

УДК 519.7 :[681.2-5;681.2]  
DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126498

## РЕКУРЕНТНА МЕРЕЖА ЯК ІНСТРУМЕНТ КАЛІБРУВАННЯ У АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ ТА ІНТЕРАКТИВНИХ ТРЕНАЖЕРАХ

**О. М. Трунов**

Доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри\*

E-mail: trunovalexandr@gmail.com

**О. В. Мальченко**

Аспірант\*

E-mail: alexmalchenyuk@meta.ua

\*Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Чорноморський національний університет ім. Петра Могили

вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, Україна, 54003

*Побудовано метод автокалібрування та корегування значень вектору магнітної індукції, що є придатним до застосування в умовах обмежених обчислювальних ресурсів мікроконтролерів та SoC-систем автоматизованих систем та інтерактивних тренажерів. Досліджено працездатність алгоритмів калібрування і обробки периферійної інформації, що реалізують систему, та залежність величини похибки вимірювання від властивостей датчика та апаратних особливостей*

*Ключові слова: метод авто-калібрування, корегування, структура рекурентної мережі, SoC-системи, інтерактивні тренажери*

*Построен метод автокалибровки и корректировки значений вектора магнитной индукции, который пригоден для применения в условиях ограниченных вычислительных ресурсов микроконтроллеров и SoC-систем. Предложена структура рекуррентной сети автоматизированных систем и интерактивных тренажеров. Исследована работоспособность алгоритмов калибровки и обработки периферийной информации, которая реализует систему и зависимость величины ошибки измерения от свойств датчика и аппаратных особенностей*

*Ключевые слова: метод автокалибровки, коррекция, структура рекуррентной сети, SoC-системы, интерактивные тренажеры*

### 1. Вступ

Загальновідомо, що умови функціонування первинних перетворювачів фізичних величин, датчиків, вимірювальних приладів, регуляторів та інших елементів автоматизованих виробництв та автоматизованих робочих місць навчальних тренажерів є непередбачено відмінними від ідеальних [1–10]. Широкий діапазон рівнів, як вібрації, шуму, вологості, температури, так і зміна у широких межах параметрів технологічного процесу, характерна для видобувних, суднобудівних, машинобудівних, ливарних, прокатних та інших механообробних виробництв. Такі зміни технологічних параметрів та впливів зовнішнього виробничого сере-

довища суттєво впливають на похибку вимірювання контрольованої величини [11–13]. Кожен з чинників, що породжує похибку, зазвичай у лабораторних умовах, може бути вимірний і врахований окремо у результатах вимірювань. Однак у реальних виробничих умовах їх врахувати одночасно не виявляється можливим [11]. Внаслідок впливу означених чинників результати вимірювання кожним датчиком, поряд з прогнозованою методичною похибкою вимірюваної величини, включають додатково випадкову похибку, яку обумовлює зміна режимів його роботи [4–11]. Датчики, побудовані на ефекті Холла, та інші напівпровідникові датчики мають виражену температурну залежність та нелінійність характеристик [12]. Це лише два фактори з переліку, що визначають похибку вимірювання даного типу датчиків. Зважаючи на досить велику ціну підвищення точності вимірювань за рахунок удосконалення конструктивних та схемо-технічних рішень, актуальним є пошук методів з меншою собівартістю [13–17]. Одним з таких методів корекції характеристик датчиків є рекурентний штучно нейронно-мережевий (РШНМ), який поширює популярність [1]. Основними сферами застосування нейронних мереж є апроксимація функцій, асоціативна пам'ять, стиснення даних, розпізнавання та класифікація, оптимізаційні задачі, керування складними процесами та прогнозування [2]. З інженерної точки зору РШНМ – це паралельно розподілена система обробки інформації. Її вузли накопичують, узагальнюють експериментальні дані у зручній формі для подальшої інтерпретації й прийняття рішень [3]. Останнє є особливо важливим для створення автоматизованих систем та інтерактивних тренажерів.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми вимірювання характеристик магнітного поля**

Останнім часом в літературі все більше обговорюється проблема чутливості та подальшого удосконалення магнітних сенсорів, що будуються на принципі ефекту Холла [18]. Незважаючи на прогресивність рішень, наприклад [19], що впроваджуються у нові конструкції сенсорів шляхом введення мікро- та макроконцентраторів, вони все рівно не задовольняють вимогам [20]. Застосування інтегрованих датчиків Холла [21], планарних концентраторів, що суттєво підвищують чутливість магнітних траєкторних транспортних систем, не розв'язує проблем дрейфу нуля температурному уходу характеристик сенсорів під час роботи [22, 23].

Особливу актуальність набуває розв'язок цієї проблеми із впровадженням концепції «Інтернету речей» [4]. Її широкий спектр переваг та демонстрація практичних застосувань спонукає до впровадження інноваційних ідей модернізації сенсорних мереж, що ґрунтуються на інтегрованих датчиках Холла. У зв'язку з цим визначальними з переліку пропозицій удосконалення сенсорів є інтелектуалізація [14], рекурентна апроксимація [15], аналітичне навчання РШНМ [16]. Не менш важливим, як інструмент розробника, є адекватний опис і побудова моделі на основі максимізації єдиного кількісного виразу п'яти критеріїв адекватності [17]. Можливості лінеаризації, як одного з підходів до розвитку напрямку інтелектуальних-сенсорів в управлінні нелінійними процесами, та сенсорних мереж продемонстровано у [5]. Дана концепція передбачає наявність ро-

звиненої сенсорної системи як мережі та збільшує вимоги до окремого сенсору як елементу системи [6]. Зважаючи на дистанційну віддаленість сенсорної мережі та її автономність (деякі типи сенсорів можуть працювати до 10 років від акумулятору типу АА) [7], виникає необхідність в самодіагностуванні [5] та калібруванні [4]. Ефективним інструментом для рішення даних практичних задач, при наявності апробованого алгоритму, є використання чисельних методів [8, 9]. На даний час ШНМ були використані для перевірки сенсорів та виявлення відмов [5]. Також ШНМ були використані для лінеаризації характеристик [7–10], але побудовані алгоритми є складними для практичної реалізації на основі цифрових сигнальних процесорів та мікроконтролерів. В роботі [10] запропоновано метод реалізації штучної нейронної мережі (ШНМ) на 8-ми бітному мікроконтролері та досліджено особливості реалізації математичних операцій, що забезпечують представлення чисел з фіксованою точкою.

