. Однак попри наукову обґрунтованість та клінічну доцільність, в Україні ІГТ не набула широкого поширення через брак доступного та технологічно адаптованого обладнання. Більшість імпортованих систем мають високу вартість, складну логістику, обмежені можливості адаптації до індивідуальних протоколів лікування, а також недостатню інтеграцію з біозворотним зв'язком.

З огляду на ці виклики, була поставлена задача — створення вітчизняного рішення, здатного конкурувати з існуючими системами, орієнтованого на використання в реабілітаційних установах. На основі клінічного досвіду автора як практичного реабілітолога та користувача однієї з небагатьох діючих систем ІГТ в Україні, сформовано технічне завдання, реалізоване у вигляді мобільного комплексу з гнучким керуванням протоколами, біозворотним контролем та можливістю інтеграції з фізичними навантаженнями.

БІОФІЗІОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ІНТЕРВАЛЬНОЇ ГІПОКСИЧНОЇ ТЕРАПІЇ

Інтервальна гіпоксична терапія (ІГТ) активує широкий спектр фізіологічних адаптацій у відповідь на періодичну нестачу кисню. Цей стресор запускає каскад реакцій, зокрема:

- Молекулярна адаптація: ключову роль відіграють HIF-фактори (Hypoxia-Inducible Factors), які активують експресію генів, відповідальних за ангіогенез (VEGF), еритропоєз (еритропоєтин), метаболізм глюкози, захист від оксидативного стресу.
- Мітохондріальна адаптація: відбувається підвищення ефективності дихального ланцюга, збільшення щільності мітохондрій, покращення окисного фосфорилування та енергозабезпечення тканин.
- Ангіогенез і мікроциркуляція: покращується васкуляризація тканин, нормалізується ендотеліальна функція, що важливо при ішемічних станах та мікроангіопатіях.
- Гормональна регуляція: зниження рівнів кортизолу, нормалізація циркадного ритму та підвищення секреції мелатоніну, що сприяє покращенню сну, зниженню тривожності, відновленню HPA-осі.
- Буферна система та толерантність до лактату: гіпоксія тренує механізми компенсації ацидозу — зростає активність карбонгідрази, буферних білків, покращується лактатна утилізація.
- Антиоксидантний захист: активація ферментів SOD, каталази, глутатіонпероксидази, зниження продукції вільних радикалів, підвищення опірності тканин до окисного стресу.
- Імуномодуючий ефект: нормалізація цитокінового профілю, зниження рівня прозапальних маркерів (TNF- α , IL-6), посилення адаптивної імунної відповіді.
- Нейропсихологічні ефекти: покращення нейропластичності, збільшення синтезу BDNF (нейротрофічного фактора), стабілізація настрою, відновлення когнітивних функцій.

ІГТ формує адаптивні резерви організму, підвищуючи його стійкість до фізичних і психоемоційних навантажень. Особливо це важливо для осіб після черепно-мозкових травм, інсультів, ПТСР, постковідних ускладнень [6, 7].

Метаболографія у цій системі дозволяє об'єктивно оцінити:

- VO_2 (споживання кисню),
- VCO_2 (виділення вуглекислого газу),
- RQ (дихальний коефіцієнт),
- VE (вентиляційний об'єм),
- частоту дихання та метаболічну ефективність.

Ці дані використовуються як для первинної діагностики, так і для динамічного моніторингу ефективності терапії та адаптації протоколів навантаження.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

ПРИНЦИПИ ДІЇ СИСТЕМИ

Розроблена система (рис. 1) інтервальної гіпоксичної терапії є багатокомпонентним мобільним комплексом, який монтується на платформі з колесами, що забезпечує умовну портативність. Основу системи складають:

1. Газогенераторний блок,
2. Блок генерації газової суміші (гіпоксичний блок):
 - Компресорний модуль .
 - Мембранний азотний модуль , який дозволяє отримати суміші з вмістом O_2 12 %
 - Система байпасів і електромагнітних клапанів , що дозволяє змішувати азотну суміш з атмосферним повітрям для точного формування фаз 12–40 % O_2 .
 - Газозмішувальна камера зі стабілізатором тиску та ресивером для накопичення суміші та вирівнювання пульсацій потоку.
 - Окремий ресивер для кисневого виходу мембрани, який використовується для фази гіпероксії (до 40% O_2).
 - Встановлені датчики тиску (2 манометри), O_2 і CO_2 , датчик потоку, що дозволяють комп'ютерно контролювати якість суміші та безпеку пацієнта.
- Дихальний контур і маска:
 - 3-клапанна маска з антикапнічним клапаном
 - Ресивер на 3 л
 - Датчик потоку для оцінки вентиляції пацієнта та компенсації за алгоритмом.
- Блок керування:
 - Промисловий міні-ПК на Linux з веб-інтерфейсом на Python.
 - Реалізує автоматичну зміну фаз (гіпоксія/нормоксія/гіпероксія) та керує пропорцією відкриття клапанів у режимі реального часу.
 - Інтеграція з велоергометром типу AirBike, пульсоксиметром і метаболографом для реалізації динамічних протоколів із біозворотним контролем.
- Особливості програмно-апаратної логіки:
 - Система здатна генерувати гіпоксичні суміші від 12 % до 21 % O_2 та фази гіпероксії до 36 % O_2 .
 - Фази й пропорції керуються електромагнітними клапанами за таблицею, прив'язаною до SpO_2 і VO_2 пацієнта.
 - Передбачено аварійне перемикання на нормоксію при критичних показниках.
 - Вся система працює з мінімальною затримкою в реальному часі, з можливістю формування різних циклів для конкретної програми [8].

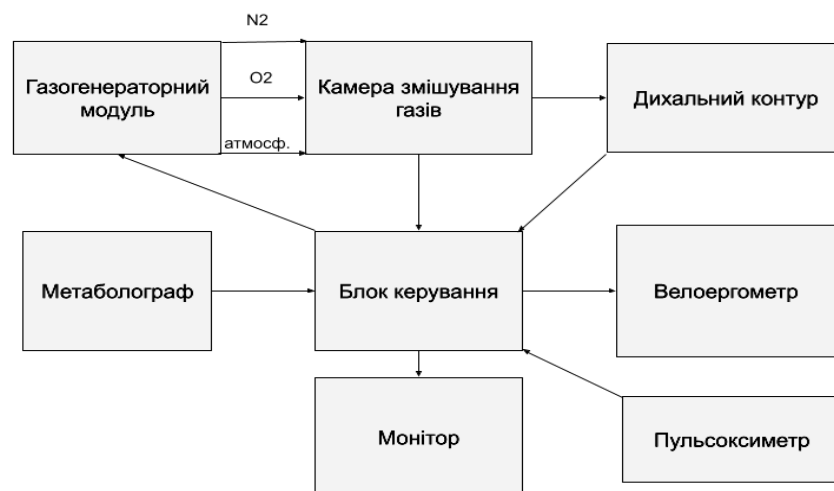


Рисунок 1 – Повна блок-схема системи інтервальної гіпоксичної терапії з біозворотним контролем

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Складові модулі та їх наповнення:

1. Газогенераторний модуль включає:
 - безмасляний компресор ;
 - мембранний модуль азотної генерації ;
 - комплекс фільтрів: механічний (грубої очистки), вугільний, вологоуловлювач;
 - манометр для контролю тиску після компресора;
 - система електромагнітних клапанів, включно з байпасом для подачі атмосферного повітря;
 - ресивер для збирання кисневого «вихлопу» мембрани (для фаз гіпероксії).
2. Газозмішувальна камера включає:
 - основну камеру змішування з турбулентним стабілізатором потоку;
 - датчик концентрації O_2 ;
 - резервний манометр для контролю стабільності тиску в газовій суміші;
 - підключення до клапанів подачі суміші в дихальний контур.
3. Дихальний контур включає:
 - ресивер дихального контуру об'ємом 2–3 л;
 - датчик потоку для реєстрації вентиляції пацієнта;
 - маску з трьома клапанами: клапан вдиху, клапан видиху, антикапнічний клапан;
 - з'єднувальні шланги та кріплення до корпусу апарата.
4. Блок керування та моніторингу включає:
 - промисловий міні-ПК на базі Linux із веб-інтерфейсом на Python;
 - сенсорний монітор 10–12" для відображення фаз, SpO_2 , O_2 , CO_2 , VO_2 , VCO_2 , RQ;
 - пульт екстреної зупинки та керування клапанами;
 - пульсоксиметр Bluetooth для SpO_2 та HR.
5. Модуль метаболографа включає:
 - датчик потоку;
 - датчик O_2 ;
 - датчик CO_2 ;
 - USB/Bluetooth-з'єднання для передачі даних VO_2 , VCO_2 , RQ, VE та частоти дихання.



