

УДК 615.38:616.12-089

# АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТЕМПЕРАТУРИ, НАСИЧЕННЯ І ЗБАЛАНСОВАНОГО ПОТОКУ КРОВІ У ВЕНОЗНОМУ РЕЗЕРВУАРІ АПАРАТУ ШТУЧНОГО КРОВООБІГУ

Суп Микола Васильович  
[kolia.sup00@gmail.com](mailto:kolia.sup00@gmail.com)

Максименко Віталій Борисович  
[maksymenko.vitaliy@gmail.com](mailto:maksymenko.vitaliy@gmail.com)

Богомолів Микола Федорович  
[mfbogomolov@gmail.com](mailto:mfbogomolov@gmail.com)

Факультет біомедичної інженерії  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;  
м. Київ, Україна

*Анотація* – У статті розглянуто новітню систему безпеки, що базується на використанні комбінованої системи датчиків, яка дає можливість не лише вимірювання низького і критичного рівнів крові в режимі реального часу, а також показники температури та сатурації венозного резервуару апарату штучного кровообігу. Система забезпечує автоматичне регулювання артеріального насосу, що дозволяє знизити ризики та ускладнення пов'язані з масивною повітряною емболією, надмірною крововтратою та гіпоксією пацієнта. Завдяки адаптивному контролю швидкості насосу на основі точних вимірювань рівня крові, запропонована система дозволяє швидше реагувати на критичні зміни в об'ємі депонованої крові венозного резервуару. Методика реалізації включає інтеграцію оптичних та лазерних технологій з існуючими апаратами штучного кровообігу, що дозволить оптимізувати процеси моніторингу та контролю штучного кровообігу. Подальша реалізація дасть змогу підвищити рівень надійності та безпеки в управлінні кров'яним потоком, знижуючи навантаження на медичний персонал і забезпечуючи більш точний контроль за станом пацієнта. Висновки свідчать про те, що запропонована система має значний потенціал для подальших досліджень і впровадження у клінічну практику..

*Ключові слова* : апарат штучного кровообігу, екстракорпоральний кровообіг, датчик рівня, автоматизація, профілактика повітряної емболії.

## І. ВСТУП

Застосування апарату штучного кровообігу (АШК) дозволяє тимчасово призупинити роботу серця та легенів, щоб полегшити хірургію в безпечному, спокійному та контрольованому середовищі, так званого, «сухого серця». Це золотий еталон більшості кардіохірургічних операцій, без якого вони неможливі[1].

Традиційно робота систем штучного кровообігу залежала від кваліфікації та досвіду перфузіоністів. «Людський фактор» є важливою складовою безпеки і якості штучного кровообігу (ШК). Рішення і дії оператора АШК обмежені дуже щільними часовими межами, що є додатковим стресовим фактором. Здатність розподіляти увагу, приймати рішення і діяти відповідно

важливості інформації, яка надходить під час ШК залежить від досвіду і адаптованості до стресу. В таких умовах можливі помилки, тому контроль параметрів підвищеного ризику важливо дублювати додатковими технічними засобами, які є запобіжниками аварійних ситуацій.

Критичною, у цьому сенсі, є ділянка Екстракорпорального контуру до якої належить венозний резервуар перед оксигенатором. Втрата заданого об'єму крові в резервуарі створює загрозу масивної газової емболії артерій і загрозу життю. [3]. Ми пропонуємо концепцію підвищення безпеки проведення ШК, шляхом покращення систем контролю об'єму крові у венозному резервуарі.

## II. МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є підвищення ефективності системи безпеки проведення ШК, шляхом автоматизованого контролю рівня крові у венозному резервуарі.

