

ВІМІРЮВАННЯ ТА ДІАГНОСТИКА В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2025.71.088>

УДК 681.518.3: 621.391.26(075): 621.372.542

ВІМІРЮВАННЯ І ЗБІР ДАНИХ ПРО ПАРАМЕТРИ МАГНІТНИХ ПОЛІВ У ПРОГРАМНО-АПАРАТНОМУ КОМПЛЕКСІ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І НЕІНВАЗИВНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Р.О. Мазманян*, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: mazmanian@ied.org.ua, r.o.mazmanian@gmail.com

Діагностика електроенергетичного обладнання, прогнозування залишкового ресурсу є ефективним способом підтримки його безпечної та довгострокової експлуатації. Зниження витрат, скорочення часу діагностики забезпечують неінвазивні методи, які не потребують втручання в конструкцію машини, що діагностується. Апаратно-програмний комплекс призначено для вивчення зв'язку між змінами розподілу напруженості магнітного поля з несправностями в енергетичному обладнанні. В експериментальних дослідженнях із заздалегідь визначеними технічними несправностями, штучно внесеними в об'єкт, комплекс забезпечить корисні та достовірні результати, реєструючи зміни індукції магнітного поля в просторовій, часовій та частотній областях фізики магнітного поля. Вибір та гнучке налаштування засобів збору даних забезпечить використання найбільш доцільного методу вимірювань, перетворення та відображення інформації про досліджувані несправності. У статті представлено основні режими роботи, графічні інтерфейси користувача персонального комп'ютера та мобільної системи збору даних, які спільно виконують перетворення, зберігання, аналіз та відображення вимірювальної інформації, отриманої від різних магнітних датчиків. Узагальнена функціональна специфікація програмного забезпечення комплексу, проектування графічного інтерфейсу користувача (GUI) як частини операційної системи реального часу (RTOS) також будуть використані під час розробки проблемно-орієнтованих систем комп'ютерної діагностики енергетичного обладнання. Бібл. 17, рис. 5.

Ключові слова: технічне діагностування, неінвазивний, електроенергетичне обладнання, магнітні поля.

Вступ. Комплекс **magnetic FieldPointer** [1] призначений для використання в дослідженнях магнітних полів та неінвазивного діагностування різноманітного електроенергетичного обладнання. Це призначення вимагає отримання тих відомостей, які після узагальнення та формального подання забезпечать можливо більшу незалежність свого інформаційного змісту від конкретних типів, режимів роботи, умов експлуатації технічних засобів, що спостерігаються. Очевидно, що подібне завдання має вирішуватися як за допомогою комп'ютерного моделювання магнітних полів машин для взаємного перетворення електричної та інших видів енергій, так і проведенням фізичних експериментів і спостережень.

Різноманітність областей, в яких може проявлятися вплив дефектів і несправностей на характеристики і параметри магнітних полів, вимагають забезпечення комплексом ширшого функціонального розмаїття, ніж мають звичайні вимірювачі фізичних величин. Фізичні експерименти з реальними об'єктами зазвичай супроводжуються виникненням обставин, які, можливо, не були прийняті до уваги при їхньому плануванні або виникли в результаті оцінки отриманих даних. Ця обставина потребує їхнього представлення в одному або кількох різних форматах, що може бути реалізовано за допомогою різноманітності та гнучкості технічних та програмних засобів **Комплексу**, створеного

мобільною системою збору даних **МСЗД** і його комп'ютером **КК**.

Особливе значення в інформаційному змісті **Комплексу** має вимірювач магнітної індукції **METER**, який є основним джерелом даних для всіх інших режимів роботи: **SCOPE**, **PLOT**, **SCAN**, **POINTER** [2]. Їхня програмна реалізація у вигляді окремих додатків **RTOS** (операційна система реального часу **МСЗД**) повинна забезпечити необхідну функціональність комплексу, можливість ефективного використання досить обмежених (у початковій її версії) апаратних можливостей засобів збору даних Комплексу і водночас окремо розробляти, об'єднувати з апаратними засобами програмне забезпечення основних режимів, тестувати та перевіряти їхню функціональність.

Як і раніше, розробка програми **METER** проводиться відповідно до Функціональної специфікації, складеної на підставі уявлень про вплив дефектів та несправностей на параметри магнітних полів електроенергетичного обладнання, умов проведення фізичних експериментів, інформаційного змісту отриманих даних, потреби експериментатора в отриманні достатньої інформації у вигляді, зручному для оперативного прийняття рішень про зміну перебігу експерименту.

Функціональна специфікація комплексу засобів, що реалізують режим METER.

Цей етап робіт присвячено розробці програмного забезпечення комплексу, апаратні засоби якого були раніше створені в рамках попередніх науково-дослідних робіт, виконаних у відділі електричних та магнітних вимірювань **ІЕД НАН України**. Це передбачає суворе підпорядкування наявним важливим технічним рішенням, залишаючи вибір найбільш ефективних шляхів програмної реалізації функціональної специфікації. В узагальненому вигляді специфікація була сформульована так:

1. Програмне забезпечення режиму **METER** та його апаратна складова реалізують систему збору магнітовимірювальних даних (**DAQ**) Комплексу **magnetic FieldPointer**.