Рисунок 2 – Дизайн прототипу апарату гіпоксичної терапії

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Це компактна мобільна система, що поєднує:

- повну контрольованість суміші,
- інтеграцію з біозворотним зв'язком і велотренуванням,
- Блок керування — міні-комп'ютер на базі операційної системи Linux, з веб-інтерфейсом, що написаний мовою Python. Забезпечує гнучке програмне керування протоколами, з можливістю адаптації параметрів в режимі реального часу.
- Велоергометр типу AirBike, що дозволяє активувати як верхні, так і нижні кінцівки одночасно. Це критично важливо для максимального залучення м'язової маси, покращення периферичної циркуляції та активації тканинного обміну. Ергометр має Bluetooth-підключення до центральної системи керування.
- Додаткові модулі, зокрема крісло для пасивних процедур та дихальна маска з резервуаром і датчиками потоку.

Система підтримує два режими роботи:

- Пасивний режим — пацієнт перебуває у стані спокою або легкого сну, дихаючи підготовленою газовою сумішшю;
- Активний режим — пацієнт виконує фізичне навантаження на велоергометрі, що дозволяє реалізувати складні протоколи тренування з контролем з боку біозворотного зв'язку.

Алгоритм дії передбачає чітку черговість фаз гіпоксії (зниження FiO_2 до 10–12%), нормоксії ($\text{FiO}_2 \approx 21\%$) і гіпероксії ($\text{FiO}_2 > 30\%$ у разі застосування), з автоматичним переключенням режимів. Протоколи містять зазвичай 4–6 циклів гіпоксія/нормоксія тривалістю 2–10 хв кожен.

Усі компоненти системи інтегруються в єдину цифрову екосистему з моніторингом у реальному часі, що дозволяє адаптувати навантаження, тривалість і склад суміші на основі фізіологічного стану користувача.

БІОЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК І МЕТАБОЛОГРАФІЯ

Запропонована система передбачає багатоканальний біозворотний контроль, який дозволяє динамічно адаптувати параметри інтервальної гіпоксичної терапії під індивідуальні фізіологічні характеристики пацієнта в режимі реального часу. До функціональних каналів біозворотного зв'язку входять:

- Пульсоксиметрія — моніторинг насичення артеріальної крові киснем (SpO_2), частоти серцевих скорочень (HR), що є ключовим критерієм гіпоксичної реакції.
- Газоаналіз — сенсори O_2 та CO_2 у вдихуваній і видихуваній суміші.
- Велоергометр — дані про навантаження (потужність, частота обертання педалей, витрата калорій), що дозволяє адаптувати інтенсивність фізичного компоненту терапії.
- Метаболограф — комплексний діагностичний модуль, що аналізує VO_2 (споживання кисню), VCO_2 (виділення вуглекислого газу), дихальний коефіцієнт (RQ), вентиляційний об'єм, частоту та глибину дихання.

Інтеграція цих сенсорів дозволяє:

- Виявляти індивідуальні реакції на гіпоксію та навантаження;
- Регулювати тривалість фаз гіпоксії/нормоксії/гіпероксії на основі об'єктивних показників;
- Автоматично змінювати подачу газової суміші через клапанну систему;
- Здійснювати контрольовану адаптацію фізичного навантаження у велоергометрі в залежності від метаболічної реакції.