## III. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ШТУЧНОГО КРОВОБИГУ

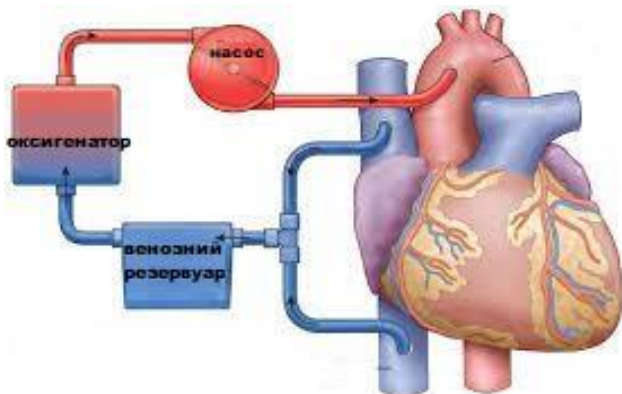


Рисунок 1. - Схема штучного кровообігу

АШК і схеми його підключення до пацієнта (рис.1), які використовуються сьогодні значно вдосконалилися з часу появи екстракорпорального кровообігу та перших спроб його використання. Однак основні принципи залишаються незмінними досі[3]:

Венозна кров дренується під дією сили тяжіння або за допомогою системи вакууму у венозний резервуар через канюлю, розміщену найчастіше у правому передсерді або верхній та нижній порожнистих венах.

В цей же резервуар надходить кардіотомічна кров з рани, тому його іноді називають кардіотомічним резервуаром. Ми розглядаємо екстракорпоральну систему в якій для венозної і кардіотомічної крові використовується єдина ємність і в подальшому для неї будемо застосовувати термін «венозний резервуар».

Стандартна технологія ШК передбачає підтримання в резервуарі заданого об'єму крові і її безпечної рівня, для безперервного її нагнітання в артеріальну систему і, в тому числі, запобігання проникнення повітря в судини пацієнта. Під час ШК динаміка рівня в резервуарі має такі характеристики: через об'єм 0,3-0,5 л рухається безперервний потік

до 4-5 л. Індикатором заданого об'єму є рівень крові в резервуарі, який постійно підтримується в межах заданих позначок на його прозорій поверхні.

Потім кров артеріальною помпою прокачується через оксигенатор, в якому відбувається елімінація двоокису вуглецю і оксигенація крові, фільтрація, зігрівання або охолодження крові пацієнта. Сучасні інтегровані моделі мають оксигенатор, теплообмінник і фільтр, об'єднані в один модуль [6].

Потім кров повертається через артеріальну екстракорпоральну магістраль у велику артерію, найчастіше в аорту.

Безперервне спостереження за параметрами ШК вимагає в першу чергу підтримку постійного об'єму у венозному резервуарі за рахунок венозного притоку, збалансованого з продуктивністю артеріальної помпи.

Підтримання збалансованого потоку має свої технічні вирішення від різних компаній виготовлення та обслуговування АШК. Але це не забезпечує повноцінного вирішення даних проблем, через ряд недоліків, пов'язаних з ризиком помилкового зчитування датчика рівня, або через велику вартість одноразових розхідників[14]. Тому єдиного повноцінно допрацьованого вирішення, на даний час, не було засвідчено.

Вивчаючи проблематику даної теми було сформовано перелік основних завдань для реалізації удосконаленої системи контролю критичних параметрів проведення екстракорпорального кровообігу:

1. розробити інноваційне інженерне вирішення питання якісного контролю рівня, який включатиме в себе систему з датчиків вимірювання критичного рівня, температури та сатурації;
2. створити схему системи контролю для експериментального дослідження даної технології;
3. реалізувати зворотній зв'язок між рівнем венозного резервуару та потоком артеріального насоса, створивши програмне забезпечення на базі Labview для постійного контролю параметрів та миттєвого

реагування згідно зниженню рівня (об'єму) рідини венозного резервуару;

#### IV. СУЧАСНІ КОНСТРУКТОРСЬКІ РІШЕННЯ

Найпоширенішими аспектами розробки датчиків рівня є використання технології ультразвукового та об'ємно-ємкісного вимірювання рівня рідини.