2. Програмне забезпечення цього режиму складається з двох різних додатків, один з яких призначений для роботи у складі **RTOS** мобільної системи збору даних (**МСЗД**), а другий – під керуванням операційної системи **Windows** комп'ютера **Комплексу**.

3. Додатки, що розробляються, забезпечують можливі в реальних умовах перелік та обсяг функцій управління процедурами вимірювання та відображення даних.

4. Програмне наповнення режиму **METER** забезпечує доступ до вимірювальних даних та повноцінне керування процедурами цього режиму з боку інших програм.

5. Програми забезпечують повну та синхронну взаємодію з використанням єдиного набору команд управління.

6. Управління процедурами забезпечує вимірювання та збирання даних магнітної індукції в діапазонах значень від 12 μT до 1600 mT та частот 0 до 600 Hz.

7. Передбачено застосування первинних вимірювальних перетворювачів трьох типів: датчики Холу, магніторезистивні датчики та індукційні перетворювачі.

8. Для більш повного представлення просторового розподілу та змін у часі магнітної індукції необхідно розробити програмні засоби, які надалі можуть бути модифіковані та використані в комплексах із триосьовими датчиками (у цій версії буде використаний один двохосьовий магніторезистивний перетворювач).

9. Передбачити можливість одночасного вимірювання та перетворень аналогових значень вимірювального сигналу у цифрові послідовності всіх трьох каналів.

10. Інтерфейси користувача в режимі **METER** включають засоби перемикання та табло для індикації діапазону вимірювань індукції постійних та змінних магнітних полів, індикацію використовуваного датчика, одиниць вимірювання mT/Gs, таблиці та кнопки очищення/запису/документування результатів у таблицях на екранах **МСЗД** і **КК**.

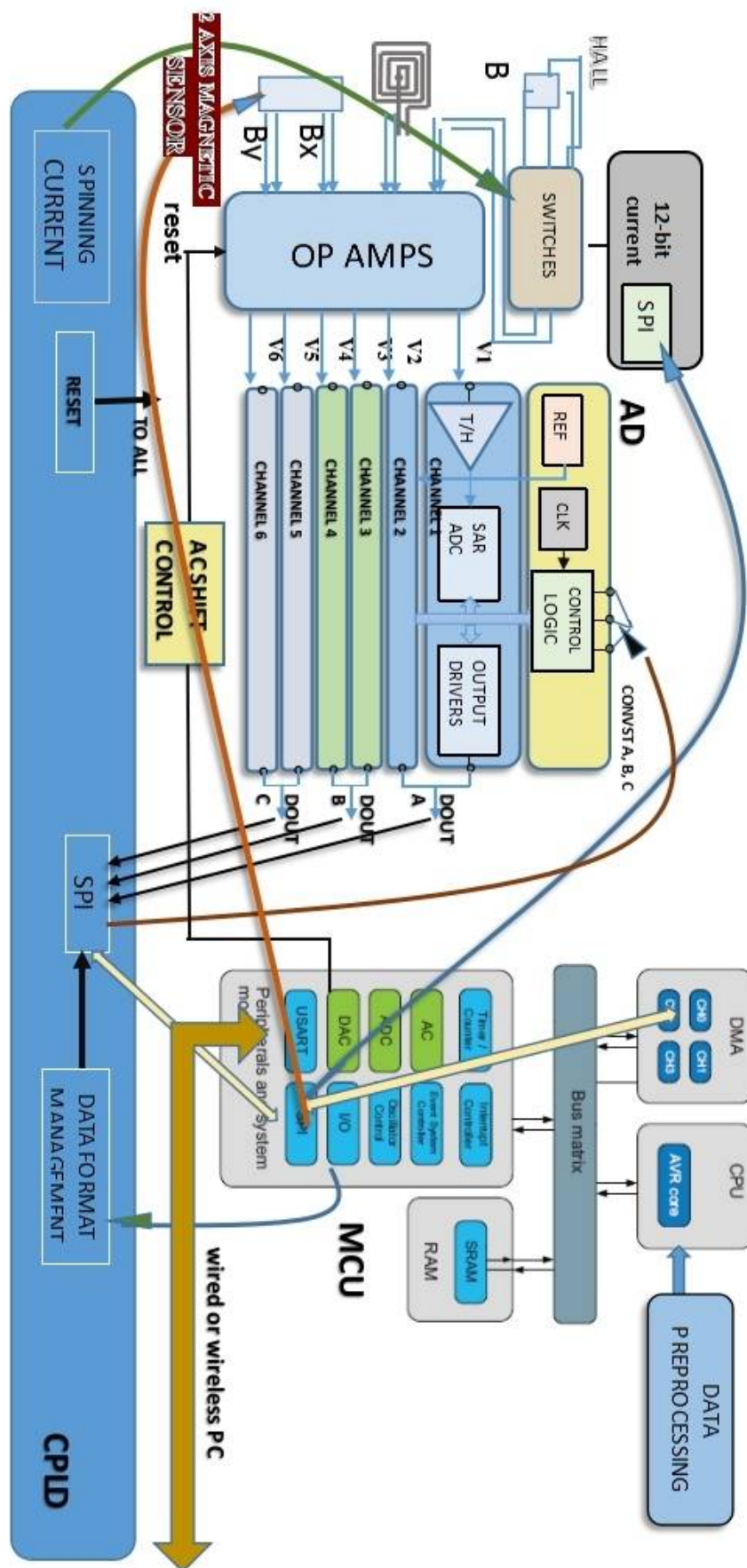


Рис. 1. Функціональна блок-схема мобільної системи збору даних (МСЗД)

Апаратні засоби МСЗД та їхня організація. Отже, передбачувану реалізованість Комплексу забезпечували апаратні засоби МСЗД [1], доповнені програмованою логікою CPLD (рис. 1), які включали такі функціонально завершені пристрої та блоки :

- 1) вимірювальні перетворювачі Холу разом із керованим джерелом живлення *12-bit current* [3] та ключами *switches* [4] для підключення виводів, або індукційного перетворювача, або двохосового магніторезистивного перетворювача [5];
- 2) *OP AMPS* – блок підсилювачів вимірювальних сигналів [6];
- 3) *AD* - аналого-цифровий перетворювач [7, 8], який містить в одному корпусі шість 12-бітових, швидкодіючих, малопотужних АЦП послідовного наближення;
- 4) CPLD – програмовану логіку [9];
- 5) MCU – високопродуктивний 8/16-біт мікроконтролер AVR XMEGA AU [10].

Вимірювальні сигнали v1 ... v6 після посилення надходять на один або кілька входів AD, які через послідовний порт SPI надходять у CPLD, де вони форматуються і вже через послідовний порт SPI MCU в режимі прямого доступу до пам'яті DMA зберігаються в оперативній пам'яті мікроконтролера SRAM, звідки далі по провідному або радіоканалу зв'язку направляються в комп'ютер Комплексу.

Розроблена раніше схемна реалізація вимірювача з датчиком Холу [11] для виключення впливу напруги нееквівалентного розташування електродів датчика на результат вимірювань застосовує відомий метод *spinning current* [12].

Комп'ютерне моделювання та наскрізне проєктування вимірювача [13, 14, 15] було виконано на попередніх етапах досліджень. У схемотехнічному моделюванні використовувалися вбудовані та оригінальні резистивні та гіраторні феноменологічні моделі [16] перетворювачів на основі ефекту Холу. З їхньою допомогою були створені структури та принципові схеми вимірювачів, визначено форму та параметри керуючих сигналів, сформульовано вимоги до логічних послідовностей сигналів, що здійснюють поперединне підключення пар електродів до джерела живлення датчика та до входних клем підсилювача напруги Холу.

Управління групами ключів, що реалізують режим *spinning current*, команди управління режимами, дані про поточний стан процесів вимірювання і збору даних, виробляються програмованою логікою CPLD. Нижче приведені деякі основні функції і команди, які визначалися на початковій стадії розробки програмного забезпечення:

- Включення послідовного введення даних каналу А перетворювача AD.
 - o Вхід BUSY. Переходить у високий рівень, коли починається перетворення, і залишається високим доти, доки перетворення не завершиться.
 - o Запуск введення і пересилки двобайтових даних трьох каналів перетворювача AD для запису в оперативну пам'ять MCU.
- Формування сигналу скидання.
- Сигнал завершення перетворення сигналу в цифровий код і пересилання в MCU.
 - o Сигнал активації / дезактивації керованого джерела току живлення давача Холу.
- Сигнали стробування старшого і молодшого байтів слова даних.
 - o Сигнали формування двобайтових посилань для кожного каналу перетворення
 - o Сигнал для ініціювання одночасних перетворень для пар V1/V2, V3/V4, V5/V6/
 - o 8 біт даних /послідовне введення даних каналу С, В, А перетворювача AD
- Дозвіл на включення режиму *spinning current* давача Холу.
 - o Сигнали управління ключами сигналу і живлення датчика Холу в режимі *spinning current*.
 - o Сигнали синхронізації послідовного порту вводу даних у MCU.
 - o Логічний сигнал супроводження передачі даних.

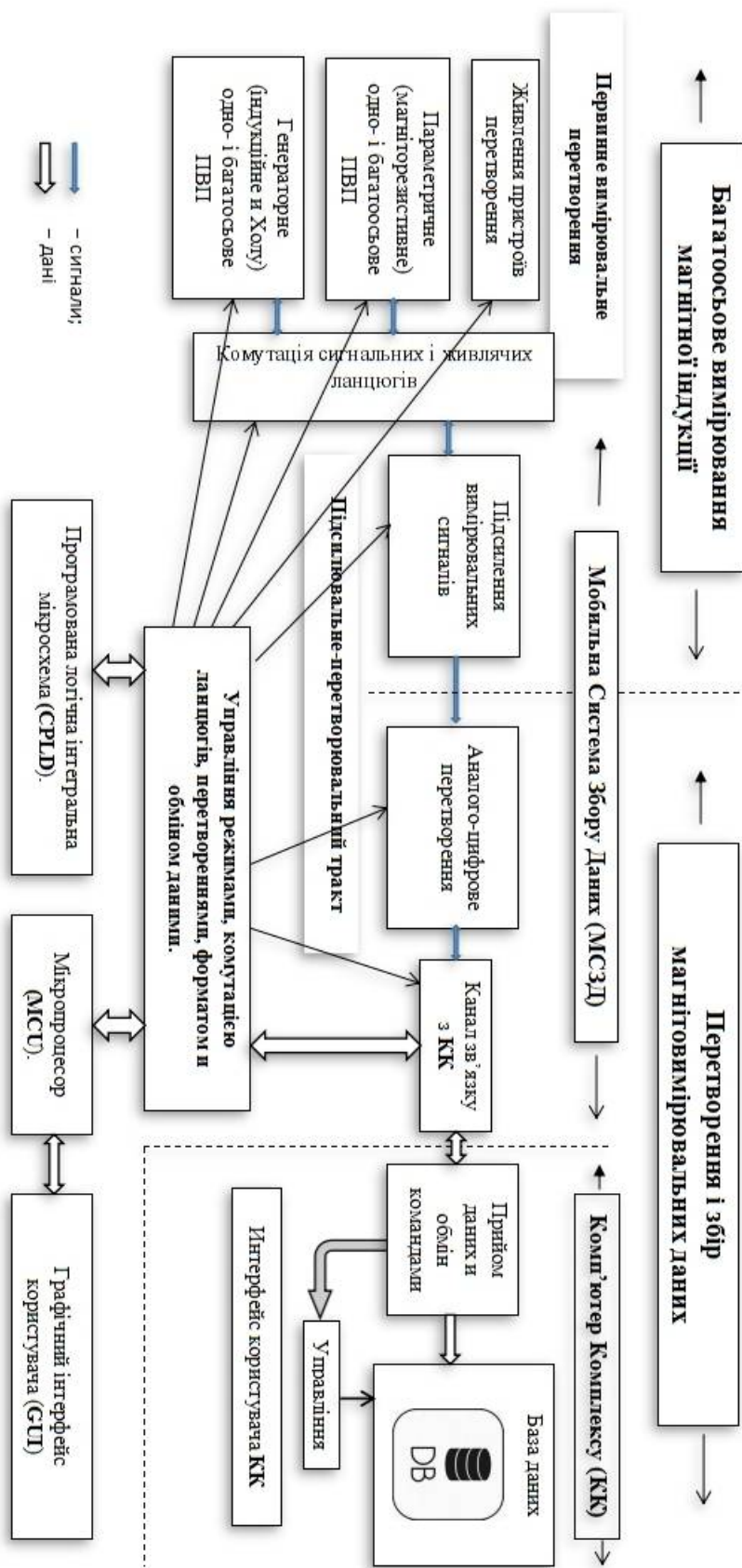


Рис. 2. Багатосьове вимірювання і збір даних

Смушковий елемент зсуву параметричного магніторезистивного перетворювача [5] являє собою металізовану спіраль, яка з'єднується з чутливою віссю сенсорного елемента. У двовісних конструкціях перемичка є спільною для обох мостів і має бути мультиплексована, якщо для кожного моста потрібний різний струм перемички. Номінальний опір кожної смужки становить 15 Ом, і для кожного Гауса індукованого поля потрібно струм величиною 10 мА. Це забезпечує знижувальні або підсилювальні поля в діапазоні лінійних вимірів ± 6 Гаус.

Смушковий елемент установки/скидання S/R є ще однією металізованою спіраллю, яка з'єднується з віссю сенсорного елемента (перпендикулярно чутливої осі на кристалі сенсора). Як і елемент усунення, він проходить через пару мостових елементів. Кожний елемент установки/скидання має номінальний опір від 3 до 6 Ом із мінімальним необхідним піковим струмом 400 мА для імпульсів скидання чи установки. У поточній версії функцію регулювання зміщення не було реалізовано з міркувань економії ресурсів і передбачуваного незначного впливу таких збурень на параметри змінних магнітних полів.

Режим S/R був реалізований для періодичної підготовки магнітних доменів магніторезистивних елементів, що забезпечило, як показали експерименти, більш стабільну роботу. Імпульс S визначається як позитивний імпульсний струм, що надходить до з'єднання перемички S/R+. У результаті його дії магнітні домени будуть вирівняні в прямому напрямку осі, так що полярність сенсорного моста має позитивний нахил, а позитивні поля на чутливій осі призводять до появи позитивної напруги вихідних з'єднань моста. Імпульс скидання визначається як негативний імпульсний струм, що надходить до з'єднання перемички S/R+. Успішним результатом буде те, що магнітні домени вирівняно у зворотному напрямку осі, так що полярність сенсорного моста має негативний нахил, а позитивні поля на чутливій осі призводять до негативної напруги на вихідних з'єднаннях моста.

У цьому режимі спочатку відправляється імпульс скидання, а через кілька мілісекунд слідує імпульс установки. Виробник обґрунтовує та пропонує варіант заміни роздільних імпульсів скидання та встановлення однополярними імпульсами з дещо підвищеною частотою. Цей варіант і був реалізований в поточній версії проекту за допомогою вбудованих таймерів MCU і біту одного з його портів, який управляє перемиканням пари транзисторних ключів.

Коротка інформація про дисплей та сенсорну панель MC3D.

У MC3D Комплексу використовувався рідкокристалічний TFT дисплей з роздільною здатністю 240RGBx320 пікселів, 320-канальний драйвер затвора, 172800 байт GRAM для даних графічного екрану 240RGBx320 пікселів і схему живлення. Крім того, на друкованій платі з дисплеєм також встановлена мікросхема флеш-пам'яті з послідовним інтерфейсом і функцією внутрішнього системного перепрограмування.

Ця пам'ять використана для зберігання фрагментів графічних зображень, що використовуються GUI MC3D, які завантажуються під керуванням позасистемної програми запису зображень, перетворених на *header*-файли.

Графічний інтерфейс програми Meter_MC3D операційної системи реального часу RTOS.

Узагальнена блок-схема RTOS (рис. 3) включає системні сервіси ядра, блок управління дисплеєм та сенсорним екраном, прикладні програми RTOS, які обслуговують додатки, що реалізують 5 основних режимів Комплексу, та **Головне вікно MC3D.**

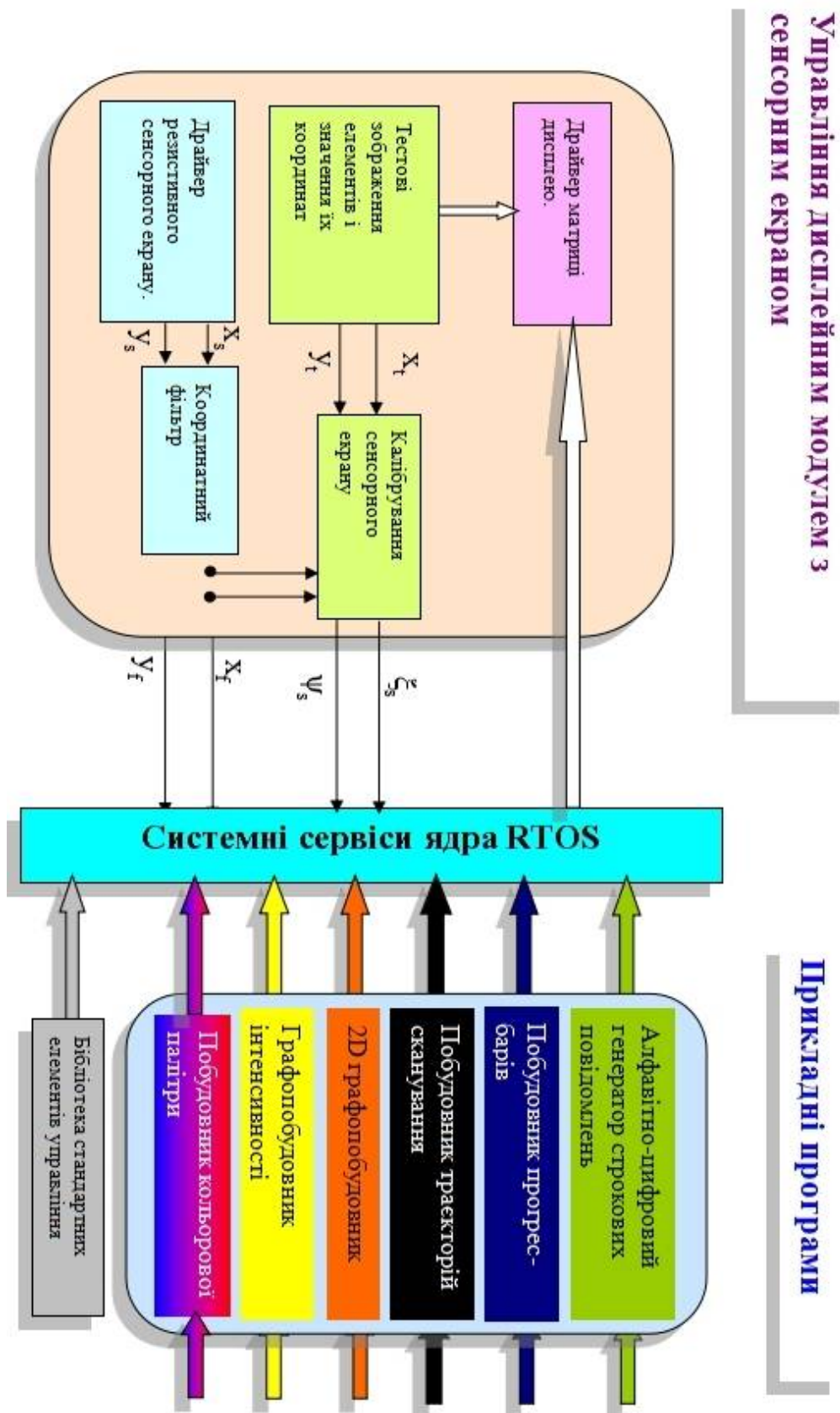


Рис. 3. Узагальнена блок-схема операційної системи реального часу RTOS

Вікно **Meter MC3D** (рис. 4) містить органи управління режимами вимірювача магнітної індукції, засобами відображення значень поточних параметрів, таблицю і сенсорні кнопки запису **Write** і очищення **Clear** до 16 результатів вимірювань. Кнопка повернення **Back** завершує роботу режиму **Meter** та викликає повернення до **Головного вікна MC3D Комплексу**. Усі перемикання, що змінюють параметри або зміст таблиці, викликають аналогічні зміни у вікні режиму **Meter_LV** Комп'ютера Комплексу (**КК**), і навпаки.

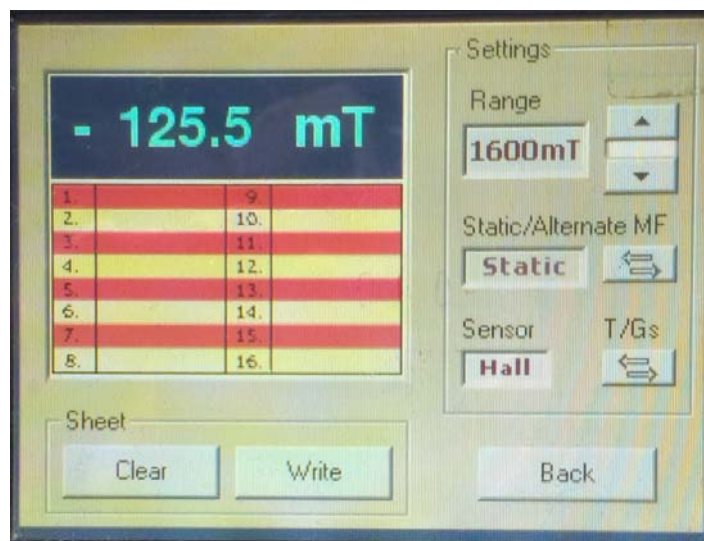


Рис. 4. Вікно передньої панелі режиму **Meter MC3D**

Побудова й тестування додатку Meter_MC3D. Основні програмні та алгоритмічні рішення були використані для створення функціонально завершених розділів програми **Meter_MC3D**, інтегровані з апаратними засобами **Комплексу** і пройшли тестування та перевірку на виконання передбачених Функціональною специфікацією положень. Підходи та рішення, використані в цьому, першому розроблюваному додатку операційної системи реального часу **RTOS**, враховували також і особливу вимогу щодо нього, що полягає в неявному режимі спільної роботи з іншими провідними додатками **RTOS**.

Центральне місце **Meter_MC3D** визначається його присутністю в усіх режимах Комплексу та роллю єдиного джерела основної інформації.

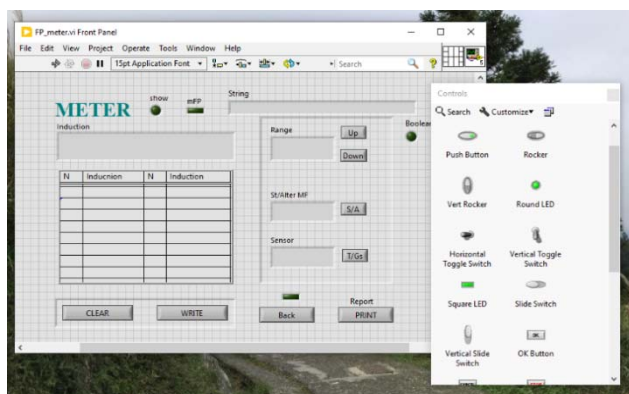
При включенні операційна система реального часу **RTOS** виконує дії, що забезпечують установку «за замовчуванням» параметрів апаратних і програмних компонентів комплексу, що настроюються, і задаються початкові значення керуючих електричних зв'язків мікроконтролера **MCU** (рис. 4)

Єдиний шлях входу в режим **Meter_MC3D** можливий через **Головне вікно MC3D GUI**, яке запускається після включення **Комплексу**. У цьому випадку всім подальшим діям із **Комплексом** передуює замальовка на екрані дисплея і потім взаємодія з компонентами програми. Вихід із вікна режиму **Meter_MC3D** передбачає повернення до **Головного вікна GUI** і його замальовку.

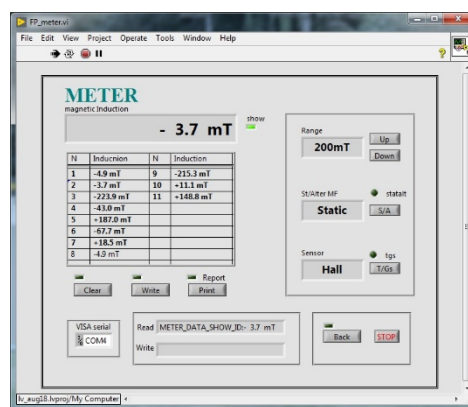
У статті обмежено представлено всі або більшість окремих функціональних і структурних рішень, використаних у роботі. Натомість тут висвітлені лише рішення головних, першочергових завдань, які демонструють загальні принципи, покладені в основу розробки.

Побудова застосунку Meter_LV. Дві суттєві особливості і фундаментальні принципи автоматизованого проектування систем збору даних і управління приладами виділяють LabView компанії National Instruments [17] серед інших програмних середовищ: використання спеціально розробленої мови графічного програмування **G** та реалізована концепція віртуальних приладів. Це забезпечує можливість в єдиному програмному

середовищі розробляти, тестувати і з'єднувати у комплекси апаратні і програмні складові різного призначення. Побудова застосунку для операційної системи **Windows 10** Комп'ютеру Комплексу **magnetic FieldPointer** дала змогу використати відомі стандартні рішення графічного інтерфейсу користувача, що зі свого боку, визначило також і дизайн вікон **МСЗД**.



a



б

Рис. 5. Панель віртуального приладу **METER**

Передня панель віртуального приладу **METER** у вікні розробки (рис. 5 а) містить органи керування приладом. На його блок-схемі [17] розміщуються функції цих органів, а також інші функції, які не мають інструментального відображення, наприклад, логічні функції.

Обмін даними і командами з усіма компонентами **Комплексу** виконується шляхом прийому і передачі текстових повідомлень. Формати посилань відповідають спрощеному стандарту даних/команд стандарту IEEE.488.2 [18]. Дешифрування текстових повідомлень виконується їхнім порівнянням із логічними елементами зі строковими константами за попередньо складеним списком команд.

Збіг константи з повідомленням підтверджується на виході проходженням коду тексту, супроводжується відповідним логічним сигналом, що викликає виконання потрібної функції і виведення константи на текст-бокси передньої панелі віртуального приладу **METER**.

Логічні сигнали від кнопок управління приладу, відповідні їм строкові константи використовуються для формування посилань керування **МСЗД**. У такий спосіб забезпечується організація умовно-ієрархічної структури з гнучким розподілом ієрархій, що залежить від характеру розв'язуваного завдання [1]. Передня панель віртуального приладу на дисплеї Комп'ютеру Комплексу в режимі вимірювання і реєстрації магнітної індукції має вигляд, поданий на рис. 5 б.

Тестування режиму **METER** Комплексу при вимірюваннях індукції постійних магнітних полів виконувалося з використанням котушки Гельмгольца. Для вимірювання змінних магнітних полів котушку було використано в схемі зі зворотнім зв'язком за струмом її живлення, що забезпечило проведення тестувань у діапазоні до 500 Гц.

Висновки.

1. Розроблено функціональну специфікацію вимірювача фізичної величини – індукції постійних, змінних, магнітних полів для досліджень внутрішніх і зовнішніх полів електроенергетичного обладнання різного призначення.

2. Запропоновано й реалізовано концептуальні і технічні рішення інтегрованих апаратних і програмних засобів для збору і відображення вимірювальних даних про магнітні поля електроенергетичного обладнання.

3. Тестування режиму **METER** Комплексу підтвердило виконання положень Функціональної специфікації, а його технічні характеристики задовольняють прийняті до створення параметри.

4. Прийняті формати даних, апаратні засоби і програмне забезпечення режиму **METER** Комплексу забезпечать отримання інформації і зберігання даних експериментів для встановлення впливу дефектів на часові, частотні і просторові параметри зовнішніх і внутрішніх магнітних полів обладнання, що досліджується, їхнє використання в усіх режимах його роботи.

Роботу виконано за держбюджетною темою «з виконання наукової роботи №: III-29-17 "Розширення функціональних можливостей та підвищення метрологічних характеристик засобів вимірювання в системах моніторингу і діагностування в електроенергетиці", шифр теми "ПАРАМЕТР-Д). Державний реєстраційний номер 0122U000136.

1. Мазманян Р.О. Программно-аппаратный комплекс для мониторинга магнитных полей электроэнергетического оборудования. *Техн. Електродинаміка*. 2019. № 5. С. 83–92.
2. Мазманян Р.О. Основні режими роботи і графічний інтерфейс користувача комплексу для експериментальних досліджень магнітних полів і діагностування електроенергетичного обладнання. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2024. Вип. 67. С. 82–89.
3. 12-Bit High Output Current ADN8810s. URL: <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Analog%20Devices%20PDFs/adn8810.pdf>
4. 5 Ω RON SPST Switches ADG451/ADG452/ADG453ADG451/ADG452/ADG453 https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG451_452_453.pdf
5. 1, 2 and 3 Axis Magnetic Sensors HMC1051/HMC1052/HMC1053 <https://www.sparkfun.com/datasheets/IC/HMC105X.pdf>
6. Precision, Low Power Instrumentation Amplifiers. URL: <https://www.ti.com/product/INA129>
7. 250 kSPS, 6-Channel, Simultaneous Sampling, Bipolar 16-/14-/12-Bit ADC AD7656/AD7657/AD7658. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7656_7657_7658.pdf
8. Configuring the AD7656/AD7657/AD7658 for Serial and Daisy-Chain Interface Modes of Operation. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-893.pdf>
9. XC9572XL High Performance CPLD URL: <https://www.mouser.com/datasheet/2/903/ds057-1595690.pdf>
10. 8/16-bit Atmel XMEGA A1U Microcontroller URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-8362-8-and-16bit-AVR-microcontroller-ATxmega256A3BU_datasheet.pdf
11. M-A. Paun, J-M. Sallese, M. Kayal Hall Effect Sensors Design, Integration and Behavior Analysis. *Journal of Sensor and Actuator Networks* 2(1). 2013. Pp. 85–97. DOI: <https://doi.org/10.3390/jsan2010085>
12. R. S. Popovic Hall-effect devices. *Sensors and Actuators*. 17. Pp. 39–53. 1989.
13. Мазманян Р.О. Структурное моделирование измерителей магнитной индукции с коммутируемыми выводами датчика Холла. *Техн. електродинаміка*. 2001. № 1. С. 73–80.
14. Мазманян Р.О. Структурное моделирование измерителей индукции постоянных и переменных магнитных полей. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2006. Вип. 2 (14). С. 126–127.
15. Мазманян Р.О. Структурне моделювання вимірювачів магнітної індукції з автоматичною корекцією і компенсацією похибок. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Електроенергетичні та електромеханічні системи. 2009. № 637. С. 50–56.
16. Таранов С.Г., Мазманян Р.О. Гиратор в SPICE-моделях гальваноманітних преобразователей Холла. *Техн. електродинаміка*. 2008. № 1. С. 56–64.
17. Yik Yang LabView Graphical Programming Cookbook. 2014. URL: User Guide for 488.2 Compliant Units Rev. A [Microsoft Word - User Guide IEEE488.2 Rev. A.doc](#)

MEASUREMENT AND DATA ACQUISITION SYSTEMS ON MAGNETIC FIELDS PARAMETERS IN A COMPLEX FOR EXPERIMENTAL RESEARCH AND NON-INVASIVE DIAGNOSTICS OF ELECTRIC POWER EQUIPMENT

R.O. Mazmanian

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: mazmanian@ied.org.ua, r.o.mazmanian@gmail.com

Diagnostics of power equipment, forecasting of the residual resource is an effective way to ensure its safe and long-term operation. Reduction of costs, reduction of diagnostic time are provided by non-invasive methods that do not require intervention in the design of the machine being diagnosed. The hardware and software complex is designed to study the relationship between changes in the patterns of magnetic field intensity distribution with faults in power equipment. In experimental studies with predetermined technical faults artificially introduced into the object, the complex will provide useful and reliable results, registering changes in magnetic field induction in the spatial, temporal and frequency domains of magnetic field physics. Selection and flexible configuration of data acquisition means will ensure the use of the most appropriate method of measurements, conversion and display of information about the studied faults. The article presents the main operating modes, graphical user interfaces of a personal computer and a mobile data acquisition system, which jointly perform the conversion, storage, analysis and display of measurement information obtained from various magnetic sensors. The generalized functional specification of the software of the complex, the design of the graphical user interface (GUI) as part of the real-time operating system (RTOS) will also be used in the development of problem-oriented systems for computer diagnostics of power equipment. Ref. 17, fig. 5.

Keywords: technical diagnostics, non-invasive, electrical power equipment, magnetic fields.

1. Mazmanian R.O. Prohrammno-apparatnyi kompleks dlia monitorynha mahnytnykh polei elektroenerhetycheskoho oborudovanyia. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 5. Pp. 83–92.
2. Mazmanian R.O. Osnovni rezhymy roboty i hrafichnyi interfeis korystuvacha kompleksu dlia eksperymentalnykh doslidzen mahnitnykh poliv i diahnostuvannya elektroenerhetychnoho obladnannya. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 2024. V. 67. Pp. 82–89.
3. 12-Bit High Output Current ADN8810s. URL: <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Analog%20Devices%20PDFs/adn8810.pdf>
4. 5 Ω RON SPST Switches ADG451/ADG452/ADG453ADG451/ADG452/ADG453 https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG451_452_453.pdf
5. 1, 2 and 3 Axis Magnetic Sensors HMC1051/HMC1052/HMC1053 <https://www.sparkfun.com/datasheets/IC/HMC105X.pdf>
6. Precision, Low Power Instrumentation Amplifiers. URL: <https://www.ti.com/product/INA129>
7. 250 kSPS, 6-Channel, Simultaneous Sampling, Bipolar 16-/14-/12-Bit ADC AD7656/AD7657/AD7658. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7656_7657_7658.pdf
8. Configuring the AD7656/AD7657/AD7658 for Serial and Daisy-Chain Interface Modes of Operation. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-893.pdf>
9. XC9572XL High Performance CPLD URL: <https://www.mouser.com/datasheet/2/903/ds057-1595690.pdf>
10. 8/16-bit Atmel XMEGA A1U Microcontroller URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-8362-8-and-16bit-AVR-microcontroller-ATxmega256A3BU_datasheet.pdf
11. M-A. Paun, J-M. Sallese, M. Kayal Hall Effect Sensors Design, Integration and Behavior Analysis. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2013. No 2(1). Pp. 85-97, DOI: <https://doi.org/10.3390/jsan2010085>
12. R. S. Popovic Hall-effect devices. *Sensors and Actuators*. 17. Pp. 39–53. 1989.
13. Mazmanian R.O. Structural modeling of magnetic induction meters with switched Hall sensor terminals. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2001. No 1. Pp. 73–80.
14. Mazmanian R.O. Structural modeling of induction meters for constant and alternating magnetic fields. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 2006. V. 2 (14). Pp. 126–127.
15. Mazmanian R.O. Structural modeling of dynamic magnetic induction with automatic correction and compensation of losses. *Visnyk Natsionalnoho universytetu Lvivska politekhnika. Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy*. 2009. No 637. Pp. 50–56.
16. Taranov S.H., Mazmanian R.O. Hyrator v SPICE-modeliakh halvanomahnytnykh preobrazovatelei Kholla. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2008. No 1. Pp. 56–64.
17. Yik Yang LabView Graphical Programming Cookbook. 2014. URL: User Guide for 488.2 Compliant Units Rev. A Microsoft Word - User Guide IEEE488.2 Rev. A.doc

Надійшла: 29.04.2025

Прийнята: 21.05.2025

Submitted: 29.04.2025

Accepted: 21.05.2025