Метаболографія дає змогу не лише відслідковувати перебіг процедури, але й формувати функціональні висновки про стан кардіореспіраторної системи, рівень метаболічної адаптації, енергетичний баланс пацієнта. Ця аналітика може використовуватись як у початковому обстеженні, так і при етапному контролі ефективності терапії. Крім того, всі дані зберігаються в електронному вигляді, що дозволяє формувати об'єктивні звіти для клінічної оцінки та наукового аналізу [9, 10, 11].

ІНТЕРФЕЙС ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ

Візуальний інтерфейс програмної частини апарату Altrogen забезпечує комфортний юзер експірієнс і допомагає спеціалістам легко орієнтуватися в можливостях і функціях апарату. Він дозволяє додавати нових користувачів, враховуючих параметри, проводити тестування, а також змінювати параметри і контролювати проходження процедур безпечно. Всі дані, які читає апарат, візуалізовано та передано на монітор для того, щоб спеціалісти, які обслуговують процедуру, та пацієнт або клієнт могли

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

спостерігати в реальному часі, що відбувається на апараті, які показники має пацієнт, які показники видає апарат. Деякі сторінки візуальних інтерфейсів програмного забезпечення, представлені в даному пункті на наступних малюнках.



Workout Session

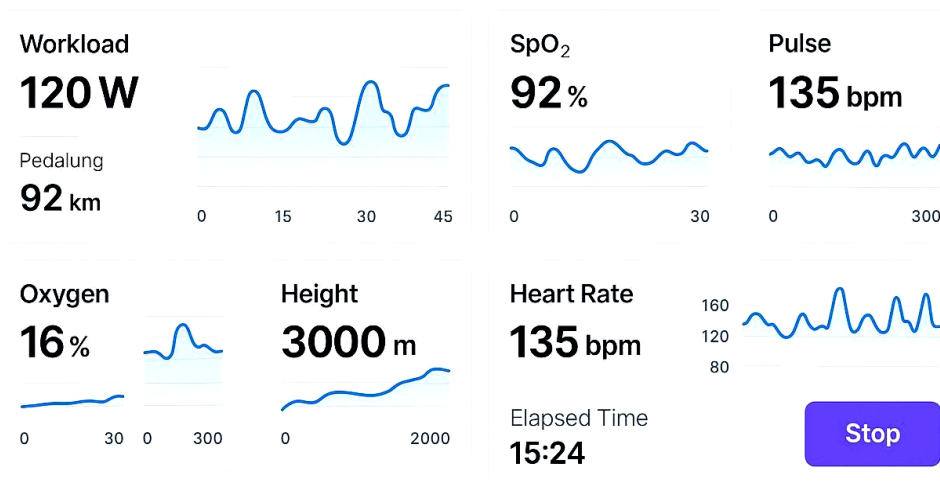


Рисунок 3 – Інтерфейс екрану проходження процедури, де відображаються показники поточної сесії

Test 2

Martinet Test - cycle ergometer

Heart rate

At rest	72 bpm	Normal
During exercise	124 bpm	Normal
1 min after exercise	101 bpm	Normal

Oxygen level

During exercise	94 %	Normal
-----------------	------	--------

Generate PDF

Send via email

Continue

Рисунок 4 – Інтерфейс екрану “Результат функціонального тесту” (Модифікована проба Мартіне)

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Test

Select a test to begin

☒ **Test 1**
Metabolic test at rest

☐ **Test 2**
Martinet test on cycle ergometer

☐ **Test 3**
Short hypoxic test with breathing gas analysis

☐ **Test 4**
Metabolic test during or after exercise

Next

Рисунок 5 – Інтерфейс екрану вибору тестів

Add New Patient

First name

Last name

Date of birth

Select...

Sex

Weight

Save

Рисунок 6 – Інтерфейс екрану додавання нового пацієнта

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ З ІСНУЮЧИМИ СИСТЕМАМИ

Сучасний ринок інтервальних гіпоксичних систем (ІГТ) представлений кількома технологічними підходами, які відрізняються як принципами реалізації гіпоксії, так і технічним рівнем адаптації до користувача. З огляду на доступні рішення, системи ІГТ умовно можна класифікувати на три основні групи:

- Азотно-генераторні комплекси (генераторного типу) — приклади: Nuroxico, Altitude Training [12, 13, 14]. У цих системах використовується генерація азоту або відкачування кисню для створення гіпоксичного середовища. Вони відрізняються високою вартістю (від 20–40 тис. USD), складною інфраструктурою (блоки генерації, клапанні системи, резервуари), потребою в калібруванні, часто громіздкі та не мають вбудованих систем біозворотного зв'язку.

