

ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

РОЩУПКІН Олексій Юрійович

УДК 004.75

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНО-
ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО
ВИПРОМІНЮВАННЯ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Наукові керівники:

Анатолій Саченко

д.т.н., професор,

Radislav Smid

Associated professor, PhD

Тернопіль - 2015

З М І С Т

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1.	
СУЧАСНИЙ СТАН МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	14
1.1. Методи визначення рівня ультрафіолетового випромінювання	14
1.2. Системи визначення рівня ультрафіолетового випромінювання	18
1.3. Аналіз сенсорів ультрафіолетового випромінювання та методів підвищення їх точності	25
1.4. Аналіз методів обробки сигналів багатопараметричних сенсорів	37
1.5. Перспективні напрямки удосконалення засобів визначення рівня ультрафіолетового випромінювання і постановка задачі дослідження	49
Висновки до розділу 1	51
РОЗДІЛ 2.	
НЕЙРОМЕРЕЖЕВИЙ МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ ПЕРЕТВОРЕННЯ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ СЕНСОРІВ	54
2.1. Метод ідентифікації індивідуальних функцій перетворення багатопараметричних сенсорів	54
2.2. Модель номінальної функції перетворення багатопараметричного сенсора та його похибок	65
2.3. Розроблення системи автоматизованого формування навчальної вибірki для дослідження похибки пропонованого методу	74
2.4. Дослідження невиключеної похибки пропонованого методу	81
2.5. Дослідження невиключеної похибки пропонованого методу при наявності випадкової похибки	83
Висновки до розділу 2	89

РОЗДІЛ 3.

СИНТЕЗ СТРУКТУРИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

90

3.1. Синтез схем вимірювальних каналів інформаційно-вимірювальної системи 90

3.2. Опрацювання результатів вимірювань 100

3.3. Методика переходу до індивідуальних функцій перетворення сенсорів 105

3.4. Методика експериментальних досліджень сенсорів ультрафіолетового випромінювання і їх результати 113

Висновки до розділу 3 120

РОЗДІЛ 4.

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА

УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

121

4.1. Структурна схема запропонованої інформаційно-вимірювальної системи ультрафіолетового випромінювання 121

4.2. Методика визначення індивідуальних функцій перетворення каналів блоку вимірювань 128

4.3. Метод забезпечення взаємозамінності сенсорів ультрафіолетового випромінювання 139

4.4. Алгоритми обробки даних у інформаційно-вимірювальній системі ультрафіолетового випромінювання 143

4.5. Оцінка похибки вимірювання рівня ультрафіолетового випромінювання 147

Висновки до розділу 4 153

ВИСНОВКИ 154

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 156

	4
Додаток А. ПЗ для автоматизованого дослідження №1	168
Додаток Б. Комбінації знаків для точки 14 (згідно формул (2.3), (2.9), (2.14), (2.19) та (2.25)	171
Додаток В. Комбінації знаків для точки 34 (згідно формул (2.3), (2.9), (2.14), (2.19) та (2.25)	176
Додаток Г. Значення похибки для точки 14	181
Додаток Д. Значення похибки для точки 34	182
Додаток Е. Значення похибки прогнозу для точки 14 при рівні випадкової похибки від 0,1% до 2,5%	183
Додаток Ж. Значення похибки прогнозу для точки 34 при рівні випадкової похибки від 0,1% до 2,5%	188
Додаток К. Результати вимірювань залежності спаду напруги на одинадцяти ФД-х від струму через ФД (від 0,4 мА до 1 мА) та температури (від 24°C до 36°C)	193
Додаток Л. Результати вимірювань залежності струму КЗ на одинадцяти ФД-х від відстані до взірцевого джерела світла (від 160 до 400 мм) та температури (від 24°C до 36°C)	196
Додаток М. Результати нейромережевого прогнозу спаду напруги на одинадцяти ФД-х від струму через ФД (від 0,4 мА до 1 мА) та температури (від 24°C до 36°C)	199
Додаток Н. Результати нейромережевого прогнозу залежності струму КЗ на одинадцяти ФД-х від відстані до взірцевого джерела світла (від 160 до 400 мм) та температури (від 24°C до 36°C)	202
Додаток П. Принципова схема запропонованої ІВС УФВ	206
Додаток Р. Акт впровадження результатів дисертації у навчальний процес Тернопільського національного економічного університету	207
Додаток С. Акт впровадження результатів дисертації у науково-дослідній роботі на НВФ «Тензор»	208

Додаток Т. Акт впровадження результатів дисертації у в навчальний процес Чернівецького національного університету

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АГК	аналіз головних компонентів
АД	автономне джерело
АЗРП	алгоритм зворотного розповсюдження помилки
АЦП	аналого-цифровий перетворювач
БЖ	блок живлення
БПС	багатопараметричний сенсор
ГНМАК	гнучке незалежне моделювання аналогій класу
ДА (DA)	дискримінантний аналіз
ДКА (DCA)	дискримінантний компонентний аналіз
ДР	дослідна робота
ЕРС	електрорушійна сила
ІВС	інформаційно-вимірювальна система
ІНМ	імовірнісна нейронна мережа
ІФП	індивідуальна функція перетворення
КЗ	коротке замикання
КНВ	квантування навчального вектора
ЛДАБ	лінійний дискримінантний аналіз Баєса
ЛДАМ	лінійний дискримінантний аналіз Махаланобіса
ЛФД	лавинний фотодіод
МАГК (PCA)	метод аналізу головних компонентів
МДАНС (DANN)	метод дискримінантного адаптивного найближчого сусіда
МК	мікроконтролер
МКНС	метод К-найближчого сусіда
МЛКНС (Local KNN)	метод локального К-найближчого сусіда
МНС	метод найближчого сусіда
МПНВП (MPNRE)	максимальний процент нелінійної відносної похибки

НДР	науково-дослідна робота
Н/П	напівпровідник
НМ	нейронна мережа
НХ	неробочий хід
ОП	операційний підсилювач
ПЗ	програмне забезпечення
ПК	персональний комп'ютер
ПППМ (IPPM)	покращений поліноміальний прогресивний метод
РПТ (RTS)	реактивний пошук Табу
УФ	ультрафіолет
УФВ	ультрафіолетове випромінювання
ФВ	фізична величина
ФД	фотодіод
ФП	функція перетворення
ШНМ	штучна нейронна мережа

ВСТУП

Актуальність теми. У 1974 р. було показано, що синтетичні сполуки, такі як хлорфторвуглеці, тетрахлористий вуглець, бромистий метил тощо, руйнують озон, що захищає життя від дії сонячного ультрафіолетового випромінювання (УФВ). Підвищення рівня УФВ, яке досягає поверхні землі, є небезпечним для здоров'я людини, може викликати, серед іншого, рак шкіри, катаракту очей і ослаблення імунної системи.

Аналіз показав [1 - 4], що, при розробці радіометрів і портативних дозиметрів для систем екологічного моніторингу, медичних і виробничих вимірювань тощо, оптимальним є застосування напівпровідникових ультрафіолетових сенсорів – фотодіодів (ФД) як простих, дешевих засобів. Але у вимірювальних каналах таких приладів домінує похибка самого ФД – розкид їх параметрів сягає 25% [5 - 7], а температурний коефіцієнт $0,1\%/^{\circ}\text{C}$ [5 - 9]. В такому разі покращення інших блоків інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) УФВ не доцільне. Додатковим недоліком ФД є значний та нелінійний вплив його освітленості на температурний коефіцієнт (зміна до 7% [5, 6]), тому для корекції слід вимірювати температуру не оточуючого середовища, а кристала ФД. Одним із вагомих критеріїв ефективності ІВС є висока точність [134, 135], а відомі ІВС УФВ мають низьку точність (5-10%), незважаючи на налаштування ІВС на індивідуальну функцію перетворення (ФП) сенсорів, що обмежує їх взаємозамінність.

Підвищення точності ІВС УФВ можна досягти шляхом обробки сигналу ФД як багатопараметричного сенсора (БПС), де на вході ФД є температура кристала та струм короткого замикання, а на виході – значення освітленості. Тоді доцільно використати штучні нейронні мережі (НМ) для розпізнавання вихідного сигналу ФД. Це добре узгоджується з переходом до індивідуальних ФП, але його трудомісткість є значною. Крім того, не забезпечується взаємозамінність сенсорів. Тому створення нових не трудомістких методів підвищення точності ІВС УФВ з автономним живленням і взаємозамінністю

сенсорів – актуальна наукова задача.

Серед виробників сенсорів УФВ можна виділити такі фірми як ITT Industries, Burle Industries, Litton Industries, Ball Aerospace System Group, Schlumberger Electro-Optics, Sglux (всі – США), Hamamatsu (Японія), Uv-groebel (Німеччина), Apogeeinstruments (Англія), Gigahertz-optik (Німеччина), Lasercomponents (США), Dexterresearch (США) та інші.

Дослідженнями у даній області займався ряд вітчизняних та закордонних вчених прізвища яких наведені у літературі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дана робота виконана в рамках науково дослідних робіт: НДР “Ідентифікація індивідуальних функцій перетворення багатопараметричних сенсорів” (№ДР 0112U008459, 2012-2013pp.); міжнародного наукового проекту “Дистрибутивні сенсорні мережі з реконфігурацією обчислювальних вузлів” у рамках програми двостороннього співробітництва між Україною та Республікою Молдова (№ДР 0114U006090 2014-2015pp.), що виконувалися у Тернопільському національному економічному університеті (ТНЕУ), а також “Апаратно-програмний комплекс для екологічного моніторингу рівня ультрафіолетового та радіаційного випромінювання навколишнього середовища” (№ДР 0110U000186, 2010-2011pp.), “Наукові основи створення, діагностики та підвищення надійності первинних перетворювачів сигналів автоматизованих систем керування, елементів і пристроїв обчислювальної техніки та захисту інформації в комп'ютерних засобах” (№ДР 105U007365, 2011-2013pp.), що виконувалися у Чернівецькому національному університеті ім. Ю.Федьковича (ЧНУ). Дисертація виконана за схемою подвійного керівництва – договір про співпрацю між ТНЕУ та Чеським технічним університетом у Празі від 25.02.2013 р.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертації є розроблення та дослідження методів і засобів підвищення точності інформаційно-вимірювальних систем ультрафіолетового випромінювання.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні завдання:

- 1) аналіз відомих методів і систем вимірювання УФВ та сенсорів УФВ у складі ІВС для визначення основних напрямів підвищення їх точності;
- 2) розроблення методу зниженої трудомісткості для ідентифікації індивідуальних ФП БПС та його дослідження за допомогою запропонованої моделі функції перетворення БПС та його похибок;
- 3) розроблення системи автоматизованого формування навчальної вибірки для дослідження похибок запропонованого методу;
- 4) дослідження завадостійкості розробленого методу ідентифікації індивідуальних ФП БПС до впливу випадкової похибки;
- 5) синтез структури та схеми вимірювальних каналів ІВС УФВ;
- 6) розроблення архітектури ІВС УФВ та методу корекції похибок її компонентів, який забезпечує взаємозамінність сенсорів.

Об'єкт дослідження – процес вимірювання енергетичної освітленості ультрафіолетового випромінювання напівпровідниковими фотодіодами.

Предмет дослідження – нейромережеві методи підвищення точності інформаційно-вимірювальних систем ультрафіолетового випромінювання.

Методи дослідження – структурно-функціональний аналіз, теорії похибок, електричних кіл і нейронних мереж, а також методи імітаційного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше запропоновано нейромережевий метод ідентифікації індивідуальних функцій перетворення багатопараметричних сенсорів за результатами їх повірки, який забезпечує:

1.1 високу точність прогнозу результатів повірки в точках, де дійсна повірка не проводилася, що дозволило суттєво скоротити кількість точок повірки;

1.2 стійкість до випадкових похибок експериментальних досліджень – зменшення їх впливу приблизно на порядок.

2. Вперше запропоновано метод корекції похибок компонентів вимірювальних каналів інформаційно-вимірювальної системи

ультрафіолетового випромінювання, який забезпечує високу точність вимірювання та взаємозамінність сенсорів ультрафіолетового випромінювання.

3. Отримала подальший розвиток модель функції перетворення багатопараметричних сенсорів та їхніх похибок, яка враховує всі можливі комбінації різних видів похибок цих сенсорів по кожній вимірюваній або впливаючій величині, що дало змогу автоматизувати формування навчальної вибірки для дослідження похибки запропонованого методу.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено:

- 1) систему автоматизованого формування навчальної вибірки для дослідження похибки методу ідентифікації індивідуальних ФП БПС;
- 2) схеми вимірювальних каналів ІВС УФВ;
- 3) методики дослідження сенсорів УФВ;
- 4) схеми та програмне забезпечення ІВС УФВ.

Теоретичні та практичні результати роботи впроваджені у НВФ „Тензор”, використані при викладанні дисциплін “Нейронні мережі та еволюційні алгоритми”, “Методи та системи штучного інтелекту”, «Мікропроцесорні системи» (ТНЕУ) та «Комп’ютерні системи штучного інтелекту» і «Мікроконтролери» (ЧНУ), а також при виконанні держбюджетних тем на кафедрі комп’ютерних систем та мереж ЧНУ та держбюджетної теми і міжнародного проекту на кафедрі інформаційно-обчислювальних систем і управління ТНЕУ.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні дослідження, розробка методів, структур та алгоритмічного забезпечення виконані автором самостійно. Аналіз результатів окремих досліджень, розроблення окремих схемних рішень, програмного забезпечення і впровадження результатів дисертації проведені у співавторстві згідно з наведеним списком праць.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить: [10, 11] – метод ідентифікації ФП БПС; [12 - 14] – метод опрацювання даних БПС 8-ми бітним мікроконтролером; [15, 16] – метод (спосіб) ідентифікації ФП БПС та

опрацювання результатів вимірювань; [17] – схемотехнічні рішення та частина програмного забезпечення; [18] – метод зменшення кількості точок повірки; [19, 20] – архітектура прецизійної ІВС; [21] – схемотехнічні рішення та методика обчислення результату вимірювання, метод забезпечення взаємозамінності БПС; [22 - 24] – застосування БПС; [25 - 27] методика опрацювання даних БПС.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації доповідалися та обговорювалися на 14-ти міжнародних та національних конференціях: 10-й міжн. н.-тех. конф. „Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science” (TCSET’2010), Львів-Славське, 2010 р.; XI міжн. н.-практ. конф. „Современные информационные и электронные технологии” (СИЭТ-2010), Одеса, 2010 р.; IV міжн. н.-тех. конф. молодих вчених „Комп’ютерні науки та інженерія 2010” (CSE-2010), Львів, 2010р.; міжн. н.-тех. конф. молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», Тернопіль, 2010 р.; 6-й, 7-й та 8-й міжн. н.-тех. конф. «Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications» (IDAACS), Прага (Чехія), 2011 р., Берлін (Німеччина), 2013р., Варшава (Польща), 2015; 1-й Всеукраїнській н.-практ. конф. ”Фізико-технологічні проблеми радіотехніки пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки”, Чернівці, 2011 р.; 9-й IEEE міжн. н.-тех. конф. «Системи, сигнали та пристрої» (SSD’2012), Хемніц (Німеччина), 2012 р.; 2-й IEEE IDAACS симпозиум «Wireless Systems within the IEEE International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications». Оффенбург (Німеччина), 2014 р.

Публікації. За результатами наукових досліджень опубліковано 17 робіт загальним обсягом 8,54 друкованих аркушів, серед них статтю, яка входить до наукометричної бази Web of Science (імпакт-фактор 0.642), 5 робіт у міжнародних виданнях, що входять до наукометричної бази SCOPUS, 4 статті у фахових виданнях (одна з них одноосібна), 9 праць у збірниках міжнародних та національних наукових конференцій, патент України на винахід та патент на

корисну модель.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків, викладених на 136 сторінках основного машинописного тексту, списку використаних джерел (135 найменувань). Робота містить 65 рисунків, 21 таблицю та 15 додатків.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

1.1 Методи визначення рівня ультрафіолетового випромінювання

Для виявлення і вимірювання ультрафіолетового (УФ) випромінювання використовують засоби, засновані на різних ефектах: біологічних, хімічних, фізичних.

Біологічні засоби - сенсори на основі ДНК, бактерій або навіть клітин ссавців [28 - 31]. Також для УФ вимірювання використовується біологічний матеріал - мікроорганізми, які застосовуються у висушеному вигляді або у вигляді водної суспензії в УФ - прозорій посудині [29]. Відомо і використання бактеріофага T7 в якості УФ - біосенсорів [30].

Засоби, що використовують хімічні процеси, називають актинометрами. При цьому вимірюються хімічні зміни, що викликаються випромінюванням. Ці технології зазвичай представлені персональними УФ дозиметрами. Часто для УФ дозиметрів використовується термопластичний полісульфон (thermoplastic polysulfone). В основі цього явища - збільшення поглинання плівкою полісульфону, яка піддавалася впливу УФ випромінювання з довжиною хвилі 250-330 нм (УФ В). Збільшення поглинання зростає зі збільшенням дози УФ, яке і вимірюють при довжині хвилі 330 нм. На практиці плівку полісульфону (40-50 мкм завтовшки) встановлюють в пластикові тримачі, який і піддається впливу УФ разом з людиною [31].

Прилади, що використовують фізичні принципи для УФ вимірювання, умовно поділяються на радіометричні й фотоелектричні. У радіометричних приладах фіксується теплова дія випромінювання. Принцип дії теплових (неселективних) приймачів заснований на тому, що при підвищенні температури змінюється той чи інший параметр матеріалу приймача, наприклад: величина опору - в болометрі; поява термо-ЕРС, тобто напруги на

кінцях приймача - в термостовпчиках; в піроелектричних приймачах змінюється величина спонтанної поляризації речовини.

Селективні приймачі випромінювання, до яких відносяться фотоелементи із замикаючим шаром і фотоопором, засновані на ефекті генерації електронів при поглинанні фотонів. Вони мають яскраво представлену залежність від довжини хвилі падаючого випромінювання і велику швидкодію [3].

В загальному, УФ вимірювачі поділяються на:

1. УФ вимірювачі з відносною спектральною чутливістю близькою за формою до відносної ефективності бактерицидної, еритемної і засмажної дій УФ випромінювання.
2. УФ вимірювачі з використанням селективного світлофільтрового виділення УФ зон по максимумам відносних ефективностей бактерицидної, еритемної і засмажної дій випромінювання.
3. Вимірювачі УФВ, принцип роботи яких заснований на комбінованих вимірах.

Крім того, УФ вимірювачі поділяються на радіометри та дозиметри.

Радіометри [32]- загальна назва ряду приладів, призначених для вимірювання енергетичних характеристик того чи іншого випромінювання.

Дозиметри [33]- прилади для вимірювання ефективної дози або потужності іонізуючого випромінювання за деякий проміжок часу.

Детектором, сенсором (чутливим елементом дозиметра або радіометра), називають елемент, потрібний для перетворення явищ, що викликаються іонізуючим випроміненням в електричний або інший сигнал, легко доступний для вимірювання.

УФД, як і детектори випромінювання інших спектральних діапазонів, поділяються на два великі класи [34]: фотодетектори (фотонні детектори) та термодетектори (рис. 1.1).

У фотодетекторах фотони, що поглинаються матеріалом детектора, при взаємодії з електронами змінюють електричні характеристики детектора, що відображається рівнем вимірюваного електричного сигналу. У термодетекторах

поглинання фотонів призводить до підвищення температури і зміни температурних властивостей детектора. Так, в піроелектричних детекторах вимірюють зміну внутрішньої електронної поляризації, в болометрах - електричний опір і так далі.

Фотодетектори володіють, як правило, кращою чутливістю і тому набули більш широкого поширення, тоді як термодетектори використовуються в основному для еталонних вимірів.

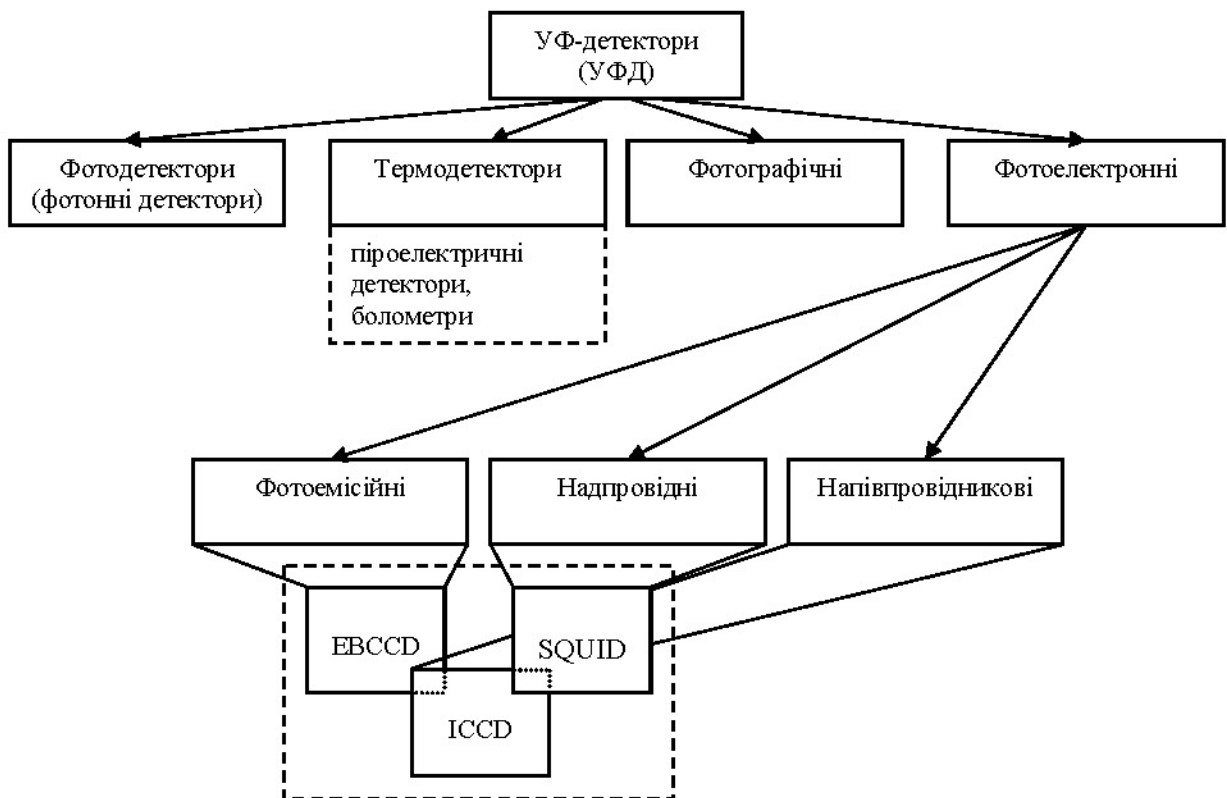


Рис. 1.1. Структура поділу типів УФД

УФД також можна розділити на дві групи [35]: фотографічні та фотоелектронні.

Фотоплівки та інші фотоматеріали дозволяють записати велику кількість інформації при однократному експонуванні, але мають серйозні недоліки: низьку і нелінійну чутливість, вузький динамічний діапазон, неможливість фільтрації фону і паразитне засвічення емульсії, тому сьогодні вони використовуються рідко, в основному для наукових досліджень.

Фотоелектронні УФД діляться на три класи [4]: фотоемісійні, напівпровідникові і надпровідні.

У фотоемісійних приладах [35, 36] падаючий фотон вибиває з поверхні фотокатода електрон, який прискорюється у вакуумі і рухається до анода при прикладанні електричного потенціалу. Електричний струм детектора пропорційний числу фотоелектронів, тобто інтенсивності падаючого випромінювання. При цьому ефективність зовнішнього фотоефекту і спектрально-енергетичні характеристики такого детектора визначаються робочою функцією поверхні фотокатода. Переваги такого детектора: висока чутливість і зручність роботи з ним; недоліки: низька квантова ефективність, спектральна залежність відгуку детектора і залежність ефективності від якості та чистоти поверхні детектора.

Надпровідні УФД - це, по суті, термодетектори, засновані на зміні фізичного стану речовини при збільшенні внутрішньої енергії матеріалу через поглинання УФ - фотонів.

У напівпровідникових (н/п) детекторах фотони поглинаються усередині об'єму н/п матеріалу, створюючи пари "електрон-дірка" і відповідну провідність. Цей клас детекторів використовує внутрішній фотоефект, в якому енергія фотона має бути достатньою, аби фотоелектрон здолав заборонену зону і перейшов в зону провідності. У ФД, діодах Шоттки і структурах типу метал-ізолятор-напівпровідник для подолання потенційного бар'єру прикладається зовнішнє електричне поле. Зовнішній фотострум детектора пропорційний числу фотонів, що детектуються. Переваги такого детектора: широкий робочий спектр, хороша лінійність, висока квантова ефективність, широкий динамічний діапазон, можливість виготовлення великих зображаючих матриць; недолік - наявність ефекту старіння під дією УФ - випромінювання.

Загальна структура поділу фотоелектронних УФД зображена на рисунку 1.2.

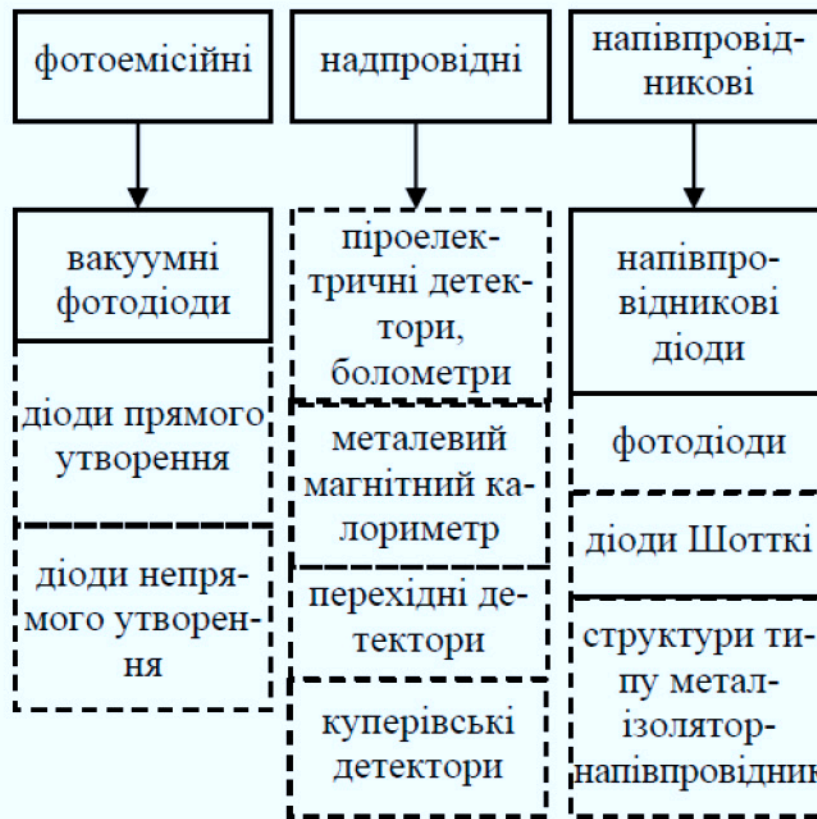


Рис. 1.2. Структура поділу фотоелектронних УФД.

Оглянувши основні типи УФД можна сформулювати підсумовуючу таблицю (табл. 1.1.).

Як видно з таблиці 1.1, найбільше переваг мають напівпровідникові УФ сенсори, тому розглянемо системи вимірювання рівня ультрафіолетового випромінювання на базі цих сенсорів.

1.2 Системи визначення рівня ультрафіолетового випромінювання

Основна маса промислових приладів для вимірювання рівня інтенсивності УФ з заявленими високими технічними параметрами виконана на н/п фотодіодах. Їх типовим представником є, наприклад, радіометр MU-200, який пропонує фірма Argee Instruments [37], та сенсор до нього SU-100 [38] (рис. 1.3, табл. 1.2)

Таблиця 1.1

Порівняльні характеристики УФД

Тип детектора	Переваги	Недоліки	Сфери використання	Фірма виробник
Фотодетектори	- висока чутливість	- висока ціна	широко розповсюджені у лабораторіях	Advanced Photonix, Inc (США)
Термодетектори	- швидкий час термо-стабілізації - низька чутливість до фону із мікро значеннями	- висока ціна	використовуються переважно для еталонних вимірів та наукових досліджень	Scitec Instruments Ltd (Англія), InfraTec GmbH (Німеччина), Micro-Hybrid Electronic GmbH (Німеччина)
Фотографічні	- фіксують велику кількість інформації	- низька чутливість - нелінійна чутливість - вузький динамічний діапазон - неможливість фільтрації фону - паразитне засвічення емульсії	використовуються рідко, в основному для наукових досліджень	Andor Technology plc (Англія), Photonic Science ltd (Англія)
Фотоемісійні	- висока лінійна чутливість до падаючого світла - зручність в роботі з ним - відсутній темновий (тепловий) шум - легкість калібрування	- низька квантова ефективність - потребують застосування світлофільтрів що блокують видимий спектр випромінювання - спектральна залежність відгуку детектора - залежність ефективності від якості і чистоти поверхні	дослідження фізики вибуху, супутники, астрофізичні дослідження	ITT Industries (США), Hamamatsu (Японія), Burle Industries (США), Litton Industries (США), Ball Aerospace System Group (США), Schlumberger Electro-Optics (США)
Надпровідні	- можливість вимірювати величину сигналу як функцію енергії фотона - широкий енергетичний спектр від рентгенівського випромінювання до видимого світла	- порівняно низька квантова ефективність (10-20%) - потрібно використовувати криогенну техніку - потребують застосування світлофільтрів	використовуються переважно для еталонних вимірів та наукових досліджень	InfraTec GmbH (Німеччина), Micro-Hybrid Electronic GmbH (Німеччина)
Напівпровідникові	- широкий робочий спектр - нечутливість до видимого випромінювання - добра лінійність - висока квантова ефективність - широкий динамічний діапазон - можливість виготовлення великих зображаючих матриць - мала ємність - мала чутливість до темнових стрімів - низька ціна	- наявність ефекту старіння під дією УФ – випромінювання - складність вирощування кристалів	радіометри, портативні дозиметри, медичні установки виробничі вимірювання	Genicom Co., Ltd (США), Hamamatsu (Японія), ITT Industries (США), Burle Industries (США), Litton Industries (США), Ball Aerospace System Group (США), Schlumberger Electro-Optics (США)



Рис. 1.3. Зовнішній вигляд радіометра MU-200 [37]

Характеристики радіометру MU-200 подані в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Основні характеристики радіометра MU-200

Параметр	Значення
Похибка калібрування:	$\pm 10 \%$
Нестабільність вимірів (Measurement Repeatability):	$< 1 \%$
Нестабільність довгострокова (Long-term Drift):	$< 3 \%$ у рік
Нелінійність:	$< 1 \%$ (до $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Час відклику:	$< 1 \text{ ms}$
Спектральний діапазон:	250 nm - 400 nm
Дирекційний (косинусний) відклик:	$\pm 10 \%$ при 75° кута
Температурна чутливість:	приблизно $0,1 \%$ на $^\circ\text{C}$
Діапазон температури використання:	від 0 до $50 \text{ }^\circ\text{C}$

Потрібно відзначити, що для калібрування даного радіометра можливим є використання сайту (www.clearskycalculator.com) [37], який відображає значення взірцевої освітленості будь-де на земній кулі.

Фірмою «Hamamatsu Photonics КК» пропонується УФ - вимірювач потужності випромінювання серії C9536 [39] зі знімним давачем (сенсорною головкою) H9535.

Знімна головка сенсора містить акумулятор для УФ - детектування і пам'ять для зберігання даних, що дозволяє проведення дистанційних вимірювань у важкодоступних місцях, наприклад на стрічковому конвеєрі УФ печі. Зовнішнє управління відбувається через інтерфейс RS-232C. Особливістю радіометра C9536 є відсутність оптичного фільтра, що дозволяє стабільно працювати приладу при інтенсивному УФ випромінюванні. Конструктивно також забезпечений широкий кут падіння для випромінювача джерела, навіть без використання спеціальних дифузорів [40].

У приладі використовуються компоненти, які не піддаються значному старінню через вплив УФ випромінювання. Радіометр C9536 [39] калібрується спільно з сенсором H9535. Точність вимірювань визначається сенсором, який розглядається в §1.3.

Інший прилад – UVTOUCH, радіометр виробництва фірми «Sglux GmbH» [41] містить такі компоненти, як сенсорний екран (Touch screen), має функцію дозиметра і даталоггера (Data logger - пристрій для запису даних у часі або в залежності від місця розташування), забезпечує передачу цифрового сигналу сенсора з використанням інтерфейсу CAN bus, калібрування за індивідуальним замовленням. Можливе використання різних сенсорів виробництва компанії «Sglux GmbH» (кремній-карбідних фотодетекторів, стійких до УФ випромінювання, що відрізняються чутливістю і спектральними характеристиками). Зовнішній вигляд радіометра приведено на рис. 1.4.

Прилад забезпечує зберігання в пам'яті радіометра калібрувальних значень (до 11000000 вимірних значень). Робоча температура приладу: 0 - 50 °C, динамічний діапазон радіометра рівний 5.

Наступне рішення (рис. 1.5.) представлено компанією «Dr. Gröbel UV-Elektronik GmbH»- радіометр RM-22 [42]. Сенсор цього радіометра обладнаний пам'яттю, в якій зберігаються спектральні характеристики даного сенсора, а також дані його калібрування.

У корпусі сенсора RM-12 [43] розміщено сенсор температури для вимірювання температури всередині УФ сенсора і відображення цієї температури на екрані радіометра RM-22.

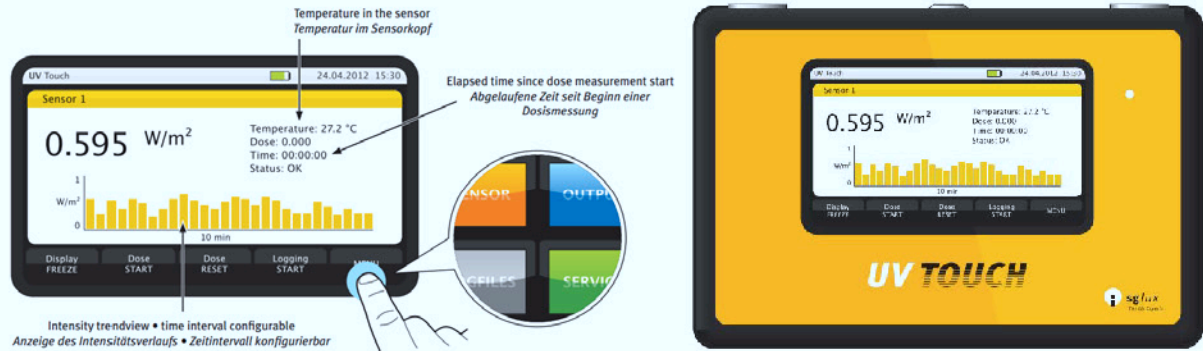


Рис. 1.4. Зовнішній вигляд радіометра UVTOUCH фірми «Sglux GmbH» [41]



Рис. 1.5. Зовнішній вигляд радіометра RM-22 та сенсорних головок RM-12, компанії «Dr. Gröbel UV-Elektronik GmbH» [42]

Вимірювальна головка забезпечена інтегрованим дифузором, який служить для косинусних поправок, які необхідні при неперпендикулярному напрямку випромінювання. Сигнал від сенсора подається в радіометр через екранований кабель, що зменшує шуми і завади.

Ще один радіометр представлено фірмою CureUV - SPDIUV UV Control 4C [44]. Його зовнішній вигляд подано на рис. 1.6, а основні технічні характеристики – у таблиці 1.3.



Рис. 1.6. Зовнішній вигляд радіометра SPDIUV UV Control 4C, фірми CureUV [44]

Таблиця 1.3

Основні характеристики радіометра SPDIUV UV Control 4C

Параметр	Значення
Основна похибка	$\pm 5\%$
Діапазон температури використання	від 0 до 45 °C
Калібрування	згідно із DIN EN ISO / IEC 17025

Зведемо досліджувані характеристики розглянутих пристроїв вимірювання УФ випромінювання в таблицю 1.4.

Характеристики розглянутих пристроїв вимірювання УФ випромінювання

Тип пристрою	Похибка	
Радіометр MU-200 фірми Apogee Instruments.	Похибка калібрування: $\pm 10\%$ Температурна чутливість: $\sim 0,1\%$ на $^{\circ}\text{C}$	
Вимірювач C9536	Розкид струмів сенсорів залежить від діапазону вимірювань	0,5 – 0,66 (32%); 2,2 – 2,9 (25%); 4,4 – 5,9 (25%); 12 – 16 (25%).
UVTOUCH радіометр фірми «Sglux GmbH»	Температурний коефіцієнт UVTOUCH сенсора: $<0,1\%$ / К	
Радіометр RM-22, компанії «Dr. Gröbel UV-Elektronik GmbH »	Містить вбудований сенсор температури *	
Радіометр фірми CureUV - SPDIUV UV Control 4C	Похибка вимірювання $\pm 5\%$	

* додатковий температурний сенсор дозволяє вести корекцію температурної залежності сенсора.

Як показав проведений аналіз приладів та систем вимірювання ультрафіолетового випромінювання, існує багато різних систем із різною вартістю, однак всі мають невисоку точність. Переважно у вимірювальних каналах приладів домінує похибка сенсора, тому актуальною є потреба її детального аналізу. Недоцільно покращувати інші блоки приладів та систем, поки домінує похибка сенсора.

1.3 Аналіз сенсорів ультрафіолетового випромінювання та методів підвищення їх точності

Як було показано вище, а також у публікації [1] розглянуто декілька видів фотоелектричних детекторів (сенсорів), серед яких: термодетектори, фотографічні детектори, фотоемісійні детектори, надпровідні детектори, напівпровідникові детектори. Всі вони відрізняються різними фізичними принципами дії, що лежать в основі їх роботи, характеристиками, межами застосувань, ціною. Серед розглянутих детекторів, зважаючи на кількість переваг (зокрема: широкий робочий спектр, нечутливість до видимого випромінювання, добру лінійність, високу квантову ефективність, широкий динамічний діапазон, можливість виготовлення великих зображаючих матриць, малу ємність, малу чутливість до темнових струмів,) та відносно невелику ціну, напівпровідникові детектори є найкращими для використання при розробці радіометрів, портативних дозиметрів, для медичних установок, для виробничих вимірювань, у системах екологічного моніторингу тощо, як прості, дешеві та ефективні пристрої.

Серед виробників ультрафіолетових фотодіодів можна виділити Hamamatsu [45], Sglux GmbH [46], LaserComponents [47] та Ams AG [48], ІТТ [36]. Розглянемо основні фотодіоди і фотодіодні сенсори, що пропонуються виробниками на ринку, а також їхні характеристики.

Сенсор SU-100 має наступні характеристики [38] (таблиця 1.5).

Таблиця 1.5

Основні характеристики сенсора SU-100

Параметр	Значення
Чутливість	0,20 mV на $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 0,61 mV на W m^{-2}
Похибка калібрування	$\pm 10 \%$

Продовження таблиці 1.5

Параметр	Значення
Нестабільність довгострокова (Long-term Drift)	< 3 % у рік
Нелінійність	< 1 % (до 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Температурна чутливість	приблизно 0,1 % на $^{\circ}\text{C}$

Фірмою Hamamatsu пропонуються фотодіоди двох основних груп: фотодіоди на основі кремнію (*Si*) та лавинні фотодіоди (ЛФД). Серед фотодіодів на основі *Si* пропонується більше 140 типів фотодіодів та більше 20 фотодіодних матриць, які в свою чергу, поділяються на кремнієві фотодіодні матриці та кремнієві сегментовані фотодіоди. Розглянемо приклади.

Основою одного з сенсорів Hamamatsu є кремнієвий УФ фотодіод S1226 (виробництва «Hamamatsu Photonics KK» [49]) для діапазону від УФ до видимої області випромінювання мало чутливий до інфрачервоного випромінювання (таблиця 1.6).

Таблиця 1.6

ФД S1226 виробництва фірми «Hamamatsu Photonics KK»

Параметр	Значення струму	Значення допустимого відхилення
Струм короткого замикання при 25 $^{\circ}\text{C}$, освітленості 1000 люкс і довжині хвилі - 200 нм:	0.5 – 0.66	32% ($\pm 16\%$)
	2.2 – 2.9	25% ($\pm 12,5\%$)
	4.4 – 5.9	25% ($\pm 12,5\%$)
	12 – 16	25% ($\pm 12,5\%$)

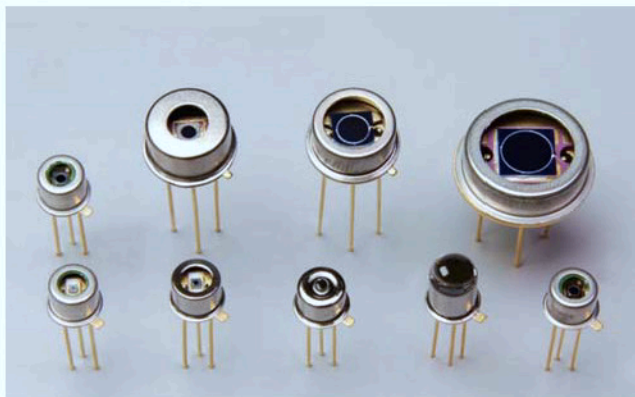
ЛФД фірми Hamamatsu [50], поділяються на три групи: кремнієві лавинні ФД, *InAlAs* ЛФД та кремнієві масиви ЛФД.

Типовим представником кремнієвого ЛФД є фотодіоди серії S12023 [51] рис. 1.7, параметри якого представлені у табл. 1.7.

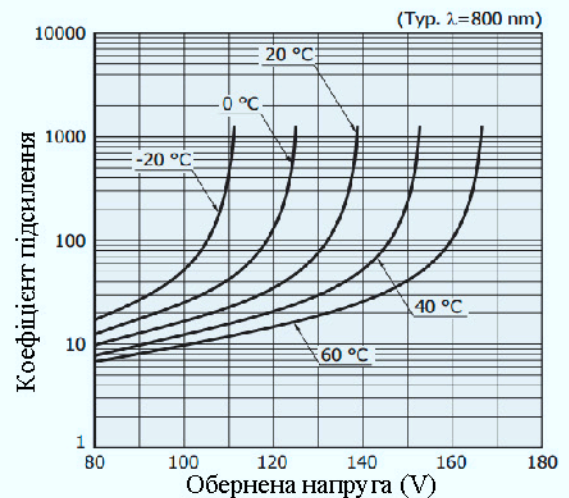
При зворотному режимі включення, даний фотодіод не підходить для вимірів через те, що внаслідок зміни температури, в сім разів міняється коефіцієнт перетворення (рис. 1.7 б). Температурний коефіцієнт його граничної напруги сягає приблизно $0,5 \text{ \%}/^\circ\text{C}$, що надто багато для вимірювальних систем.

Наступна група – *InAlAs* ЛФД G8931-04 [52] рис. 1.8, які можуть використовуватись для високочастотних застосувань (до 2,5 Гб/сек) у оптоволоконних мережах зв'язку. Однак для вимірів УФ випромінювання він практично не придатний.

ФД S1226-18BQ [5], зовнішній вигляд якого представлено на рисунку 1.9, має характеристики, що наведено у таблиці 1.8.



(a)



(б)

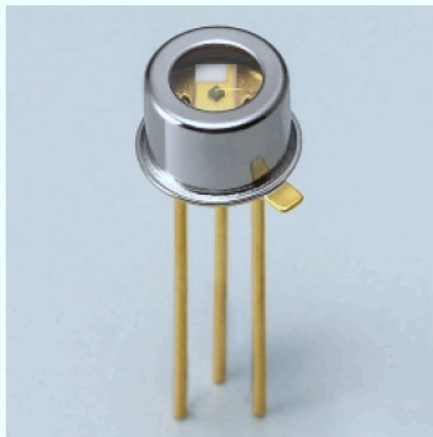
Рис. 1.7. ЛФД серії S12023 фірми Hamamatsu [51]:

а) зовнішній вигляд ЛФД серії S12023;

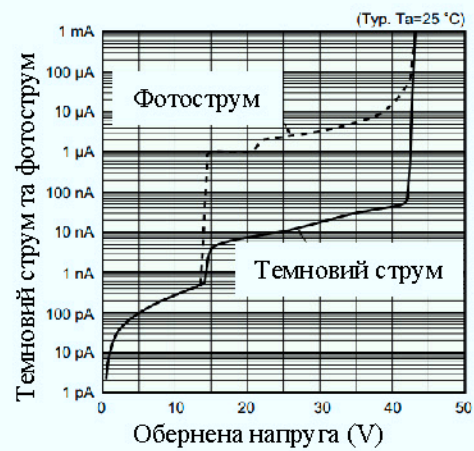
б) графік залежності коефіцієнту підсилення від оберненої напруги.

Електричні та оптичні характеристики ЛФД серії S12023 при температурі оточуючого середовища $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$.

Тип	Діапазон спектральної чутливості λ , (нм)	Довжина хвилі пікової чутливості λ_p , (нм)	Фоточутливість, при $\lambda=800$ нм, (A/W)	Квантова ефективність, при $\lambda=800$ нм, (%)	Напруга пробної, ($I_d=100\text{ }\mu\text{A}$)		Температурний коефіцієнт, ($V/^\circ\text{C}$)	Темновий струм		Гранична частота, (MHz)	Загальна ємність	Надлишковий струмовий шум	Коефіцієнт підсилення						
					Тип (V)	Макс. (V)		Тип. (nA)	Макс. (nA)										
S12023-02	від 400 до 1000	800	0,5	75	150	200	0,65	0,05	0,5	1000	1	0,3	100						
S12023-05								0,1	1					900	2				
S12051								0,2	2										
S12086								0,5	5							400	10		
S12023-10								1	10									120	40
S12023-10A								3	30										
S3884																			
S2384																			
S2385																			



(a)



(б)

Рис. 1.8. *InAlAs* ЛФД G8931-04 фірми Hamamatsu [52]:

а) зовнішній вигляд ЛФД G8931-04;

б) графік залежності темного струму та фотоструму від оберненої напруги.

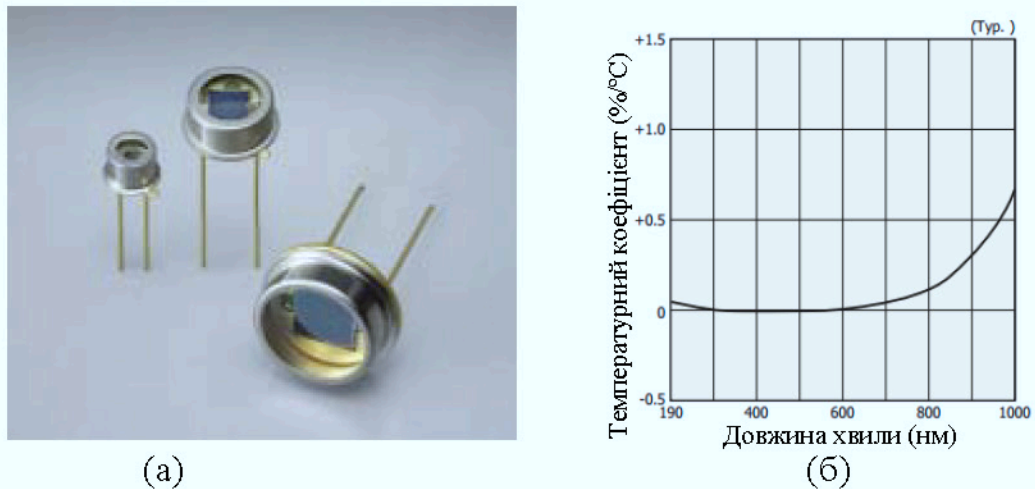


Рис. 1.9. ФД S1226-18BQ фірми Hamamatsu [5]:

а) зовнішній вигляд фотодіоду S1226-18BQ;

б) графік залежності температурного коефіцієнту від довжини хвилі.

Таблиця 1.8

Оптичні характеристики ФД S1226-18BQ при температурі оточуючого середовища $T_A = 25^\circ\text{C}$

Тип	Діапазон спектральної чутливості λ , (нм)	Довжина хвилі пікової чутливості λ_p , (нм)	Фото-чутливість, (A/W) 200 nm		Струм короткого замикання при 100 lx		Темновий струм (pA)	Температурний коефіцієнт, (раз /°C)	Час збудження (μs)	Загальна ємність (pF)	Опір шунта		Потужність еквівалентна шуму ($\text{W/Hz}^{1/2}$)		
			Мін.	Тип.	Мін. (μA)	Тип. (μA)					Мін. (G Ω)	Тип. (G Ω)			
S1226-18BQ	190-1000	720	0.10	0.12	0,5	0,66	2	1,12	0,15	35	5	50	$1,6 \cdot 10^{-15}$		
S1226-18BK	320-1000		-	-	-	-	-								
S1226-5BQ	190-1000		0.10	0.12	2,2	2,9	5		0,5	160	2	20		$2,5 \cdot 10^{-15}$	
S1226-5BK	320-1000		-	-	-	-	-		-	-	-	-		-	
S1226-44BQ	190-1000		0.10	0.12	4,4	5,9	10		1	500	1	10		$3,6 \cdot 10^{-15}$	
S1226-44BK	320-1000		-	-	-	-	-		-	-	-	-		-	-
S1226-8BQ	190-1000		0.10	0.12	12	16	20		2	1200	0,5	5		$5,0 \cdot 10^{-15}$	
S1226-8BK	320-1000		-	-	-	-	-		-	-	-	-		-	-

Як видно зі значень фоточутливості сенсора S1226-18BQ, її зміна сягає $\pm 10\%$.

Наступний приклад - охолоджуваний за допомогою термоелектричної батареї УФ фотодіод S2592/S3477 із вбудованим терморезистором [6] (рис. 1.10). Його електричні та оптичні характеристики наведено в таблиці 1.9.

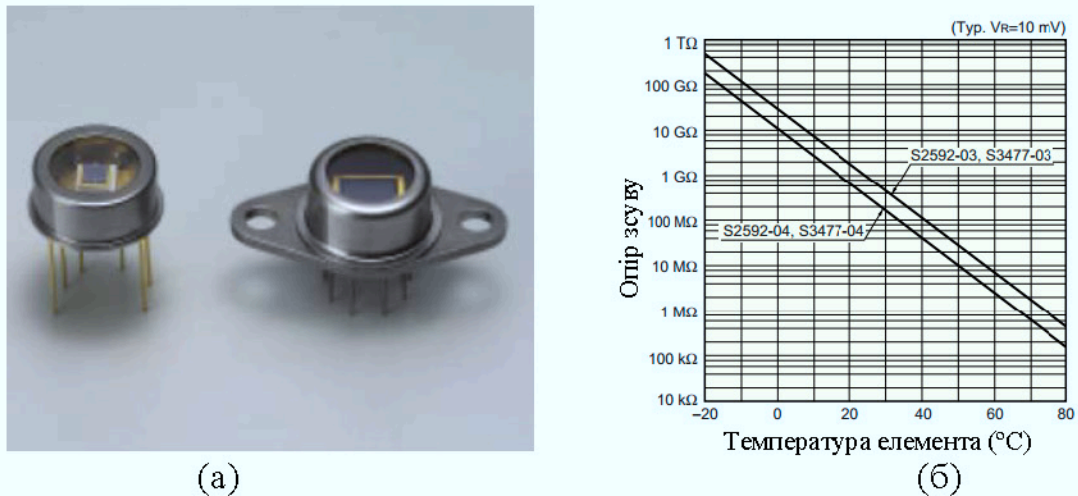


Рис. 1.10. Термоелектрично охолоджуваного УФ ФД із вбудованим терморезистором S2592/S3477 фірми Hamamatsu [6]:

- а) зовнішній вигляд ФД S2592/S3477;
 б) графік залежності опору зсуву від температури елемента.

Таблиця 1.9

Електричні та оптичні характеристики ФД S2592/S3477 при температурі оточуючого середовища $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$

■ Electrical and optical characteristics (Typ. $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Condition	S2592-03	S3477-03	S2592-04	S3477-04	Unit
Spectral response range	λ		190 to 1100				nm
Peak sensitivity wavelength	λ_p		960				nm
Photo sensitivity	S	$\lambda = \lambda_p$	0.5				A/W
Short circuit current	I_{sc}	100 lx, 2856 K	5		28		μA
Dark current	I_D	$V_R = 10\text{ mV}$	10		25		pA
Temperature coefficient of dark current	$TCID$		1.15				times/ $^\circ\text{C}$
Rise time	t_r	$V_R = 0\text{ V}$, $R_L = 1\text{ k}\Omega$	0.2		1		μs
Terminal capacitance	C_t	$V_R = 0\text{ V}$	65		380		pF
Shunt resistance	Rsh	$V_R = 10\text{ mV}$	1		0.4		G Ω
Noise equivalent power	NEP	$V_R = 0\text{ V}$, $\lambda = \lambda_p$	8.1×10^{-15}		1.3×10^{-14}		W/Hz ^{1/2}
Cooling temperature	ΔT		35				$^\circ\text{C}$

Для стабілізації температурних параметрів роботи фотодіода виробники рекомендують використовувати температурний контролер типу S1103-04, структура якого наведена рис. 1.12 [6].

Таке рішення дозволяє стабілізувати температуру у просторі, що оточує кристал фотодіода, але не може визначити або стабілізувати температуру самого кристалу.

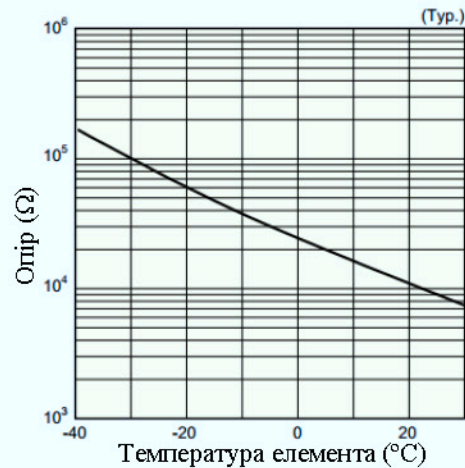


Рис. 1.11. Графік залежності опору терморезистора від температури фотодіода S2592/S3477 фірми Hamamatsu [6].

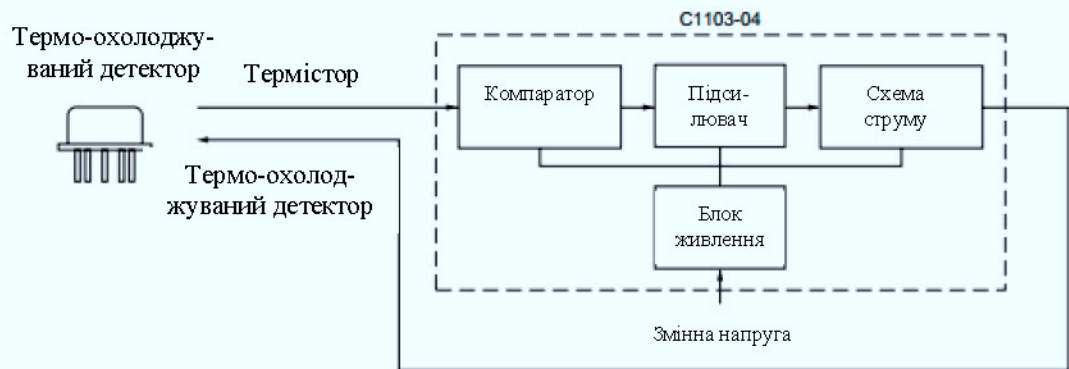


Рис. 1.12. Схема стабілізації температурних параметрів роботи фотодіода S2592/S3477 [6].

У групі кремнієвих фотодіодних масивів (матриць) присутній, наприклад, 16 - елементний фотодіодний масив серії S4111/ S4114 [53] рис. 1.13.

Наступна група - сегментовані фотодіоди кремнієвого типу. Це кремнієві PIN фотодіодні масиви, що містять від 2-х до 4-х елементів, чутливих у областях спектру від УФ до близької до інфрачервоної області. Зовнішній

вигляд 4-х елементного PIN фотодіоду серії S4349 [7] показано на рис. 1.14. Його характеристики наведено у таблиці 1.10. Він теж має значний температурний коефіцієнт.

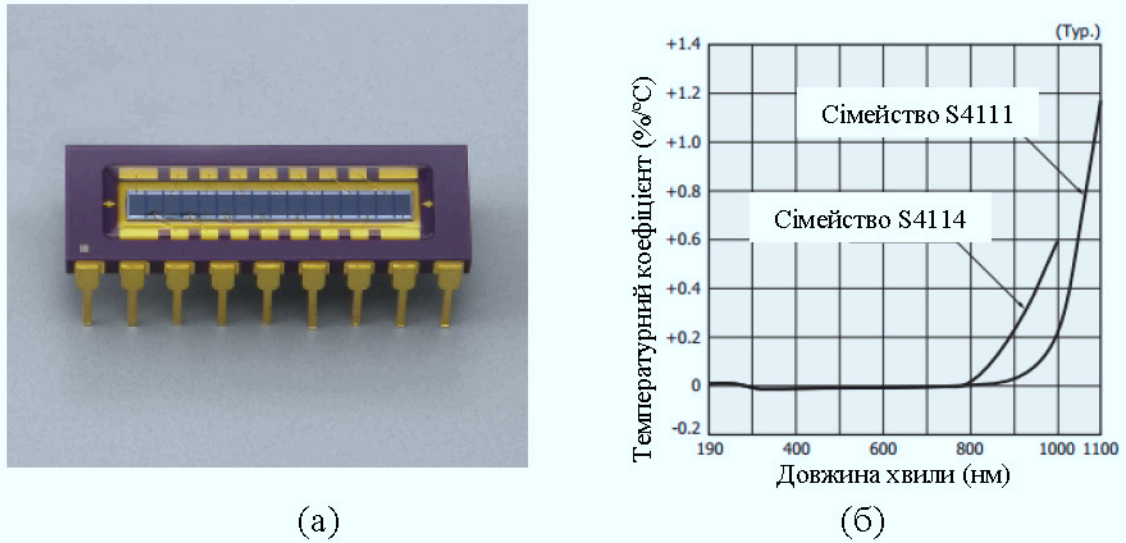


Рис. 1.13. Фотодіодний масив S4111 фірми Hamamatsu [53]:

- а) зовнішній вигляд фотодіодного масиву S4111;
 б) графік залежності температурного коефіцієнта від довжини хвилі.

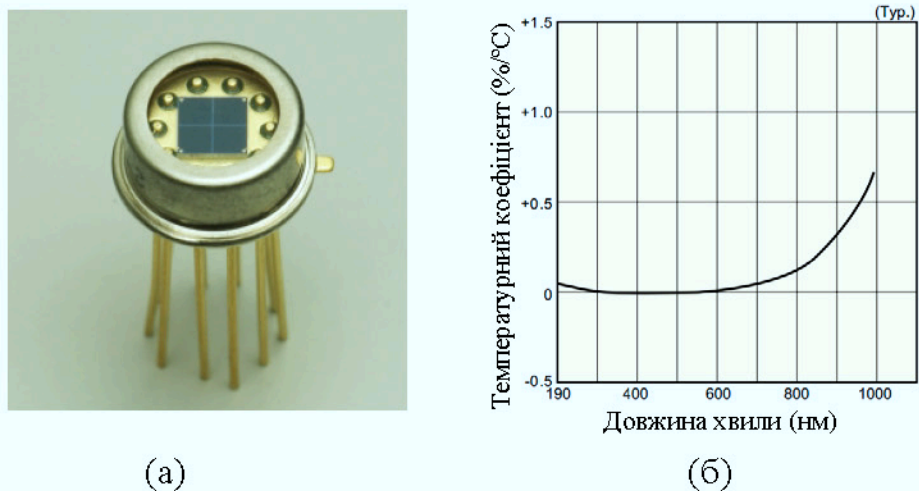


Рис. 1.14. 4-х елементний PIN ФД серії S4349 фірми Hamamatsu [7]:

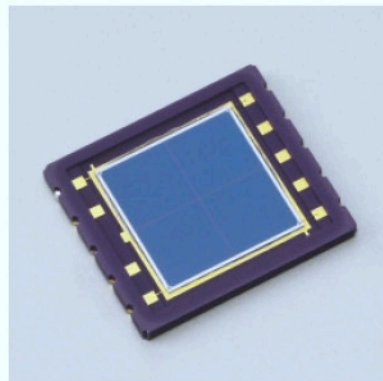
- а) зовнішній вигляд 4-х елементного PIN фотодіоду серії S4349;
 б) графік залежності температурного коефіцієнту від довжини хвилі.

Електричні та оптичні характеристики 4-х елементного PIN ФД серії S4349 при температурі оточуючого середовища $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$,
для кожного з 4-х елементів окремо.

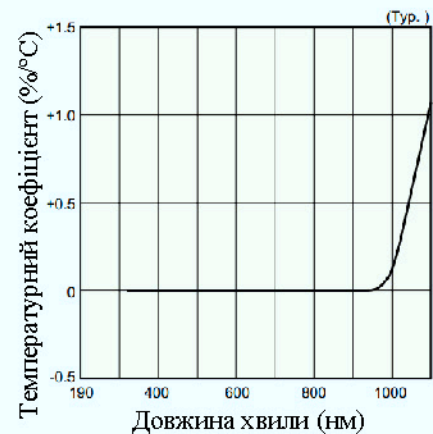
■ Electrical and optical characteristics ($T_A=25\text{ }^\circ\text{C}$, per 1 element)

Parameter	Symbol	Condition	Typ.	Max.	Unit
Spectral response range	λ		190 to 1000	-	nm
Photo sensitivity	S	$\lambda=\lambda_p$	0.45	-	A/W
Dark current	I_D	$V_R=5\text{ V}$	0.04	0.2	nA
Temperature coefficient of I_D	T_{CID}		1.12	-	times/ $^\circ\text{C}$
Cut-off frequency	f_c	$V_R=5\text{ V}$, $R_L=80\ \Omega$ $\lambda=780\text{ nm}$, -3 dB	20	-	MHz
Terminal capacitance	C_t	$V_R=5\text{ V}$, $f=1\text{ MHz}$	25	-	pF
Noise equivalent power	NEP	$V_R=5\text{ V}$, $\lambda=\lambda_p$	4.0×10^{-15}	-	W/Hz ^{1/2}
Cross-talk	CL	$V_R=5\text{ V}$, $\lambda=780\text{ nm}$	-	2	%

Наступний приклад - 4-х елементний PIN ФД для поверхневого монтажу S5980 [54] рис. 1.15. Його характеристики наведено у таблиці 1.11. Він теж має значний температурний коефіцієнт.



(a)



(б)

Рис. 1.15. 4-х елементний PIN ФД S5980 фірми Hamamatsu [54]:

- а) зовнішній вигляд 4-х елементного PIN ФД S5980;
- б) графік залежності його температурного коефіцієнту від довжини хвилі.

Таблиця 1.11

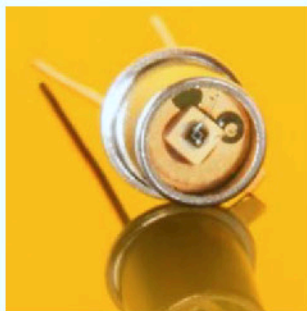
Електричні та оптичні характеристики 4-х елементного PIN ФД S5980 при температурі оточуючого середовища $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$, для кожного з 4-х елементів окремо.

■ Electrical and optical characteristics ($T_A=25\text{ }^\circ\text{C}$, per 1 element)

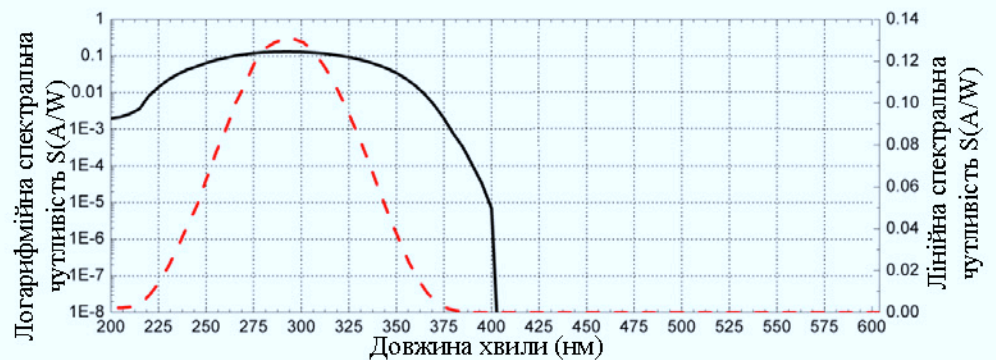
Parameter	Symbol	Condition	S5980		S5981		S5870		Unit
			Typ.	Max.	Typ.	Max.	Typ.	Max.	
Spectral response range	λ		320 to 1100	-	320 to 1100	-	320 to 1100	-	nm
Photo sensitivity	S	$\lambda=\lambda_p$	0.72	-	0.72	-	0.72	-	A/W
Dark current	I_D	$V_R=10\text{ V}$	0.3	-	0.6	-	2	-	nA
Temperature coefficient of I_D	T I_D		1.15	-	1.15	-	1.15	-	times/ $^\circ\text{C}$
Cut-off frequency	f_c	$V_R=10\text{ V}$, $R_L=50\text{ }\Omega$, $I_D=3\text{ }\mu\text{A}$	25	-	20	-	10	-	MHz
Terminal capacitance	C_t	$V_R=10\text{ V}$, $f=1\text{ MHz}$	10	-	35	-	50	-	pF
Noise equivalent power	NEP	$V_R=10\text{ V}$, $\lambda=\lambda_p$	1.4×10^{-14}	-	1.9×10^{-14}	-	3.5×10^{-14}	-	$\text{W/Hz}^{1/2}$

Фірмою Sglux пропонується фотодіоди із різними параметрами та характеристиками [46]. Розглянемо основні з них.

Фотодіод на основі карбід кремнію - SG01M-18, (ціна 49€) зовнішній вигляд якого показано на рис. 1.16 [9]. Його характеристики наведено у таблиці 1.12.



(a)



(б)

Рис. 1.16. ФД SG01M-18 фірми Sglux [9]:

а) зовнішній вигляд фотодіоду SG01M-18;

б) графік залежності спектральної чутливості від довжини хвилі.

Таблиця 1.12

Електричні та оптичні характеристики ФД SG01M-18 при температурі оточуючого середовища $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$.

Parameter	Symbol	Value	Unit
General Characteristics ($T=25^\circ\text{C}$)			
Active Area	A	0,20	mm ²
Dark current (1V reverse bias)	I_d	1	fA
Capacitance	C	75	pF
Short circuit (10mW/cm ² at peak)	I_0	2600	nA
Temperature coefficient	T_c	<-0,1	%/K
Spectral Characteristics ($T=25^\circ\text{C}$)			
Max. spectral responsivity	S_{\max}	0,130	AW ⁻¹
Wavelength of max. spectral resp.	λ_{\max}	300	nm
Responsivity range ($S=0,1 \cdot S_{\max}$)	-	220 ... 360	nm
Visible blindness ($S_{\max} / S_{>405\text{nm}}$)	VB	$>10^{10}$	-

Як видно з таблиці 1.12, температурний коефіцієнт цього сенсора менший, але він занадто великий для вимірювальних систем.

Справа в тому, що великі температурні коефіцієнти ($\pm 0,1\%/K$ та більше), вимагають корекції похибок за температурою кристалу ФД (який нагрівається випромінюванням УФВ), а не за температурою корпусу.

Фірмою «Sglux GmbH» пропонується сенсор UVTOUCH [55], температурний коефіцієнт якого аналогічний іншим (таблиця 1.13).

Таблиця 1.13

Основний параметр сенсора UVTOUCH

Параметр	Значення
Температурний коефіцієнт UVTOUCH сенсора:	<0,1% / K

Також фірмою «Sglux GmbH» пропонуються фотодіоди, які можуть використовуватися в якості сенсора для УФ вимірювача. Наприклад, кремнієво-карбідний фотодіод, чутливий до ультрафіолету, SG01L-18ISO90 [56], з наступними параметрами, вказаними в таблиці 1.14.

Основні параметри фотодіоду SG01L-18ISO90 [56]

Параметр	Значення
Температурний коефіцієнт	$<+ 0,1\% / \text{K}$
Робочий температурний діапазон	$-55 \dots +170 \text{ }^\circ\text{C}$

Через малі значення темного струму (фемптоампери) цього фотодіоду – існує можливість вимірювання УФ випромінювання з малою величиною інтенсивності. Також з даним кремній-карбідним фотодіодом можливі широкосмугові вимірювання без фільтрів або ж вузькосмугове вимірювання з фільтрами діапазонів випромінювання УФ А, УФ В, УФ С або вимірювання відповідно формі еритемної кривої.

Також існують інші фотодіоди фірми «Sglux GmbH», що виконані на інших основах, таких як GaN та AlGaN [57]. Однак їх параметри, як сенсорів УФВ, ще гірші, ніж розглянутих ФД.

Наступний сенсор, що пропонується, виробляється фірмою Dexterresearch - ST120 DUAL (рис. 1.17), має додатковий термістор у корпусі сенсора [58].

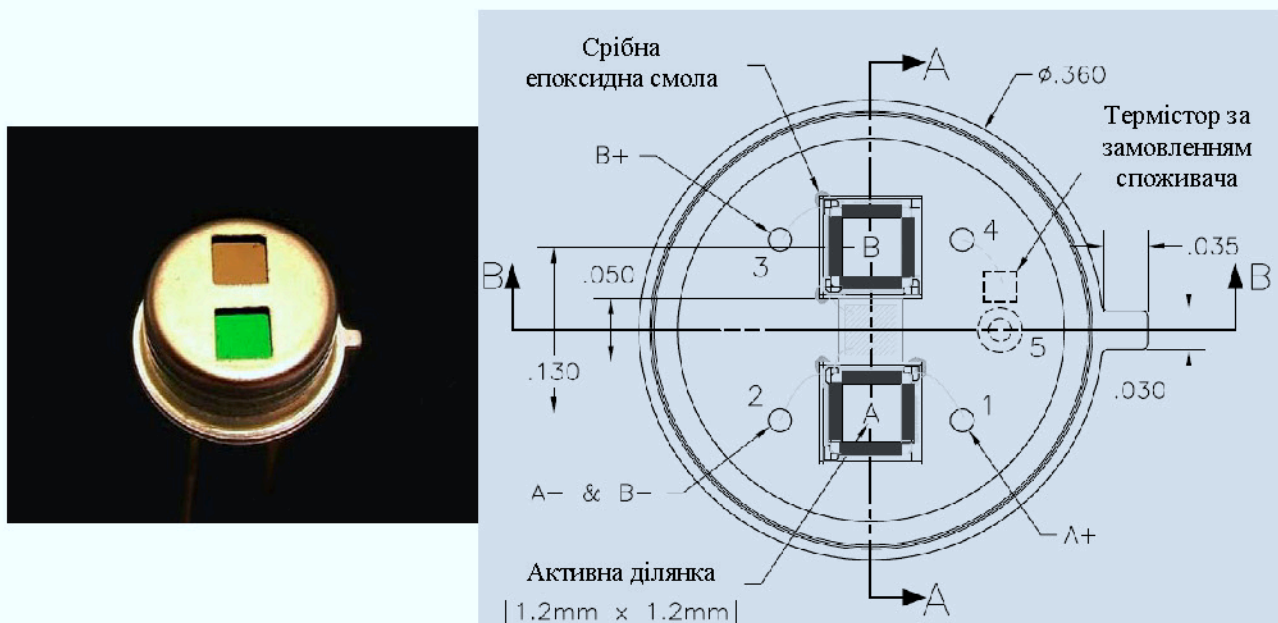


Рис. 1.17. Зовнішній вигляд сенсора ST120 DUAL фірми Dexterresearch [58].

В цьому сенсори передбачено додатковий сенсор температури (термістор), який можна використати як у складі систем термостабілізації корпусу ФД, так і в складі системи корекції температурних похибок ФД. Однак ефективність такої термостабілізації або корекції все одно буде невисока.

Таким чином, в §1.3 розглянуто доступні на ринку напівпровідникові фотодіоди різних типів, зокрема, лавинні фотодіоди, *Si*, *InP*, *InAlAs* та їхні характеристики. Проведений аналіз показав, що в наслідок великого розкиду параметрів (до 25%) [5 - 7], великого температурного коефіцієнту (до 0,1%/°C) [8, 9], великого та нелінійного впливу освітлення на температурний коефіцієнт (до 7%) [1, 10], необхідна корекція похибок ФД та вимірювання температури кристалу ФД, а не оточуючого середовища. Слід відзначити, що корекція мусить мати високу точність. Тому доцільно розглядати ФД як багатопараметричний сенсор (БПС). Такий підхід значно ускладнить апаратне забезпечення, яке буде взаємодіяти з ФД, а також опрацювання результатів вимірювання. Однак цей підхід перспективний з точки зору підвищення точності вимірювання рівня УФВ, тому його слід розглянути детально.

1.4 Аналіз методів обробки сигналів багатопараметричних сенсорів

Останнім часом все більше розповсюдження отримують БПС [23, 24, 59 - 62], тобто сенсори, які мають змогу одночасно вимірювати кілька фізичних величин. Для традиційних сенсорів вихідний сигнал залежить, в основному, від однієї вимірюваної фізичної величини. Залежність вихідного сигналу не від вимірюваної фізичної величини вважають недоліком, який зумовлює похибку сенсора. В БПС вихідний сигнал цілеспрямовано залежить від декількох фізичних величин. Їх найчастіше виготовляють за тонкоплівковою або інтегральною технологією і використовують в хімічній промисловості, різноманітних системах безпеки, екологічному моніторингу та в інших областях [62 - 68]. В цих галузях БПС мають суттєві переваги – можливість вимірювання великої кількості фізичних величин, які часто не можна виміряти іншими

сенсорами, простота, відносно мала ціна. Функції перетворення двопараметричних сенсорів є поверхнями у координатах зміни окремих фізичних величин і можуть мати вигляд, наприклад, поданий на рис. 1.18 [69, 70].

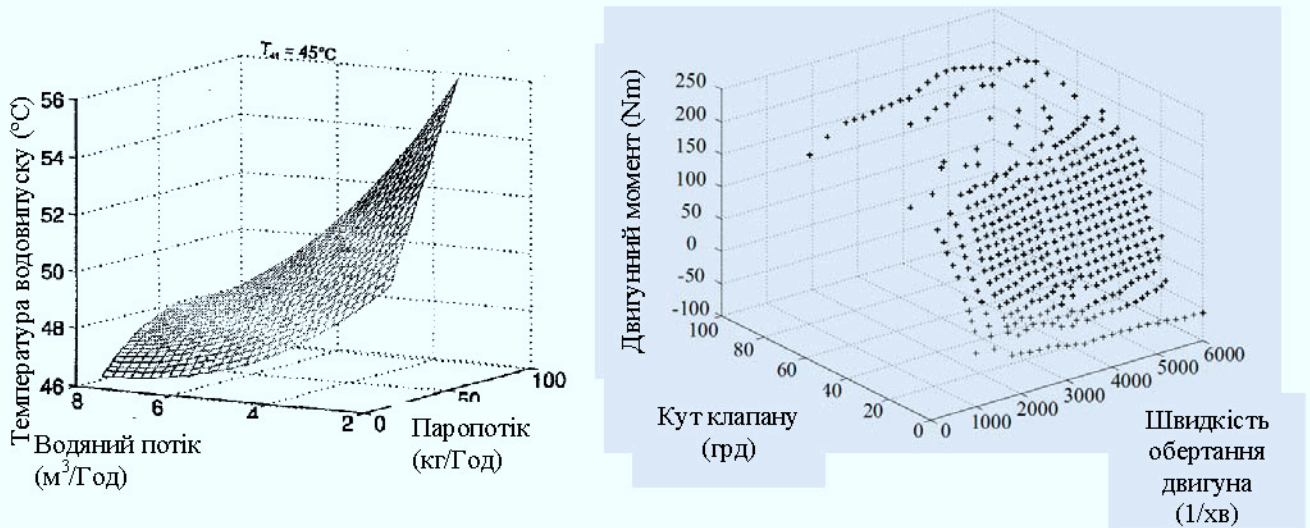


Рис. 1.18. Поверхні функції перетворення двопараметричного сенсора

Для обробки сигналів БПС необхідно ідентифікувати (визначити) їх функцію перетворення у кожній точці відповідно до значень параметрів, що сприймаються сенсором.

У [71] проведено кількісне порівняння серед чотирьох алгоритмів, три з яких базуються на застосуванні чисельних методів: шматково-лінійна інтерполяція [72], поліноміальний прогресивний метод [73] та покращений поліноміальний прогресивний метод [74]. Четвертий розглянутий метод базується на штучних нейронних мережах (ШНМ). Щоб вибрати найкращий метод ідентифікації, автори скористались кроками, пропонованими у [75]:

1. Симуляція відгуку сенсора. Найважливіша інформація, яка необхідна для цього кроку – максимальна відносна нелінійність ФП сенсора (МПНВП), (maximum percentage of non-linearity relative error – MPNRE). MPNRE - це максимальне значення відносної похибки, отримане шляхом порівняння вихідного сигналу сенсора із прямою, що відповідає діапазону вимірювання. MPNRE можна отримати або із паспорта сенсора або експериментально.

Наприклад, інфрачервоний сенсор Sharp GP2Y0A02YK, який вимірює відстань до об'єкта, має MPNRE - 46,7 %.

2. Використання для симуляції відгуку сенсора рівняння

$$V_0 = \left(1 - e^{-(q_i/m)}\right) \quad (1.1)$$

де V_0 – симуляція вихідної напруги сенсора;

q_i – вхідна змінна величина сенсора;

m – змінна, що характеризує нелінійність MPNRE для V_0 .

Наприклад, при значеннях q_i від 1 до 100 та m між 1 і 95, то MPNRE для V_0 буде між 94,3 % і 12 %, як показано на рис. 1.19.

3. Оцінка реакції методу із використанням різної кількості точок – зважаючи на вимоги до обчислювальної складності, до MPNRE та кількості точок ідентифікації, порівняти результати і вибрати найбільш вигідний метод.

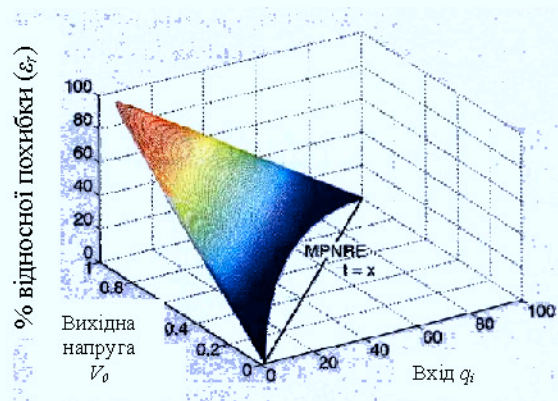


Рис. 1.19. Симуляція відклику сенсорного елемента за формулою (1.1) [71]

Таблиця 1.15. підсумовує кількісний аналіз між розглянутими методами ідентифікації, що дозволяє вибрати кращий метод ідентифікації для кожної індивідуальної ситуації. Як згадувалося вище, при виборі методу ідентифікації розробник повинен знати тільки MPNRE сенсора.

Як видно з таблиці 1.15, шматково-лінійна інтерполяція та поліноміальний метод мають близькі параметри для $N = 5, 6, 7$ точок визначення ФП.

Результат порівняння розглянутих методів ідентифікації

Кількість точок визначення ФП (N)	Значення MPNRE, яке може виправити метод ідентифікації			
	Шматково-лінійна інтерполяція (Piecewise)	Поліноміальний прогресивний метод (Polynomial)	Покращений поліноміальний прогресивний метод (Improved Polynomial, IPPM)	Метод штучних нейронних мереж (Artificial Neural Network, ANNM)
N = 5	15,4%	21,4%	25,0%	33,8%
N = 6	23,3%	25,5%	37,4%	42,9%
N = 7	33,0%	30,1%	45,5%	53,1%
N = 8	38,4%	32,2%	35,5%	56,6%

Шматково-лінійна інтерполяція краща при $N = 8$. Для $N = 8$ не рекомендується застосовувати поліноміальний метод через нестабільність отримуваних результатів інтерполяції – це називають “перенавчанням” (перепідгонкою, *overfitting*) [76]. Покращений поліноміальний прогресивний метод (ПППМ), (IPPM) з 7-ма точками калібрування може виправити похибки максимальної нелінійності до 45,5 %, але тут потрібно застосовувати спеціальний процес вибору кращого порядку. Найкращий результат при 1% MPNRE (максимальною невиключеною нелінійністю) забезпечує метод ШНМ (ANNM) – він може виправити максимальну нелінійність до 56,6 %.

Аналіз методів розпізнавання вихідних сигналів БПС також здійснювали дослідники на багатьох типах вхідних даних [60, 77 - 79] та у специфічних предметних областях [23, 24, 80, 81].

Наприклад, Дерде та Массарт [77] проводять якісний аналіз методів класифікації популярних в загальній хімометрії, зокрема методів гнучкого незалежного моделювання аналогій класу (ГНМАК) (Soft Independent Modeling of Class Analogy), дискримінантного лінійного аналізу та інших за критеріями оптимальних границь рішень, областей перекриття, точності визначення, викидів. Основні висновки цих дослідників – вибір кращого методу

розпізнавання істотно залежить від сфери застосування; кращі результати дає використання змішаних підходів.

Найбільш повний аналіз методів розпізнавання вихідних сигналів БПС здійснено в [78] – тут розглянута система, що має назву «Електронний ніс», де застосовані різні методи обробки сигналів. Автори проаналізували 23 методи розпізнавання, базовані на машинному навчанні, статистичних та нейромережевих підходах, і порівняли їх кількісно та якісно.

Найпростішим методом є метод найближчого сусіда (МНС) (Nearest Neighbor), що базується на обчисленні Евклідової відстані [79]. Метод не потребує фази навчання, розпізнавання ФП нового сенсора відбувається на основі мінімальної Евклідової відстані між точками ФП нового сенсора та точками ФП кожного сенсора з відомою ФП $d_{ij} = \sqrt{\sum_1^n (x_{ik} - x_{jk})^2}$, де x_{ik} , x_{jk} – точки ФП нового сенсора та точки ФП кожного сенсора з відомою ФП відповідно; n – кількість точок ФП.

Близькими до цього методу є метод локального K -найближчого сусіда (МЛКНС) (Local KNN) [82 - 84] та метод дискримінантного адаптивного найближчого сусіда (МДАНС) (DANN, Discriminant adaptive nearest neighbor) [82].

Метод статистичного розпізнавання [85] – лінійний дискримінантний аналіз Махаланобіса (ЛДАМ) (Mahalanobis Linear Discriminant Analysis), подібно до попереднього методу, базується на обчисленні відстані Махаланобіса між точками ФП нового сенсора та точками ФП кожного сенсора з відомою ФП, $d_{ij} = \sqrt{(x_i - \bar{x}_j)' S^{-1} (x_i - \bar{x}_j)}$, де x_i , \bar{x}_j – точки ФП нового сенсора та усереднені точки ФП сенсорів з відомою ФП; S – сумарна коваріаційна матриця, що є оцінкою загальної коваріації точок. Коваріаційні матриці слабо відрізняються між собою для кожної точки.

Метод лінійного дискримінантного аналізу Баєса (ЛДАБ) (Bayes Linear Discriminant Analysis) базується на Баєс-стратегії мінімізації ризику [79, 86].

Навчання здійснюється шляхом використання усередненого вектора для кожного класу ФП і загальної коваріаційної матриці для позиціонування дискримінанту (зваженого вектора) до задоволення критерію Баеса. Зарахування нової ФП до певного класу базується на розмірі дискримінанту – скалярного добутку вектора нової ФП з кожним зваженим вектором. Класифікація здійснюється до класу, дискримінант якого має максимальне значення.

У [77] автори розглядають застосування також методів обробки сигналів, що базуються на теорії розпізнавання паттернів (образів). Метод ГНМАК використовує методологію визначення головних компонент для побудови індивідуальної багатопараметричної моделі кожної ФП [78, 81, 87]. Модель кожного класу ФП використовує стільки головних компонент, скільки необхідно для її адекватного опису. Для аналізу та класифікації використовується теорія розпізнавання паттернів (образів). Класифікація здійснюється шляхом обчислення відхилення між новим паттерном і моделлю класу. Відповідно, новий паттерн відноситься до того класу, різниця з яким є мінімальною.

Важливою проблемою при обробці сигналів БПС є скорочення кількості вимірів (Dimensionality reduction). У [68] скорочення кількості вимірів було адаптовано до сімейства лінійних перетворень

$$Y = A^T X, \quad (1.2)$$

де X і Y є початковою та скороченою матрицями даних, відповідно.

Метою є визначення матриці A , яка збільшується (або зменшується) за заданим критерієм.

Метод аналізу головних компонентів (МАГК) (РСА, Principal component analysis) [88] вибирає матрицю A , яка зменшує середньоквадратичну відстань між початковими (вхідними) даними і тими, що відтворюються (реконструюються) із скорочених даних. У [82] показано, що така матриця A

визначається з урахуванням власних векторів коваріантної матриці відповідно до m першого доміантного власного значення, де m - результуюча розмірність. Із дискримінантного аналізу (ДА) (DA, Discriminant analysis) [89] відомо, що проєкційними напрямками є ті, які підтримують максимальну відокремленість (розділеність) класів у результуючому просторі. Тут, для оцінки класу відокремленості (розділеності), був використаний критерій Фішера [90], а напрямки проєкції обрано за результатами, отриманими при розв'язку задачі знаходження власних значень (власних векторів, eigenvalue-eigenvector). Дискримінантний компонентний аналіз (ДКА) (DCA, Discriminant component analysis) є відносно новим методом [91], який перетворює вихідний простір в ортонормований простір таким чином, що для кожного напрямку власне значення відображає степінь дискримінанти проєкції у цьому напрямку. Це досягається використанням ітераційного методу.

Метод нейронних мереж [68, 76, 92 - 97] є доволі досконалим і універсальним методом функціонального перетворення. У роботі [68] розглянуто НМ прямого поширення на базі стандартного персептрона [76, 97], що має два приховані шари, кожен з яких містить 10 нейронів. Вихідний шар містить один нейрон. Як активаційну функцію, використано логістичну функцію. Навчання кожної із мереж зупинялось ще до перенавчання (використано набір перехресної перевірки), або коли була досягнута необхідна точність (досягнуто мінімальне значення помилки тренування). Для навчання нейронних мереж було використано метод оптимізації, який має назву – реактивний пошук Табу (РПТ) (RTS, reactive Tabu search) [98]. Даний метод, на відміну від стандартних еволюційних методів, таких як алгоритм зворотного розповсюдження помилки (АЗРП) (error back-propagation) [76], дозволяє швидко вийти із локального оптимуму, попереджує циклічні повтори та є дуже надійним у формуванні початкової конфігурації, що призводить до більш ефективного навчання.

Методи тестування розглянутих методів ідентифікації ФП повинні базуватися на спеціальних тестових наборах даних [99]. У цьому дослідженні

було використано підхід «середнього значення», при якому набір даних розбивався випадковим чином на дві взаємовиключаючі підмножини – одну для навчання, а другу – для тестування. Для того, щоб результат менше залежав від методу розбивання, було використано 30 різних варіантів розбиття, розраховано вірність ідентифікації для кожного з них та усереднено результати.

Перший аналіз було проведено для повного набору даних, і його результати представлені у таблиці 1.16

Таблиця 1.16

Вірність різних класифікаторів, отримана на повному наборі даних

Класифікатор	Вірність (%)
KNN	99 ± 1
Local KNN	99 ± 1
DANN	99 ± 1
Neural Networks	100 ± 0

Наступний аналіз розглянутих методів було проведено на скороченому наборі даних. Під час аналізу змінювалась розмірність поля даних (dimensionality), до якого було застосовано методику скорочення. Результати цього аналізу представлені в таблиці 1.17.

Із цієї таблиці можна зробити наступні висновки. По-перше, якщо виключити DCA, на двовимірному скороченому наборі початкових даних, продуктивність методів ідентифікації, у порівнянні із повним набором початкових даних, майже однакова, що говорить про те, що у повному наборі початкових даних була велика надлишковість. По-друге, у багатьох ситуаціях зменшення вимірності має на меті зменшення помилки, а цього не відбувається. Швидше за все, це пояснюється тим, що надлишковість даних була джерелом шуму, а її зменшення призводить до часткового зниження шуму. ДА (DA) є найбільш придатним методом для ідентифікації, навіть, якщо його застосування обмежене кількістю даних.

Таблиця 1.17

Вірність класифікації методів розпізнавання на скороченому наборі початкових даних із використанням МАГК (PCA), ДКА (DCA) та ДА (DA) при зміні розмірності поля даних (resulting dimensionality)

Розмірність	Метод	KNN вірність (%)	Local KNN вірність (%)	DANN вірність (%)	Neural nets вірність (%)
1	PCA	92±3	93±3	92 ±3	94± 2
1	DCA	69±5	69±4	69±5	71± 4
1	DA	69±5	69±4	69±4	71± 5
2	PCA	99±1	98±1	100±0	99± 1
2	DCA	70±4	69±5	71±5	77± 4
2	DA	100±0	100±0	99±1	100± 0
3	PCA	100±0	99±1	100±0	100± 0
3	DCA	89±4	89±3	82±4	90± 2
4	PCA	99±1	99±1	99±1	99± 1
4	DCA	90±3	90±3	92±4	92± 3
5	PCA	99±1	98±1	99±1	99± 1
5	DCA	100±0	100±0	99±1	100± 0
6	PCA	99±1	99±1	99±1	99± 1
6	DCA	100±0	100±0	99±1	100± 0
7	PCA	99±1	99±1	99±1	99± 1
7	DCA	100±0	100±0	99±1	100± 0

Ще один аналіз оцінки продуктивності методів розпізнавання було проведено у [68] на наборі «фотоданих», для яких використовувалась функція виділення ознак. Ці ознаки використовуються для аналізу даних, які виділяються з часових рядів $R_j(T_i)$, по одному для кожного елемента j масиву сенсорів. Ці часові ряди були отримані шляхом періодичної дискретизації опору сенсорів. Для вирішення задачі випаровування для кожного сенсора обчислювалась максимальна відносна зміна опору.

Зазвичай [100, 101], часовий інтервал $[a, b]$ відповідає всьому часу експозиції (дії) випаровування. В більшості випадків, час експозиції не може бути дуже великим, реакція системи та аналіз отриманих даних повинна бути швидшою. Тому при аналізі виділявся мінімальний час, необхідний сенсорній системі для вирішення задачі сприйняття випаровування. Для цього зміни

опору сенсорів обчислювались у поступово зростаючому інтервалі $[0, 1 \text{ с}]$, $[0, 2 \text{ с}]$ і так далі. Тоді усі дані об'єднували у групи, які отримані в однакові інтервали $[a, b]$, створюючи, таким чином, декілька наборів початкових даних, що використовувались для тестування різних методів аналізу. Такі дані й отримали назву «фотодані» (Photo Sets). У таблиці 1.18 наведені «фотодані» для оцінки продуктивності методів розпізнавання, отримані з восьми інтервалів ($[0-1]$ $[0-2]$... $[0-8]$) секунд. Зауважимо, що вірність результату збільшується при збільшенні інтервалу вимірювання. Вірність в останньому наборі «фотоданих» є помітно високою.

Проведений у [68] аналіз продуктивності показав, що, хоча KNN, Local KNN, DANN та НМ мають майже однаковий рівень вірності, тим не менше, ці методи є дуже різними.

Таблиця 1.18

Вірність класифікації виконана на «фото даних» при зміні часових інтервалів

Часові інтервали	KNN вірність (%)	Local KNN вірність (%)	DANN вірність (%)	Neural nets вірність (%)
1	82 ± 5	81 ± 4	75 ± 6	84 ± 3
2	91 ± 2	90 ± 3	92 ± 3	94 ± 2
3	90 ± 3	91 ± 4	93 ± 3	96 ± 2
4	93 ± 3	93 ± 3	93 ± 3	96 ± 2
5	95 ± 3	94 ± 3	94 ± 3	97 ± 2
6	95 ± 2	94 ± 2	94 ± 3	97 ± 2
7	96 ± 2	95 ± 2	96 ± 2	97 ± 2
8	96 ± 2	96 ± 2	96 ± 3	97 ± 2

Для НМ їх навчання було найбільш важкою частиною. Деякі попередні тести показали, що використання алгоритму навчання RTS, замінюючи стандартний алгоритм зворотного поширення, призводить до значного поліпшення швидкості збіжності помилки навчання. Для KNN існує проблема збереження паттернів, яка може бути суттєвою при широкому наборі даних. Не зважаючи на це, він є хорошим методом, швидким і досить точним. Під час використання методу Local KNN кількість інформації, що зберігається в пам'яті,

значно збільшувалась, тому ініціалізація системи займала чимало часу. Для методу DANN потрібно дуже багато часу для виконання (ще на один або два порядки більше), через використання метричної оцінки.

У роботі [68] було показано, що метод RTS для НМ є перспективним для ідентифікації сигналів та класифікації запахів, із швидкістю, еквівалентною до KNN та інших методів. Крім цього, цей метод добре підходить для мініатюрних пристроїв. Ще було продемонстровано [68], що у завданні скорочення вимірності, метод DA може зменшити обчислювальну складність методів розпізнавання без істотної втрати інформації. Більш того, застосування методу DA знижує рівень шуму на надлишкових наборах даних, в результаті чого швидкодія була іноді кращою, ніж на не скорочених множинах даних. Аналіз «фотоданих» показав, що швидкість відгуку сенсора може бути використана як дискримінантний фактор для вирішення широкого спектру завдань БПС, зокрема сенсорів випаровування.

Модифікацією методу ШНМ є імовірнісна НМ (ІНМ) - probabilistic neural network [94, 95]. Для класифікації нового паттерну використовується функція густини імовірності, яка визначає імовірність віднесення нового паттерну до кожного класу даних. Навчання ІНМ здійснюється шляхом копіювання кожного паттерну з навчальної вибірки до схованого шару НМ та оптимізація цього шару методом перехресної перевірки. Класифікація нового паттерну здійснюється проходженням вектора паттерну через НМ. При цьому вхідний шар НМ використовується для збереження цього нового паттерну, що розпізнається, поки він послідовно проходить через схований шар. На кожному нейроні схованого шару обчислюється відстань внутрішнього добутку між новим паттерном і паттерном з вибірки навчання, збереженим в цьому схованому нейроні. За шаром схованих нейронів розміщується рівень підсумовуючих нейронів, один нейрон для кожного класу вхідних даних. Цей шар підсумовує виходи всіх схованих нейронів, що відповідають певному класу і передає результат на вихідний шар. Кількість нейронів вихідного шару відповідає кількості класів вхідних даних. На кожному нейроні вихідного шару

обчислюються значення імовірності належності нового паттерну до певного класу паттернів з навчальної вибірки.

Для деяких застосувань НМ доцільно використати метод квантування навчального вектора (КНВ) – learning vector quantization. Він допускає [102], що базова функція густини імовірності для кожного класу характеризується малим набором контрольних векторів, які визначаються за допомогою конкурентного навчання. Під час навчання контрольні вектори подаються на сховані нейрони, що випадковим чином класифікують ці вектори, і конкурентно навчаються для визначення структури простору вхідних паттернів. Початкове призначення класу з навчальної вибірки для кожного контрольного вектора здійснюється з використанням відносного розподілу класів вихідних даних, тому схований шар нейронів статистично точно представляє вихідний простір паттернів. Початкове розміщення кожного контрольного вектора представляється усередненим вектором з навчального набору. Після ініціалізації, паттерни з навчального набору випадковим чином подаються на сховані нейрони. Для кожної ітерації, нейрон, що є найближчим до даного паттерну, є нейроном-переможцем. Класифікація нового паттерну відбувається подібно до методу НС, за виключенням того, що схований шар НМ замінює навчальну вибірку.

Інші дослідники також дуже широко застосовують штучні НМ для розпізнавання вихідних сигналів БПС: НМ з радіально-базисною функцією активації [62], НМ з часовою затримкою [63], НМ адаптивного резонансу [64], самоорганізовані карти Кохонена [102], багат шаровий перцептрон з алгоритмом зворотного поширення помилки [65 – 67, 76, 96] для розпізнавання концентрацій небезпечних газів в сумішах [61, 64, 66, 67, 103, 104] у промисловості та у навколишньому середовищі, запахів та пахучих речовин [62, 63, 65] у харчовій промисловості, ідентифікації хімічних сполук у з'єднаннях напівпровідників та діелектриків у електронній промисловості [96]. Проведений аналіз показав характерну особливість для більшості застосувань нейромережевих методів: всі вони розпізнають сигнали сенсорів, що подаються від масиву сенсорів (sensors arrays). Тільки одна з названих вище робіт [61]

оперує даними, отриманими від одного БПС в різних режимах роботи, і цих даних є недостатньо для навчання НМ.

Результати порівняльного аналізу методів по вищезгаданих критеріях [62], показують, що нейромережеві методи зазвичай мають малу швидкодію. Вони є найбільш повільними і важкими з позицій навчання. Крім того, нейромережеві методи мають найбільші вимоги до пам'яті в процесі навчання. Однак слід врахувати, що фази навчання і розпізнавання в загальному випадку можуть бути розділені, а фаза навчання може здійснюватися на більш продуктивному обчислювальному засобі, це теж не можна вважати важливим недоліком [76, 105]. Іншим недоліком методу штучних НМ є необхідність вибору оптимальної структури НМ. Однак це питання вирішується на етапі попередніх експериментальних досліджень. Існують загальні рекомендації щодо вибору структури НМ [76], однак вони не завжди дають потрібний результат.

Таким чином, проведений вище аналіз показав, що автори, які досліджували методи ідентифікації ФП за допомогою НМ, відзначають, що НМ практично завжди забезпечують найкращі показники, проте вимагають довгого часу навчання та інтуїції експерта-дослідника для цілеспрямованого застосування. Тому доцільно використати нейромережеві методи для ідентифікації індивідуальних ФП ФД. Однак особливості ФП ФД (залежність чутливості по освітленості від температури) не дозволяють прямо використати відомі методи, доцільним є розроблення нових методів, які призначені для використання в системах вимірювання УФВ і забезпечують при такому використанні кращі характеристики.

1.5 Перспективні напрямки удосконалення засобів визначення рівня ультрафіолетового випромінювання і постановка задачі дослідження

Як було показано у попередніх параграфах, існуючі системи вимірювання параметрів УФВ мають малу точність. Це пов'язано, насамперед, з великими

похибками сенсорів – ФД, які випускають багато фірм. Аналіз показав, що перспективним щодо підвищення точності є перехід до індивідуальних ФП. Але ФД, крім значного розкиду параметрів та температурного коефіцієнта, характеризується значним впливом температури самого кристала ФД на ФП світлових величин. Тому був запропонований підхід до опрацювання вихідних сигналів ФД, як до сигналів БПС, де вхідними величинами є температура кристала ФД та вимірювана світлова величина, а на виході отримується значення вимірюваної світлової величини, де вплив температури кристала на результат вимірювання буде практично усунено.

Однак відомо, що для отримання результату вимірювання, який характеризується високою точністю, необхідно перейти до індивідуальних ФП ФД. При підході до сенсора як до БПС, необхідними є переходи до індивідуальних ФП ФД як по вимірюваній світловій величині, так і по температурі. Такі переходи ведуть до ряду негативних наслідків.

Першим негативним наслідком переходу до індивідуальних ФП сенсорів є втрата їх взаємозамінності. Якщо вимірювальний прилад або система налаштований на індивідуальну ФП одного сенсора (конкретного ФД), то підключення іншого сенсора (іншого ФД) веде до виникнення додаткової похибки. Така похибка може сягати подвійного допустимого розкиду параметрів сенсорів (якщо сенсори мають відхилення від номінальної ФП близькі до максимально допустимих та різного знаку). В такому випадку налаштування вимірювальної системи на номінальну (середню) ФП сенсорів веде при заміні сенсора до похибки не більше допустимого розкиду його параметрів. Тому розроблення методів переходу до індивідуальної ФП сенсорів (в нашому випадку ФД УФВ) без втрати їх взаємозамінності є важливою та цілком актуальною науково-технічною задачею.

Другим негативним наслідком переходу до індивідуальної ФП ФД, при підході до ФД як до БПС, є значне зростання трудомісткості такого переходу. Справа в тому, що для переходу до індивідуальної ФП ФД потрібно досить

багато точок повірки. Необхідну кількість цих точок можна оцінити за аналогією з іншими сенсорами при їх переході до індивідуальної ФП.

Наприклад, для платинових термометрів опору, індивідуальні ФП яких вивчалися протягом близько 100 років і мають малі відхилення від номінальної ФП (не більше 0,1...0,2% по опору), стандарти [109] визначають дві точки повірки (0°C та 100°C) для повного визначення параметрів індивідуальної ФП. Тільки для еталонних платинових термометрів опору та платинових термометрів опору, що працюють в діапазоні криогенних температур, стандарти вимагають три точки повірки. Для платино-родій - платинових термопар типу ПП стандарти [107] та наукові дослідження [108] вимагають три точки повірки. ФП та похибки цих термопар, за приблизно 150 років від їх появи, добре вивчені. Ці термопари свого часу були інтерполяційними еталонами, тобто дослідженням їх ФП займалися на рівні еталонів. Для термопар із неблагородних металів та сплавів стандарти [112] та наукові дослідження [110] вимагають (при застосуванні в широкому діапазоні температури) чотири точки повірки для визначення індивідуальних ФП. Однак ці термопари не можуть бути аналогами для визначення кількості точок повірки ФД. Вони мають при випуску відхилення від номінальної ФП не більше 1...1,2%, тобто приблизно в 10 разів менші за ФД. Аналогами для визначення кількості точок повірки ФД можуть бути так звані „сурогатні ” термопари, що створюються з підручних матеріалів на місці експлуатації та призначені для вимірювання температури в місцях, недоступних для звичайних термопар. Наприклад, для вимірювання температури в зоні ріжучої кромки токарного різця, останній ізолюють від супорта та використовують як один з електродів термопари різець-деталь. Для таких термопар у [111, 112] рекомендовано 5...7 точок повірки. Саме ці „сурогатні ” термопари можуть служити аналогами для ФД. Тобто для переходу до індивідуальної ФП ФД слід провести його повірку щонайменше в 7 точках.

Однак при підході до ФД як до БПС, що має ФП не у вигляді деякої кривої, яка показує залежність вихідного сигналу від вхідної вимірювальної величини, а у вигляді поверхні (див. рис. 1.18 та 1.19), перехід до ідентифікації

індивідуальної ФП ускладнюється. Згадана поверхня характеризує залежність вихідного сигналу ФД від двох вимірюваних фізичних величин (в нашому випадку від температури кристала ФД та вимірюваної світлової величини). Тому для переходу до індивідуальної ФП БПС необхідно ідентифікувати не криву, а поверхню, що вимагає відповідно більшої кількості точок перевірки. У загальному випадку при необхідності 7-ми перевірок для надійної ідентифікації індивідуальної ФП по кожній фізичній величині, для такої ж надійної ідентифікації індивідуальної ФП двопараметричного сенсора необхідно $7 \times 7 = 49$ точок перевірки. Зрозуміло, що така велика кількість точок перевірки робить перехід до індивідуальної ФП не виправданим, що ми і бачимо у §1.2, 1.3 при аналізі приладів, систем і сенсорів, які випускаються серійно.

Тому, без усунення вказаних двох негативних наслідків переходу до індивідуальної ФП ФД та підходу до ФД як БПС, такий перехід є недоцільним.

Метою дисертації є розроблення та дослідження нейромережевого методу підвищення точності інформаційно-вимірювальних систем ультрафіолетового випромінювання за рахунок переходу до індивідуальних функцій перетворення фотодіодних сенсорів при зниженій трудомісткості та забезпеченні взаємозамінності сенсорів.

Для досягнення поставленої мети розв'язано наступні завдання:

- 1) проведено аналіз відомих методів і систем вимірювання УФВ та сенсорів УФВ для визначення основних напрямів підвищення їхньої точності;
- 2) розроблено та досліджено метод ідентифікації індивідуальних ФП БПС зниженої трудомісткості за результатами їх експериментальних досліджень;
- 3) досліджено завадостійкість розробленого методу ідентифікації індивідуальних ФП БПС щодо впливу випадкової похибки їх експериментальних досліджень;
- 4) розроблено систему автоматизованого формування навчальної вибірки для дослідження похибок запропонованого методу;
- 5) синтезовано структури та схеми вимірювальних каналів ІВС УФВ;

б) розроблено архітектуру ІВС УФВ та метод корекції похибок її компонентів, який забезпечить взаємозамінність сенсорів.

Підвищення точності ІВС УФВ можна досягти шляхом обробки сигналу ФД як БПС, де вхідні величини - температура кристала та струм КЗ ФД, а вихідна – значення освітленості. В цьому випадку доцільне використання ШНМ для розпізнавання вихідного сигналу ФД. Цей підхід може дати значний ефект від переходу до індивідуальних ФП ФД, але його трудомісткість дуже велика і він не забезпечує взаємозамінність сенсорів. Тому створення нових не трудомістких методів підвищення точності ІВС УФВ з автономним живленням, а також взаємозамінності сенсорів, є актуальною науковою задачею.

Висновки до розділу 1

Таким чином, проведений в §1.1 - 1.5 аналіз відомих методів і засобів вимірювання вихідних сигналів БПС ультрафіолетового випромінювання показав, що для підвищення точності доцільно застосувати підходи, базовані на апараті штучних НМ. У загальному, нейромережеві методи показують кращі результати розпізнавання вихідних сигналів БПС (у порівнянні з іншими підходами) завдяки їх добрим узагальнюючим властивостям та можливості самонавчання. Відомі методи розпізнавання фізичних величин на основі сигналів БПС за допомогою ШНМ. Однак ці методи використовують наперед визначену індивідуальну функцію перетворення БПС не звертаючи уваги на трудомісткість її отримання. Однак, як показано вище, для визначення індивідуальної функції перетворення кожного БПС, необхідні що найменше десятки експериментальних досліджень. Що формує задачу даного дисертаційного дослідження.

РОЗДІЛ 2. НЕЙРОМЕРЕЖЕВИЙ МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ ПЕРЕТВОРЕННЯ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ СЕНСОРІВ

2.1 Метод ідентифікації індивідуальних функцій перетворення багатопараметричних сенсорів

Як було показано в параграфі 1.2, для підвищення точності вимірювання УФ випромінювання, діодні сенсори необхідно розглядати як БПС, у яких одним з параметрів є освітленість УФ випромінювання, а другим – температура кристалу. Однак, як показано в параграфі 1.3, такі сенсори вимагають великого об'єму попередніх експериментальних досліджень для ідентифікації їх функцій перетворення. Тому першою задачею буде розроблення методу ідентифікації індивідуальних функцій перетворення таких сенсорів.

Згідно проведеному у параграфах 1.3 та 1.4 аналізу, найбільш перспективними є нейромережеві методи обробки сигналів БПС.

Розглянемо новий метод обробки сигналів БПС.

Пропонований метод [16] призначений для забезпечення високої точності ідентифікації індивідуальної функції перетворення багатопараметричного сенсора при значному скороченні необхідної кількості точок дійсної повірки шляхом прогнозу результатів повірки в інших точках з допомогою комплексу нейронних мереж, що навчалися на результатах попередньої повірки групи однотипних багатопараметричних сенсорів у кількості точок, яка є достатньою для ідентифікації індивідуальної функції перетворення багатопараметричних сенсорів цього типу із заданою точністю.

Суть методу полягає в тому, що для ідентифікації індивідуальної функції перетворення даного багатопараметричного сенсора залучається додаткова інформація про характер функції перетворення багатопараметричних сенсорів даного типу, отримана на основі результатів повірки групи однотипних

багатопараметричних сенсорів у відносно великій кількості точок n , наприклад, $n = 25...49$ (рис 2.1).

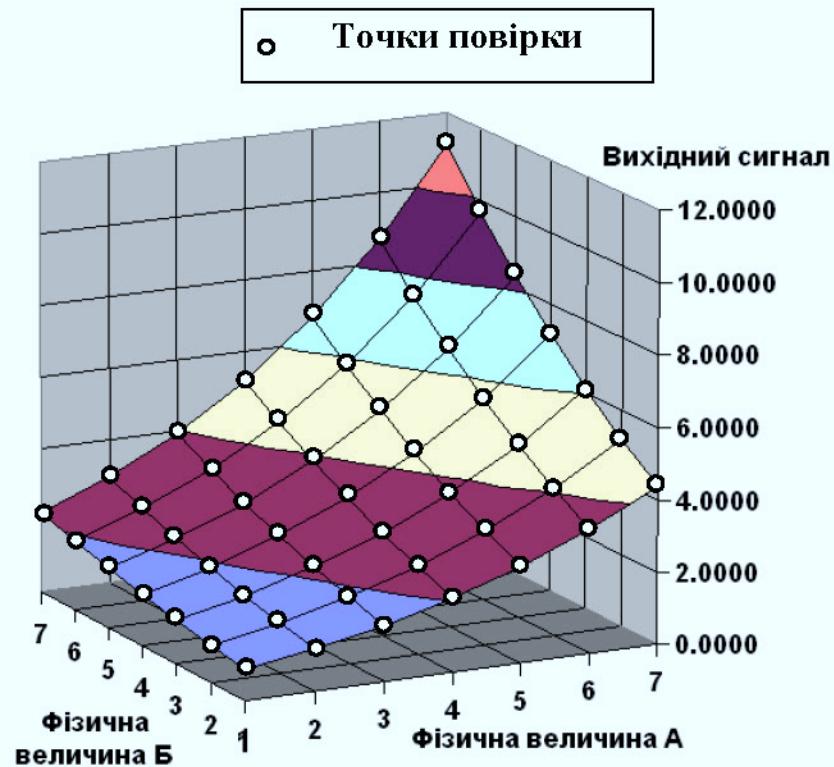


Рис. 2.1. ІФП БПС та розміщення точок повірки

Назвемо ці результати базою даних. Це дозволяє нейронним мережам виявити та узагальнити закономірності, характерні для функцій перетворення багатопараметричних сенсорів даного типу. Згідно цих виявлених характерних закономірностей та результатів повірки даного багатопараметричного сенсора в скороченій кількості точок результати його повірки в інших точках прогножуються (рис. 2.2).

Це дозволить отримати результати повірки даного багатопараметричного сенсора в повному наборі точок – як в тих, де його повірка дійсно проводилася, так і в інших точках функції перетворення, де його повірка насправді не проводилась. Основами для отримання високої точності прогнозу служать база даних повірки групи однотипних багатопараметричних сенсорів у кількості точок, яка є достатньою для ідентифікації індивідуальної функції перетворення

багатопараметричних сенсорів цього типу із заданою точністю, а також індивідуальне нейромережеве прогнозування в кожній точці згідно описаної нижче методики.

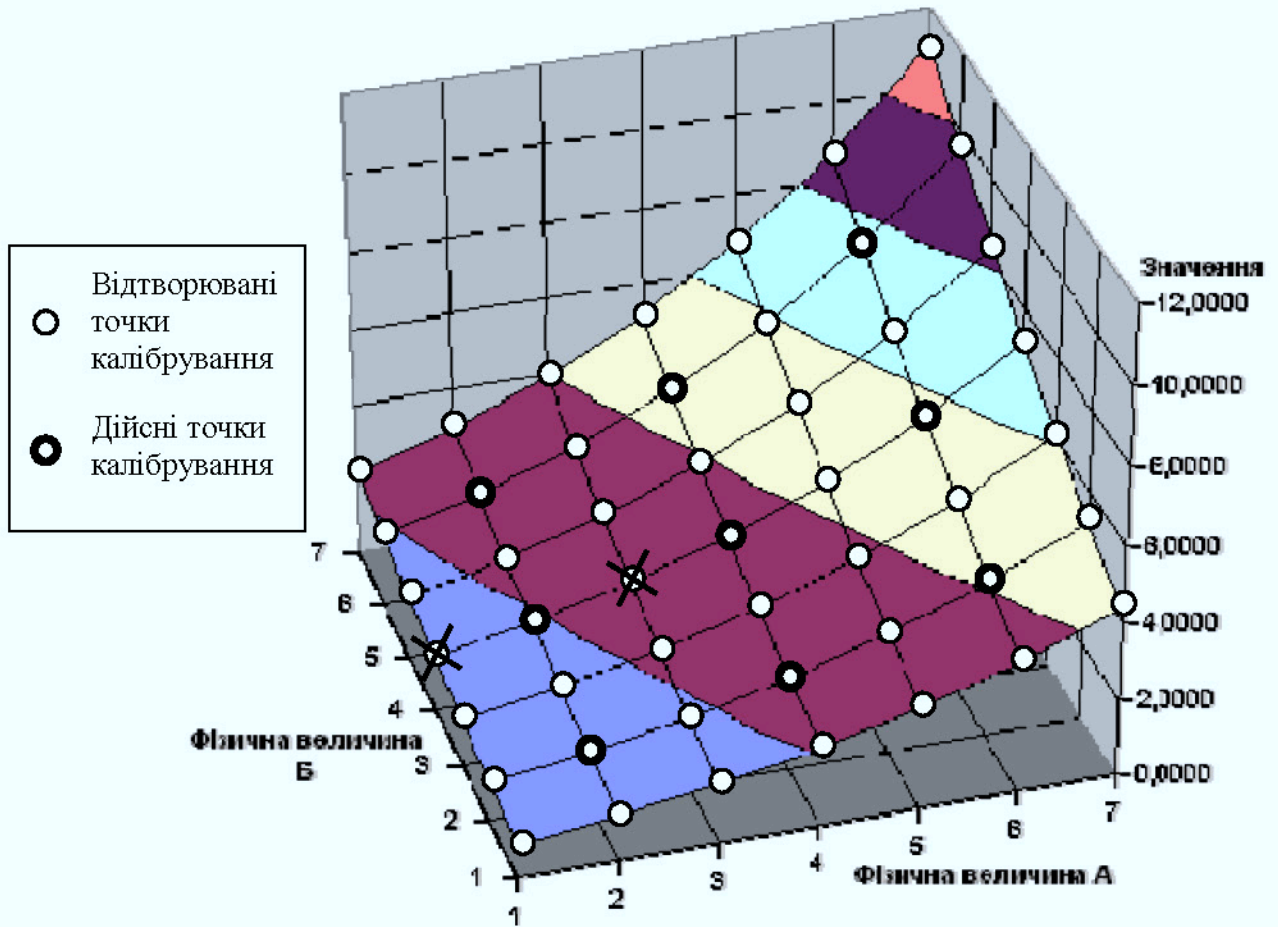


Рис. 2.2. Розміщення дослідних точок, дійсних точок калібрування і відтворюваних точок в координатах фізичних величин

Нейронні мережі множини А, позначимо як АНК (Н – номер точки прогнозованого результату повірки; К – номер варіанту конфігурації точок повірки групи однотипних багатопараметричних сенсорів, які відповідають даній мережі). Прогноз значення результату повірки даного багатопараметричного сенсора в точці Н нейронні мережі множини А ведуть на базі результатів його повірки та результатів повірки групи однотипних багатопараметричних сенсорів в точках, які належить одній прямій, що проходить через точку Н. Кількість К таких прямих (і, відповідно, нейронних

мереж) визначається кількістю прямих, які можна провести через точку H і точки дійсної повірки даного багатопараметричного сенсора.

Результати повірки групи однотипних багатопараметричних сенсорів у великій кількості точок (див. рис. 2.1) дозволяють нейронним мережам виявити та узагальнити закономірності, характерні для функцій перетворення даного типу сенсорів. При цьому використання набору нейронних мереж, кожна з яких спеціалізується на прогнозі результатів повірки в одній точці, за результатами повірки в інших точках, що кожен раз входять у строго заданий набір, дозволяє підвищити точність прогнозу. Наприклад, кожна нейронна мережа використовує результати повірки, які лежать на одній прямій з прогнозованою точкою повірки (рис. 2.3).

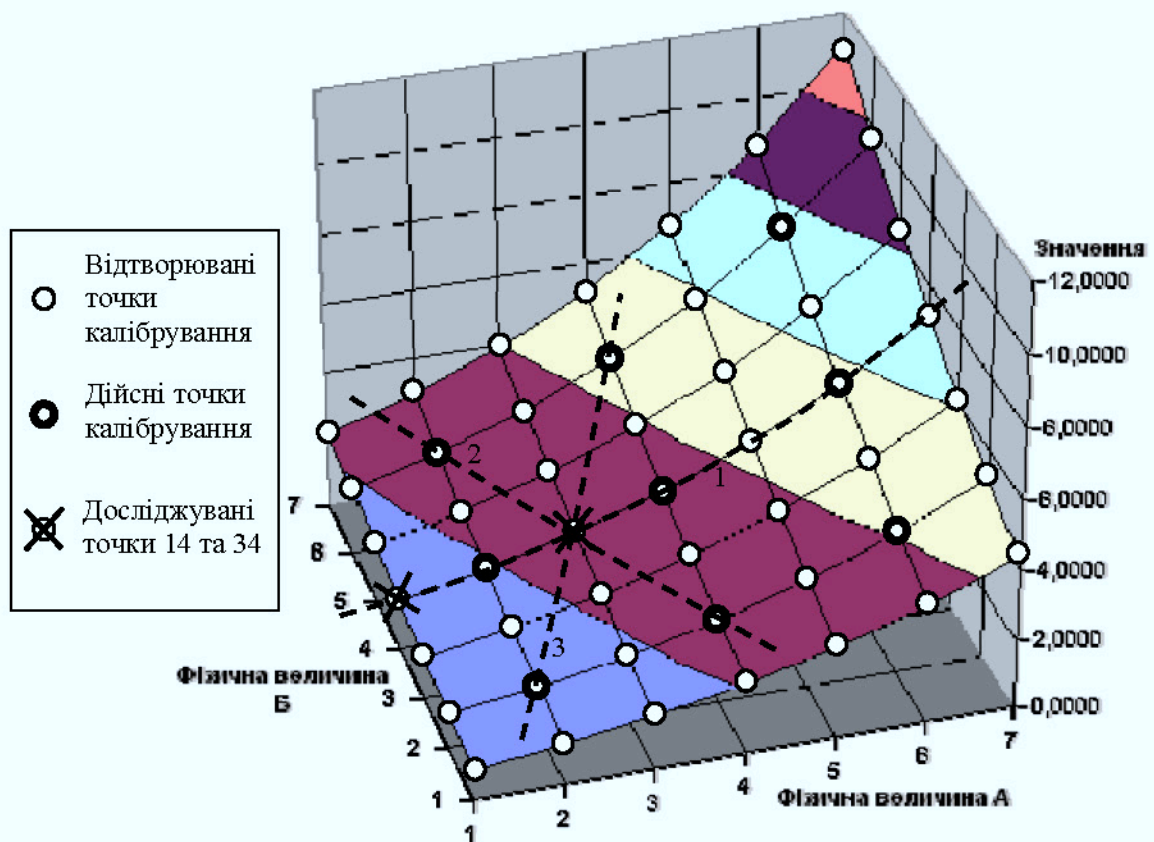


Рис. 2.3. Розміщення дослідних точок, дійсних точок калібрування і відтворюваних точок в координатах фізичних величин

Ці прямі задаються спільними для точок дійсної повірки даного сенсора, точок повірки однотипних сенсорів і точки, результати повірки якої прогноуються. Таким чином досягається взаємно-однозначна відповідність умов навчання нейронної мережі та прогнозу, що сприяє високій точності навчання нейронних мереж і, тим самим, високій точності прогнозу. Заміна операцій пропонованого методу або зміна їх послідовності погіршить спеціалізацію нейронних мереж і відповідність умов навчання та прогнозу, що приведе до зростання похибки прогнозу.

Результати повірки однотипних багатопараметричних сенсорів у великій кількості точок хоча і збільшують трудомісткість повірки, однак таке збільшення має місце лише на початковому етапі виробництва, його результати можуть використовуватися при повірці всіх сенсорів даного типу, тому в результаті можна отримати значне зменшення середньої трудомісткості та часу ідентифікації індивідуальної функції перетворення багатопараметричних сенсорів.

На прикладі двопараметричного сенсора реалізація пропонованого методу може бути наступною. Спочатку проводять попередню повірку групи 30 ... 50 однотипних сенсорів у великій кількості точок, наприклад, у 49 – по 7 точок повірки для кожної з двох фізичних величин. При рівномірному розподілі точок повірки по діапазонах перетворення обидвох фізичних величин їх розміщення показує рис. 2.3. По осі абсцис відкладені значення першої фізичної величини А, а по осі ординат – значення другої фізичної величини В. В номері точки перша цифра відповідає фізичній величині А, а друга – фізичній величині В. 49 точок повірки однотипних сенсорів, від точки 11 до точки 77, показані кільцями.

Сенсор, індивідуальну функцію перетворення якого визначаємо, повірений в 9 точках, які позначені на рис. 2.2 товстими кільцями – точки 22, 24, 26, 42, 44, 46, 62, 64, 66. Ці точки повірки відповідають точкам повірки однотипних сенсорів, однак їх всього 9. Завданням пропонованого методу є виконання прогнозу значень результатів повірки у всіх точках повірки (тонкі кільця) на

основі результатів дійсної повірки сенсора в 9 точках (товсті кільця). Для виконання цього завдання маємо результати повірки однотипних сенсорів (всі кільця). Критерієм якості виконання завдання є висока точність прогнозованих результатів повірки в точках 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 23, 25, 27, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 41, 43, 45, 47, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 61, 63, 65, 67, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77.

На першому етапі прогнозуємо результати повірки сенсора, вибираючи його дійсні точки повірки та точки повірки однотипних сенсорів, що лежать на одній прямій з прогнозованою точкою функції перетворення багатопараметричного сенсора. Наприклад, для прогнозованої точки функції перетворення багатопараметричного сенсора 34 цей процес ілюструється рис. 2.3. Через точку 34 можна провести три прямі, які містять також точки дійсної повірки сенсора: пряма №1 – через точки 24, 44, 64; пряма №2 – через точки 26, 42; пряма №3 – через точки 22, 46. Одночасно в пряму №1 ввійдуть точки повірки однотипних сенсорів 14, 34, 54, 74. Кожній прямій відповідає своя нейронна мережа. Їх навчання проводиться за результатами повірки групи, наприклад, 50 однотипних багатопараметричних сенсорів у великій кількості точок (у 49 точках).

Навчальна вибірка, наприклад, для прямої №1, формується наступним чином. Один з сенсорів групи, наприклад, перший, приймається сенсором, який повіряють, інші – це група однотипних багатопараметричних сенсорів у великій кількості точок. Тому перший вектор навчання формують як набір чисел, розміщених, наприклад, згідно приведеної в табл. 2.1 методики.

Найбільш подібний сенсор (серед групи однотипних багатопараметричних сенсорів) до сенсора, який повіряють, визначається за мінімумом суми абсолютних значень відхилень результатів повірки сенсора серед групи однотипних багатопараметричних сенсорів від результатів повірки сенсора, який повіряють.

Методика формування першого навчального вектора

Операція
1. Значення результатів перевірки сенсора, який повіряють, в точках 24, 44, 64
2. Значення результатів перевірки найбільш подібного сенсора до того сенсора, який повіряють, серед групи однотипних багатопараметричних сенсорів у точках 14, 24, 34, 44, 54, 64, 74
3. Значення результатів перевірки наступного за подібністю сенсора до того сенсора, який повіряють, серед групи однотипних багатопараметричних сенсорів у точках 14, 24, 34, 44, 54, 64, 74
4. Продовжити виконання пунктів для всіх сенсорів згідно зменшення подібності
5. Значення результатів перевірки найменш подібного сенсора до того сенсора, який повіряють, серед групи однотипних багатопараметричних сенсорів у точках 14, 24, 34, 44, 54, 64, 74
6. Значення результату перевірки сенсора, прийнятого сенсором, який повіряють, в точці 34

Абсолютні значення відхилень визначають в тих точках дійсної перевірки, що належать прямій, згідно якої прогнозують результат перевірки сенсора, який повіряють. Наступний за подібністю сенсор буде мати більшу (наступну) суму абсолютних значень відхилень результатів перевірки сенсора серед групи однотипних багатопараметричних сенсорів від результатів перевірки сенсора, який повіряють. Для найменш подібного сенсора вказана сума буде максимальною.

Таким чином, при виконанні операцій табл. 2.1, сенсори в складі навчального вектора, що входять в групу однотипних багатопараметричних сенсорів (рис. 2.4.), розміщуються в порядку зменшення їх подібності (Н-найбільш подібний) до сенсора, який повіряють (П), саме в тих точках, згідно

яких ведеться прогноз значення повірки. Останнім в ряді буде записано значення результату повірки в точці 34, яке є метою навчання (з яким порівнюється результат роботи нейронної мережі).

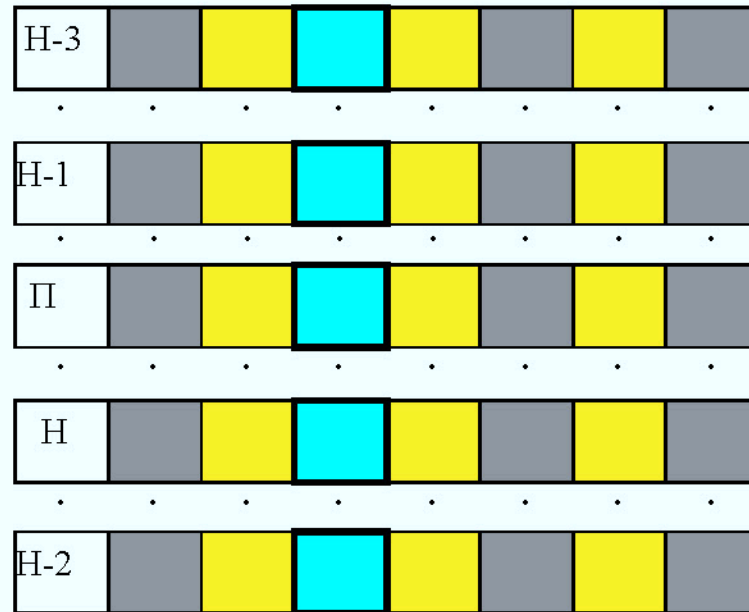


Рис. 2.4. Розташування подібних сенсорів

Слід відзначити, що порядок запису значень результатів повірки, приведений в табл. 2.1, може бути інший, але він мусить бути завжди однаковий, тільки тоді нейронна мережа при навчанні має можливість виявити закономірності, що визначають відхилення функції перетворення багатопараметричних сенсорів від номінальної. Тому важливим є не сам порядок розміщення значень результатів повірки в складі навчального вектора, а його сталість (незмінність) як при навчанні, так і при прогнозі.

Наступний вектор навчальної вибірки формується шляхом визначення іншого сенсора тим, який повіряють, серед групи однотипних багатопараметричних сенсорів, що були повірені у всіх точках повірки. Для формування навчальної вибірки знову повторюють операції табл. 2.1. Процес формування навчальних векторів продовжують до того моменту, коли всі сенсори групи однотипних багатопараметричних сенсорів, що були повірені у всіх точках повірки, не побувають в ролі того сенсора, який повіряють.

Представлену вище методику формування навчального вектора для НМ графічно зображено на рис. 2.5:

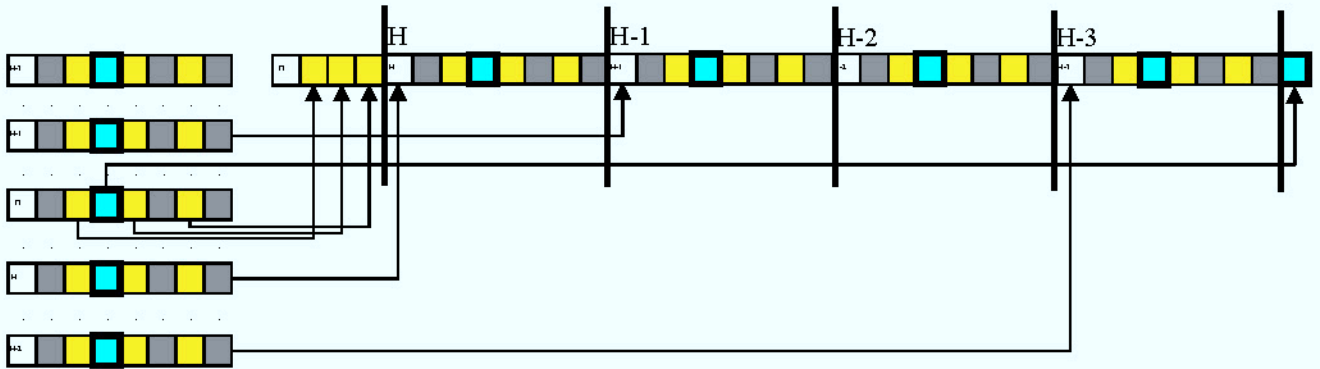


Рис. 2.5. Послідовність формування вхідного вектора

Для відтворення прогнозу результатів повірки можна використати нейронні мережі типу тришарового персептрона [76] з кількістю вхідних нейронів, що відповідає кількості значень результатів повірки у даній точці згідно рис. 2.5. Вихідний нейрон – один. Кількість нейронів схованого шару та вид функції їх активації слід вибирати експериментально, за результатами пробних навчань. Для забезпечення добрих узагальнюючих властивостей слід, згідно рекомендацій [76, 87], вибирати кількість нейронів схованого шару якнайменшою.

Після навчання нейронної мережі на такій навчальній вибірці її коефіцієнти відбивають закономірності відхилення функції перетворення БПС від номінальної. Така навчена нейронна мережа може бути використана для прогнозу результатів повірки сенсора, який дійсно повіряють, в точці повірки 34 згідно прямої №1 (хоча цей сенсор в точці 34 насправді не повірявся).

При використанні навченої нейронної мережі для прогнозу результатів повірки сенсора, який повіряють, результати його повірки в точках 24, 44, 64 підставляють у вектор прогнозу на місце, де були результати повірки сенсора, який імітував сенсор, який повіряють, під час навчання нейронної мережі в цих же ж точках (згідно п. 1, табл. 2.1). Далі розміщують результати повірки

найбільш подібного сенсора, далі наступного (згідно пп. 2, 3, 4, табл. 2.1). Значення результатів повірки найменш подібного сенсора до того сенсора, який повіряють, відкидають. В результаті нейронна мережа прогнозує з високою точністю значення результату повірки сенсора, який дійсно повіряють, в точці 34 за прямою №1 (хоча цей сенсор в точці 34 насправді не повірявся).

Для прогнозу результатів повірки сенсора, який дійсно повіряють, в точці повірки 34 згідно прямої №2 та №3 слід повторити всі описані операції знову і навчити відповідні нейронні мережі.

Для прогнозу результатів повірки в інших точках також слід навчити відповідні нейронні мережі. При цьому треба зважати на подібність методів проведення прямих через точки 43, 45, 54 до прямих через точку 34. Через точки 33, 35, 53, 55 можна провести дві прямі – через точки 22, 44, 66 та через точки 24, 42. Через точки 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 23, 25, 27, 31, 32, 36, 37, 41, 47, 51, 52, 56, 57, 61, 63, 65, 67, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77 можна провести лише одну пряму. Тому похибка прогнозу в цих точках може бути дещо вищою.

В результаті навчання множин нейронних мереж на різних прямих та використання їх для прогнозу результатів повірки сенсора, який повіряють, отримуємо декілька прогнозованих результатів в кожній точці прогнозу. Це дозволяє підвищити точність прогнозу за рахунок їх об'єднання.

Найпростіший метод об'єднання є знаходження середнього значення. Однак для дослідження можливостей методу доцільно дослідити похибки прогнозу з допомогою прямих окремо.

Таким чином, в результаті використання пропонованого методу ідентифікації індивідуальної функції перетворення багатопараметричного сенсора за результатами його повірки в скороченій кількості точок можна отримати високу точність прогнозу результатів повірки в тих точках, де ця повірка насправді не проводилася і, тим самим, дуже суттєво скоротити кількість точок дійсної повірки багатопараметричного сенсора для отримання малої похибки його індивідуальної функції перетворення. Пропонований метод

може отримати широке використання, наприклад, в системах захисту від перевищення допустимої концентрації газів, зокрема, захисту від перевищення безпечної концентрації метану та закису вуглецю в шахтах, а також в системах газового аналізу, де можна застосувати двопараметричні сенсори на основі окису олова. Також запропонований метод можна використати в системах корекції впливу динамічної зміни температури напівпровідникового кристалу на результат вимірювання фізичної величини сенсором, реалізованим на цьому кристалі, зокрема, для корекції температурної похибки фотодіода, викликані його нагрівом вимірюваним світловим потоком. В такому випадку сенсор температури довільного типу, розміщений поряд з фотодіодом буде мати значну динамічну похибку через запізнення результату його вимірювання відносно температури кристалу фотодіода, викликану малою швидкістю процесу теплопередачі. Тільки в тому випадку динамічна похибка буде малою, коли сам фотодіод буде сенсором своєї температури. Однак в такому випадку фотодіод стає двопараметричним сенсором, в якому генерований фотострум є мірою світлового потоку (однак він залежить і від температури кристалу), а спад напруги при проходженні прямого струму через фотодіод є мірою температури кристалу (однак він залежить і від світлового потоку, який падає на кристал). Ідентифікація індивідуальної функції перетворення такого фотодіода, як двопараметричного сенсора, дозволяє реалізувати корекцію температурної похибки з високою точністю.

Визначення ефективності запропонованого методу та меж його придатності на експериментальних даних не є доцільним, оскільки в цьому випадку відбудеться перевірка лише однієї або декількох комбінацій похибок з багатьох можливих. Тому необхідно провести імітаційне моделювання (дослідження), яке, в свою чергу, вимагає розробки методики дослідження запропонованого методу. Також доцільно дослідити можливості запропонованого методу для різних варіантів похибок по обидвох фізичних величинах.

Таким чином, у даному параграфі був запропонований метод ідентифікації індивідуальної ФП БПС, зокрема, ФД, який базується на експериментальних

дослідженнях їх похибки (повірці), але має значно, майже в п'ять разів, знижену трудомісткість за рахунок нейромережевого прогнозу результатів повірки в точках, де повірка не проводилася.

2.2 Модель номінальної функції перетворення багатопараметричного сенсора та його похибок

Для проведення імітаційних досліджень похибки методу ідентифікації індивідуальних функцій перетворення БПС, запропонованого у параграфі 2.1, необхідно розробити модель номінальної ФП багатопараметричного сенсора та його похибок, а також методику їх дослідження.

Оскільки фотодіод має гладкі монотонні нелінійні ФП по обидвох параметрах (фізичних величинах) [105], а також враховуючи те, що пропонується метод призначений для врахування індивідуальних відхилень від номінальної ФП, вигляд останньої не має вирішального значення для дослідження властивостей методу. Згідно [87] модель ФП БПС, яка не враховує похибок БПС, має вигляд (рис. 2.1):

$$Y_{NOM} = (A \times (X_1 + B)^k + C \times (X_1 + B)) \times (D \times (X_2 + E)^l + F \times (X_2 + E)) \times G, \quad (2.1)$$

де Y_{NOM} – номінальний вихідний сигнал багатопараметричного сенсора;

X_1, X_2 – вимірювані фізичні величини A і B відповідно;

$A \dots G, k, l$ – коефіцієнти та показники степені відповідно.

Значення ФП БПС які відповідають повірці групи однотипних сенсорів (значення по осі аплікат) для поверхні (див. рис. 2.1), наведені в табл. 2.2.

Таблиця ФП БПС для 7 точок по фізичних величинах А та Б

		Фізична величина А						
		1	2	3	4	5	6	7
Фізична величина Б	7	4.3927730	5.2080160	6.1317920	7.1733290	8.3422360	9.6484940	11.1024600
	6	3.4360460	4.0737330	4.7963140	5.6110100	6.5253330	7.5470940	8.6843960
	5	2.6637840	3.1581490	3.7183280	4.3499180	5.0587450	5.8508620	6.7325520
	4	2.0453430	2.4249330	2.8550570	3.3400140	3.8842740	4.4924880	5.1694800
	3	1.5542930	1.8427500	2.1696090	2.5381360	2.9517290	3.4139220	3.9283800
	2	1.1679690	1.3847300	1.6303470	1.9072760	2.2180700	2.5653830	2.9519710
	1	0.8670568	1.0279720	1.2103090	1.4158900	1.6466120	1.9044450	2.1914330

Представлена в табл. 2.2 ФП БПС є основою номінальної ФП, до якої будуть додаватись індивідуальні відхилення ФП. Індивідуальні відхилення будуть формуватись окремо для кожної складової – адитивної, мультиплікативної та нелінійної похибок. Максимальна зміна адитивної складової похибки приймається рівною приблизно 5% від мінімального значення, яке вказано в таблиці 2.2. Це значення додається до перших 25 результатів перевірки БПС і віднімається від наступних 25 результатів перевірки.

Максимальне значення мультиплікативної похибки, як більш небезпечної з точки зору її ідентифікації нейронною мережею, береться більшим - $\pm 0,4$, що приблизно відповідає 50% від мінімального значення, яке вказано в табл. 2.2. Максимальне значення розподіляється на 50 сенсорів таким чином, що мультиплікативна похибка кожного наступного від 25 – го приростає на $0,4/25$, а кожного, номер якого менший за 25, падає на цю ж величину. Таким чином, мультиплікативна похибка буде мати для кожного з 50 сенсорів індивідуальне значення.

В загальному випадку ідентифікація адитивних та мультиплікативних індивідуальних відхилень ФП БПС від номінальної ФП не вимагає

використання НМ. Але БПС, особливо виконані на базі технології p-n переходів, мають суттєво нелінійні ФП [52], а, значить, і їх відхилення від номінальної ФП мають не тільки адитивний та мультиплікативний характер. Також, нелінійні відхилення індивідуальних ФП від номінальної, мають настільки великі значення, що ними нехтувати не можна. Для дослідження можливостей пропонованого методу при ідентифікації індивідуальних ФП БПС спочатку необхідно дослідити вплив на похибку ідентифікації нелінійної складової виду X^n . При цьому характер нелінійної складової індивідуального відхилення ФП БПС за різними фізичними величинами може бути однаковим або різним.

Тому для дослідження нелінійної складової X^n , розвиваючи (2.1), запропоновано модель [18] похибок ФП БПС у вигляді функції

$$Y = Y_{ном} \pm n\Delta(\pm K_1(i-4)^k \pm K_2(j-4)^l), \quad (2.2)$$

де Y – значення реальної фізичної величини;

$Y_{ном}$ – значення номінальної фізичної величини;

n – кількість варіантів дослідження, прийнято $n = 50$ (тобто по 25 дослідів для кожної полярності);

Δ – крок квантування похибки багатопараметричного сенсора, прийнято 0,1% (тобто максимальна нелінійна складова індивідуального відхилення ФП БПС по кожній фізичній величині становить 5%);

K_1, K_2 – коефіцієнти, що узгоджують нелінійну складову індивідуального відхилення зі значенням ФП БПС та дорівнюють 1% (0,01);

i та j – значення кроку по різних лінійках та стовпцях відповідно;

k, l - показники степені, що дорівнюють 2, 3 та 4.

Для початкового моделювання індивідуальних ФП сенсорів використано табличний процесор Microsoft Excel.

Для другої степені при всіх можливих комбінаціях знаків формула (2.2) має вигляд:

$$Y = Y_{НОМ} \pm n\Delta(\pm K_1(i-4)^2 \pm K_2(j-4)^2), \quad (2.3)$$

У всіх чотирьох випадках комбінацій знаків, формули для досліджень у програмі Excel для квадратичного індивідуального відхилення ФП БПС від номінального будуть наступними:

$$\Phi_{v_{ij}} \text{ реальна} = \Phi_{v_{ij}} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{ad} \left(+K_1(i-4)^2 + K_2(j-4)^2 \right), \quad (2.4)$$

$$\Phi_{v_{ij}} \text{ реальна} = \Phi_{v_{ij}} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{ad} \left(+K_1(i-4)^2 - K_2(j-4)^2 \right), \quad (2.5)$$

$$\Phi_{v_{ij}} \text{ реальна} = \Phi_{v_{ij}} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{ad} \left(-K_1(i-4)^2 + K_2(j-4)^2 \right), \quad (2.6)$$

$$\Phi_{v_{ij}} \text{ реальна} = \Phi_{v_{ij}} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{ad} \left(-K_1(i-4)^2 - K_2(j-4)^2 \right), \quad (2.7)$$

при тому, що

$$\Delta A_{ad} = \left(N_{\text{лінійки}} - 25 \right) \cdot \frac{1\%}{25}, \quad (2.8)$$

тобто приймається значення від 1 до -1 з кроком 0,04.

Для третьої степені та квадрату при всіх можливих комбінаціях знаків формула (2.2) має вигляд:

$$Y = Y_{НОМ} \pm n\Delta(\pm K_1(i-4)^3 \pm K_2(j-4)^2), \quad (2.9)$$

формули для різної комбінації знаків будуть наступними:

$$\Phi_{vij} \text{ реальна} = \Phi_{vij} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{ad} \left(+K_1(i-4)^3 + K_2(j-4)^2 \right) \quad (2.10)$$

$$\Phi_{vij} \text{ реальна} = \Phi_{vij} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{ad} \left(+K_1(i-4)^3 - K_2(j-4)^2 \right) \quad (2.11)$$

$$\Phi_{vij} \text{ реальна} = \Phi_{vij} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{ad} \left(-K_1(i-4)^3 + K_2(j-4)^2 \right) \quad (2.12)$$

$$\Phi_{vij} \text{ реальна} = \Phi_{vij} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{ad} \left(-K_1(i-4)^3 - K_2(j-4)^2 \right) \quad (2.13)$$

Для третьої степені та третьої степені при всіх можливих комбінаціях знаків формула (2.2) має вигляд,

$$Y = Y_{НОМ} \pm n\Delta \left(\pm K_1(i-4)^3 \pm K_2(j-4)^3 \right), \quad (2.14)$$

формули для різної комбінації знаків будуть наступними:

$$\Phi_{vij} \text{ реальна} = \Phi_{vij} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{ad} \left(+K_1(i-4)^3 + K_2(j-4)^3 \right) \quad (2.15)$$

$$\Phi_{vij} \text{ реальна} = \Phi_{vij} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{ad} \left(+K_1(i-4)^3 - K_2(j-4)^3 \right) \quad (2.16)$$

$$\Phi_{vij} \text{ реальна} = \Phi_{vij} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{ad} \left(-K_1(i-4)^3 + K_2(j-4)^3 \right) \quad (2.17)$$

$$\Phi_{vij} \text{ реальна} = \Phi_{vij} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{ad} \left(-K_1(i-4)^3 - K_2(j-4)^3 \right) \quad (2.18)$$

Для четвертої степені та другої степені при всіх можливих комбінаціях знаків формула (2.2) має вигляд,

$$Y = Y_{НОМ} \pm n\Delta \left(\pm K_1(i-4)^4 \pm K_2(j-4)^2 \right), \quad (2.19)$$

формули для різної комбінації знаків (2.2) будуть наступними:

$$\Phi_{vij} \text{ реальна} = \Phi_{vij} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{a\partial} \left(+K_1 (i-4)^4 + K_2 (j-4)^2 \right) \quad (2.20)$$

$$\Phi_{vij} \text{ реальна} = \Phi_{vij} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{a\partial} \left(+K_1 (i-4)^4 - K_2 (j-4)^2 \right) \quad (2.21)$$

$$\Phi_{vij} \text{ реальна} = \Phi_{vij} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{a\partial} \left(-K_1 (i-4)^4 + K_2 (j-4)^2 \right) \quad (2.22)$$

$$\Phi_{vij} \text{ реальна} = \Phi_{vij} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{a\partial} \left(-K_1 (i-4)^4 - K_2 (j-4)^2 \right) \quad (2.23)$$

Однак для дослідження можливостей запропонованого методу необхідно дослідити також можливість ідентифікації індивідуальної ФП БПС, в якій нелінійність має принципово інший характер, ніж X^n .

В природі дуже широко розповсюджені нелінійності типу e^x , тому слід дослідити похибку ідентифікації індивідуальної ФП БПС при нелінійності такого типу. Вигідною функцією, яка моделює нелінійності типу e^x є сигмоїда. Тому базовою функцією, яка імітує таку нелінійність доцільно вибрати функцію, аналогічну до сигмоїди (рис. 2.6):

$$Y = Y_{NOM} \pm n\Delta \left(\pm K_1 \left((i-4) + \frac{1}{(1 + \exp(-(i-4)))} \right) \pm K_2 \left((j-4) + \frac{1}{(1 + \exp(-(j-4)))} \right) \right). \quad (2.24)$$

Для дослідження нелінійності різної амплітуди введемо в (2.24) додаткові коефіцієнти.

$$Y = Y_{NOM} \pm n\Delta \left(\pm K_1 \left(\frac{(i-4)}{H} + \frac{1}{(1 + \exp(-(i-4))) - M} \right) \pm K_2 \left(\frac{(j-4)}{H} + \frac{1}{(1 + \exp(-(j-4))) - M} \right) \right), \quad (2.25)$$

де H та M – коефіцієнти, які впливають на відносну кривизну сигмоїдної функції ($H = 20$ та $M = 0,5$)

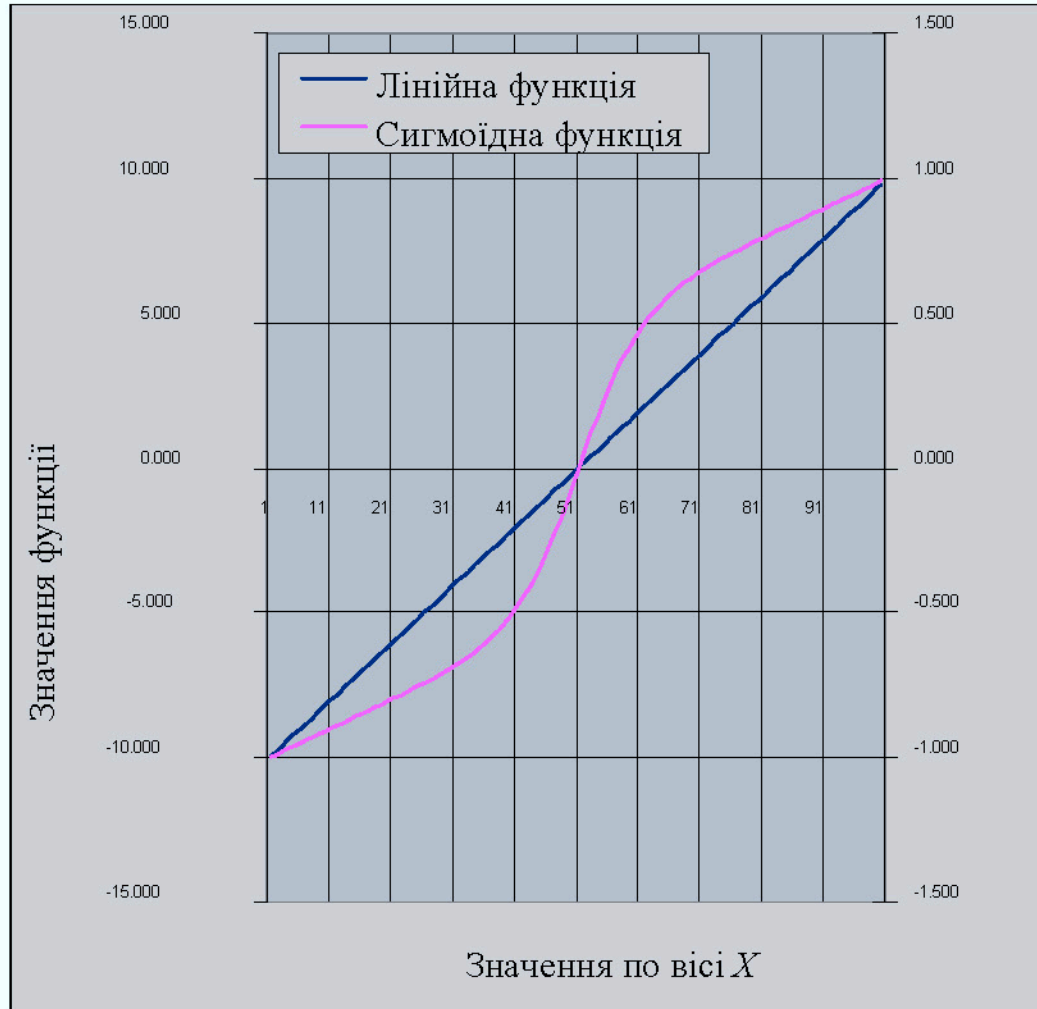


Рис. 2.6 Функція вигляду $f(x)=1/(1+\exp(-x))$ та лінійна функція

Формули такої функції, при всіх можливих комбінаціях знаків, будуть мати наступний вигляд:

$$\Phi_{вїї \text{ реальна}} = \Phi_{вїї \text{ номінальна}} \pm \Delta A_{ад} \left(\begin{array}{l} +K_1 \left(\frac{(i-4)}{H} + \frac{1}{(1+\exp(-(i-4)))} - 0.5 \right) + \\ +K_2 \left(\frac{(j-4)}{H} + \frac{1}{(1+\exp(-(j-4)))} - 0.5 \right) \end{array} \right) \quad (2.26)$$

$$\Phi_{vij} \text{ реальна} = \Phi_{vij} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{ad} \left(\begin{array}{l} +K_1 \left(\frac{(i-4)}{H} + \frac{1}{(1+\exp(-(i-4))) - 0.5} \right) - \\ -K_2 \left(\frac{(j-4)}{H} + \frac{1}{(1+\exp(-(j-4))) - 0.5} \right) \end{array} \right) \quad (2.27)$$

$$\Phi_{vij} \text{ реальна} = \Phi_{vij} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{ad} \left(\begin{array}{l} -K_1 \left(\frac{(i-4)}{H} + \frac{1}{(1+\exp(-(i-4))) - 0.5} \right) + \\ +K_2 \left(\frac{(j-4)}{H} + \frac{1}{(1+\exp(-(j-4))) - 0.5} \right) \end{array} \right) \quad (2.28)$$

$$\Phi_{vij} \text{ реальна} = \Phi_{vij} \text{ номінальна} \pm \Delta A_{ad} \left(\begin{array}{l} -K_1 \left(\frac{(i-4)}{H} + \frac{1}{(1+\exp(-(i-4))) - 0.5} \right) - \\ -K_2 \left(\frac{(j-4)}{H} + \frac{1}{(1+\exp(-(j-4))) - 0.5} \right) \end{array} \right) \quad (2.29)$$

Як було показано у параграфі 2.1, відомі нейромережеві методи прогнозу похибок багатопараметричних сенсорів дуже бояться випадкових похибок. Для дослідження стійкості до випадкових похибок запропонованого методу доцільно ввести в кожну модель додаткову похибку згідно наступної формули:

$$Y_{NOM} = Y + Rnd(K_3), \quad (2.30)$$

де Rnd – функція генерації випадкового числа (випадкової похибки);

K_3 – коефіцієнт, який визначає амплітуду випадкової похибки.

Коефіцієнт K_3 доцільно вибирати так, щоб випадкова похибка відбивала похибки вимірювання при повірці БПС. Оцінка показує, що така похибка не повинна перевищувати 0,5%.

У загальному, можна сформулювати методику дослідження похибок прогнозованого методу. Вона складається з наступних кроків (табл. 2.3):

Послідовність дій

№ кроку	Послідовність дій
1	задати номінальну ФП потрібного вигляду (наприклад, у вигляді таблиці 2.1)
2	задати похибку систематичну адитивну
3	задати максимальне значення систематичної адитивної похибки
4	задати максимальне значення випадкової похибки
5	сформувати 50 ФП з наростанням систематичних похибок (тобто всі проміжні комбінації)
6	вибрати прогнозовану точку
7	сформувати набір ФП для необхідної точки у вигляді таблиці результатів перевірки
8	вибрати одну лінійку з таблиці п.7
9	сформувати навчальні вектори для НМ – методика проілюстрована у параграфі 2.1
10	додати випадкову похибку (якщо таке дослідження потрібно проводити)
11	навчити нейронну мережу
12	визначити похибку прогнозу як різницю між отриманим з допомогою НМ значенням в точці прогнозу та дійсним значенням, що отримане в п.5 даної методики

Як вище вказувалося, процес прогнозу в різних точках ФП БПС може бути подібним через те, що кількість точок перевірки вибиралася однаковою для обидвох фізичних величин (процес прогнозу в симетрично розміщених точках буде проходити подібно). Тому для дослідження методу доцільно вибрати точки 14 і 34. Ці точки відображають (репрезентують) два основні типи прогнозу - екстраполяція та інтерполяція.

Отже у цьому параграфі описано методику дослідження пропонуваного методу. Для цього побудовано модель індивідуальних відхилень ФП БПС від номінальної, що враховує адитивну, мультиплікативну та нелінійну складові. Показано, що для цього доцільно застосовувати добуток поліномів для кожної змінної фізичної величини. Показано види похибок для кожної змінної, різні комбінації степенів від 2-х до 4-х, а та також вигляд сигмоїдної функції та їхніх

різних знаків. Подано методику врахування випадкових похибок та визначено межі їх зміни. Запропоновано загальну методику дослідження пропонованого методу у вигляді 12 кроків.

2.3. Розроблення системи автоматизованого формування навчальної вибірки для дослідження похибки пропонованого методу

Для прискорення досліджень похибки пропонованого методу, що було показано у параграфі 2.2, пропонується розробити систему автоматизованого дослідження.

Згідно методу, запропонованого у параграфі 2.1, та моделі, представленій у параграфі 2.2, можна описати функції системи та розробити узагальнений алгоритм роботи системи, а також алгоритми виконання цих функцій.

Система має забезпечити наступні функції:

1. завантажувати файл (із розширенням *.xls);
2. відображати ФП БПС із завантаженого файлу;
3. забезпечувати можливість вибору зі списку готових формул та введення нових формул індивідуальних відхилень ФП БПС від номінальних;
4. вибирати зі списку та вводити вручну максимальні значення адитивних та мультиплікативних індивідуальних відхилень ФП БПС від номінальних;
5. вибирати та вводити значення коефіцієнтів (K_1, K_2, K_3);
6. передавати опрацьовану матрицю (із чисельними значеннями, врахованими коефіцієнтами для всіх відхилень ФП БПС) у вікно сортування;
7. у вікні сортування вибирати схему сортування або забезпечити можливість введення нової схеми сортування;
8. додавати в кінець відсортованої таблиці таблицю з ідеальними значеннями ФП та формувати масив (вектор) для навчання НМ;
9. забезпечити можливість вводу необхідного коефіцієнту шуму ($K_{\text{шуму}}$);
10. проводити навчання нейронної мережі, для чого вибрати тип нейромережі, ввести її параметри (кількість нейронів у схованому шарі,

максимальну кількість епох навчання, значення заданої похибки навчання), забезпечувати вибір кількості запусків нейромережі (за замовчуванням 5 запусків));

11. отримання результатів навчання НМ (графіки для кожного з циклів навчання, кінцеві файли);

12. збереження отриманих результатів на всіх етапах роботи програми (для кожного з модулів програми виконувати збереження із додаванням індексу, що відповідає назві модуля програми).

Система автоматизованого дослідження складається з трьох програм, перша з яких здійснює попередню підготовку даних для дослідження похибки пропонованого методу, друга налаштовує нейронну мережу, проводить навчання та отримує результат, а третя проводить опрацювання отриманих результатів з метою визначення максимальної та середньої похибки прогнозу.

Зовнішній вигляд вікна першої програми показано на рисунку 2.7.

Програмний код (лістинг) програми наведено додатку А.

Програма відповідно до загальної формули (2.2), з § 2.2, забезпечує введення: ΔAd ; значення коефіцієнтів K_1 та K_2 ; значення коефіцієнта K_3 для випадкової складової; знаки до формул (2.3, 2.9, 2.14, 2.19) та значення показників степені k, l , що характеризують нелінійність функції перетворення похибки БПС.

member	value	nr	k1	k2	k3	c1	c2	z
350	1,752772	5,518016	5,711792	7,413320	5,622235	0,958151	11,15215	
349	3,605045	4,153723	4,885314	5,65101	5,615333	7,627054	5,854395	
348	2,762784	3,203149	3,735322	4,959918	5,073745	5,902822	5,022552	
347	2,111134	2,304313	2,861856	3,180004	3,199274	4,1112811	2,754911	
316	1,631295	1,87275	2,165605	2,528126	2,951723	3,413922	1,00538	
345	1,177965	1,34472	1,562347	1,827276	2,14307	2,525383	2,961971	
344	0,6670558	0,757972	0,952305	1,14565	1,385612	1,674445	2,011433	
312	5,095373	5,815616	5,682593	7,702520	5,891035	0,256001	11,83805	
341	3,765245	4,803923	4,972714	5,76781	5,701733	7,782254	5,017595	
340	2,852784	3,256149	3,757522	4,969518	5,097945	5,948822	5,923552	
314	2,22174	2,313131	2,414626	3,180004	3,401129	4,1112811	2,754911	
338	1,711092	1,90155	2,165605	2,518526	2,951723	3,472722	1,08518	
337	1,187565	1,30663	1,492147	1,750476	2,08387	2,456983	2,971571	
336	0,5142558	0,577172	0,702705	0,86665	1,137012	1,453645	1,83633	
332	5,712573	6,108816	5,935192	7,950920	5,113635	0,511291	12,13025	
333	3,922645	4,419823	5,055514	5,84141	5,784533	7,852664	5,173995	
332	2,951784	3,302149	3,775922	4,978718	5,115345	5,954822	7,022652	
310	2,388614	2,480013	2,581856	3,180004	3,411129	4,1112811	2,754911	
330	1,781692	1,92915	2,165605	2,502326	2,951723	3,500322	1,15378	

Рис. 2.7. Зовнішній вигляд програми автоматизованого дослідження

Алгоритм попередньої підготовки даних представлено на рис. 2.8, а зовнішній вигляд файлу даних, що згенеровано програмою попередньої підготовки даних, – на рис. 2.9.