Ультразвукові датчики використовують принцип випромінювання ультразвукових хвиль, що дозволяє точно визначати рівень рідини через вимірювання часу, необхідного для повернення відбитого сигналу. Проте їхня ефективність залежить від калібрування в умовах експлуатації.

Ємнісні датчики працюють на основі зміни електричної ємності між електродами, що робить їх менш чутливими до зовнішніх факторів.

Обидва типи датчиків широко застосовується до автоматизації у сучасних системах штучного кровообігу. Водночас головним недоліком їхнього алгоритму є залежність від єдиного датчика рівня та системи керування артеріальним насосом. Відсутність дублювання показань датчика і попередження про поступове зниження рівня крові створює ризик виникнення тяжких ускладнень[6]. Беручи до уваги велику швидкість кровотоку - продуктивність артеріального насоса та низький рівень крові, будь-яка затримка відклику (не кажучи, про збій чи помилку) підвищує ризик повітряної емболії у декілька разів, що дуже часто несе за собою критичні наслідки у формі інфаркту, інсульту, або летального випадку.

#### V. ІНЖЕНЕРНА РЕАЛІЗАЦІЯ

Інженерне рішення щодо підвищення надійності та безпеки роботи системи контролю рівня крові у венозному резервуарі апарату штучного кровообігу, на нашу думку, полягає в реалізації системи подвійного контролю критичних значень рівня крові. Це може бути досягнуто шляхом інтеграції комбінованої системи датчиків оптичної та лазерної технології, яка забезпечить високу точність, миттєву

відповідь сенсорів та виключить можливість похибок односторонніх датчиків. Завдяки різному положенню датчиків, система відповідатиме критичним рівням, визначеним виробниками одноразових систем оксигенації. Зокрема, перший датчик розміщується на рівні 50 мл, а другий — на рівні 150 мл. Такий підхід дозволяє ефективно запобігти аварійним ситуаціям, пов'язаним із різким зниженням рівня крові у венозному резервуарі.

Наступна схема ілюструє роботу системи (рис.2):

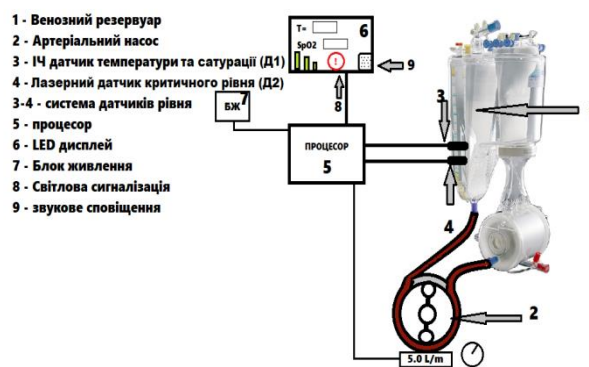


Рисунок 2. - Схема системи контролю рівня

Датчик 1 (Д1) реалізований на основі комбінованої технології інфрачервоної пірометрії і фотоспектрометрії, дозволяє вимірювати, відображати температуру та сатурацію крові у венозному резервуарі. У разі, якщо рівень крові опускається нижче положення датчика, припиняється сигнал від Д1 до процесора. У свою чергу, процесор генерує сигнал до артеріального насоса, що призводить до зниження продуктивності насоса до 50%. Одночасно на LED-дисплеї відображається світлове та звукове сповіщення про зниження рівня крові[4].

Датчик 2 (Д2) працює на основі реєстрації параметрів відбиття лазерного променя від поверхні крові. У випадку, якщо рівень крові знижується нижче критичної позначки, що відповідає розташуванню датчика Д2, передача сигналу до процесора припиняється, і система генерує команду для повної зупинки артеріального насоса. Обов'язково супроводжується світловим та звуковим сповіщенням на LED-дисплеї[7].

У випадку відновлення рівня крові відповідним межам розташування датчиків, всі показники та продуктивність відновлюються відповідно алгоритму.