- Мультигазові системи (зі змішуванням кисню/азоту) — приклад: Reoxy. Забезпечують точне дозування газової суміші через змішувальні блоки, мають продуману інтерфейсну реалізацію, але залишаються обмеженими за мобільністю і не завжди інтегрують зовнішні тренажери. Вартість таких систем — близько 15–20 тис. USD. Біозворотний зв'язок реалізовано лише частково — за рахунок пульсоксиметрії, без повноцінної метаболографії чи контролю фізичного навантаження.

- Функціональні системи — приклад: CardioScan AirZone. Ці системи забезпечують створення гіпоксичної суміші за допомогою зміненого потоку з кисневого концентратора, що значно знижує вартість, а також зменшує потребу в обслуговуванні. AirZone не використовує генератори азоту або складні фільтрувальні блоки, що робить її більш доступною, однак система переважно базується на фіксованих протоколах і має обмежений рівень інтеграції з біозворотним зв'язком. Програмне забезпечення реалізоване як десктопний додаток, без відкритої веб-інтеграції.

Переваги запропонованої системи:

- Веб-додаток з управлінням який має програми на вибір (тренувальні і реабілітаційні), тести та кабінет пацієнта, історію всіх дій, аналіз та порівняння, інтерпретацію показників для пацієнта. Будеться на базі Linux та Python.

- Інтеграція з велоергометром типу AirBike (руки/ноги) та метаболографом.

- Динамічне керування фазами гіпоксії/нормоксії/гіпероксії.

- Повноцінна система біозворотного зв'язку: SpO₂, VO₂, VCO₂, RQ, потужність, частота педалювання.

- Вартість системи разом із метаболографом — до 12 000 USD.

- Мобільна реалізація (на платформі з колесами).

- Низький рівень шуму завдяки подвійній шумоізоляції.

Таким чином, запропонована система поєднує переваги мобільності, відкритості платформи, повноцінного аналізу дихальних параметрів та тренувального навантаження з низькою вартістю, що робить її конкурентоспроможною в умовах українських реалій та міжнародних викликів.

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ У ВІЙСЬКОВІЙ РЕАБІЛІТАЦІЇ

Система демонструє високу ефективність у програмах фізичної, нейро- та психоемоційної реабілітації військовослужбовців. Вона впливає як на аеробну, так і на анаеробну витривалість завдяки адаптації до інтервального гіпоксичного стресу, що активує широке коло адаптаційних реакцій: від мітохондріальної біогенезу до нормалізації вегетативного балансу. За рахунок підвищення кисневої ємності тканин, покращення регуляції судинного тонуусу та метаболічної пластичності, пацієнти демонструють пришвидшення процесів відновлення.

Крім цього, під впливом гіпоксичних циклів посилюються процеси нейропластичності, покращується когнітивна функція, сон, знижується рівень тривожності, що є особливо важливим при роботі з посттравматичними станами, ПТСР та післяконтузійними порушеннями. За рахунок інтегрованої роботи з м'язовими групами верхніх та нижніх кінцівок (через велоергометр типу AirBike), забезпечується висока ефективність навіть при мінімальному обсязі фізичних зусиль.

Система не потребує складного навчання: інтерфейс перекладений на 25+ мов світу, UX/UI оптимізований для роботи реабілітологів та фізичних терапевтів, надається зрозуміла покрокова інструкція. Це дозволяє впроваджувати апарат у клінічну практику швидко і з мінімальним періодом адаптації персоналу.

Економічна ефективність системи — ще один вагомий аргумент. Вартість одного комплексу суттєво нижча за більшість західних аналогів при схожому функціоналі, а простота в обслуговуванні та

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

мобільність дозволяють використовувати його в широкому спектрі умов: від стаціонарних реабілітаційних центрів до польових клінік (за умови забезпечення електроживлення та контролю).

