

В.О. БІЛИЙ

vitaliy2034v@gmail.com

В.О. БІЛИЙ

Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»

bilyi.vl204@gmail.com

В.М. БОНДАРЕНКО

Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1663-4799>

vicnbondarenko@gmail.com

Н.О. БОНДАРЕНКО

Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9237-8187>

nalbondarenko@gmail.com

## ПРИСТРІЙ ДЛЯ ПРИШВИДШЕННЯ РЕАБІЛІТАЦІЇ ПІСЛЯ ТРАВМ НИЖНІХ КІНЦІВОК

*Для якісної та швидкої реабілітації після важкої травми нижніх кінцівок вкрай необхідно регулювати та поступово збільшувати навантаження на хвору ногу. Дана робота присвячена розробці спеціального пристрою, який складається з насадок на милиці, що вимірюють навантаження на хвору нижню кінцівку й передають результати вимірювань на смартфон для інформування лікаря. Нова методика реабілітації із застосуванням цього пристрою демонструє позитивні результати. Подальша модернізація пристрою спрямована на його здешевлення та збільшення тривалості використання насадок, що дасть змогу запустити серійне виробництво пристрою.*

*Ключові слова: тензодатчик, мікроконтролер, реабілітація, травми нижніх кінцівок, насадки на милиці.*

VITALIY BILYI, VLADYSLAV BILYI, VIKTOR BONDARENKO, NATALIYA BONDARENKO

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

### DEVICE FOR ACCELERATING REHABILITATION AFTER LOWER LIMBS INJURIES

*For high-quality and fast rehabilitation after a severe injury of lower limbs, it is extremely necessary to adjust and gradually increase the load on the patient's leg. This work is devoted to the development of a special device consisting of attachments for crutches that measure the load on the patient's lower limb and transmit the measurement results to a smartphone to inform a doctor.*

*It is possible to accelerate rehabilitation by rather exact regulation and gradual increase of loading on a sick leg. The procedure and scheme of rehabilitation is proposed. Smart nozzles on crutches have been proposed to monitor the load on a sore foot. Functionally, the device consists of a pair of nozzles for crutches. A strain gauge is integrated into each nozzle, which is connected to the wireless information transmission unit. In our case, we used a strain gauge DYHW-116 and a microcontroller MCU ESP32, designed to process and transmit information. The doctor determines the rehabilitation program according to the diagnosis and prescribes it to the patient, and the patient installs the application on the smartphone and enters his account (where there is already a rehabilitation program). The developed rehabilitation device includes a strain gauge, control board, screws and piston, which are housed in the housing. Printing parts can use ABS plastic.*

*The patient uses nozzles on crutches, which determine the load on the patient's leg according to the program, as well as captures their own feelings on the smartphone. The algorithm of the device allows you to get Statistics, which is sent to the doctor (nozzles - smartphone - doctor). The doctor can change the rehabilitation program if necessary.*

*Rehabilitation techniques using this device show positive results. Further modernization of the device is aimed at making it cheaper and increasing the duration of using attachments, which will allow mass production of the device.*

*Key words: tense sensor, microcontroller, rehabilitation, lower limbs injuries, attachments for crutches*

### Вступ

Проблема якісної та швидкої реабілітації після важких травм нижніх кінцівок завжди є актуальною, оскільки лікування зазвичай потребує доволі багато часу. Пришвидшити реабілітацію можна шляхом досить точного регулювання й поступового збільшення навантаження на хвору ногу.

За стандартною практикою це роблять за допомогою звичайних милиць, покладаючись на власні відчуття хворого. Такий підхід не є надійним, оскільки людина не може чітко регулювати навантаження на ногу, що призводить до збільшення терміну реабілітації, а в деяких випадках, навіть, до травм або рецидиву. Для моніторингу навантаження на хвору ногу запропоновано розумні насадки на милиці. Функціонально пристрій складається з пари насадок для милиць. В кожену насадку інтегровано тензодатчик, який підключено до блоку бездротової передачі інформації. В нашому випадку використано тензодатчик DYHW-116 [1] та мікроконтролер MCU ESP32, призначений для обробки і передачі інформації [2].

Відомі інші конструкції насадок для милиць, наприклад, що дозволяють полегшити пересування хворого в період реабілітації шляхом зниження ризику ковзання милиць і підвищення їх стійкості при використанні (патент на корисну модель RU 162715 і патент на корисну модель № UA 39990 [3]). На жаль, подібні пристрої не дають можливості вимірювати та регулювати навантаження на хвору нижню кінцівку. Найбільш близьким до вирішення даної проблеми є пристрій для вимірювання навантаження на милицю (патент на корисну модель ES1249804, МПК А61В5/103; А61Н3/02, заявка № ES20200031029U від

22.05.2020 [4]). Проте, цей відомий пристрій не дає змогу лікареві слідкувати за прогресом реабілітації хворого та своєчасно змінювати програму. Також цей пристрій не дає зворотного зв'язку пацієнту.

### Методика реабілітації

Порядок і схема проходження реабілітації (рис. 1):

1. Лікар за діагнозом визначає програму реабілітації та призначає її пацієнту.
2. Пацієнт встановлює додаток на смартфон і входить в свій обліковий запис (де вже є програма реабілітації).
3. Пацієнт використовує насадку на милиці, що визначають навантаження на хвору ногу згідно з програмою, а також фіксує власні відчуття на смартфоні.
4. Статистика відправляється лікареві (насадки - смартфон - лікар).
5. Лікар в разі необхідності може змінити програму реабілітації.



Рис. 1. Схема проходження реабілітації

### Пристрій для реабілітації

#### Зовнішній вигляд прототипу

На рис. 2 показаний зовнішній вигляд прототипу. Для друку використовується пластик ABS:



Рис. 2. Зовнішній вигляд прототипу

#### Будова прототипу

Прототип складається з наступних частин (рис. 3):

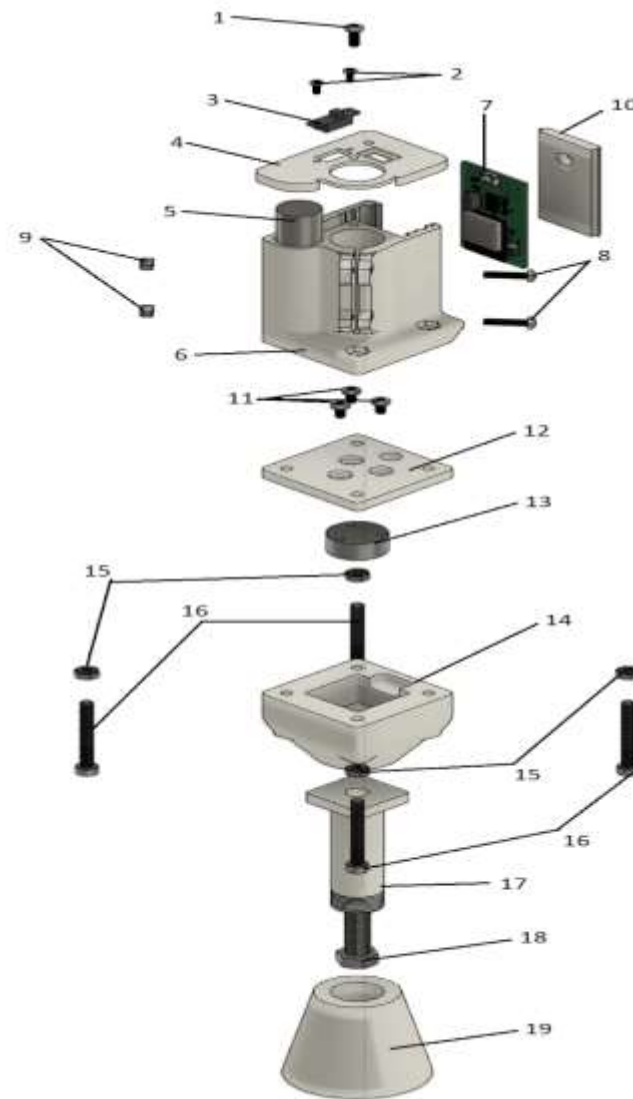


Рис. 3. Внутрішня будова прототипу

- 1) гвинт верхньої кришки;
- 2) гвинти перемикача (2 шт.);
- 3) перемикач;
- 4) верхня кришка;
- 5) акумулятор;
- 6) корпус для електроніки;
- 7) плата керування;
- 8) гвинти для фіксації мильці (2 шт.);
- 9) контргайки для фіксації мильці (2 шт.);
- 10) висувна стінка блоку електроніки;
- 11) гвинти фіксації тензодатчика (3 шт.);
- 12) проміжна пластина;
- 13) тензодатчик;
- 14) корпус;
- 15) високоміцні гайки (4 шт.);
- 16) високоміцні гвинти (4 шт.);
- 17) поршень;
- 18) головний болт;
- 19) гумова насадка.

#### Вибір тензодатчика

Кожна насадка має бути компактною та легкою, а також витримувати навантаження в 100 кг і мати похибку в межах 1 кг. Тензодатчик обирався поміж трьох варіантів, але висунутим вище умовам задовольняє лише DУМН-116. Основні характеристики тензодатчиків наведенні нижче (табл. 1). Більш детально ознайомитись з характеристиками тензодатчиків TAL208/DYLY-106/DУМН-116 можна в документації [1].

Таблиця 1

Назва тензодатчика	Максимальне перевантаження*, %	Точність, %	Форма	Габарити**, мм
TAL208	150	5	Паралелепіпед	150×35×40
DYLY-106	150	5	Паралелепіпед	25×12×30
DYMH-116	150	0,2	Циліндр	20×12

\* — наведене значення в відсотках відносно 100 кг;

\*\* — для форми “Паралелепіпед” формат: довжина × ширина × висота; для форми “Циліндр” формат: діаметр × висота.

### Електронна частина пристрою

Розглянемо структурну схему електронної частини, що зображена на рис. 4. Червоним кольором на схемі позначені блоки живлення, синім – блоки периферії. Усі вхідні червоні лінії вказують на напругу живлення блоку, що поступає з перетворювача/джерела напруги. Передача даних між блоками та напрямком передачі зображено чорними лініями.

Живлення основної частини схеми відбувається від напруги акумуляторної батареї VBATT. Вона подається на імпульсний підвищуючий перетворювач-стабілізатор напруги на мікросхемі MT3608, з якого отримуємо 5 В, що використовуються для живлення тензодатчика, попередньо пройшовши через НЧ фільтр. Також 5 В подаються на лінійний стабілізатор AP-1117-3.3V, з якого живиться мікроконтролер ESP32-WROOM-32. При підключенні USB кабелю, акумулятор починає заряджатись, також подається живлення на USB-UART перетворювач, що використовується для вивантаження прошивки на пристрій.

В якості обробника і передавача інформації використовується MCU ESP32-WROOM-32 (надалі ESP32), який обрано тому, що він має підтримку Bluetooth з низьким енергоспоживанням (BLE) [5], та два ядра, одне з яких працює з BLE периферією, а інше повністю використовується для прикладної програми, що дає суттєвий приріст продуктивності.

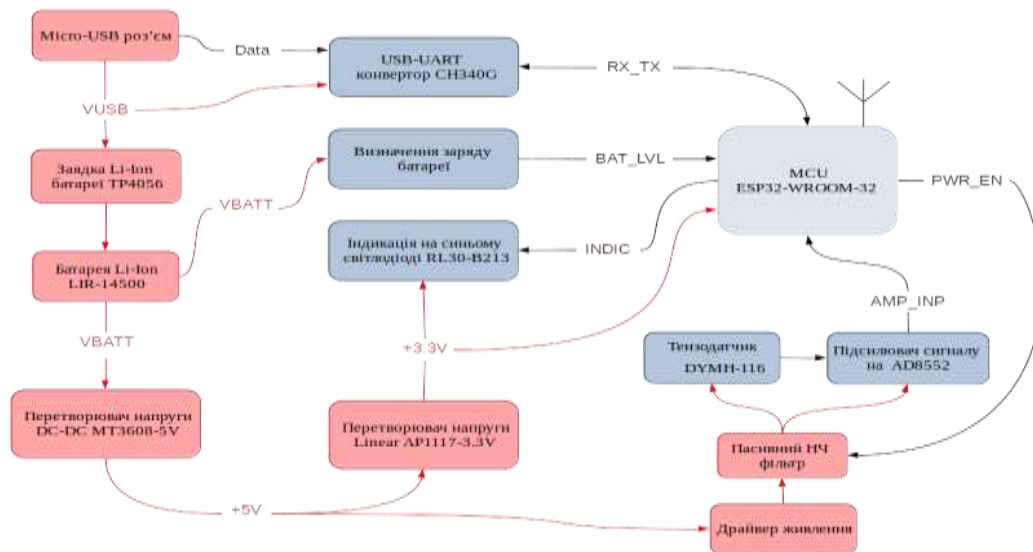


Рис. 4. Структурна схема електронної частини

Алгоритм роботи пристрою полягає в наступному. Спочатку, через сигнал PWR\_EN, дозволяємо драйверу живлення подати напругу на тензодатчик та підсилювач. Далі вихідний сигнал з тензодатчика, що залежить від прикладеної до нього ваги, подається на підсилювач, з якого зчитується ESP32 за допомогою аналого-цифрового перетворювача. Також, в той самий час, зчитується напруга акумуляторної батареї для визначення рівня заряду. Далі формується пакет даних для передачі по BLE користувачу на смартфон, або, якщо немає підключення, пакет даних зберігається в пам'яті.

Розглянемо і обґрунтуємо деякі прийняті технічні рішення, а саме:

- підсилення вихідної напруги тензодатчика;
- побудова схеми підсилення тензодатчика;
- керування напругою живлення тензодатчика та підсилювача.

**Підсилення вихідної напруги тензодатчика.** Принцип роботи датчика ваги заснований на зміні електричної напруги пропорційно вазі вимірюваного предмета. У даному пристрої використовується датчик ваги, виконаний на пружних резисторах, включених за мостовою схемою Уінстона (напівмостова схема менш чутлива). При зміні ваги, що діє на датчик, змінюється і опір тензорезисторів, тим самим плечі моста розбалансовуються, а отже з'являється різниця напруг на виході мостової схеми (рис. 5). Для DYMH-116

червоний і чорний виводи це плюс і мінус живлення, а зелений і білий відповідно плюс і мінуси сигнальні. Необхідно підсилити різницю напруг на останніх двох виводах. Оскільки різниця напруг на сигнальних виводах має порядок міліВольт, її потрібно підсилити до 3.3 В щоб ESP32 міг коректно зчитати сигнал для подальшого перетворення в вагу.



Рис. 5. Схема тензодатчика

Для розрахунку коефіцієнта підсилення необхідно врахувати основний параметр датчика — так звану чутливість, тобто яка напруга буде на виході датчика (в міліВольтах), якщо його навантажити на максимум, при напрузі живлення в 1 Вольт.

Отже, маємо тензодатчик, що працює з діапазоном навантажень 0-100 кг, чутливість ( $U_{sens}$ ) якого 1.6 мВ/В. Рекомендована виробником мінімальна напруга живлення становить 4.5 В, тому обираємо напругу живлення з запасом: 5 В (VCC).

Розрахуємо напругу на виході датчика при навантаженні в 100 кг:

$$U_{OutMax} = VCC * U_{sens} = 1.6 * 5 = 8 мВ . \quad (1)$$

Оскільки мікроконтролер ESP32 на аналоговий вхід приймає від 0 В (нульове значення ваги) до 3.3 В (максимальне навантаження, в нашому випадку 100 кг). При максимальному навантаженні напруга на виході підсилювача має бути 3.3 В. Розрахуємо необхідний коефіцієнт підсилення:

$$K_U = \frac{3.3В}{8 \cdot 10^{-3} В} = 41 . \quad (2)$$

**Побудова схеми підсилення тензодатчика.** Схема тензодатчика є мостовою з тензорезисторами, для підсилення якої необхідно вибрати операційний підсилювач з низькою напругою зміщення, великим вхідним опором та низьким рівнем залежності дрейфу нуля від часу. Базуючись на вищевказаних критеріях, обрана мікросхема прецизійного операційного підсилювача AD8552.

Перейдемо до побудованої схеми підсилення, що зображена на рис. 6, як два послідовно включених неінвертуючих підсилювача.

Значення пінів входу J501 схеми наступні:

- 1 — Signal-(Vsig-);
- 2 — GND (Живлення -);
- 3 — VCC (Живлення +);
- 4 — Signal+(Vsig+).

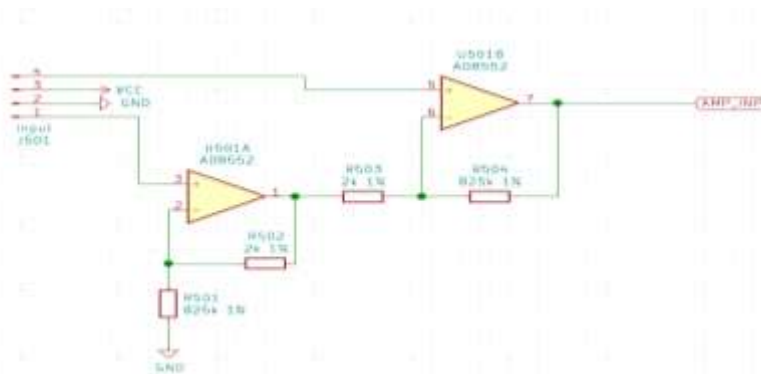


Рис. 6. Схема підсилення тензодатчика

Перший підсилювач U501A змінює рівень опорної напруги другого U501B. Тобто вихідний сигнал з U501A подається на інвертуючий вхід U501B, тому підсилювач U501B підсилює диференційний вхідний сигнал ( $V_{sig+} - V_{sig-}$ ). Така схема забезпечує набагато більший вхідний імпеданс ніж при використанні одного ОУ на неінвертованому підсилювачі.

Диференційний коефіцієнт підсилення ( $K_{dm}$ ) дорівнює:

$$K_{dm} \approx \left( 1 + \frac{R_{504}}{R_{503}} \right) \quad (3)$$

А коефіцієнт підсилення синфазного ( $K_{cm}$ ), некорисного сигналу буде дорівнювати:

$$K_{cm} = \frac{(R_{504} \cdot R_{502} - R_{503} \cdot R_{501})}{R_{501} \cdot R_{503}} = \frac{R_{504} \cdot R_{502}}{R_{501} \cdot R_{503}} - 1 \quad (4)$$

Відповідно, якщо:

$$\frac{R_{504}}{R_{503}} = \frac{R_{502}}{R_{501}} \quad (5)$$

то коефіцієнт підсилення синфазного сигналу  $K_{cm} = 0$ . З цього можемо зробити висновок, що в ідеальному випадку, коли резистори будуть без відхилення, схема буде підсилувати тільки потрібний нам диференційний сигнал, а синфазний відкидати, тобто СММР буде прямувати до нескінченності. В реальних умовах  $K_{cm}$  не може дорівнювати нулю хоча б тому, що резистори мають відхилення.

Коефіцієнт підсилення має бути 412.5, тобто виходячи з формули (3):

$$K_{dm} = 1 + \frac{R_{504}}{R_{503}} = 412.5. \quad (6)$$

Номінали резисторів можна вибирати з оглядом на те, що найменший з них повинен був більше ніж 1.5 кОм (для стабільності роботи схеми). Також для більшої точності роботи підсилювача краще обирати резистори з допуском не більше як в 1%. Згідно з вище сказаним, були обрані наступні номінали  $R_{502}=R_{503}=2$  кОм,  $R_{504}=R_{501}=825$  кОм.

**Керування напругою живлення тензодатчика та підсилювача.** Насадки живляться від акумуляторів, а тензодатчик в увімкненому стані споживає струм 5 мА, при тому що його робота є необхідною тільки в момент замірів. В інший час він може бути вимкнений для економії енергії, тому була розроблена схема керування живленням (рис. 7) на базі двох MOS FET транзисторів, що забезпечує включення і виключення підсилювача та тензодатчика.

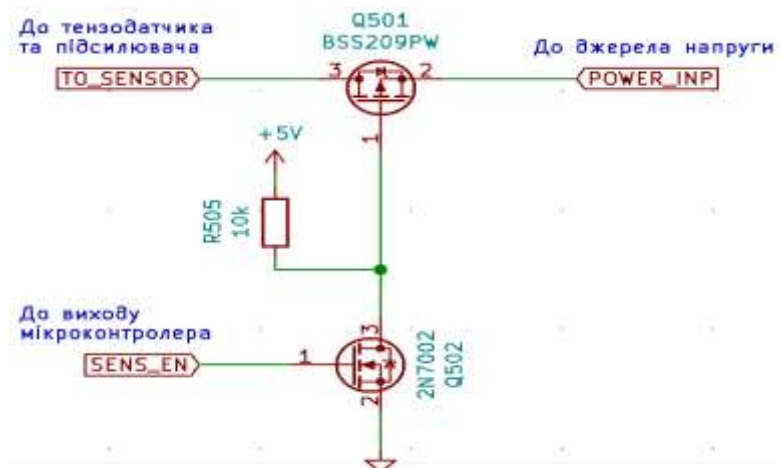


Рис. 7. Схема керування живленням тензодатчика та підсилювача

Принцип роботи схеми досить простий: при подачі високого рівня на вхід SENS\_EN, N-канальний транзистор Q502 відкривається, тоді напруга на затворі (вивід 1) P-канального транзистора Q501 впаде до нуля, й він також відкривається, подавши напругу живлення на вивід POWER\_INP на датчик, підключений до виходу TO\_SENSOR.

**Висновок.** Розглянуто побудову пристрою для пришвидшення реабілітації після травм нижніх кінцівок. Запропоновано структурну схему електронної частини пристрою та алгоритм його роботи, обґрунтовано прийняті технічні рішення. Нова методика реабілітації із застосуванням цього пристрою дає наступні результати: в більш ніж 30 пацієнтів, що проходили лікування з пристроєм, не було зафіксовано жодного рецидиву. Таким чином, впровадження розробленого і запатентованого пристрою [6] для вимірювання навантаження на м'язи в процес реабілітації після важких травм нижніх кінцівок сприятиме підвищенню ефективності відновлення нижніх кінцівок, зниженню ризику рецидивів та зменшенню терміну реабілітації пацієнтів.

## Література

1. Тензодатчики [Електронний ресурс] // Радиолюбитель. – 2015. – Режим доступу : <http://www.radiomexanik.spb.ru/8.-primeneniye-elektricheskikh-signalov/7.-tenzodatchiki.html>.
2. ESP32 Series Datasheet [Електронний ресурс] // Espressif Systems Version 3.7. – 2021. – Режим доступу : [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf).
3. Патент України 39990U. Мадриченко С. – Київ : Державне патентне відомство України, 2009.
4. Sanchez, S., Corchado, R., Calderon, L. (2020). Patente Spain ES1249804U. Oficina Española de Patentes y Marcas.
5. Townsend K., Cufi C., Akiba, Davidson R. Getting Started with Bluetooth Low Energy: Tools and Techniques for Low-Power Networking (1st ed.). Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2014. 180 p.

---

6. Попов І., Воронкова Є., Білий Владислав, Білий Віталій (2021). Патент України 146685U. Київ: Державне патентне відомство України.

#### References

1. Tenzodatchyky [Elektronnyi resurs] // Radyoliubitel. – 2015. – Rezhym dostupu : <http://www.radiomexanik.spb.ru/8.-primenienie-elektricheskikh-signalov/7.-tenzodatchiki.html>.
2. ESP32 Series Datasheet [Elektronnyi resurs] // Espressif Systems Version 3.7. – 2021. – Rezhym dostupu : [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf).
3. Patent Ukrainy 39990U. Madrychenko S. – Kyiv : Derzhavne patentne vidomstvo Ukrainy, 2009.
4. Sanchez, S., Corchado, R., Calderon, L. (2020). Patente Spain ES1249804U. Oficina Española de Patentes y Marcas.
5. Townsend K., Cufí C., Akiba, Davidson R. Getting Started with Bluetooth Low Energy: Tools and Techniques for Low-Power Networking (1st ed.). Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2014. 180 p.
6. Popov I., Voronkova Ye., Bilyi Vladyslav., Bilyi Vitalii (2021). Patent Ukrainy 146685U. Kyiv: Derzhavne patentne vidomstvo Ukrainy.