Для реалізації програмного забезпечення було обрано платформу LabVIEW на основі мови програмування G. Це рішення обумовлене рядом переваг, серед яких:

- інтуїтивно зрозумілий графічний підхід;
- модульність та гнучкість архітектури;
- легка інтеграція з апаратними засобами у системах моніторингу та управління;
- підтримка широкого спектра сенсорів і приладів;
- наявність функціоналу та інструментів, оптимізованих для біомедичних систем[5].

Обрана комбінація LabVIEW та графічного підходу відповідає вимогам з погляду простоти розробки, надійності та ефективності в умовах клінічного використання[13]. Графічна схема керування системою, побудована на платформі LabVIEW, реалізує адаптивне управління потоком крові артеріального насоса, забезпечуючи зворотний зв'язок для системи контролю рівня крові.

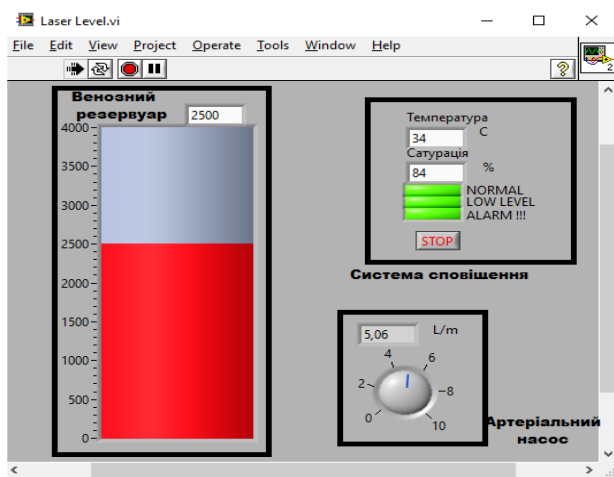


Рисунок 3. - Система безпеки в середовищі LabView

Схема програмного забезпечення (рис. 3) відображена в середовищі LabView складається з таких складових:

- венозного резервуара (Tank), згідно якого діє алгоритм зменшення об'єму.
- артеріального насоса (Pump), який складається з ручки керування та

цифрового дисплея фактичної продуктивності. Ці два параметри можуть між собою відрізнитись через різний алгоритм розрахунку продуктивності: завдяки ручці керування, перфузіолог має можливість задавати розрахункову продуктивність штучного кровообігу, а система автоматичного контролю рівня рідини підтримує даний параметр відповідно до об'єму крові венозного резервуару. Даний алгоритм забезпечує профілактичні заходи запобіганню розвитку масивної повітряної емболії за рахунок різкого зниження рівня рідини венозного резервуару.

- системи сповіщення, яка відображає цифрові параметри температури, венозної сатурації, індикацію рівня крові венозного резервуару в режимі реального часу. а також має можливість перемикає режими автоматичного та ручного режиму контролю рівня рідини. Реалізація даного зв'язку необхідна для забезпечення системи контролю рівня крові та адаптивного керування потоком крові артеріального насоса буде реалізована по наступному алгоритму (рис. 4) :