Особливо слід відзначити, що система дозволяє реалізовувати терапію для пацієнтів, які через тяжкість стану не здатні до активних фізичних навантажень. У таких випадках ІГТ виконує роль метаболічного стимулятора без фізичного перенапруження. Це відкриває нові можливості у ранній та середньостроковій реабілітації військових з важкими ураженнями опорно-рухового апарату, нервової системи, а також після черепно-мозкових травм.

Таким чином, запропонована система є перспективним інструментом комплексної відновлювальної терапії, що відповідає актуальним вимогам НАТО та ВООЗ до стандартів військової медичної реабілітації.

ОБГОВОРЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ

Запропонована система інтервальної гіпоксичної терапії з біозворотним контролем характеризується високим рівнем технічної реалізації та потенціалом до широкого застосування у сфері реабілітаційної медицини. На відміну від низки закордонних аналогів, розробка адаптована до умов локального виробництва, не містить запатентованих критичних компонентів та може бути впроваджена без значних витрат на ліцензування.

Конструкція системи, її функціональне призначення та програмно-апаратна реалізація дозволяють класифікувати її як реабілітаційно-тренувальний засіб, що значною мірою спрощує процедури сертифікації та скорочує строки офіційної реєстрації в системі охорони здоров'я.

Система є повністю готовою до експлуатації в клінічних та позаклінічних умовах, включно з реабілітаційними відділеннями медичних закладів, центрами спортивної медицини, геріатричними та неврологічними клініками, установами післяковідної реабілітації, а також у превентивних програмах здоров'я.

Однією з переваг системи є інтегрований навчальний модуль, реалізований у веб-інтерфейсі. Він включає адаптований довідковий матеріал щодо клінічних ефектів, показань і протипоказань до застосування ІГТ, алгоритми призначення процедур залежно від типу патології, а також інструктивні блоки, спрямовані на запобігання ускладненням. Завдяки перекладеному багатомовному інтерфейсу та інтуїтивно зрозумілому UX-дизайну, освоєння системи можливе навіть без попередньої спеціалізованої підготовки, що є вагомим чинником у реабілітаційній практиці.

Таким чином, представлена розробка може бути ефективно інтегрована у клінічну практику без потреби у додатковій адаптації або модифікації, що відкриває перспективи для масштабного впровадження на національному рівні в контексті імпортозаміщення технологій у сфері відновлювальної медицини.

ВИСНОВКИ

Запропонована система є інноваційним прикладом інтеграції інтервальної гіпоксичної терапії (ІГТ), біозворотного зв'язку та аналітики метаболізму у форматі мобільного комплексу. Вона поєднує в собі високий рівень технологічної адаптації, індивідуальне налаштування терапевтичних протоколів та доступність в умовах обмежених ресурсів.

Комплекс дозволяє ефективно працювати з пацієнтами різного функціонального стану, від тяжких посттравматичних випадків до спортсменів високої кваліфікації. Завдяки багатоканальному біозворотному зв'язку, автоматичному регулюванню подачі газової суміші та гнучкій логіці адаптації навантаження, забезпечується високий ступінь безпеки та персоналізації терапії.

З огляду на потреби військової та постковідної реабілітації, система відкриває нові можливості для прискореного відновлення, покращення якості життя та зменшення соціального навантаження на медичні структури. Її впровадження може стати стратегічно важливим етапом розвитку національної реабілітаційної інфраструктури, що відповідатиме міжнародним стандартам WHO та НАТО.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Gonzalez-Rothi E.J., Lee K.Z., Dale E.A., Mitchell G.S., Fuller D.D. Intermittent hypoxia and neurorehabilitation. *Journal of Applied Physiology* (1985). 2015; 119(12): 1455–1465. doi: <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00235.2015>.
2. Behrendt T., Bielitzki R., Behrens M., Herold F., Schega L. Effects of Intermittent Hypoxia–Hyperoxia on Performance- and Health-Related Outcomes in Humans: A Systematic Review. *Sports Medicine –*