На теперішній час вже публіковано роботи, в яких описані приклади пристроїв, за допомогою яких досліджено алгоритми калібрування такого об'єкту керування як маніпулятор [11]. Останній також оснащено сенсорами, які побудовані за принципом ШНМ [11]. Проведений порівняльний аналіз алгоритмів керування маніпулятором із врахуванням калібрувальної поправки, за результатами якого побудовано інтелектуальний алгоритм керування багатоланцюговим маніпулятором [12]. Дана стаття також демонструє приклад сумісної роботи двох генетичних алгоритмів: калібрування та керування [13]. Однак необхідність одночасного використання двох алгоритмів мінімум у двічі уповільнює реалізацію процесу керування [15, 16].

Застосування РШНМ для коригування похибки датчиків у режимі реального часу вивчається у роботах [11, 12, 24]. Там же продемонстровано приклад використання мережі, що базується на розв'язку рівнянь тільки для очікуваних станів змінних [24]. Останнє завдяки використанню нейронної техніки знімає необхідність вивчення динаміки параметрів сенсору, але й обмежує розв'язки тільки цими наявними очікуваними станами змінних [24–27]. Запит на розробки інтелектуальних сенсорів все більше виникає при проектуванні систем змінної конфігурації [26], що здатні працювати у системі датчиків із різними цифровими входами [27]. Автоматичне калібрування дозволяє зменшити, за рахунок впровадження РШМ [26, 28], вплив таких проблем як переустановка, варіації коефіцієнтів підсилення, нелінійність [29]. Чисельне дослідження методу автоматичного калібрування та порівняння результатів з методологіями, що використовують кусково-лінійні та поліноміальні апроксимації, демонструє його переваги [30]. Наряду з цим такі фактори як час та вартість стримують його широке впровадження [31]. Не менш важливими є вимоги достовірності та надійності, що висувуються сучасними сенсорними мережами, які базуються на концепції Інтернет речей [32], або використовують розповсюдженні комп'ютерно-інтегровані технології для автоматизації нових виробничих процесів [33, 34]. Впровадження нейро-контролерних систем управління сучасними виробництвами процесами теж супроводжується зростанням вимог до підтвердження працездатності та автокалібрування [35, 36].

Таким чином, головною не розв'язаною проблемою є калібрування датчиків з нелінійними гістерезисними характеристиками в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Успіхи впровадження РШМ [15–17], що використовують вектори індикатори фізичної величини та її похідні [30], а також останні теоретичні роботи з інтелектуалізації сенсорів [12–14, 30–32], є привабливими за своїми перспективами. Досвід аналітичного навчання нейронів [16] та периферійної обробки даних [17] дозволяє сформулювати наступні цілі та задачі дослідження.

### **3. Цілі та задачі дослідження**

Ціллю роботи є формування принципу автоматичного калібрування сигналів напівпровідникових датчиків, наприклад Холла, які використовують зазвичай у автоматизованих виробництвах, комплексах фізичної терапії та тренажерах, у тому числі для навчально-тренувальних та аналітично-консультативних комплексів різного застосування.

Для досягнення поставленої цілі необхідно розв'язати задачі:

- побудувати алгоритм корегування вектору магнітної індукції, який може бути використано в умовах обмежених обчислювальних ресурсів (на мікроконтролерах та SoC-системи на кристалі);
- встановити структуру рекурентної мережі;
- встановити залежність величини похибки вимірювання від властивостей датчика та апаратних особливостей.

### **4. Побудова рекурентної мережі як засобу управління процесами збору та обробки периферійних даних**

Для досягнення поставленої цілі застосування оберемо РШМ з пам'яттю та структурними елементами, що визначають компоненти вектору – індикатору. Остання, для свого навчання, потребує наявності ефективного інструменту аналітичного визначення коренів. На рис. 1 демонструється фрагмент РШМ, що узагальнює такий підхід до периферійної обробки даних. Новий розклад у ряд Тейлора [14, 15] використовує величини індикаторів, що за допомогою розпаралелювання і рекурентного наближення дозволяє успішно обробляти та аналізувати сигнали [16].

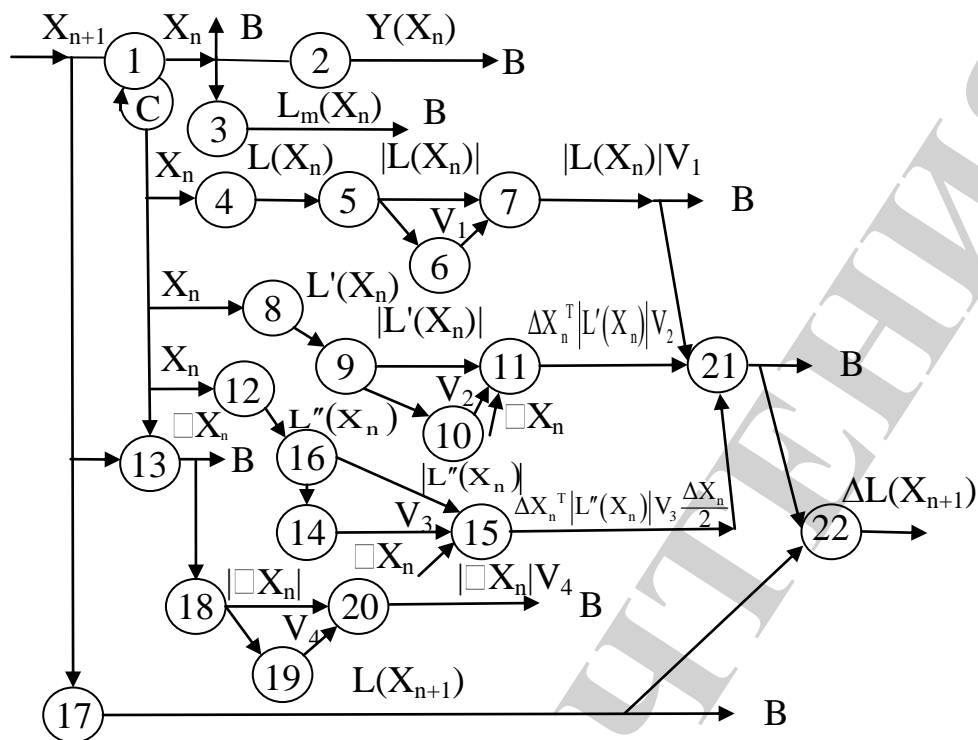


Рис. 1. Фрагмент РШНМ з коротко – довготривалою пам'яттю [26]

Так, якщо вихід з нейрону 3 визначає еталонну поведінку системи для довільного вектору стратегій  $\bar{X}$ , а з нейронів 4 та 17 для  $\bar{X}_n$  та  $\bar{X}_{n+1}$ , то відхилення:

$$\Delta L(\bar{X}) = L(\bar{X}) - L(\bar{X}_{n+1}) \quad (1)$$

визначає стратегію зміни керуючих впливів. Компоненти вектору – індикатору, отримуються після обробки компонент вектору відхилення (1) компаратором. Останній використовує предикати порівняння за одним еталоном та подання результату одним значенням із множини можливих  $(-1, 0, 1)$  [14–16]. Крім того, після додавання сигналів з нейрону 7 та нейронів 11 та 15, отримаємо апроксимоване значення у точці  $\bar{X}_{n+1}$ , як вихід з нейрону 21:

$$L(\bar{X}_{n+1}) = \|a_i\| + \|b_{ij}\| \Delta \bar{X}_n + \Delta \bar{X}_n^T \|c_{ij}\| \frac{\Delta \bar{X}_n}{2}. \quad (2)$$

У свою чергу, цей стандартний елемент (рис. 1) також дає можливість оцінювати похибку апроксимації шляхом порівняння величин  $L(\bar{X}_{n+1})$  розрахованих за (4) або вимірних на виході 21 та виходу 17. Останнє, у свою чергу, відкриває можливість проводити удосконалення моделі та формування керуючих правил [15–17]. Особливо це актуально для реальних систем, у яких  $L(\bar{X}_{n+1})$  є осцилюючими негладкими функціями, а процес удосконалення вимагає багато точкових наближень. Для реалізації ідеї калібрування додатково стабілізується

часовий крок спрацьовування  $\Delta$  правил “умова-дія”. Останнє забезпечує стабільний перехід від фази очікування  $[t = t(n-1)]$  до фази спрацьовування  $[t = t(n-1 + \Delta)]$  та дію регулятора і зміну сигналу:

$$X_n = X_{n-1} + a_1 \delta(n) + a_2 \delta(n-1). \quad (3)$$

Вибір величин коефіцієнтів підсилення  $a_1$  та  $a_2$  дозволяє змінювати чутливість та здійснювати корекцію кроку вектору стратегій залежно від величин швидкості зміни  $L(\bar{X}_{n+1})$  при незмінному часовому кроці  $\Delta$ .

### 5. Реалізація режиму періодичного автоматичного калібрування

Для реалізації принципу автоматичного калібрування додатково введемо до вимірювального тракту засіб керованого тарованого впливу на чутливі елементи. У якості останнього оберемо котушку, що з'єднано через підсилювач потужності з цифро-аналоговим перетворювачем мікроконтролеру. Вважаючи розрахункові значення напруженості на вісі котушки для стабілізованого струму еталонними та за умов незмінності відносного положення побудуємо процес калібрування. Необхідно зазначити, що таке калібрування буде давати точні відносні дані. Для калібрування абсолютних значень необхідно попередньо прокалібрувати саму котушку. Припустимо, що котушка прокалібрована, внаслідок чого відома  $H_s = f_s(i)$ . За таких умов процес калібрування датчика відбувається наступним чином. Після формування заданого значення та стабілізації сили струму у котушці фіксуються вихідні значення вихідних сигналів датчиків. Забезпечуючи упорядковану зміну сили струму, що еквівалентно зміні напруженості магнітного поля та забезпечуючи накопичування пар вхідних і вихідних сигналів, тарується датчик:  $H = f(i) H_s / f_s(i)$ . Точність такого процесу тарування визначається як точністю стабілізації сили струму, так і точністю тарування котушки:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta f(i)}{f(i)} + \frac{\Delta H_s}{H_s} + \frac{\Delta f_s(i)}{f_s(i)} = \frac{1}{f(i)} \frac{\partial f(i)}{\partial i} \Delta i + \frac{\Delta H_s}{H_s} + \frac{\Delta f_s(i)}{f_s(i)}. \quad (4)$$

Таким чином, для автоматизації тарування такого сигналу датчика та його періодичного уточнення необхідно і достатньо при наявності мікроконтролеру із вбудованими ЦАП та АЦП програмними засобами організувати процес змін сили струму та збору даних про вхідний та вихідний сигнал датчика. Проводячи такий процес у межах робочого діапазону, змінюючи силу струму на протилежний, утворимо можливості корекції зміщення нуля та калібрування датчику при наявності у характеристиці гістерезису.

Розроблені алгоритми мають перевагу, оскільки дозволяють обчислювати співвідношення між вихідними цифровими сигналами і тарованими впливами автоматично. Обчислена різниця сигналів з виходів 21 та 17 є максимально можливою похибкою. Нульові відхилення вихідних сигналів датчиків для отриманих

значень коефіцієнтів масштабу у кінцевому рахунку є свідченням успіху процесу автоматичного калібрування. Алгоритми автокалібрування складені без припущення про лінійність передавальних характеристик датчиків, операційних підсилювачів і АЦП. Зауважимо, що в процесі автоматичного калібрування немає необхідності вимірювати температуру первинного перетворювача та напругу живлення. Вплив цих факторів автоматично враховується у вигляді «отриманих миттєвих значень нулів» і «отриманих миттєвих масштабних коефіцієнтів» датчиків. Як правило, вони змінюються повільно і можуть бути прийняті як дійсні протягом проміжку часу. Протягом цього проміжку вимірювань точність буде оцінюватись максимально можливою похибкою (4). Після закінчення проміжку часу процедура автокалібрування повторюється. Величину проміжку часу задається алгоритмом калібрування. У алгоритмі передбачено інтерактивне завдання величини проміжку часу. Для перевірки даного алгоритму було створено макет приладу вимірювання трьохкомпонентного вектору магнітної індукції, принципова схема якого зображена на рис. 2. Вимірювальний елемент даного приладу побудований на основі датчиків SS495.

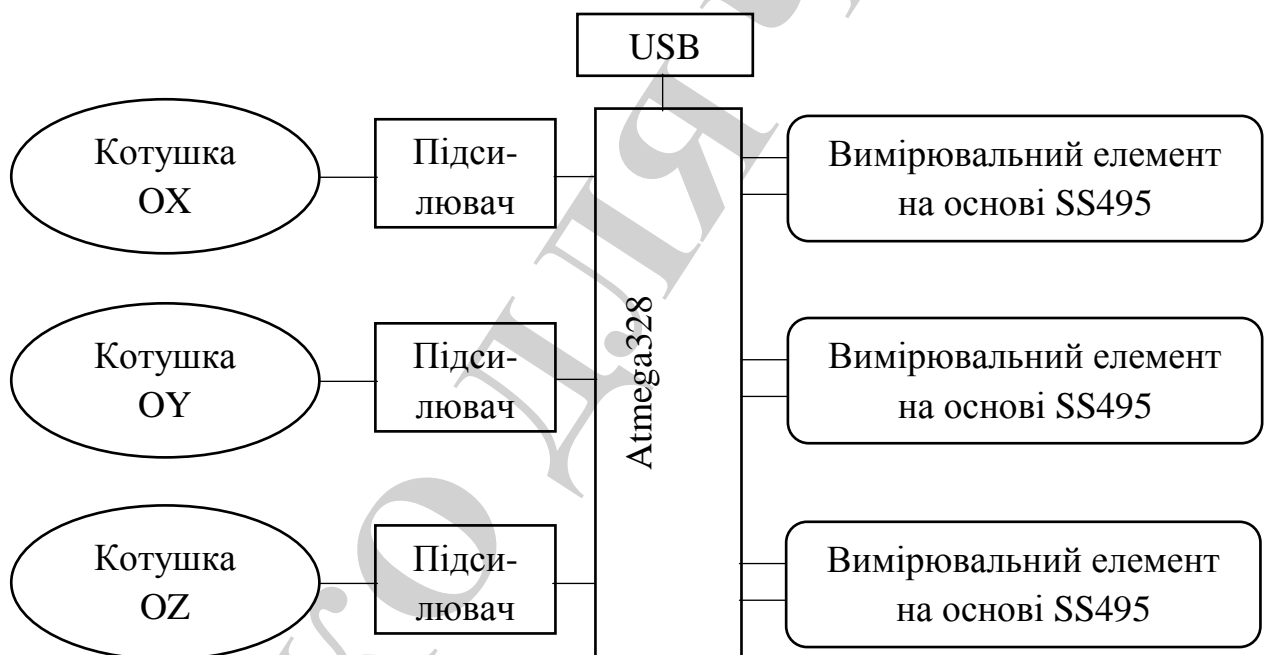


Рис. 2. Функціональна блок-схема приладу

Апаратно алгоритм автоматичної періодичної калібровки реалізовано на мікроконтролері Atmega 328. У свою чергу, простота функціональної блок-схеми демонструє невибагливість до підбору апаратних ресурсів. Функціональна блок-схема програмного забезпечення (ПЗ) приладу для вимірювання трьохкомпонентного вектору магнітної індукції зображена на рис. 3.

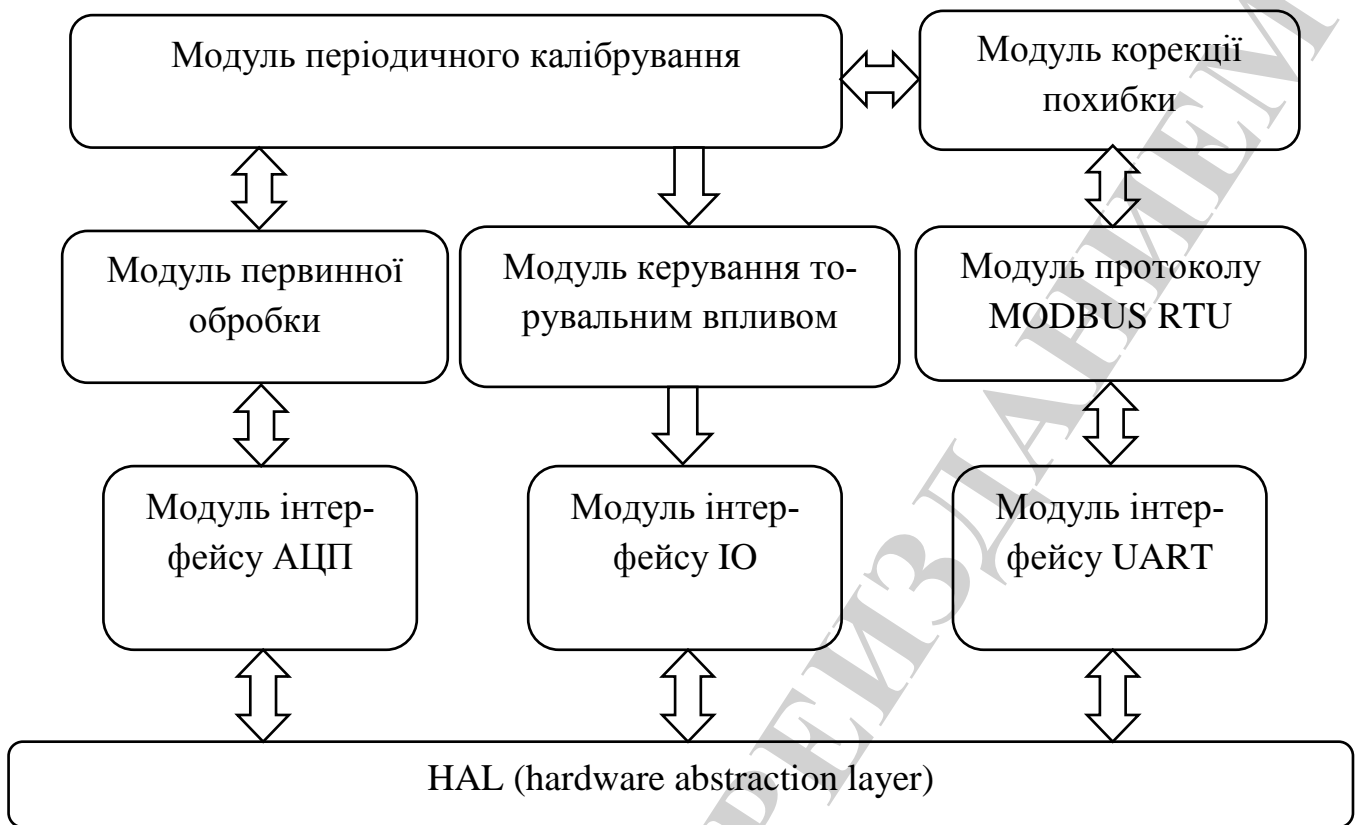


Рис. 3. Функціональна блок-схема ПЗ, що та реалізує роботу мікроконтролерної системи калібрування та вимірювання

Програмне забезпечення мікроконтролера побудоване за модульним принципом, з використанням трьох парадигм об'єктно-орієнтованого програмування. Такий підхід відкриває можливість до масштабування. Повний цикл функцій ПЗ реалізується за допомогою дев'яти модулів. Модульність збільшує відсоток повторного використання частин ПЗ за допомогою організації викликів, а також дозволяє утворити нові функції без внесення суттєвих змін до вже існуючого коду ПЗ. Для забезпечення незалежності ПЗ від апаратної платформи реалізації датчика та системи обробки і передачі даних в ньому передбачено модуль, що адаптує рівень апаратної абстракції (HAL). Як наслідок впровадження HAL спрощується процедура передачі ПЗ крізь порти, що обрано на інші апаратні засоби. На даному рівні реалізуються всі платформи-залежні функції системи. Також цей адаптований рівень забезпечує незалежність від впливу апаратних особливостей різних платформ, що реалізується за рахунок залучення обчислювальних інструментів, прийомів та засобів, та у свою чергу збільшує ефективність ПЗ. Наступний рівень в даному ПЗ представлений модулями інтерфейсів (SPI, UART), за допомогою яких здійснюється конфігурація та обмін інформацією з периферією підключеною до даних інтерфейсів. Для реалізації каналного рівня обміну з периферійними модулями приладу вимірювання трьохкомпонентного вектору магнітної індукції використано модулі протоколу. Дані модулі реалізують:



– Протокол обміну з SPI АЦП для вимірювання значення трьохкомпонентного вектору магнітної індукції за результатами обробки сигналу з первинного перетворювача на основі датчиків Холла;

– Протокол обміну Modbus-RTU для передачі результатів вимірювання до персонального комп'ютеру, де і відбуватиметься подальша обробка.

Наступним модулем ПЗ є модуль первинної обробки. Його функціями є перевірка коректності отриманих значень, а також приведення отриманих даних до вигляду придатного для подальшої обробки.

Модуль періодичної калібровки призначений для керування тарувальним впливом. Також даний модуль виконує функцію розрахунку коригувальних коефіцієнтів та корекції значень «миттєвих нулів». На основі отриманих значень корегувальних коефіцієнтів модуль корекції похибки здійснює поправки вимірюваного значення трьохкомпонентного вектору магнітної індукції, яке є вихідним для розробленого датчика.

## **6. Завдання експериментального дослідження інтелектуалізованого датчика**

Для експериментальної перевірки працездатності датчика у цілому виготовлена додаткова плата, яка містить шість попарно підключених первинних датчиків Холла, фото якого подано на рис. 4.

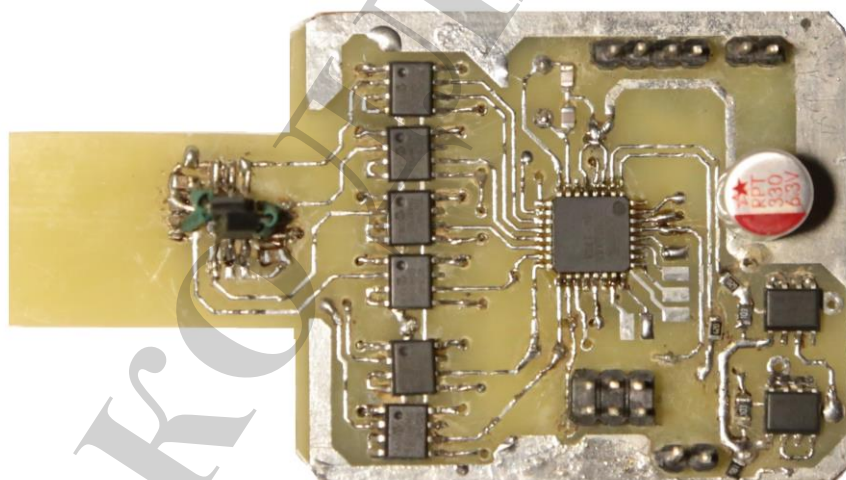


Рис. 4. Зовнішній вигляд дослідного модулю перетворювачів

Крім того, додатково для перевірки коректності роботи алгоритму було спроектовано та виготовлено мікропроцесорний дослідний модуль, за прототип якого обрано максимально спрощений варіант популярної мікроконтролерної плати Arduino [37]. За проектом плата задовольняє наступним вимогам:

– конструкція друкованої плати виконана за третім класом точності, що забезпечує зменшення собівартості, за рахунок використання менш точного обладнання;

– плата програмується на вільному програмному продукті Arduino за ідеологією open-source, яка є надбудовою над мовами C та C++ для мікроконтролерів;

– допускати приєднання бібліотек Arduino для різноманітних сенсорів, двигунів, інтерфейсів сполучення з ПЕОМ та іншими приладами [11–13], протоколи обміну з різноманітними носіями інформації та інформаційними середовищами: Ethernet, Bluetooth, Zig-Bee та інші;

– ядром плати обирається популярний мікроконтролер Atmega 328.

*Модуль стабілізації формування та підсилення каліброваного сигналу*

Для забезпечення автоматичної повірки та перевірки коректності роботи вимірювальних елементів в конструкції пристрою передбачено модуль автоматичного періодичного калібрування. Конструктивно він виконаний із трьох функціональних блоків: стабілізатору струму, блоку комутації та генеруючих елементів.

## **7. Обговорення результатів: моделювання, взаємодія експериментального модуля перетворювачів та програмних середовищ моделювання**

Для перевірки роботи запропонованого алгоритму використано середовище математичного моделювання Matlab. Для забезпечення взаємодії між дослідним модулем та середовищем Simulink використано пакет matlab Serial IO. Даний пакет дозволяє організувати обмін між пристроями та середовищем математичного моделювання за допомогою інтерфейсу UART. Для створення інтерфейсу користувача використано Matlab GUI. За допомогою даного додатку реалізовано режим збору даних сенсорів і запис значень до бази даних та зміна налаштувань дослідного зразка, а також візуалізація отриманих значень в реальному часі, що зображено на рис. 5. Підключення до дослідного стенду передбачено у додатку кнопкою connect інтерфейсу UART. Комунікації і підтримка реалізовано за допомогою Matlab Serial IO, а підключення до бази даних виконане на основі СУБД Firebird.

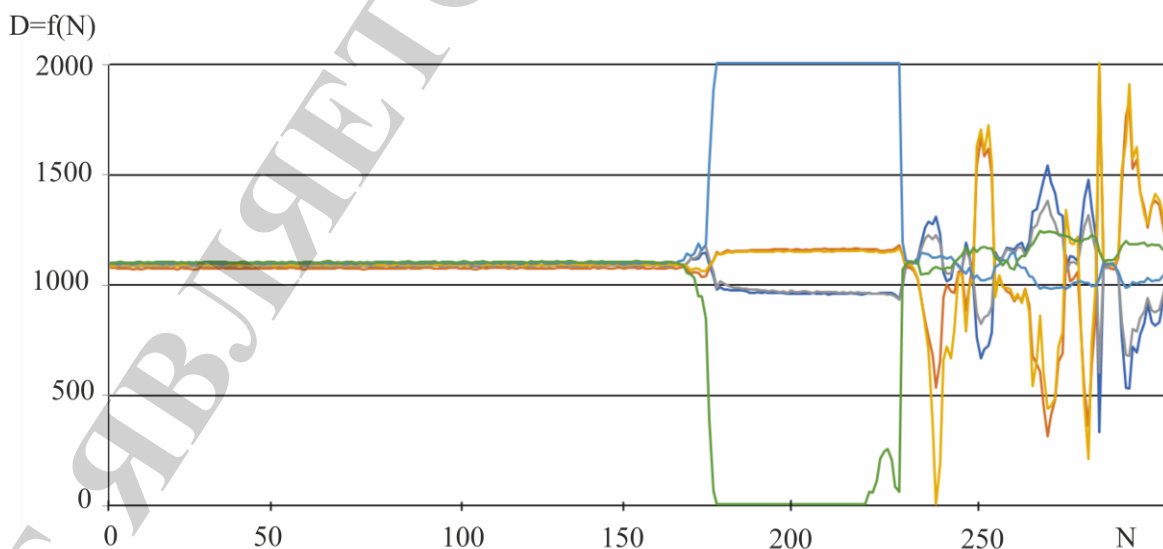


Рис. 5. Вікно програми, що збирає, записує та відображає графічно дані для шости сенсорів у реальному часі  $D=f(N)$

За результатами експериментального дослідження підтверджено ефективність застосування комунікаційного протоколу Modbus RTU, що дозволило встановлювати зв'язок між дослідним зразком та ПК, а забезпечення його підтримки здійснювати програмою збору даних Instrument Control Toolbox. Такі можливості дозволяють підключати MATLAB безпосередньо до таких інструментів, як осцилографи, генератори функцій, аналізатори сигналів, джерела живлення та аналітичні прилади. Для віддаленого зв'язку з іншими комп'ютерами та пристроями з MATLAB, даний Toolbox забезпечує вбудовану підтримку послідовних протоколів TCP/IP, UDP, I2C, SPI, MODBUS та Bluetooth®. Генератор генерує сигнал, завдяки якому у каліброваній котушці тече струм та створюється магнітне поле. За значенням величини на вході системи із бази знань за запитом подається величина магнітної індукції на осі котушки. За запитом синхронно замірюються покази датчика Холла. Таким чином, отримано дві величини, які дозволяють обчислювати калібрувальний множник за методологією [26] та записувати і зберігати його величину у базі знань. Як підтверджують наявні дані графічного відображення (рис. 5), такі алгоритми здатні проводити одночасні заміри зустрічно попарно підключених датчиків, що у свою чергу дозволяє проводити корекцію нуля компонент вектору магнітної індукції при реалізації в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Реалізація зустрічно-попарного підключення сенсорів дозволяє знівелювати дрейф нуля та різні температурні залежності кристалу, що досягається саме за рахунок використання РШНМ та алгоритмів визначення і запам'ятовування коефіцієнтів калібрування. Останнє зумовлює переваги пропонованого підходу у порівнянні з [18–23]. Однак, незважаючи на ці переваги, невідомо, як поведуть себе такі кристали із часом та як на них будуть впливати процеси старіння та опромінення. Слід очікувати, що при певних обставинах стрибкоподібні зміни властивостей одного з кристалів утворюватимуть ситуації невизначеності до наступного процесу авто-калібрування. Такі проблеми теоретично можливі, але на сьогоднішній день експериментально вони не спостерігались. Очевидно, що тільки комплексне використання авто-калібрування, яке побудовано на засадах традиційної метрології та теорії нечітких множин, відкриває більш широкі можливості для застосування у інженерній практиці реалізації різноманітних проектів та побудови методів прийняття рішень [38].

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження підтвердили здатність алгоритмів РШНМ корегування вектору магнітної індукції при реалізації в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Нові можливості оцінки залежності величини похибки вимірювання від властивостей датчика та його апаратних особливостей відкривають нові технології автоматичної корекції і калібрування. Застосування принципу автоматичного калібрування сигналів напівпровідникових датчиків, які використовують зазвичай у автоматизованих виробництвах, не обмежується датчиками Холла. Слід очікувати, що вони набудуть поширення разом із впровадженням інтелектуальних методів прогнозування, ідентифікації та керування [35, 36]. Разом з тим, комплексне застосування апробованих алгоритмів і протоколів у сукупності з нейро-мережевими регуляторами знайде своє впровадження у проектах приладів фізичної терапії та тренажерів. Особливо

приваблює їх застосування для навчально-тренувальних та аналітично-консультативних комплексів подвійного застосування.

## 8. Висновки

1. Реалізація принципу автоматичного калібрування вихідних сигналів напівпровідникових датчиків Холла забезпечується застосуванням рекурентної мережі, що використовує інструменти вектор-індикаторів та рекурентну апроксимацію, а похибка їх визначається похибкою калібрувальної кривої котушки, стабілізацією величини сили струму і похибкою оцифрування.

2. Реалізація алгоритму корегування вектору магнітної індукції, що здійснена в умовах обмежених обчислювальних ресурсів, експериментально підтверджує реалізуємість автокалібрування на мікроконтролерах та SoC-системах на одному кристалі.

3. Застосування рекурентної нейронної мережі дозволяє експериментально визначати величину максимально можливої похибки та встановити залежність величини похибки вимірювання від властивостей датчика та апаратної реалізації.

## Література

1. Руденко О. Г., Бодяньський Є. В. Штучні нейронні мережі: навч. пос. Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. 404 с.
2. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. Москва: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.
3. Bavarian B. Introduction to neural networks for intelligent control // IEEE Control Systems Magazine. 1988. Vol. 8, Issue 2. P. 3–7. doi: 10.1109/37.1866
4. Alberti A. M. Internet of Things – Perspectives, Challenges and Opportunities – Presentation Slides. 2013. doi: 10.13140/rg.2.1.4501.4887
5. Fazlur Rahman M. H. R., Devanathan R., Kuanyi Z. Neural network approach for linearizing control of nonlinear process plants // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2000. Vol. 47, Issue 2. P. 470–477. doi: 10.1109/41.836363
6. ANN generalised inversion for the linearisation and decoupling control of nonlinear systems / Dai X., He D., Zhang T., Zhang K. // IEE Proceedings – Control Theory and Applications. 2003. Vol. 150, Issue 3. P. 267–277. doi: 10.1049/ipcta:20030322
7. Ciminski A. S. Neural network based adaptable control method for linearization of high power amplifiers // AEU – International Journal of Electronics and Communications. 2005. Vol. 59, Issue 4. P. 239–243. doi: 10.1016/j.aeue.2004.11.026
8. Linearization of Nonlinear Dynamic Systems / Schoukens J., Nemeth J. G., Vandersteen G., Pintelon R., Crama P. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2004. Vol. 53, Issue 4. P. 1245–1248. doi: 10.1109/tim.2004.831123
9. Cotton N. J., Wilamowski B. M., Dundar G. A Neural Network Implementation on an Inexpensive Eight Bit Microcontroller // 2008 International Conference on Intelligent Engineering Systems. 2008. doi: 10.1109/ines.2008.4481278

10. Научно-технический отчет о выполнении 2 этапа Государственного контракта № П1047 от 20 августа 2009 г. и Дополнению от 02 апреля 2010 г. № 1. Екатеринбург, 2010. 84 с.
11. Roj J. Neural Network Based Real-time Correction of Transducer Dynamic Errors // *Measurement Science Review*. 2013. Vol. 13, Issue 6. P. 286–291. doi: 10.2478/msr-2013-0042
12. Schott C., Racz R., Huber S. Smart CMOS Sensors with Integrated Magnetic Concentrators // *IEEE Sensors*. 2005. doi: 10.1109/icsens.2005.1597860
13. Self-Calibration and Optimal Response in Intelligent Sensors Design Based on Artificial Neural Networks / Rivera J., Carrillo M., Chacón M., Herrera G., Bojorquez G. // *Sensors*. 2007. Vol. 7, Issue 8. P. 1509–1529. doi: 10.3390/s7081509
14. Trunov A. N. Intellectualization of the models' transformation process to the recurrent sequence // *European Applied Sciences*. 2013. Vol. 9, Issue 1. P. 123–130.
15. Trunov A. N. Application of the recurrent approximation method to synthesis of neuron net for determination the hydrodynamic characteristics of underwater vehicles // *Problem of Information Technology*. 2014. Issue 02 (016). P. 39–47.
16. Trunov A. Vector indicator as a tool of recurrent artificial neuron net for processing data // *EUREKA: Physics and Engineering*. 2016. Issue 4. P. 55–60. doi: 10.21303/2461-4262.2016.000129
17. Трунов О. М. Критерій адекватності як оцінка ефективності процесу побудови моделі // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. Т. 1, № 4 (73). С. 36–41. doi: 10.15587/1729-4061.2015.37204
18. Popovic R. S., Drljaca P. M., Schott C. Bridging the gap between AMR, GMR, and Hall magnetic sensors // 2002 23rd International Conference on Microelectronics. Proceedings (Cat. No.02TH8595). 2002. doi: 10.1109/miel.2002.1003148
19. Magnetic field sensor and current and/or energy sensor: Pat. No. US5942895A. Cl. G01R 33/06; G01R 19/00 / Popovic R., Racz R., Hreisa J., Blanchard H. No. 5,942,895; declared: 23.10.1996; published: 24.08.1999.
20. High Sensitivity Hall Magnetic Sensors Using Planar Micro and Macro Flux Concentrators / Drljaca P. M., Schlageter V., Vincent F., Popovic R. S. // *Transducers '01 Eurosensors XV*. 2001. P. 160–163. doi: 10.1007/978-3-642-59497-7\_37
21. Popovic R. S., Randjelovic Z., Manic D. Integrated Hall-effect magnetic sensors // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2001. Vol. 91, Issue 1-2. P. 46–50. doi: 10.1016/s0924-4247(01)00478-2
22. Design of planar magnetic concentrators for high sensitivity Hall devices / Drljača P. M., Vincent F., Besse P.-A., Popović R. S. // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2002. Vol. 97-98. P. 10–14. doi: 10.1016/s0924-4247(01)00866-4
23. A Magnetic Tracking System based on Highly Sensitive Integrated Hall Sensors / Schlageter V., Drljaca P. M., Popovic R. S., Kucera P. // *Proc. MIPRO Conference*. Opatija, Croatia, 2002.
24. Trunov A. Peculiarities of the interaction of electromagnetic waves with bio tissue and tool for early diagnosis, prevention and treatment // 2016 IEEE 36th In-

ternational Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 2016. doi: 10.1109/elnano.2016.7493041

25. Trunov A. Realization of the paradigm of prescribed control of a nonlinear object as the problem on maximization of adequacy // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 4, Issue 4 (82). P. 50–58. doi: 10.15587/1729-4061.2016.75674

26. Trunov A. Recurrent approximation as the tool for expansion of functions and modes of operation of neural network // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 5, Issue 4. P. 41–48. doi: 10.15587/1729-4061.2016.81298

27. Trunov A. Criteria for the evaluation of model's error for a hybrid architecture DSS in the underwater technology ACS // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 6, Issue 9 (84). P. 55–62. doi: 10.15587/1729-4061.2016.85585

28. Trunov A. Theoretical predicting the probability of electron detachment for radical of cell photo acceptor // 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 2017. doi: 10.1109/elnano.2017.7939776

29. Trunov A. Recurrent transformation of the dynamics model for autonomous underwater vehicle in the inertial coordinate system // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 2, Issue 4 (86). P. 39–47. doi: 10.15587/1729-4061.2017.95783

30. Trunov A. Recurrent Approximation in the Tasks of the Neural Network Synthesis for the Control of Process of Phototherapy. Chap. 10 // Computer Systems for Healthcare and Medicin. Denmark, 2017, P. 213–248.

31. Fisun M., Smith W., Trunov A. The vector rotor as instrument of image segmentation for sensors of automated system of technological control // 2017 12th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). 2017. doi: 10.1109/stc-csit.2017.8098828

32. Complex Industrial Systems Automation Based on the Internet of Things Implementation / Kondratenko Y., Kozlov O., Korobko O., Topalov A. // Communications in Computer and Information Science. 2018. P. 164–187. doi: 10.1007/978-3-319-76168-8\_8

33. Automation of control processes in specialized pyrolysis complexes based on web SCADA systems / Kondratenko Y., Kozlov O., Gerasin O., Topalov A., Korobko O. // 2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). 2017. doi: 10.1109/idaacs.2017.8095059

34. Topalov A., Kozlov O., Kondratenko Y. Control processes of floating docks based on SCADA systems with wireless data transmission // 2016 XII International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). 2016. doi: 10.1109/memstech.2016.7507520

35. Development of an intelligent system for the prognostication of energy produced by photovoltaic cells in smart grid systems / Kupin A., Vdovychenko I., Muzyka I., Kuznetsov D. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5, Issue 8. P. 4–9. doi: 10.15587/1729-4061.2017.112278

36. Kupin A. I. Intelktual'na identyfikatsiya ta keruvann v umovakh protsesiv zbahachuval'noyi tekhnolohiyi. Kyiv: Korniychuk, 2008. 202 p.
37. ARDUINO PRO MINI. URL: <https://store.arduino.cc/arduino-pro-mini>
38. Fuzzy decision support systems in marine practice / Solesvik M., Kondratenko Y., Kondratenko G., Sidenko I., Kharchenko V., Boyarchuk A. // 2017 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE). 2017. doi: 10.1109/fuzz-ieee.2017.8015471

ТОЛЬКО ДЛЯ ЧТЕНИЯ