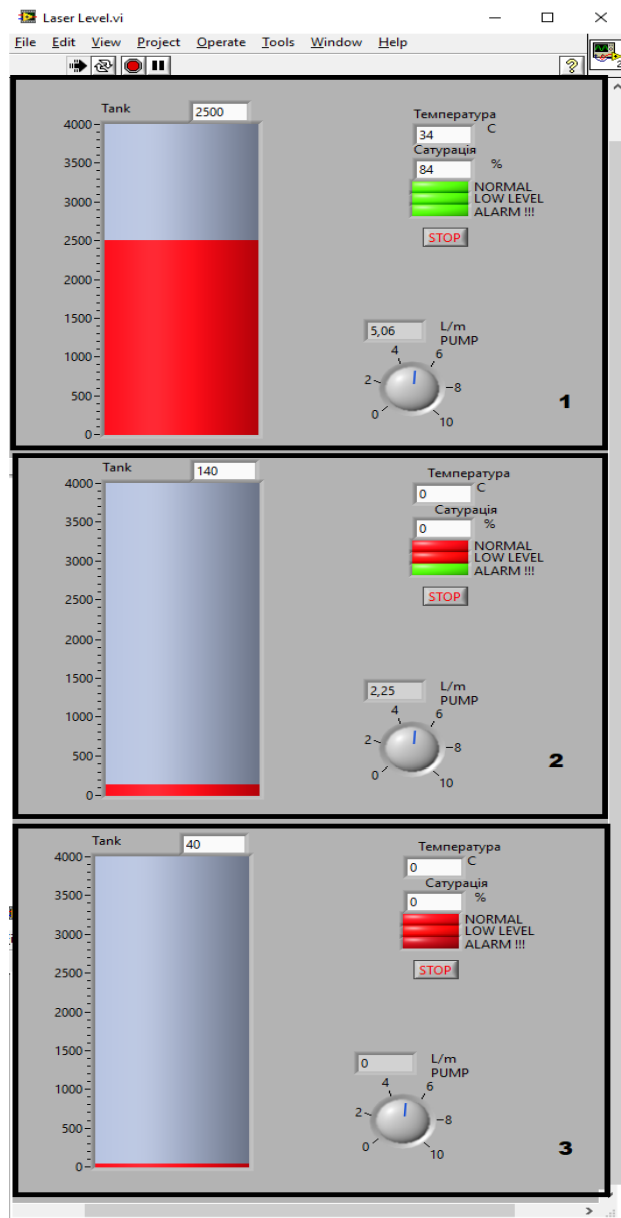


Рисунок 4. - Демонстрація роботи алгоритму в LabView.

1. Система датчиків контролю розміщена на стінці венозного резервуару, реєструє дані венозної температури та сатурації з оптичного інфрачервоного датчика №1, демонструючи показники на монітор системи сповіщення.
2. У випадку зниження рівня нижче позначки низького рівня крові, власне рівня розташування Д1, процесор реєструє відсутність даних від оптичного датчика, миттєво реагує зниженням продуктивності артеріального насосу на 50% та світловим і звуковим сигналом.

Основним сигналом реакції в даному випадку є показники венозної сатурації, що дає можливість виключити похибки зчитування температурного датчика при відсутності градієнту температури крові з температурою навколишнього середовища у випадку проведення штучного кровообігу за методикою глибокої гіпотермії.

3. У разі продовження зниження рівня крові венозного резервуару, що досягнув критичного рівня крові, система негайно відповість повною зупинкою артеріальної помпи, світловою індикацією “Alarm” та звуковою сигналізацією.

Як тільки рівень крові відновлюється, всі показники та продуктивність відновлюються відповідно.

Технічна реалізація була здійснена завдяки використанню логіки True/False (рис. 5), що дозволяє оперативно реагувати на зміни стану системи:

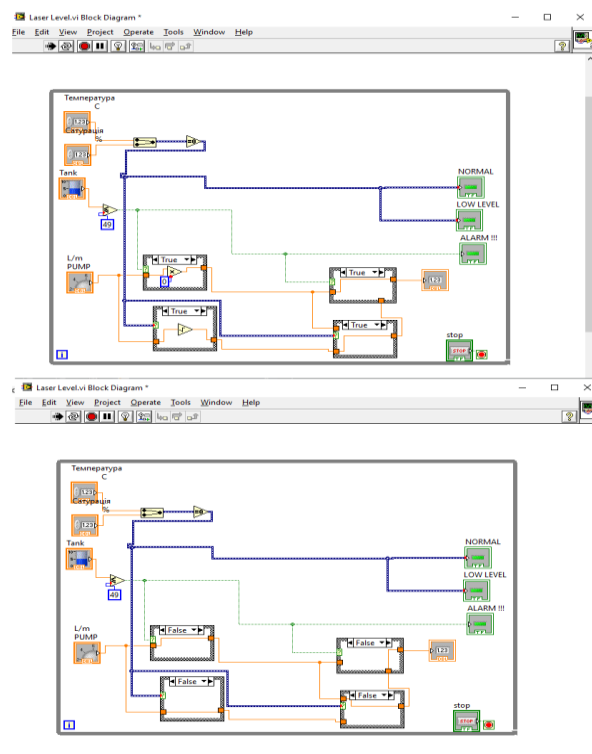


Рисунок 5. - Схема True/False

Імітація об'єму крові, параметрів температури та сатурації була здійснена за допомогою цифрових індикаторів та



мікроконтролера Arduino, що будуть замінені реальними датчиками оптичної та лазерної технології у фінальній версії системи. Всі елементи будуть інтегровані у стаціонарну плату апарату штучного кровообігу (рис. 6), що забезпечить надійну роботу та ефективний контроль критичних параметрів під час проведення екстракорпоральних процедур.

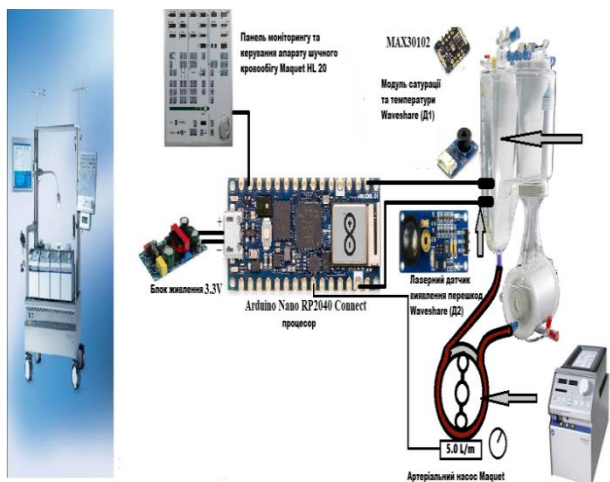


Рисунок 6. - Технічна реалізація системи контролю рівня

## VI. ВИСНОВКИ

Запропоноване інженерне рішення для моніторингу рівня крові у венозному резервуарі апарату штучного кровообігу передбачає інтеграцію датчиків для вимірювання критичного рівня, температури та сатурації, що забезпечує комплексний підхід до моніторингу стану пацієнта та підвищує точність контролю завдяки взаємодоповнюючим функціям різних типів датчиків. Використання доступних комплектуючих для експериментальної установки робить рішення економічно вигідним та простим у впровадженні в клінічну практику. Реалізація зворотного зв'язку між рівнем венозного резервуару та продуктивністю артеріального насоса на базі програмного забезпечення LabVIEW дозволяє оперативно реагувати на зміни об'єму рідини, що може бути застосоване як у клінічних умовах, так і в навчальних

програмах для підготовки перфузіоністів. Це рішення значно розширює можливості систем екстракорпорального кровообігу та сприяє підвищенню безпеки пацієнтів через безперервний контроль ключових параметрів.

**Фінансування.** Дане дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

**Конфлікт інтересів.** Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

## ORCID ID та внесок авторів.

0009-0000-0451-3362(A, B, C) Mykola Sup  
0000-0003-4425-5665(B, C, D, E) Vitaliy Maksymenko

0000-0002-4351-527X (D) Mykola Bohomolov

A – концепція роботи та дизайн; B – аналіз інформації; C – написання статті; D – критичний огляд; E – остаточне схвалення статті.

## VII. ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1) Agarwal P. Basic Principles of Medical Sensors. – Cambridge: Cambridge Press, 2022. – 180 p.
- 2) Андрушко Л. М., Гроднев И. И., Панфилов И. П. Волоконно-оптические линии связи : [учебное пособие для электротех. институтов связи спец. 0708] / Л. М. Андрушко, И. И. Гроднев, И. П. Панфилов. – Москва : Радио и связь, 1984. – 136 с.
- 3) Cardiopulmonary Bypass, 3rd Edition / Florian Falter, Albert C. Perrino. – 2021.
- 4) Методи та засоби діагностики. Основи лазерних лабораторних методів біомедичних досліджень [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Медична інженерія» спеціальності 163 «Біомедична інженерія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. В. Шликов, В. Б. Максименко, М. Ф. Богомолів. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 150 с. – Режим доступу: <https://www.kpi.ua/laser-methods>
- 5) Національні інструменти. Довідка LabVIEW 2022 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361R-01/>
- 6) Falter F., Perrino A. C. Cardiopulmonary Bypass / F. Falter, A. C. Perrino. – 3rd Edition. – 2021.
- 7) Шликов В. В., Максименко В. Б., Богомолів М. Ф. Основи лазерних лабораторних методів біомедичних досліджень / В. В. Шликов, В. Б. Максименко, М. Ф. Богомолів. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 150 с.

## REFERENCES

- 1) P. Agarwal, Basic Principles of Medical Sensors. Cambridge: Cambridge Press, 2022, 180 p.
- 2) L. M. Andrushko, I. I. Grodnev, and I. P. Panfilov, Fiber-Optic Communication Lines: [Textbook for Electrical

Engineering Institutes of Communication Specialties 0708].  
Moscow: Radio and Communication, 1984, 136 p.

3) F. Falter and A. C. Perrino, Cardiopulmonary Bypass, 3rd ed. – 2021.

4) Methods and Means of Diagnostics. Basics of Laser Laboratory Methods in Biomedical Research [Online]: Textbook for Bachelor's Degree Students in Medical Engineering / KPI named after Igor Sikorsky; compiled by: V. V. Shlikov, V. B. Maksimenko, M. F. Bogomolov. Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky, 2021, 150 p. [Online]. Available: <https://www.kpi.ua/laser-methods>

5) National Instruments, LabVIEW 2022 Documentation [Online]. Available: <https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361R-01/>

6) F. Falter and A. C. Perrino, Cardiopulmonary Bypass, 3rd ed., 2021.

7) V. V. Shlukov, V. B. Maksimenko, and M. F. Bogomolov, Basics of Laser Laboratory Methods in Biomedical Research. Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky, 2021, 150 p.

UDC 615.38:616.12-089

# AUTOMATED TEMPERATURE, SATURATION AND BALANCED BLOOD FLOW MONITORING SYSTEM IN THE VENOUS RESERVOIR OF A HEART-LUNG MACHINE

*Mykola Sup*

*[kolia.sup00@gmail.com](mailto:kolia.sup00@gmail.com)*

*Vitaliy Maksymenko*

*[maksymenko.vitaliy@gmail.com](mailto:maksymenko.vitaliy@gmail.com)*

*Mykola Bohomolov*

*[mfbogomolov@gmail.com](mailto:mfbogomolov@gmail.com)*

Faculty of Biomedical Engineering  
National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute";  
Kyiv, Ukraine

**Abstract** - The article discusses the latest security system based on the use of a combined sensor system, which enables not only the measurement of low and critical blood levels in real time, but also the temperature and saturation indicators of the venous reservoir of the artificial blood circulation apparatus. The system provides automatic regulation of the arterial pump, which allows to reduce risks and complications associated with massive air embolism, excessive blood loss and hypoxia of the patient. Thanks to the adaptive control of the pump speed based on accurate measurements of the blood level, the proposed system allows a faster response to critical changes in the volume of deposited blood of the venous reservoir. The method of implementation includes the integration of optical and laser technologies with existing artificial blood circulation devices, which will allow to optimize the processes of monitoring and control of artificial blood circulation. Further implementation will make it possible to increase the level of reliability and safety in the management of blood flow, reducing the burden on medical personnel and providing more accurate control of the patient's condition. The conclusions indicate that the proposed system has significant potential for further research and implementation in clinical practice.

**Keywords:** heart-lung machine, extracorporeal circulation, level sensor, automation, air embolism prevention.