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

- Open. 2022; 8(1): 70. doi: <https://doi.org/10.1186/s40798-022-00450-x>.
3. Chen P.-W., Hsu C.-C., Lai L.-F., Chi C.-P., Yu S.-H. Effects of Hypoxia–Hyperoxia Preconditioning on Indicators of Muscle Damage After Acute Resistance Exercise in Male Athletes. *Frontiers in Physiology*. 2022; 13: 824210. doi: <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.824210>.
 4. Dale E.A., Mitchell G.S., Fuller D.D. Therapeutic acute intermittent hypoxia: a translational roadmap for spinal and motor recovery. *Neurorehabilitation and Neural Repair*. 2023. doi: <https://doi.org/10.1177/15459683231151545>.
 5. The Impact of Intermittent Hypoxia–Hyperoxia Therapy on Metabolism and Respiratory System in Obese Patients as Part of Comprehensive Medical Rehabilitation. *Cureus*. 2024; 16(4): e291825. doi: <https://doi.org/10.7759/cureus.291825>.
 6. Serebrovska T.V., Serebrovska Z.O., Egorov E. Fitness and therapeutic potential of intermittent hypoxia training: a matter of dose. *Fiziol. Zh.* 2016;62(3):78–91. fz.kiev.ua
 7. Serebrovskaya T.V., Xi L. Intermittent hypoxia training as non-pharmacologic therapy for cardiovascular diseases: practical recommendations. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2016;2016:1–12. Hagertkliniken
 8. Rybnikova E., Glushchenko T., Nalivaeva N. Intermittent hypoxic training as an effective tool for increasing human resilience. *Frontiers in Physiology*. 2022. [PMC](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9044441/)
 9. Zhang X., et al. Experience of hypoxic conditioning in rehabilitation of patients with chronic obstructive lung disease using intermittent hypoxic-hyperoxic exposure. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2025. Eco-Vector Journals Portal
 10. Astorino T.A. Effects of acute intermittent hypoxia on physical function and health status in humans with spinal cord injury: a review. *Journal of Rehabilitation Research*. 2023. [SAGE Journals+1](https://www.sagepub.com/journalsPermissions.nav)
 11. Lopata O., Serebrovskaya T.V. Equipment and regimes for intermittent hypoxia therapy. *Biomedical Engineering*. 2016. (огляд гіпоксикаторів, режимів дозування та безпеки). [ResearchGate+1](https://www.researchgate.net/publication/311111111)
 12. ReOxy® intermittent hypoxia-hyperoxia therapy device. Official description of the IHHT system and the principle of SRT control using SpO₂. A.M.I. Mediq, product documentation and website. Ai Mediq | Intelligent Medical Systems+2Reoxy+2
 13. Cardioscan Airzone® – Intelligent Hypoxic Training System: principle of operation, interval hypoxic protocols, areas of application. Cardioscan GmbH technical description and marketing materials. soreha.net+2soreha.net+2
 14. NATO Centre of Excellence for Military Medicine. Rehabilitation and recovery guidelines for wounded service members (sections on cardiopulmonary and neurorehabilitation, including use of advanced training technologies). Policy/Guideline document.

Надійшла до редакції: 15.06.2025

КУЗЬМІНОВ ЯРОСЛАВ СЕРГІЙОВИЧ — аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, [e-mail: kuzminov.yaroslav@gmail.com](mailto:kuzminov.yaroslav@gmail.com)

КАРАСЬ ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ — доктор філософії, старший викладач кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, [e-mail: karas@vntu.edu.ua](mailto:karas@vntu.edu.ua)

ПАВЛОВ ВОЛОДИМИР СЕРГІЙОВИЧ — доктор філософії, науковий співробітник кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, [e-mail: machinehead6926@gmail.com](mailto:machinehead6926@gmail.com)

YAROSLAV KUZMINOV, OLEKSANDR KARAS, VOLODYMYR PAVLOV

**INTELLIGENT SYSTEM OF INTERVAL HYPOXIC THERAPY WITH BIOLOGICAL FEEDBACK
CONTROL IN THE REHABILITATION OF MILITARY PERSONNEL**

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia