

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

«Програмне забезпечення для визначення
чутливості елементів магніторезистивної пам'яті»

Завідувач
випускаючої кафедри

Довбиш А.С.

Керівник роботи

Проценко О.Б.

Студента групи ІН.мз-92с

Шкурдоди Ю.О.

СУМИ 2021

Сумський державний університет

(назва вузу)

Факультет ЕлІТ Кафедра Комп'ютерних наук

Спеціальність «Інформатика»

Затверджую:

зав.кафедрою _____

« _____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТОВІ

Шкурдоді Юрію Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Програмне забезпечення для визначення чутливості елементів магніторезистивної пам'яті

затверджую наказом по інституту від « _____ » _____ 20__ р. № _____

2. Термін здачі студентом закінченого проекту (роботи) _____

3. Вхідні данні до проекту (роботи)

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

1) Аналіз проблеми та огляд літератури за темою; 2) Постановка завдання й формування завдань дослідження; 3) Оволодіти графічним середовищем програмування LabVIEW, ознайомитись з установкою для дослідження температурних та польових залежностей електроопору чутливих елементів магніторезистивної пам'яті; 4) Провести автоматизацію установки, та порівняти отримані результати отримані в «ручному» та в автоматичному режимах; 5) Запропонувати моделі для опису залежності магнітоопору чутливих елементів; 5) Аналіз отриманих результатів.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Блок схеми віртуальних приладів

6. Консультанти до проекту (роботи), із значенням розділів проекту, що стосується їх

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

Керівник

(підпис)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

п/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання проекту (роботи)	Примітка
.	Аналіз проблеми та огляд літератури за темою.		
.	Постановка задачі та формування завдань дослідження.		
.	Вивчення графічного середовища програмування LabVIEW.		
.	Автоматизацію установки.		
.	Оформлення пояснювальної записки до кваліфікаційної магістерської роботи		

Студент – дипломник

(підпис)

Керівник проекту

(підпис)

РЕФЕРАТ

Записка: 38 стор., 7 рис., 0 таблиць, 2 додатки, 19 літературних джерел.

Об'єкт дослідження – графічне середовище програмування LabVIEW, та температурні і польові ефекти в електропровідності чутливих елементів магніторезистивної пам'яті.

Мета роботи – автоматизація процесу дослідження залежності електроопору від температури та індукції магнітного поля, дослідження температурних та польових залежностей залежностей опору чутливих елементів магніторезистивної пам'яті.

Результати — проведена автоматизація установки для дослідження температурних та польових залежностей електричного опору функціональних елементів магніторезистивної пам'яті. Автоматизація дала змогу досягти більш точних результатів та збільшити кількість отриманих даних у 10 разів для кожного етапу дослідження. Також залучення ІТ суттєво економить час, оскільки не має потреби внесення отриманих експериментальних даних в табличний процесор. Збільшення кількості даних дозволяє більш точно визначити різні характерні температури: температуру Дебая, Кюрі Нееля тощо.

Максимальна розбіжність між значеннями електроопору виміряними за допомогою прилада В7-46/1 та за допомогою контролера USB6008 в інтервалі температур 150-700 К, і не перевищує 2%.

ГРАФІЧНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ПРОГРАМУВАННЯ LABVIEW, КОНТРОЛЕР
USB 6008, ВІРТУАЛЬНИЙ ПРИЛАД, МАГНІТОРЕЗИСТИВНА ПАМ'ЯТЬ,
ЧУТЛИВІСТЬ ДО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТРОЛЕРА USB 6008 ТА ПРИКЛАДНОЇ ПРОГРАМИ LABVIEW	8
1.1. Основні характеристики контролера USB 6008.....	8
1.2. Прикладна програма LabView	9
РОЗДІЛ 2. АВТОМАТИЗАЦІЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ МАГНІТОРЕЗИСТИВНОЇ ПАМ'ЯТІ	13
2.1. Автоматизація установки для дослідження температурної залежності опору	13
2.2. Порівняння температурних залежностей електроопору отриманих в автоматизованому і в «ручному» режимах	16
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЬ ГІГАНТСЬКОГО МАГНІТОРЕЗИСТИВНОГО ЕФЕКТУ В ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТАХ ПАМ'ЯТІ	19
3.1. Двоструменева та резисторна модель.....	19
3.2. Апробація теоретичних співвідношень.....	21
3.3. Квазікласична модель.....	23
ВИСНОВКИ	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	29
Додаток А	31
Додаток В	35

ВСТУП

За останні роки відбувся значний прогрес у створенні та розробці вимірювальних засобів, що, у першу чергу, пов'язано з активним розвитком інформаційних технологій (ІТ – широкий клас дисциплін і областей діяльності, які пов'язані з технологіями створення, зберігання, управління і обробки даних, в тому числі й з використанням комп'ютерної техніки), що і обумовлює **актуальність даної роботи.**

Основними досягненнями ІТ технологій у вимірювальній техніці:

1) DAQ-пристрої – вимірювальні модулі, що з'єднуються безпосередньо з комп'ютером;

2) спеціалізовані вимірювальні інтегровані програмні оболонки для збору, обробки і візуального представлення даних. На відміну від традиційних засобів їх функції, інтерфейс, алгоритми збору і обробки інформації визначаються користувачем, а не виробником. До таких програм належить і програмне середовище LabVIEW.

Графічне середовище програмування LabVIEW – це засіб для швидкого проектування та модифікації інструментальних систем, мета застосування якого полягає у спрощенні розв'язання прикладних задач засобами програмування. Засіб є одним з провідних програмних середовищ, які використовуються у промисловості для розробки систем збору даних, контролю та вимірювання.

LabVIEW, подібно до C або BASIC, є універсальною системою програмування з потужними бібліотеками функцій, які дозволяють реалізовувати найрізноманітніші завдання. Організація розрахунків у цій програмній оболонці здійснюється на рівні функціональних блок-діаграм, які у поєднанні з сучасним компілятором дозволяють значно скоротити час розробки складних систем при збереженні високої швидкості і якості виконання програм.

Мета: автоматизація процесу дослідження залежності електроопору від температури та індукції магнітного поля, дослідження температурних та польових залежностей опору чутливих елементів магніторезистивної пам'яті.

Об'єкт дослідження: графічне середовище програмування LabVIEW, та температурні і польові ефекти в електропровідності чутливих елементів магніторезистивної пам'яті.

Предмет дослідження: автоматизації мікроконтролера USB 6008, за допомогою графічного середовища програмування LabVIEW, та аналіз питомого опору чутливих елементів магніторезистивної пам'яті.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТРОЛЕРА USB 6008 ТА ПРИКЛАДНОЇ ПРОГРАМИ LABVIEW

(Літературний огляд)

1.1 Основні характеристики контролера USB 6008

Контролер USB 6008 (рис. 1.1) є продуктом фірми «National Instruments», яка є розробником технології віртуальних приладів – революційної концепції, що змінила підхід та методику проведення вимірювань та розробки систем автоматизації. Максимально використовуючи можливості комп'ютерів та сучасних інформаційних технологій, віртуальні прилади дозволили збільшити продуктивність і знизити собівартість фізичних установок.



Рис. 1.1. Зовнішній вигляд контролера USB 6008

Нижче наведено більш детальні технічні характеристики контролера USB 6008 [1].

Аналоговий вхід

Кількість аналогових входів.....8

Розширення.....12 біт

Максимальна частота дискретизації10 кГц

Діапазон вхідних напруг:

У схемі з загальним провідником.....	± 10 В
У диференціальній схемі.....	± 20 В, ± 10 В, ± 5 В, ± 4 В
Робоча напруга.....	± 10 В
Вхідний імпеданс.....	144 кОм
Захист від перевищення напруги.....	до ± 35 В

Аналоговий вихід

Кількість аналогових виходів.....	2
Розширення.....	12 біт
Максимальна частота регенерації.....	150 Гц
Діапазон вихідних напруг.....	від 0 до +5 В
Вихідний імпеданс.....	50 Ом
Максимальний струм вихідного сигналу.....	5 мА
Напруга після включення пристрою.....	0 В
Швидкість наростання вихідної напруги.....	1 В/мкс
Струм короткого замикання вихідного ланцюга.....	50 мА

Переваги цього контролера:

- 1) 8 каналів аналогового вводу по 12 або 14 біт, частота оцифровки до 48 кГц;
- 2) гвинтові термінали для підключення датчиків;
- 3) швидке підключення plug-and-play до ПК;
- 4) драйвери для ОС Windows, Mac OS X та Linux;
- 5) багатофункціональний ввід/вивід для проведення збору та збереження даних;
- 6) живлення по шині USB;
- 7) безкоштовне ПО для збору та збереження даних [1].

1.2 Прикладна програма LabView

LabView – це універсальна система програмування, що включає в себе бібліотеки функцій і засобів проектування, розроблених для збору даних,

управління і їх обробки. Програми LabView, які створені для реалізації конкретних цілей, називають віртуальними приладами – ВП (Virtual Instruments), оскільки їх робота та зовнішній вигляд імітують реальні прилади. Незважаючи на те, що ВП подібні до функцій стандартних мов програмування, вони мають ряд переваг [2]:

1) ВП більш наочні, прості для конструювання вимірювальних модулів і взаємодії з оператором;

2) внутрішня структура ВП є для користувача "чорним ящиком" з відомими входами і виходами, що спрощує застосування і забезпечує автоматичну сумісність різних ВП.

Як правило, інші програмні пакети покривають тільки один аспект поставленого завдання – збір, аналіз, зберігання чи керування інформацією. LabView надає усі необхідні засоби для об'єднання цих завдань в єдиному графічному середовищі, користувач безпосередньо оперує бібліотеками готових віртуальних інструментів (VI), не займаючись низькорівневим програмуванням, оскільки LabView пропонує більше 600 драйверів для приладів від більш, ніж 50 світових виробників. Після збору даних користувач може скористатися бібліотекою VI для аналізу отриманого потоку даних, цифровою обробкою сигналів (DSP), цифровою фільтрацією, статистикою і чисельним аналізом. Управління ВП можна візуалізувати за допомогою інтерактивних лицьових панелей, які дозволяють побудову стандартного інтерфейсу незалежно від апаратного забезпечення системи. Крім цього, користувач має широкі можливості з маніпулювання даними – запис/зчитування з диска, передача по мережі та друк на принтері. Лицьова панель інтерфейсу дає можливість інтерактивно керувати всією програмною системою.

Для програмування системи будується блок-діаграма, яка складається із певного набору елементів бібліотеки віртуальних інструментів, які необхідні для реалізації поставлених завдань. Тобто в LabView блок-діаграма є вихідним кодом програми. Такий підхід у програмуванні є більш ефективним і наочним. Графічно

представлені віртуальні інструменти дуже легко модифікуються і налаштовуються. Не менш важливим є те, що користувач може самостійно створювати нові елементи бібліотеки VI, які вбудовуються як піктограми у діаграми верхнього рівня.

Для побудови ВП, в першу чергу, створюється лицьова панель з необхідним набором кнопок, перемикачів, регуляторів, екранів тощо. Для цього використовуються різні індикатори та керуючі елементи, які можна вибрати з меню Controls і розставити їх на лицевій панелі. Крім того, ви можете змінити колір, розмір, мітку кожного елемента, його тип даних і діапазон значень. Є можливість імпортувати будь-яке зображення для створення специфічного елемента. Після закінчення створення ВП, користувач контролює роботу програми за допомогою елементів лицьової панелі, змінюючи положення перемикачів і регуляторів. Таким чином, панель «оживає», забезпечуючи зворотний зв'язок зі всією системою.

Програмуючи ВП, користувач звільняється від багатьох синтаксичних деталей. Функціональні блоки з бібліотеки VI з'єднуються за допомогою віртуальних провідників для забезпечення передачі даних від одного блоку до іншого. Це можуть бути як блоки елементарних алгебраїчних операцій, так і складні функції збору та аналізу даних, мережеві операції, файловий ввід/вивід, обмін даними з жорстким диском в бінарному форматі та у форматі табличного процесора. LabView має великий набір засобів для розробки, тестування і налагодження системи. Вікно підказки (Help Window) описує кожен блок в цілому, а також шляхи його використання [2].

При неправильному з'єднанні блоків або елементів бібліотеки VI LabView проінформує про некоректність написання програми у вигляді списку помилок у вікні Error Window. В асортимент налагоджувальних засобів входить і підсвічування виконання блок-діаграми. Таким чином, користувач можете наочно побачити всі етапи виконання програми безпосередньо на блок-діаграмі.

Також можна самостійно задавати спеціальний порядок виконання паралельних операцій (операції, які без зовнішнього втручання, відбуваються одночасно). Для цього середовище LabView пропонує такі програмні структури: цикл (FOR), цикл (WHILE) для повторюваних чи послідовних операцій і оператор вибору (CASE)[30].

Кожна програма LabVIEW є окремим віртуальним приладом (ВП) тобто програмним аналогом деякого реально існуючого або уявного пристрою, що складається з двох взаємозв'язаних частин.

1. Лицьова панель, яка описує зовнішній вигляд ВП і містить засоби введення інформації або засоби управління, а також засоби візуалізації інформації (індикатори).

2. Блок-схеми (чи блок-діаграми), які описують алгоритм роботи ВП (рис. 2.1).

У LabView також є дві графічні палітри: Controls (палітра управління) і Functions (палітра функцій), які можна вільно переміщувати по екрану. Вони служать для створення і управління віртуальними приладами. (детальніше про них у додатку А)

Опис приладів вимірювання (віртуальний амперметр, омметр) наведені у додатку Б.

РОЗДІЛ 2

АВТОМАТИЗАЦІЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ МАГНІТОРЕЗИСТИВНОЇ ПАМ'ЯТІ

2.1. Автоматизація установки для дослідження температурної залежності опору

Як вже зазначалося для реалізації поставленого завдання нами використали контролер USB 6008, персональний комп'ютер, а також графічне програмне середовище LabView.

На рис. 2.1 зображено лицьову панель нашого віртуального приладу. Вона складається з кнопки старт (1), яка потрібна для запуску програми, перемикача (2), що виконує функцію зміни запису даних під час нагрівання і охолодженні зразка. Також на ній присутні шкали опору (3) і температури (4) та панель (5), які наочно демонструє зміну величини електричного опору при нагріванні чи охолодженні. Усі отримані дані фіксуються у вигляді таблиці (6), які потім можна зберегти у файл MS Excel.

Для того, щоб ВП працював, потрібно скласти наступну блок схему (рис. 2.2). Для початку потрібно створити цикл (1), що повторюватиметься певну кількість разів (в нашому випадку 850 раз). Він потрібен для того, щоб задати кількість точок виміру температури і опору. В цьому циклі міститься ще

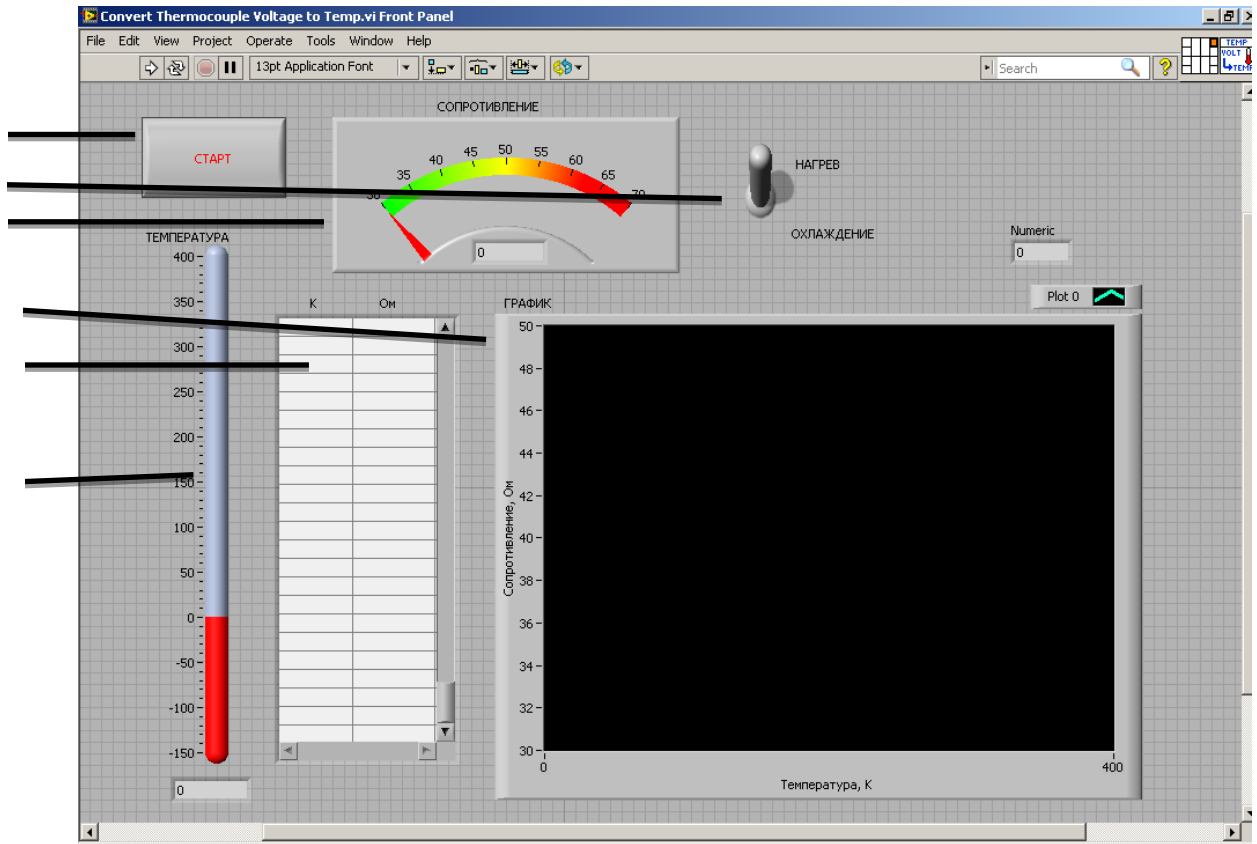


Рис. 2.1. Лицова панель ВП

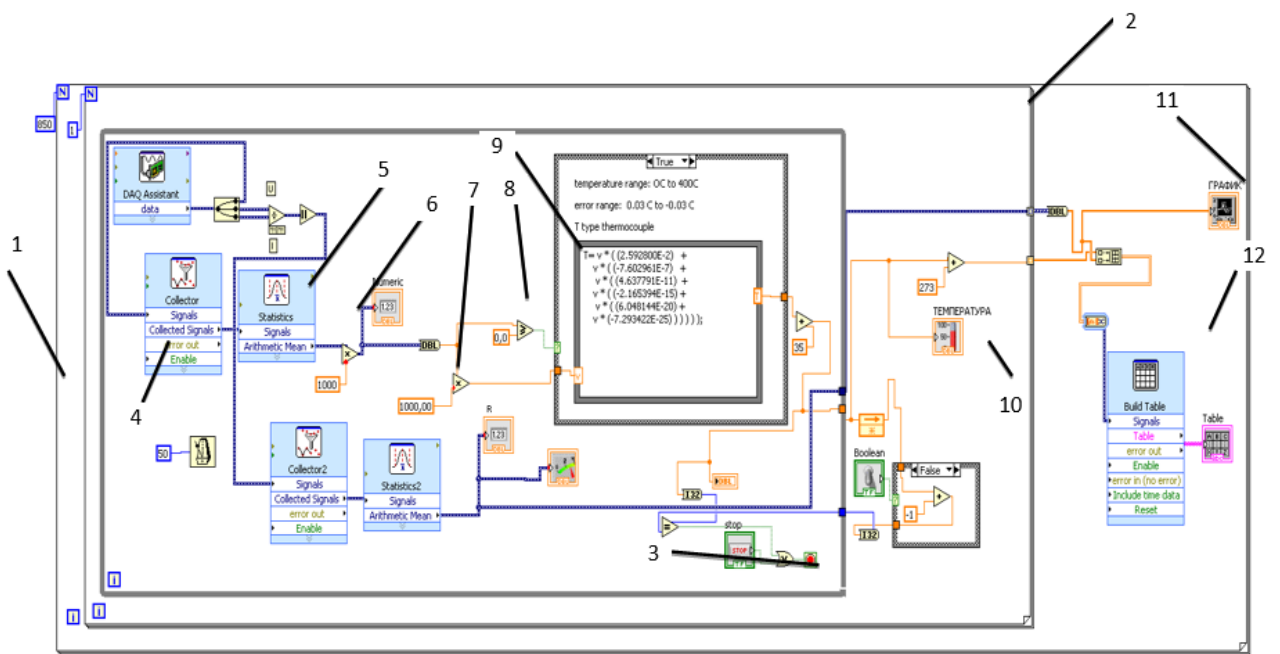


Рис. 2.2 Блок схема ВП

один цикл (2), який заносить отримані дані до таблиці і відразу будує графік температурної залежності опору (5). Головне тіло програми знаходиться у циклі (3) з умовою, що при зміні температури на 1 градус Цельсія, цикл завершиться і значення температури і опору будуть занесені до таблиці. При цьому зміна температури може бути як додатною, так і від'ємною, що керується за допомогою перемикача (2) (рис.2.10). При невиконанні цієї умови цикл повторюватиметься до тих пір, поки умова не буде задоволена.

Для зняття показів температури ми використовували мідь-константову термопару, яка була підключена до мікроконтролера у вихід ai0. Створений віртуальний амперметр (4) (рис. 1.3) вимірював досить малі значення ЕРС термопари. Що вимагало усереднення даних за допомогою колектора (4) і статистики (5). Потім отримані значення напруги домножили на 1000 (6) для перетворення мілівольт у вольти.

Далі ці значення розгалужувалися. У першому варіанті вони порівнювалися з нулем (7). У другому перетворювали у вольти і надсилалось до оператора розгалуження Case (8). У ньому покази вольтметра перетворювалися за допомогою формул переходу в температуру. Оператор розгалуження потрібен для врахування того факту, що при від'ємному значенні ЕРС (охолодження) формули перерахунку напруги в температури для мідь-константової термопари змінюються.

Отримані значення температури розгалужуються на дві частини. Перша потрібна для того, щоб порівнювати значення температури для умови виконання циклу, а інша виводиться на лицьовій панелі у вигляді температурної шкали (4) (рис.2.10) і заноситься до таблиці (5).

Вимірювання електричного опору зразка ми реалізували у відповідності з додатком В, але, для більш точного результату (як і в випадку з температурою) використали усереднення. Отримані дані відразу після завершення циклу відображаються на графіку (6) і у таблиці (5) [3].

2.1 Порівняння температурних залежностей електроопору отриманих в автоматизованому і в «ручному» режимах

На рисунку 2.1 в якості ілюстрації представлені залежність електроопору від температури для термостабілізованих чутливих елементів $\text{Fe}_{20}\text{-Ni}_{80}/\text{Cu}/\text{Fe}_{20}\text{-Ni}_{80}$; Суцільна крива отримана в автоматизованому режимі, точки в ручному. Як бачимо з рис. 2.1 криві побудовані за результатами отриманими в автоматизованому і ручному режимах добре співпадають. Максимальна розбіжність між значеннями електроопору вимірюваними за допомогою прилада В7-46/1 та за допомогою контролера USB6008 знаходиться в інтервалі температур 450-550 К, і не перевищує 2%. Похибка пов'язана з особливістю вимірювання опору за допомогою мікроконтролера. Слід відмітити, що вимірювання електричного опору за допомогою мікроконтролера USB 6008 реалізовано на основі закону Ома для ділянки кола ($R_x = U/I$).

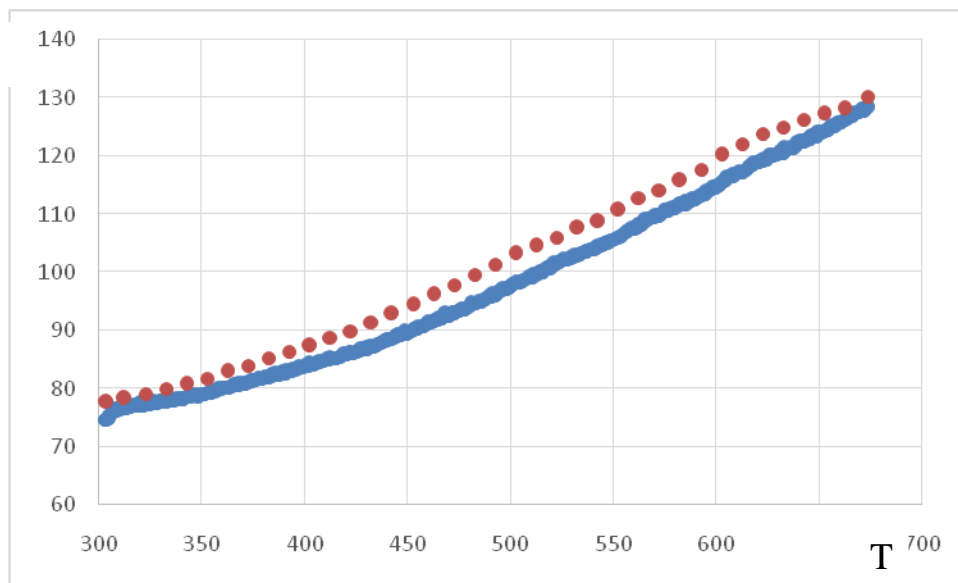


Рис. 2.3 Залежність електроопору від температури для термостабілізованої чутливих елементів $\text{Fe}_{20}\text{-Ni}_{80}/\text{Cu}/\text{Fe}_{20}\text{-Ni}_{80}$ з товщинами шарів $2d_{\text{Fe-Ni}}=60$ нм, $d_{\text{Cu}}=10$ нм. Суцільна крива отримана в автоматизованому режимі; точки в ручному

Для роботи омметра створено віртуальні вольтметр і амперметр. Для вимірювання сили струму використовуватимемо інший канал DAQ модуля (ai2).

Вимірюючи падіння напруги на резисторі з відомим опором (33 Ом), підключеному до диференціального входу ai3, визначається значення сили струму (рис 2.2) [4].

Для програмування мікроконтролера створено наступну Блок – схему рис. 2.3.

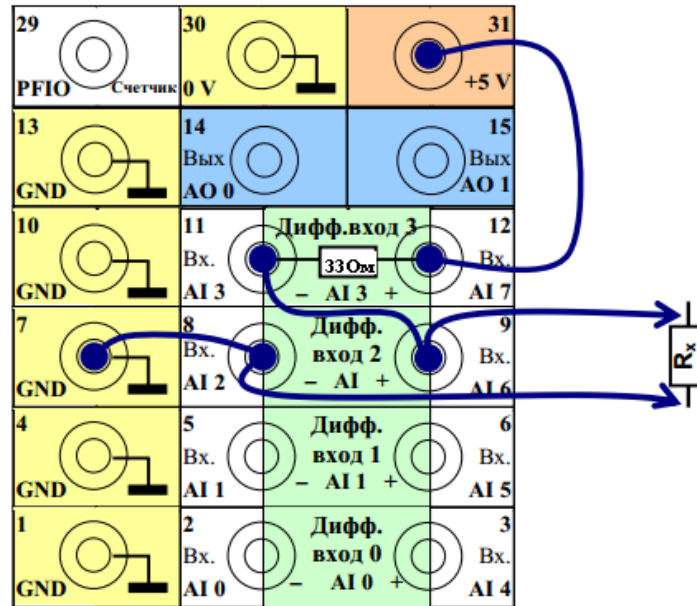


Рис. 2.4. Схема підключення віртуального омметра

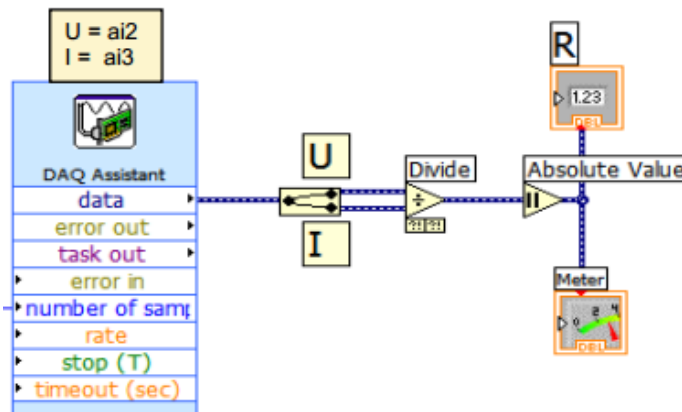


Рис. 2.4. Блок-схема: омметр

Додаткову похибку в результати вносить вимірювання температури за допомогою термопари, та людський фактор.

Для визначення характеру залежності електроопору від температури були побудовані залежності R від T². Як бачимо з рис. 2.4 температурна залежність в координатах R ,T²є лінійною.

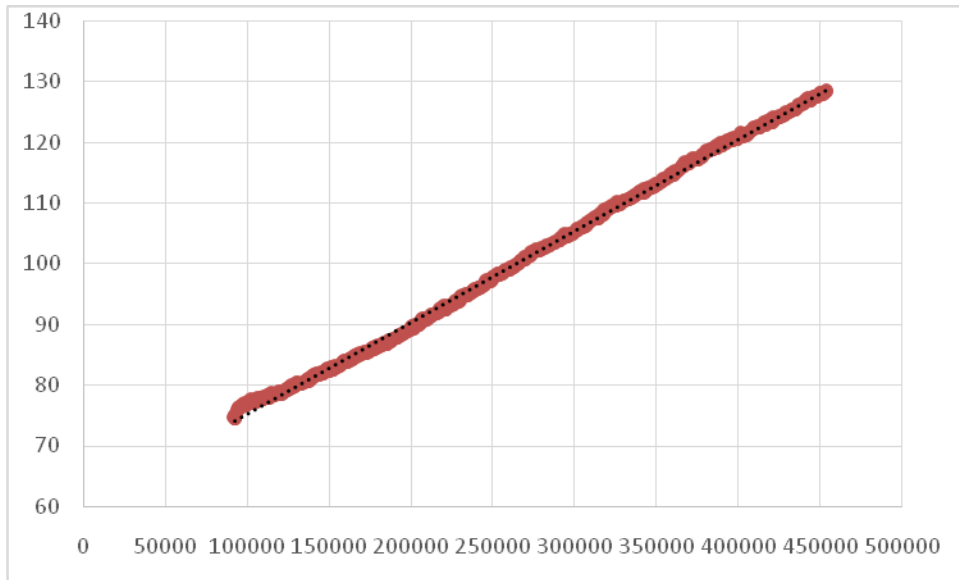


Рис. 2.5. Залежність опору R від T^2 для тришарової плівки $\text{Fe}_{20}\text{-Ni}_{80}/\text{Cu}/\text{Fe}_{20}\text{-Ni}_{80}$ з товщинами шарів $2d_{\text{Fe-Ni}}=60$ нм, $d_{\text{Cu}}=10$ нм

Отже, залежність електроопору від температури є квадратичною, що узгоджується з літературними даними [5-7].

РОЗДІЛ 3.

МОДЕЛЬ ГІГАНТСЬКОГО МАГНІТОРЕЗИСТИВНОГО ЕФЕКТУ В ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТАХ ПАМ'ЯТІ

3.1 Двоструменева та резисторна модель

Кількісно ефект ГМО описується магніторезистивним відношенням яке визначається зміною опору $(\rho_{ap}(0) - \rho_p(B))$ сандвіча в результаті його перемагнічування зовнішнім магнітним полем індукцією B , нормованого на опір $\rho_p(B)$:

$$\delta = \frac{\rho_{ap}(0) - \rho_p(B)}{\rho_p(B)} = \frac{\rho_{ap}(0)}{\rho_p(B)} - 1, \quad (1)$$

де $\rho_{ap}(0)$ та $\rho_p(B)$ – усереднені по товщині сандвіча питомі опори магнітного провідника у відсутності магнітного поля (реалізується антиферомагнітна (ap) конфігурація) та в магнітному полі індукції B (реалізується феромагнітна (p) конфігурація) відповідно.

В рамках феноменологічного підходу МРВ δ для тришарової магнітовпорядкованої плівки, яка складається з двох магнітних шарів металу, розділених немагнітним прошарком (незначним анізотропним ефектом [8,9]) можна записати у вигляді [10-16]:

$$\delta(d_{m2,m1}) = \frac{(\alpha_{m1} - 1)(\alpha_{m2} - 1)\rho_{m2,m1}^+ d_{m2,m1}}{\alpha_{m1} \prod_{s=\pm} (1 + \rho_{m2,m1}^s d_{m2,m1} + \rho_{n,m1}^s d_{n,m1})} \cong (\alpha_{m1} - 1)(\alpha_{m2} - 1) \times$$

$$\times \begin{cases} \frac{\rho_{m_2, m_1}^+ d_{m_2, m_1} (1 - 2\rho_{n, m_1} d_{n, m_1})}{\alpha_{m_1}}, d_{m_2, m_1} \ll \sqrt{\prod_{s=\pm} \rho_{m_1, m_2}^s (1 + 2\rho_{n, m_1} d_{n, m_1})}, \\ \frac{\rho_{m_1, m_2}^+ d_{m_1, m_2} (1 - 2\rho_{n, m_2} d_{n, m_2})}{\alpha_{m_2}}, d_{m_2, m_1} \gg \sqrt{\prod_{s=\pm} \rho_{m_1, m_2}^s (1 + 2\rho_{n, m_1} d_{n, m_1})}. \end{cases} \quad (2)$$

У формулі (2) введенні наступні позначення: $\alpha_{m_j} = \frac{\rho_{m_j}^-}{\rho_{m_j}^+}$ ($j = 1, 2$) – параметри об'ємної асиметрії, які описують асиметрію в розсіянні спін-поляризованих носіїв заряду в об'ємі j – магнітного шару металу з питомим опором $\rho_{m_j}^s$ (механізм Мотта [1,2]); $s = \pm(\uparrow\downarrow)$ – спінові індекси, які визначають знак проекції спіну електрона на напрямок вектора локальної намагніченості в магнітному шарі провідника; d_{m_1} – товщина базового магнітного шару з питомим опором $\rho_{m_1}^s$; d_{m_2} – товщина магнітного шару з питомим опором $\rho_{m_2}^s$, який покриває (накривний шар) немагнітний прошарок товщиною d_n з питомим опором ρ_n ; $\rho_{m_2, m_1}^s = \frac{\rho_{m_2}^s}{\rho_{m_1}^s}$, $d_{m_2, m_1} = \frac{d_{m_2}}{d_{m_1}}$; $\rho_n^+ = \rho_n^- = 2\rho_n$ – питомий опір немагнітного прошарку (спейсера); $\rho_{n, m_1}^s d_{n, m_1} = \frac{\rho_n^s}{\rho_{m_1}^s} \frac{d_n}{d_{m_1}}$. Зауважимо, що при отриманні формули (2) вважалося, що взаємодія спін-поляризованих носіїв заряду із зовнішніми межами тришарового провідника не призводить до дисипації електронного потоку.

З наведеного виразу (2) бачимо, що в області малих значень товщин d_{m_2} накривного шару зі зростанням товщини d_{m_2} МРВ зростає ($\delta \sim d_{m_2}$), в той час як в області великих значень товщин d_{m_2} зі зростанням d_{m_2} магніторезистивне відношення зменшується ($\delta \sim 1/d_{m_2}$). З урахуванням виконання нерівностей $d_{m_1}, d_{m_2} \gg d_n$ незначна величина ефекту обумовлена шунтуванням опору

накривного опору опором базового магнітного шару і, навпаки, шунтуванням опором накривного шару опором базового шару.

У разі виконання рівності:

$$d_{m2,m1}^{\text{extr}} = \sqrt{\prod_{s=\pm} \rho_{m1,m2}^s (1 + 2\rho_{n,m1} d_{n,m1})}, \quad (3)$$

ефект шунтування відсутній і МРВ δ , що описує ефект гігантського магнітоопору в тришаровій магнітовпорядкованій плівці, досягає свого максимального (амплітудного) значення, яке дорівнює:

$$\delta(d_{m2,m1}^{\text{extr}}) \equiv \delta_{\text{max}} = \frac{(\alpha_{m1} - 1)(\alpha_{m2} - 1)}{\left(\sqrt{\alpha_{m1}(1 + \rho_{n,m1}^- d_{n,m1})} + \sqrt{\alpha_{m2}(1 + \rho_{n,m1}^+ d_{n,m1})}\right)^2}. \quad (4)$$

3.2 Апробація теоретичних співвідношень

В межах даного експериментального дослідження розмірної залежності МРВ від товщини d_{m2} накривного магнітного шару величина δ досягає максимального значення за умови, що $d_{m1} \cong d_{m2} \ll d_n$, і в граничному випадку товщиною немагнітного прошарку можна знехтувати, тобто вважати його ультратонким ($d_n \rightarrow 0$). З урахуванням зазначеного формула (4) запишеться у вигляді [17]:

$$\delta_{\text{max}} = \frac{(\alpha_{m1} - 1)(\alpha_{m2} - 1)}{\left(\sqrt{\alpha_{m1}} + \sqrt{\alpha_{m2}}\right)^2}. \quad (5)$$

Щоб зменшити кількість параметрів задачі, потрібно з одного боку розв'язати рівняння:

$$\frac{(\alpha_{\text{eff}} - 1)^2}{4\alpha_{\text{eff}}} = \frac{(\alpha_{m1} - 1)(\alpha_{m2} - 1)}{\left(\sqrt{\alpha_{m1}} + \sqrt{\alpha_{m2}}\right)^2}. \quad (6)$$

відносно α_{eff} з урахування того, що в магнітних компонентах тришарової плівки мажоритарними (ефективними, відповідальними за ефект, концепція „неефективності” Піппарда [18]) носіями заряду являються електрони напрямок спіну яких збігається з напрямком намагніченості в магнітному шарі металу:

$$\alpha_{\text{eff}} = 1 + \frac{2\sqrt{(\alpha_{m1}-1)(\alpha_{m2}-1)}}{(\sqrt{\alpha_{m1}} + \sqrt{\alpha_{m2}})^2} \left\{ 1 + \sqrt{\alpha_{m1}\alpha_{m2}} + \sqrt{(\alpha_{m1}-1)(\alpha_{m2}-1)} \right\}, \quad (7)$$

з іншого боку розв'язати рівняння:

$$\delta_{\text{max}} = \frac{(\alpha_{\text{eff}} - 1)^2}{4\alpha_{\text{eff}}}, \quad (8)$$

відносно α_{eff} з урахуванням того, що $\alpha_{\text{eff}} > 1$:

$$\alpha_{\text{eff}} = 1 + 2\delta_{\text{max}} + 2\sqrt{\delta_{\text{max}}(\delta_{\text{max}} + 1)}. \quad (9)$$

Прирівнюючи між собою формули (7) та (9) та чисельно розв'язуючи отримане рівняння відносно параметра α_{m2} об'ємної асиметрії в розсіяні спін-поляризованих носіїв заряду в $\text{Ni}_{20}\text{Fe}_{80}$ магнітному шарі з урахуванням того, що $\delta_{\text{max}} = 0,015$ (див. рис.1) та $\alpha_{m1} = 3,082$ [19-21], для параметра α_{m2} отримаємо наступне значення: $\alpha_{m2} = 1,056$.

На рис. 1 наведена залежність величини ГМО від співвідношення товщин магнітних шарів, отриманої для свіжосконденсованих плівок $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Cu}/\text{Co}$ при кімнатній температурі.

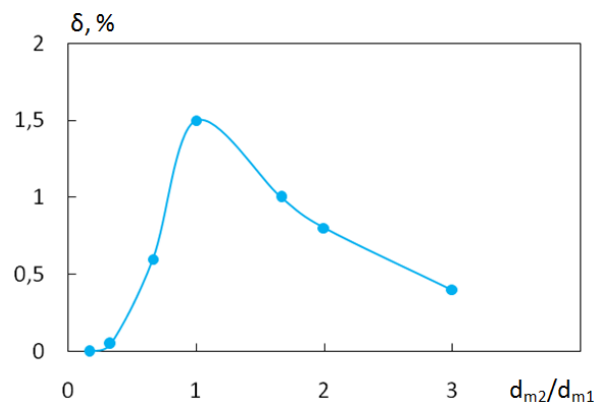


Рис. 3.1. Залежність магніторезистивного відношення $\delta = (\rho_{\text{ap}} - \rho_p) / \rho_p$ (ρ_{ap} та ρ_p – питомий опір зразка з анти – та ферромагнітною конфігураціями відповідно) від товщини d_{m2} накривного магнітного шару нормованого на товщину $d_{m1} = \text{const}$ базового магнітного шару для свіжосконденсованих плівок

$\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Cu}/\text{Co}$ ($d_{m1} \equiv d_{Co} = 30 \text{ нм} = \text{const}$, $d_n = d_{Cu} = 5 \text{ нм}$).

З наведеної залежності видно, що зі зростанням товщини d_{m2} накривного магнітного шару величина магніторезистивне відношення (МРВ) δ лінійно зростає зі збільшенням товщини d_{m2} досягаючи свого максимального значення (1,5%), коли товщини магнітних шарів сумірні за величиною ($d_{m2} \approx d_{m1}$). Подальше збільшення товщини накривного шару призводить до монотонного зменшення МРВ і при $d_{m2,m1} > 3$ величина δ набуває значень менше 0,1%.

Характер експериментально встановленої розмірної залежності МРВ, яке кількісно характеризує ефект ГМО, можна описати за допомогою наведеної нижче феноменологічної моделі, за допомогою якої і описуються причини такої поведінки величини δ .

3.3 Квасікласична модель

Дослідження електронного спіно-поляризованого транспорту в багатошарових магнітовпорядкованих структурах є предметом пильної уваги багатьох дослідників. Це обумовлене принциповою можливістю створення провідників з необхідними характеристиками (див. [10] і цитовану там літературу).

Серед різноманітних ефектів, які спостерігаються в магнітних багатошарових структурах, до найбільш важливого, з практичної точки зору, відноситься від'ємний («прямий» [16,17]) та позитивний (інверсний [18,19]) ефекти гігантського магнітопору (ГМО). Зміст зазначених ефектів полягає або у зменшенні («прямий»), або у збільшенні (інверсний) опору магнітовпорядкованого провідника, в якому реалізується антиферомагнітна конфігурація (*ap*-конфігурація), при його вміщенні у зовнішнє магнітне поле.

Мета даного повідомлення полягає в тому, щоб з одного боку виявити умови за яких спостерігається від'ємний (позитивний) ефекти ГМО у

магнітовпорядкованому сандвічі, з іншого боку їх амплітуда була би максимальною.

Розглянемо магнітний сандвіч, який складається з магнітних шарів металу різної товщини ($d_j \neq d_n, j \neq n = 1, 2$) розділених немагнітним ультратонким прошарком роль якого зводиться до формування антиферромагнітної конфігурації провідника. Будемо вважати, що однорідне електричне поле напруженості $\mathbf{E} = \mathbf{E}(0, E, 0)$ прикладене уздовж межі поділу шарів металу, вісь x паралельна нормалі до інтерфейсів зразка, а товщини шарів металу значно більші де Бройлевої довжини хвилі електронів, так що електронний транспорт в багат шаровому провіднику можна адекватно описати за допомогою квазікласичної функції розподілу [10-13].

Провідність тришарової магнітовпорядкованої плівки можна розрахувати в межах модифікованої моделі Фукса-Зондгаймера і двострумової моделі Мотта, записавши кінетичне рівняння Больцмана з відповідними граничними умовами для функції розподілу спін-поляризованих електронів.

У разі, коли в сандвічі реалізується ap - конфігурація, поздовжня провідність провідника дорівнює:

$$\sigma_{ap} = \sum_{s=\pm} \sum_{j \neq n=1}^2 \sigma_{apj}^{(n-j)s} = \frac{1}{d} \sum_{s=\pm} \sum_{j \neq n}^2 d_j \sigma_{0j}^{(n-j)s} \Phi_{apj}^{(n-j)s}, \quad (1)$$

де $d = d_1 + d_2$ - товщина сандвіча, σ_{0j}^s - об'ємна провідність j -го шару металу, $s = \pm(\uparrow\downarrow)$ - спінові індекси, які визначають знак проєкції спіну електрона на напрямок вектора локальної намагніченості в магнітному шарі провідника.

Асимптотичні вирази для розмірних функцій Φ_{apj}^s у припущенні, що закон дисперсії для носіїв заряду в кожному шарі зразка є квадратичним та ізотропним, а їх товщина $d_j \ll l_j^s$ довжині вільного пробігу електронів мають вигляд (логарифмічним фактором $\ln l_j^s / d_j$, який визначає внесок у розмірні функції спін-поляризованих носіїв заряду, які рухаються під малими кутами до зовнішніх меж та меж поділу шарів металу, нехтуємо) [14]:

$$\Phi_{apj}^s = \frac{(1+q_j^s)\{(1+P_{jn}^s)(1-q_n^{-s}P_{nj}^{-s})+q_n^{-s}Q_{jn}^sQ_{nj}^{-s}+(1+q_n^{-s})Q_{nj}^{-s}d_{n,j}\}l_j^s}{(1-q_j^sP_{jn}^s)(1-q_n^{-s}P_{nj}^{-s})-q_j^sq_n^{-s}Q_{nj}^sQ_{nj}^{-s}} \frac{l_j^s}{d_j}. \quad (2)$$

Тут q_j^s - параметр дзеркальності Фукса [1], який має сенс ймовірності розсіяння електрона зі збереженням енергії та тангенційної до j - ї зовнішньої межі зразка компоненти квазіімпульсу; P_{jn}^s - ймовірність дзеркального відбиття носія заряду на межі поділу між j - м та n - м шарами металу без проходження у сусідній шар металу; Q_{nj}^s - визначає ймовірність проходження електрона з n - го шару в j - й шар без розсіяння, так що $P_{jn}^s+Q_{nj}^{-s} \leq 1$. Зауважимо, якщо в розмірних функціях знехтувати спіновим індексом, то вони збігаються з відповідними розмірними функціями для немагнітного провідника [15].

Будемо вважати, що зовнішнє магнітне поле, яке необхідне для переведення сандвіча з $ap \rightarrow p$ конфігурацію (вектора намагніченості в магнітних шарах паралельні між собою) відносно слабке і його впливом на траєкторію руху носія заряду можна знехтувати. У цьому випадку провідність сандвіча з p - конфігурацією визначається формулою:

$$\sigma_p = \sum_{s=\pm} \sum_{j=1}^2 \sigma_{pj}^s = \frac{1}{d} \sum_{s=\pm} \sum_{j=1}^2 d_j \sigma_{0j}^s \Phi_{pj}^s,$$

де асимптотичні вирази для розмірних функцій Φ_{pj}^s будуть визначатися формулою (2) в якій потрібно зробити заміну $-s \rightarrow s$, тобто:

$$\Phi_{pj}^s = \Phi_{apj}^s \Big|_{\text{при } -s \rightarrow s}. \quad (4)$$

Кількісною характеристикою ефекту ГМО є магніторезистивне відношення (МРВ) яке визначається зміною провідності магнітного провідника при його перемагніченні, нормованої на провідність сандвіча, в якому реалізується ap - конфігурація:

$$\delta = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{ap}} = \frac{\sigma_p}{\sigma_{ap}} - 1, \quad (5)$$

де σ_{ap} і σ_p - усереднені по товщині провідника питомі провідності (1) і (3) провідника відповідно.

Для дослідження залежності ефекту ГМО від товщини d_2 накривного шару металу, МРВ δ зручно записати у вигляді (вважається, що ефект магнітної анізотропії [16,17] нехтовно малий і ним можна знехтувати):

$$\delta = \frac{\sum_{j \neq n=1}^2 (d_{j,n} \sigma_{0j,n}^-)^{j-1} \{ \Phi_{pj}^- + \alpha_{bj} \Phi_{pj}^+ \}}{\sum_{j \neq n=1}^2 (d_{j,n} \sigma_{0j,n}^-)^{j-1} \{ \Phi_{apj}^- + \alpha_{bj} \Phi_{apj}^+ \}} - 1, \quad (6)$$

де $d_{j,n} = d_j / d_n$, $\sigma_{0j,n}^- = \sigma_{0j}^- / \sigma_{0n}^-$, $\alpha_{bj} = \sigma_{0j}^+ / \sigma_{0j}^-$ - параметр об'ємної асиметрії.

Будемо вважати, що зовнішні межі сандвіча дифузним чином розсіюють спін-поляризовані носії заряду ($q_j^s = 0$). У цьому випадку розмірні функції (2) і (4) набувають вигляду:

$$\Phi_{apj}^s = \left\{ 1 + P_{jn}^s + Q_{nj}^{-s} d_{n,j} \right\} \frac{d_j}{l_j^s}, \quad \Phi_{pj}^s = \left\{ 1 + P_{jn}^s + Q_{nj}^s d_{n,j} \right\} \frac{d_j}{l_j^s}. \quad (7)$$

Підставляючи формули (7) у вираз (6), для МРВ δ отримаємо:

$$\delta = \frac{(P_{p21} - P_{ap21}) d_{m2,m1}^2 - (Q_p - Q_{ap}) d_{m2,m1} - P_{p21} - P_{ap21}}{P_{ap21} d_{m2,m1}^2 + Q_{ap} d_{m2,m1} + P_{ap12}}, \quad (8)$$

де $Q_{ap(p)} = (Q_{12}^+ + Q_{12}^- + Q_{21}^+ + Q_{21}^-)_{ap(p)}$, $P_{ap(p)12} = (2 + P_{12}^+ + P_{12}^-)_{ap(p)}$, а вираз для $P_{ap(p)21}$ можна отримати з останньої формули, в якій потрібно виконати заміни $1 \rightarrow 2$ і навпаки.

Досліджуючи на екстремум вираз (8), і виключно для простоти вважаючи, що межі поділу шарів металу дифузним чином розсіюють спін-поляризовані носії заряду ($P_{jn}^s = 0$), переконуємося, що у разі виконання рівності (аналогічний результати отримаємо і у разі використання феноменологічного підходу до аналізу ефекту ГМО [18, 19]):

$$d_{2,1} \equiv \frac{d_2}{d_1} = 1, \quad (8)$$

ефект гігантського магнітоопору досягає амплітудного значення, яке дорівнює:

$$\delta(1) = \frac{Q_p - Q_{ap}}{4 + Q_{ap}}. \quad (9)$$

Для визначення знаку ефекту знайдемо другу похідну від функції (8), яка запишеться у вигляді

$$\delta(1)'' = -\frac{(Q_p - Q_{ap})(1 + Q_{ap})}{4(1 + 0,5Q_{ap})^4}. \quad (10)$$

Звідси випливає, що у разі виконання нерівності $Q_{ap} < Q_p$ реалізується прямий (від'ємний) ефект ГМО, а у разі виконання протилежної нерівності $Q_{ap} > Q_p$ реалізується інверсний (позитивний) ефект гігантського магнітоопору.

ВИСНОВКИ

1. В результаті виконання магістерської роботи була проведена автоматизація установки для дослідження температурних та польових залежностей електричного опору чутливих елементів магніторезистивної пам'яті.

2. Автоматизація дала змогу досягти більш точних результатів та збільшити кількість отриманих даних у 10 разів для кожного етапу відпалювання чи охолодження. Також залучення ІТ суттєво економить час, оскільки не має потреби внесення отриманих експериментальних даних в табличний процесор.

3. Збільшення кількості даних дозволяє більш точно визначити різні характерні температури: температуру Дебая, Кюрі Нееля тощо.

4. З використанням теоретичних моделей показано, що у областях малих ($d_{m2} \ll d_{m1}$) та великих ($d_{m2} \gg d_{m1}$) значень товщини d_{m2} накривного магнітного шару у порівнянні з товщиною d_{m1} базового магнітного шару сандвіча, ефект ГМО мізерно малий в силу наявності ефекту шунтування. У разі виконання рівності $d_{m1} \cong d_{m2}$ ефект шунтування відсутній, і МРВ δ_{\max} набуває максимального значення. Знання амплітудного значення МРВ δ_{\max} і параметра об'ємної асиметрії в базовому магнітному шарі дозволяє розрахувати параметр об'ємної асиметрії в накривному магнітному шарі сандвіча.

2. Ефект гігантського магнітоопору досягає максимальної величини у разі, коли товщини магнітних шарів металу є сумірними за величиною в силу відсутності ефекту шунтування. У випадку коли імовірність проходження спін-поляризованих носіїв заряду через інтерфейси магнітовпорядкованого сандвіча у якого реалізується ap - конфігурація менша за зазначену імовірність при перемагніченні тришарової плівки, то спостерігається від'ємний («прямий») ефект. У разі виконання протилежної нерівності реалізується інверсний (позитивний) ефект гігантського магнітоопору.

Список використаних джерел:

1. Руководство пользователя и технические характеристики USB-6008/6009. – [електронний ресурс]. – Режим доступу: www.labview.ru/products/docs/NI_USB6008.pdf
2. Шестаков В.В. Введение в «LabView» / В.В. Шестаков.–Томск: Издательство Томского политехнического университета. 2010. – 42 с.
3. Валюх Ю.В. Автоматизація вимірювання електроопору тонких плівок в графічному середовищі програмування LabVIEW / Валюх Ю. // «Наукова діяльність як шлях формування професійних компетентностей майбутнього фахівця» (НПК) матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції 3-4 грудня 2014р. м. Суми у 2-х томах. – Суми : ВВП «Мрія», 2014. – Т 1 С. 123-124.
4. Тревис Д. LabVIEW для всех / Дж. Тревис. - М., 2005. - 539 с.
5. Фізичні властивості плівкових матеріалів мікро- і наноелектроніки : навчальний посібник : у 2 ч. / І. М. Пазуха, І. Ю. Проценко, І. В. Чешко ; за заг. ред. проф. І. Ю. Проценка. – Суми : Сумський державний університет, 2014. – Ч. 1. – 230 с.
6. Кінетичні розмірні ефекти у багатошарових плівках з полікристалічною структурою / А.Г. Басов, Ю.О. Шкурдода, Л.В. Дехтярук [та ін.] // Успехи фізики металлов. – 2010. – Т. 11, № 4. – С. 461 – 508.
7. Сучасні методи дослідження структури речовини. Спеціальний фізичний практикум: навч. посіб. / [В. Б. Лобода, В. С. Іваній, Ю.О. Шкурдода та ін.] ; за заг. ред. доц. В. Б. Лободи. – Суми : Університетська книга, 2010. – 259 с.
8. Yu. O. Shkurdoda, Loboda V. B., L. V. Dekhtyaruk MNT, **30**(3), 295 (2008).
9. A. Chornous, L. Dekhtyaruk, M. Marszalek, I. Protsenko, Cryst. Res. Technol., **41**, 388 (2006).
10. L. V. Dekhtyaruk, S. I. Protsenko, A. M. Chornous, I. O. Shpetnyi, Ukr. J. Phys., **49**, 587 (2004).
11. Л. В. Дехтярук, МНТ, **30**(2), 219 (2008).

12. Л. В. Дехтярук, Ю. А. Колісниченко, ФНТ, **19**, 1013 (1993).
13. Yu. O. Shkurdoda, L. V. Dekhtyaruk, A. G. Basov, A. P. Kharchenko, A. M. Chornous, Yu. M. Shabelnyk, *Eur. Phys. J. B.* **91**, 300 (2018).
14. Yu. O. Shkurdoda, A. G. Basov, Yu. V. Shabelnyk, A. M. Chornous, A. P. Kharchenko, L. V. Dekhtyaruk, *Proc. Int. Conf: Appl. and Prop.* **6**, 02MFPM05(4pp) (2017).
15. A. G. Basov, S. I. Vorobjov, Yu. O. Shkurdoda, L. V. Dekhtyaruk, *J. Nano-Electron. Phys.*, **2**, 78 (2010).
16. Yu. O. Shkurdoda, A. M. Chornous, A. P. Kharchenko, A. G. Basov, L. V. Dekhtyaruk, *Proc. Int. Conf: Appl. and Prop.* **5** (2), 02MFPM03 (2pp) (2016).
17. Yu. O. Shkurdoda, L. V. Dekhtyaruk, A. M. Chornous, A. G. Basov, A. P. Kharchenko *Proc. Int. Conf: Appl. and Prop.* **5**, 02MFPM05(2pp) (2016).
18. L. V. Dekhtyaruk, A. P. Kharchenko, Yu. O. Shkurdoda, A. G. Basov, A. M. Chornous, Yu. M. Shabelnyk, *Proc. Int. Conf: Appl. and Prop.* **6**, 02MFPM04 (3pp) (2017).
19. Yu. O. Shkurdoda, L. V. Dekhtyaruk, A. G. Basov, A. M. Chornous, Yu. M. Shabelnyk, A. P. Kharchenko, T. M. Shabelnyk, *JMMM*, **477**, 88 (2019).

Додаток А

Палітра Controls (управління). Палітра Controls (рис. 1) доступна тільки з лицьової панелі (1) (рис. 2). За допомогою неї додаються засоби управління й індикатори на передню панель.

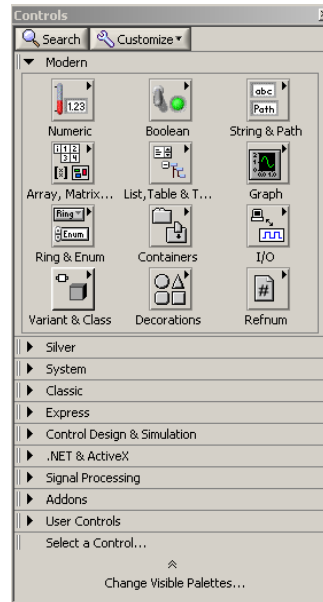


Рис. 1. Палітра Controls (керування).

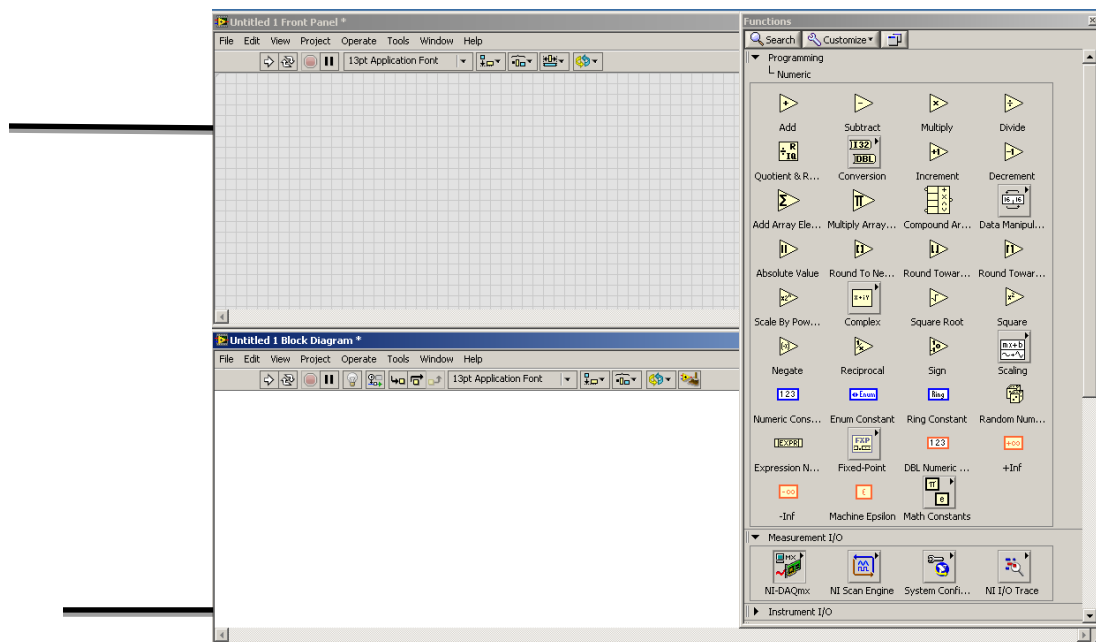









Рис. 2. Загальний вигляд ВП. 1 – лицьова панель; 2 – блок-схема



Кожна опція у палітрі Controls відображає підпалітру доступного засобу управління й індикаторів вибору. Якщо палітра Controls – не відображається, користувач може відкрити палітру, натиснувши ControlsPalette в меню View. Також викликати палітру можна відкривши спливаюче меню на порожній області панелі управління.

У таблиці 1 наведені характеристики елементів палітри Controls

Таблиця 1

Основні підпалітри, палітри управління

 <p>Numeric</p>	<p>ПідпалітраNumeric (числових значень). Складається із засобів управління і індикаторів для числових даних.</p>
 <p>String & Path</p>	<p>ПідпалітраString&Path (строкових значень і шляхів). Складається із засобів управління і індикаторів для ASCII рядків, таблиць і шляхів.</p>
 <p>Array, Matrix...</p>	<p>ПідпалітраArray, Matrix&Cluster (масивів, матриць і кластерів). Складається із засобів управління і індикаторів для угруповання наборів типів даних.</p>
 <p>Refnum</p>	<p>ПідпалітраRefnum (посилань). Складається із засобів управління і індикаторів для посилань.</p>
 <p>Boolean</p>	<p>ПідпалітраBoolean (двійкових (булевих) значень). Складається із засобів управління і індикаторів для двійкових величин.</p>
 <p>I/O</p>	<p>Підпалітра I/O. Складається з функцій введення/виводу.</p>
 <p>List, Table & ...</p>	<p>ПідпалітраList, Table&Tree (списки, таблиці, дерева). Складається із засобів управління і індикаторів для меню, виконаних у формі списків, таблиць, дерев.</p>
 <p>Ring & Enum</p>	<p>Підпалітра Ring&Enum (зациклені списки і перерахування). Складається із засобів управління і індикаторів для меню, виконаних у формі закольцованих списків і перерахувань.</p>

 <p>Graph</p>	<p>Підпалітра Graph. Складається з індикаторів, для побудови графіків діаграм</p>
 <p>Decorations</p>	<p>Підпалітра Decorations (оформлення). Складається з графічних об'єктів для налаштування дисплеїв передньої панелі.</p>
<p>Палітра UserControl (засоби управління користувача). Складається із спеціальних засобів управління, які формує сам користувач.</p>	
<p>Палітра ControlDesign&Simulation. Відображує діалогове вікно, щоб завантажити саморобні елементи управління</p>	
<p>Палітра.NET &ActiveX (об'єктів ActiveX). Складається із засобів управління, що дозволяють впровадити об'єкти ActiveX на передню панель.</p>	

Палітра Functions (функцій). Палітра Functions доступна тільки на блок-діаграмі. За допомогою цієї палітри користувач формує блок-схему. Кожна опція в палітрі відображає підпалітру значків верхнього рівня. Якщо палітри Functions – не видно, користувач може викликати її, вибравши FunctionsPalette в меню View. Відкрити палітру Функцій можна викликавши спливаюче меню на порожній області у вікні Diagram

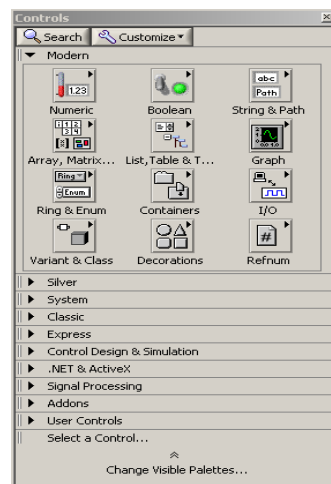





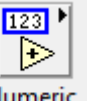




Рис. 3. Палітра Functions (функцій)

У таблиці 2 наведені характеристики палітри Functions.

Основні підпалітри, палітри функцій

 Structures	<p>ПідпалітраStructures (структур). Складається із окремих структур керування (цикл For і т.д.)</p>
 Boolean	<p>ПідпалітраBoolean (Булевих функцій). Складається з логічних функцій.</p>
 Array	<p>ПідпалітраArray (масивів). Складається з функцій для обробки масивів.</p>
 Comparison	<p>ПідпалітраComparison (порівняння). Складається з функцій для порівняння числових, строкових значень, булевих змінних.</p>
 File I/O	<p>ПідпалітраFile I/O (введення/виведення файлу). Складається з функцій введення/виводу у файл.</p>
 Application ...	<p>ПідпалітраApplicationControl (управління додатком). Складається з ВП, його керівників; дозволяє запускати ВП на інших комп'ютерах через мережу.</p>
 Numeric	<p>ПідпалітраNumeric (числових функцій). Складається з тригонометричних, логарифмічних і числових функцій</p>
 String	<p>ПідпалітраString (строкових функцій). Складається з функцій для роботи із строковими величинами.</p>
 Cluster, Clas.	<p>ПідпалітраCluster (кластерів). Складається з функцій для обробки кластерів.</p>

Додаток Б

Віртуальний амперметр

Для програмування роботи вимірювальних DAQ-модулів в системі LabView є великий набір готових ВП, що виконують деякі групи операцій по обслуговуванню DAQ – модулів. Завдання, що не вимагають розширених можливостей, можна запрограмувати за допомогою експресс-ВП DAQ Assistant.

Для його запуску треба клацнути мишею по значку DAQ Assistant (знаходиться в палітрі Functions>> Express >>Input), а потім клацнути по вільному місцю на блок-схемі, куди потрібно помістити цей вузол. На блок-схемі з'явиться іконка програми DAQ Assistant і діалогове вікно налаштування DAQ-модуля, в якому потрібно вибрати AnalogInput (Аналоговий вхід), а потім вибрати із списку вимірюваних величин Voltage (напруга) рис.4.

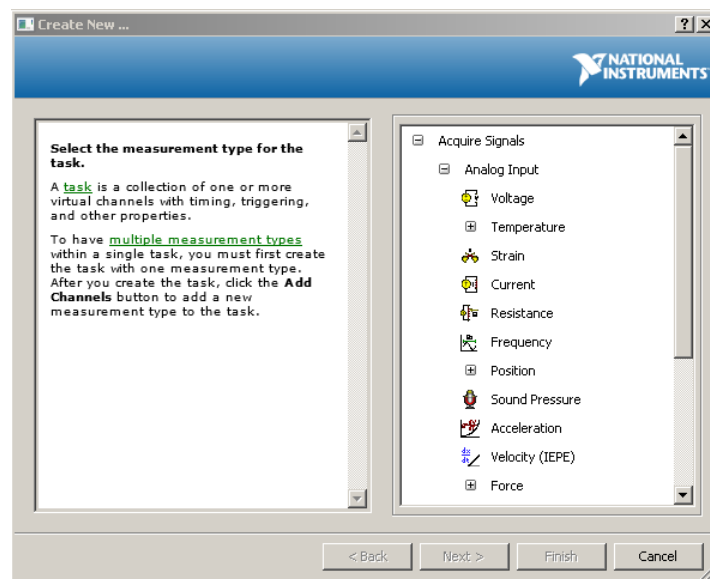


Рис.4. Діалогове вікно налаштування DAQ-модуля

З'явиться вікно з назвою DAQ-модуля, який підключений до комп'ютера, із списком наявних фізичних каналів, аналогових входів ai0 – ai7. Необхідний диференціальний режим можливий тільки на входах ai0 – ai3. Вибираємо мишею

будь-який з них, наприклад, ai0, і натискаємо кнопку Finish. З'явиться вікно додавання і налаштування каналів (рис. 5).

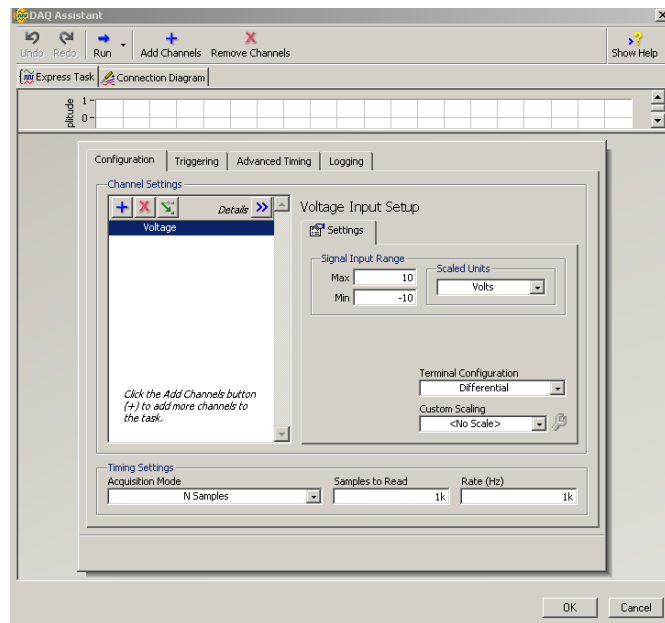


Рис. 5. Вікно додавання і налаштування каналів

У розділі `SignalInputRange` (діапазон вхідного сигналу) поставимо `Max: 1`, `Min: -1`. За замовчуванням варіант "1 samples" (1 вимір) в розділі `AcquisitionMode` (режим збору даних) забезпечить виконання одного виміру. Для того, щоб дізнатися до яких виходів підключати досліджувану напругу, потрібно натиснути по `ConnectionDiagram`. Після чого з'явиться вікно з схемою підключення (рис. 6). Для збереження налаштувань натискаємо кнопку `OK`.

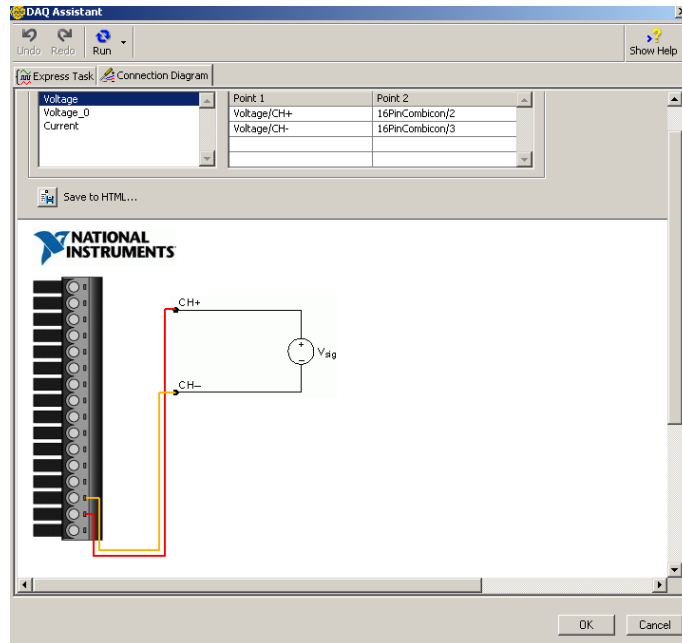


Рис. 6. Схема підключення віртуального вольтметра

Віртуальний омметр

Опір ділянки кола розраховується за законом Ома $R_x = U/I$. Для створення омметра потрібно створити вольтметр і амперметр. Для вимірювання сили струму використовуватимемо інший канал DAQ модуля (ai2). Вимірюючи падіння напруги на резисторі з відомим опором, підключеному до диференціального входу ai3, знайдемо значення сили струму.

Для відкриття другого фізичного вимірювального каналу потрібно подвійним натисканням миші по іконці DAQ Assistant знову відкрити діалогове вікно створення і налаштування каналів. Далі натискаємо +Addchannels (додати канали) і в меню, що відкрилося, вибираємо Current (струм). У вікно Resistorvalue (ohms) (номінал резистора (Ом)) потрібно ввести величину опору резистора, а в вікні SignalInputRange (вхідний діапазон сигналу) вибрати потрібний діапазон сили струму. Треба також перевірити, щоб опція ShuntResistor (шунтуючий резистор) була встановлена на External (зовнішній). Таким чином маємо наступну схему підключення (рис. 7).

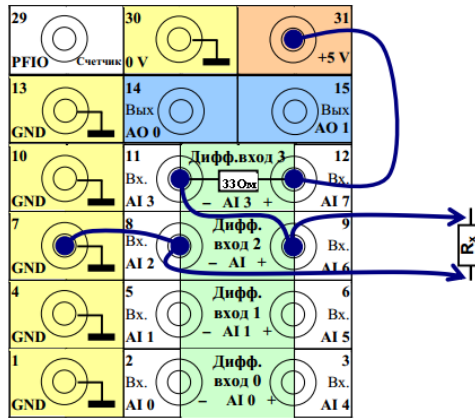


Рис.7. Схема підключення віртуального омметра

В модулі USB 6008 один вимірювальний аналого – цифровий перетворювач по черзі обслуговує усі канали введення. Тому після введення другого каналу поле виходу Data на вузлі DAQ Assistant, як і раніше, залишається одним, але по ньому будуть послідовно в часі проходити два різних цифрових динамічних сигнали, які відповідають напрузі і струму. Для розподілу цих сигналів використовується вузол SplitSignal (палітра Functions>> Express >>Signalmanipulation).

Спочатку вузол SplitSignal має один вихід. За допомогою миші його треба розтягнути по вертикалі за нижній або верхній край до отримання двох виходів. Верхній буде виходом напруги, нижній – сили струму (відповідно до порядку додавання каналів). Для отримання величини опору треба поділити напругу на силу струму, що виконується вузлом Divide (рис. 8).

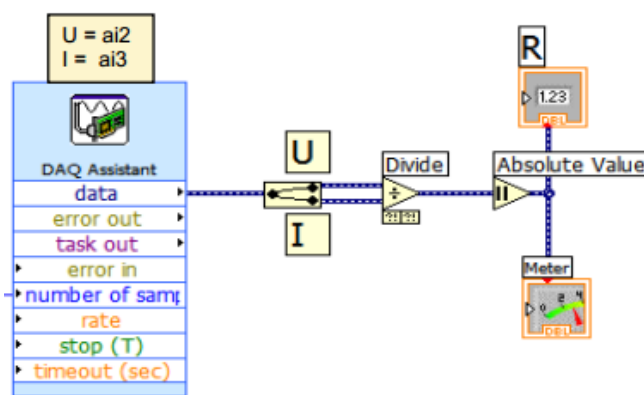


Рис. 8. Блок-схема: омметр

Щоб не забути, які канали, і в якому порядку підключені, доцільно підписати їх в тому ж порядку над іконкою DAQ.