На рис. 2.10 подано алгоритм навчання НМ.

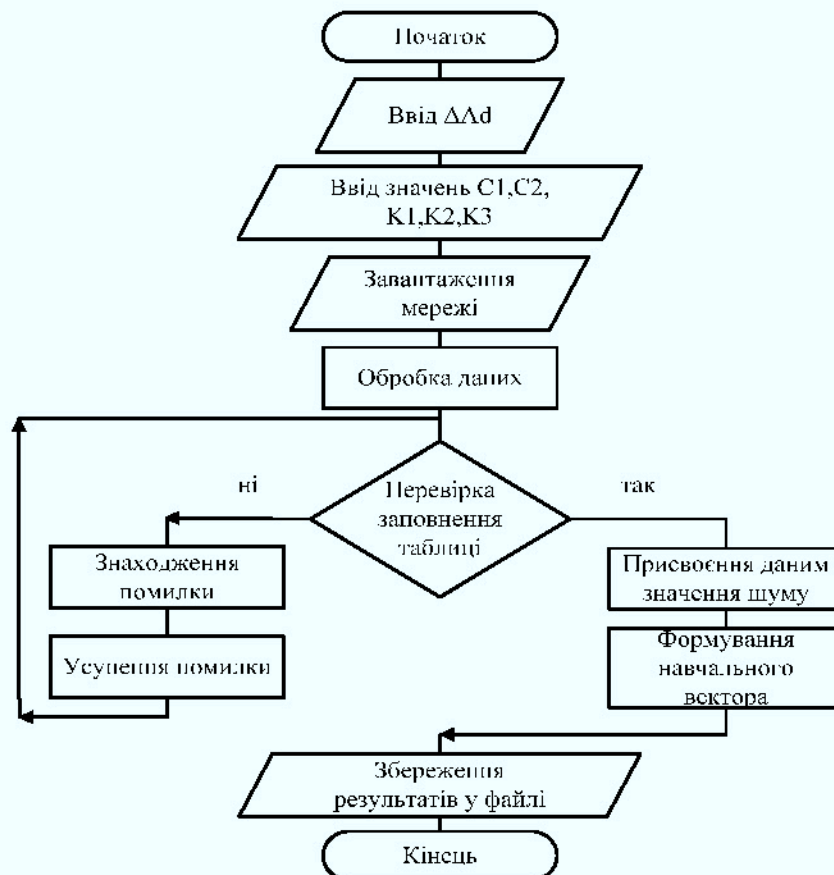


Рис. 2.8. Схема алгоритму попередньої підготовки даних

	A	B	C	D	E	F	G
1	4.727273	5.710016	6.417792	7.447029	8.722206	9.970294	11.47247
2	3.60046	4.133733	4.886314	5.89101	6.315333	7.667097	8.664395
3	2.411414	3.200149	3.700001	4.175811	5.101746	5.900067	6.117262
4	2.135313	2.431933	2.865057	3.340014	3.391274	4.532788	5.25913
5	1.634333	1.37245	2.169609	2.528136	2.351729	3.443022	4.00633
6	1.177969	1.34473	1.560347	1.827276	2.14807	2.525383	2.961971
7	0.667057	0.737972	0.950309	1.14689	1.336612	1.674445	2.011433
8							
9	5.098373	6.315616	6.680592	7.702529	8.391036	10.25609	11.60803
10	3.783246	4.308333	4.972714	5.76781	6.711733	7.782294	9.117595
11	2.659784	3.256149	3.757528	4.359518	5.037945	5.948862	6.926552
12	2.221743	2.533333	2.874657	3.340014	3.391274	4.570888	5.24688
13	1.711093	1.30155	2.169609	2.518536	2.351729	3.472722	4.06513
14	1.187669	1.30633	1.493147	1.760476	2.08087	2.486983	2.971571
15	0.714277	0.727172	0.700709	0.800009	1.17012	1.450645	1.800000
16							
17	5.423573	6.130816	6.938192	7.540029	8.148636	10.54129	12.13325
18	3.925646	4.419333	5.055514	5.84141	6.734533	7.892694	9.173993
19	2.961784	3.332149	3.775928	4.375718	5.116346	5.994862	7.020552
20	2.004543	2.540133	2.900057	3.340014	3.310074	4.607600	5.42003
21	1.764693	1.32915	2.169609	2.609336	2.351729	3.600322	4.16673
22	1.197679	1.26953	1.420747	1.670076	2.01647	2.450100	2.900771
23	0.588657	0.366572	0.467609	0.63829	0.937812	1.242076	1.673033
24							
25	5.746373	6.373616	7.184592	8.189529	9.335036	10.87409	12.45603
26	4.075246	4.524933	5.134714	5.91181	6.353733	7.998294	9.323695
27	3.079704	3.461149	3.793520	4.377510	5.170945	6.000067	7.100072
28	2.363743	2.575333	2.892657	3.340014	3.321874	4.642888	5.60783
29	1.871411	1.30000	2.169609	2.511000	2.351729	3.500000	4.000000
30	1.205669	1.23133	1.367177	1.606476	1.36187	2.474983	2.969671
31	0.714277	0.737172	0.700709	0.800009	0.830012	1.030045	1.146333

Рис. 2.9. Зовнішній вигляд файлу даних, що згенеровано програмою попередньої підготовки даних

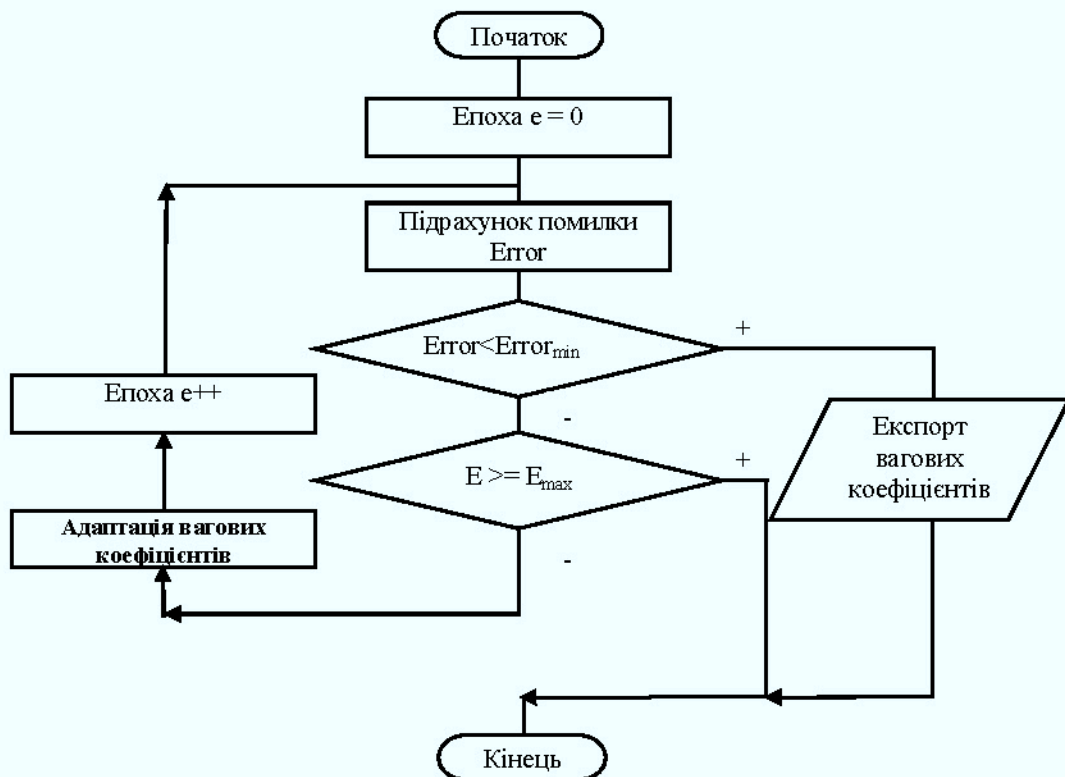


Рис. 2.10. Алгоритм навчання НМ

Зовнішній вигляд програми налаштування і навчання нейронної мережі показано на рис. 2.11.

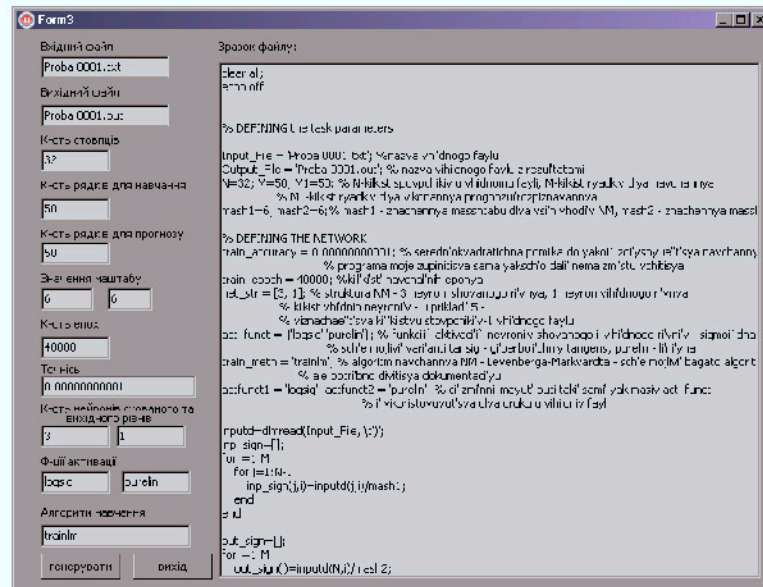


Рис. 2.11. Зовнішній вигляд програми підготовки даних та налаштувань нейронної мережі

Алгоритм налаштування нейронної мережі, виконується за кроками, які представлені на рис. 2.12.

Після натискання кнопки «генерувати» відбувається збереження файлу та його передача у середовище MatLab.

Третя програма опрацювання отриманих результатів запускається окремо, після того, як з допомогою повторних запусків другої програми буде забезпечено потрібний об'єм результатів. Алгоритм роботи третьої програми представлено на рис. 2.13. Основною функцією третьої програми є вибір серед файлів результатів роботи другої програми, вказаних у вікні третьої програми, максимального значення прогнозу з допомогою запропонованого методу, а також обчислення середнього значення цієї похибки для всіх прогнозованих значень.

На основі методики, розробленої в параграфі 2.2, проводиться дослідження властивостей пропонованого методу згідно алгоритму (див. рис. 2.13).

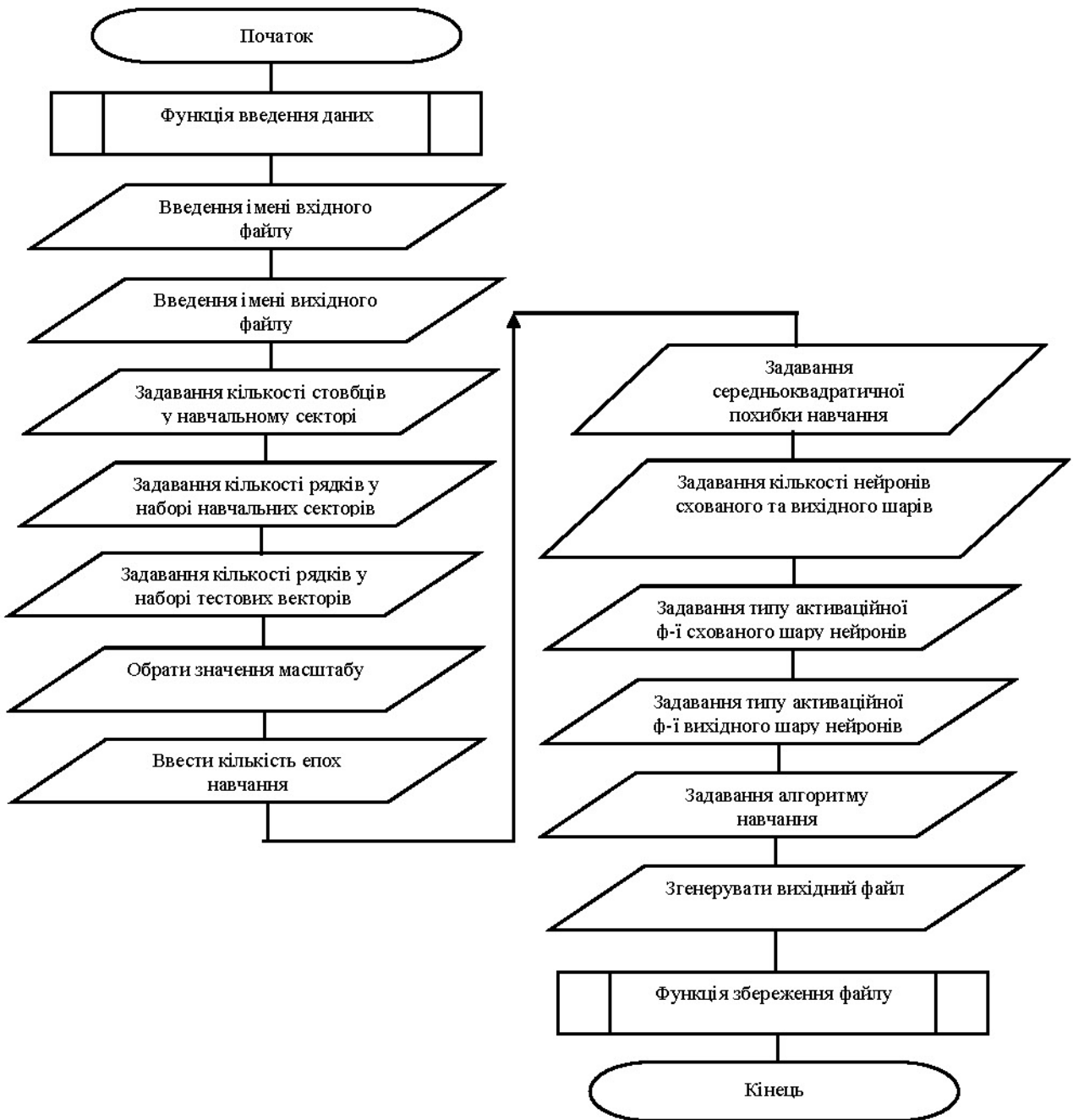


Рис. 2.12. Алгоритм налаштування і навчання нейронної мережі.

Як видно з алгоритму, представленого на рис. 2.13, дослідження властивостей пропонованого методу в мінімальному об'ємі точок вимагає проведення великої кількості експериментів (для вказаних на рис. 2.13 значень - 432 варіанти комбінацій параметрів), тому розроблення системи автоматизованого дослідження є цілком виправданим та необхідним.

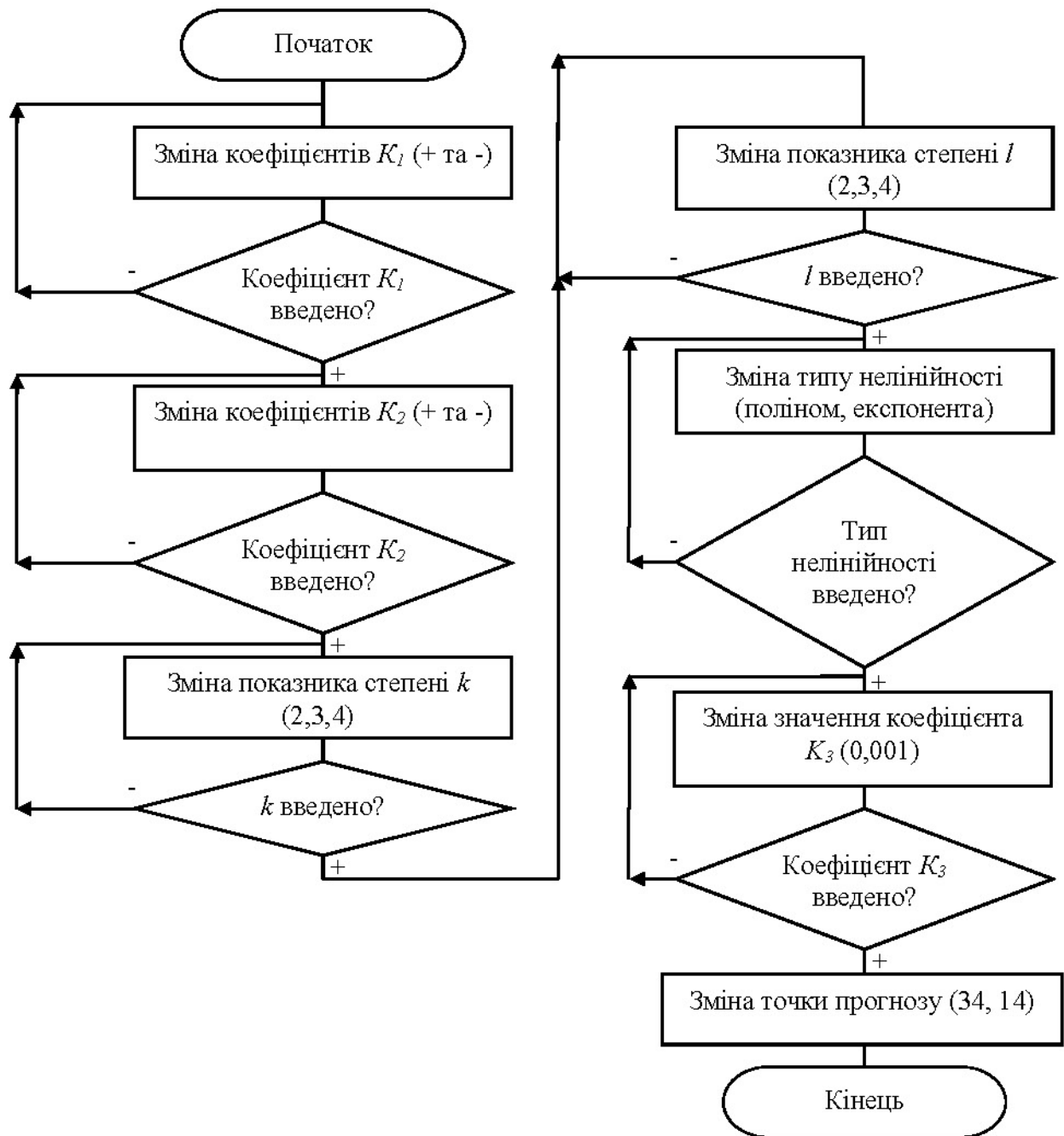


Рис. 2.13. Алгоритм функціонування системи автоматизованого дослідження властивостей нейромережевого методу

Отже, у параграфі 2.3 на основі методу, запропонованого у параграфі 2.1, та моделі, описаної у параграфі 2.2, розроблено систему автоматизованого дослідження властивостей нейромережевого методу ідентифікації функцій перетворення багатопараметричних сенсорів. Створене програмне забезпечення дає змогу дослідити пропонуваній метод в необхідній мірі при різних комбінаціях похибок та рівнях шумів.

2.4 Дослідження невиключеної похибки пропонованого методу

Згідно методу, описаного у параграфі 2.1, та методики дослідження похибки, запропонованої у параграфі 2.2, проілюструємо дослідження похибки пропонованого методу при відсутності випадкової похибки.

Для цього вибираємо точку, значення якої необхідно відтворити, наприклад, крайню точку 14 та точку 34 з рисунку 2.2.

Наведемо результати досліджень згідно із загальною формулою (2.2).

Верхнє число у таблиці представляє максимальне значення похибки прогнозу, вибране серед п'яти запусків навчання нейронних мереж. Нижнє число в таблицях представляє середнє з максимальних значень похибки прогнозу для цих п'яти запусків навчання нейронних мереж. Доцільно відзначити, що характер моделі похибок за формулою (2.2), носить симетричний характер, тому це дозволяє провести основні експерименти для знаків коефіцієнтів та степенів.

Для точки 14 було отримано результати, які наведені у додатку Г, графічна інтерпретація яких, показана на рисунку 2.14.

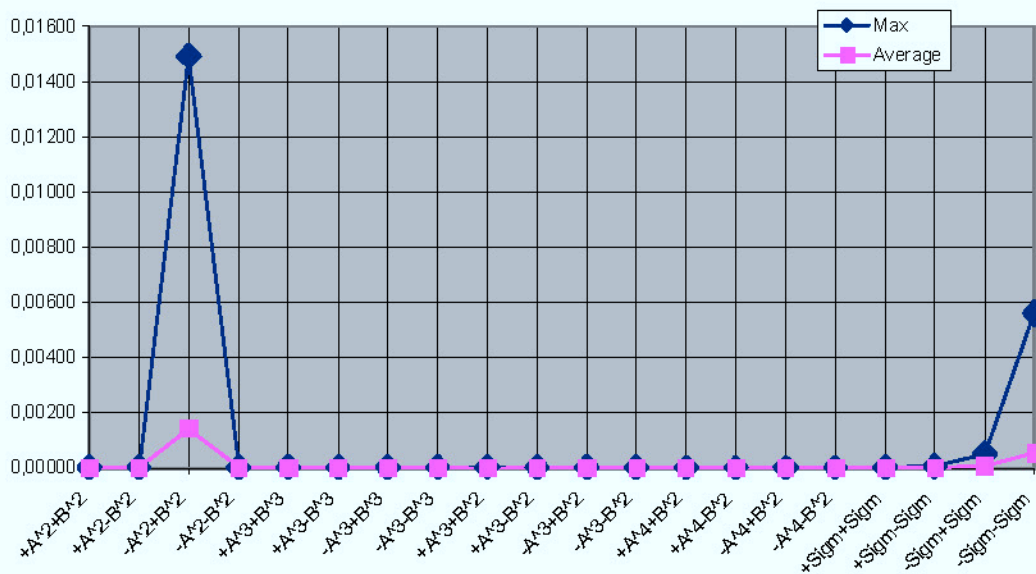


Рис. 2.14 Результати досліджень похибки для точки 14

Всі комбінації знаків (++; +--; -+; --) для точки 14 (згідно формул (2.3), (2.9), (2.14), (2.19) та (2.25) наведені у додатку Г.

Наведемо результати досліджень для точки 34, які сумарно представлені у додатку Д, та графічно відображені на рисунку 2.15, та додатку В.

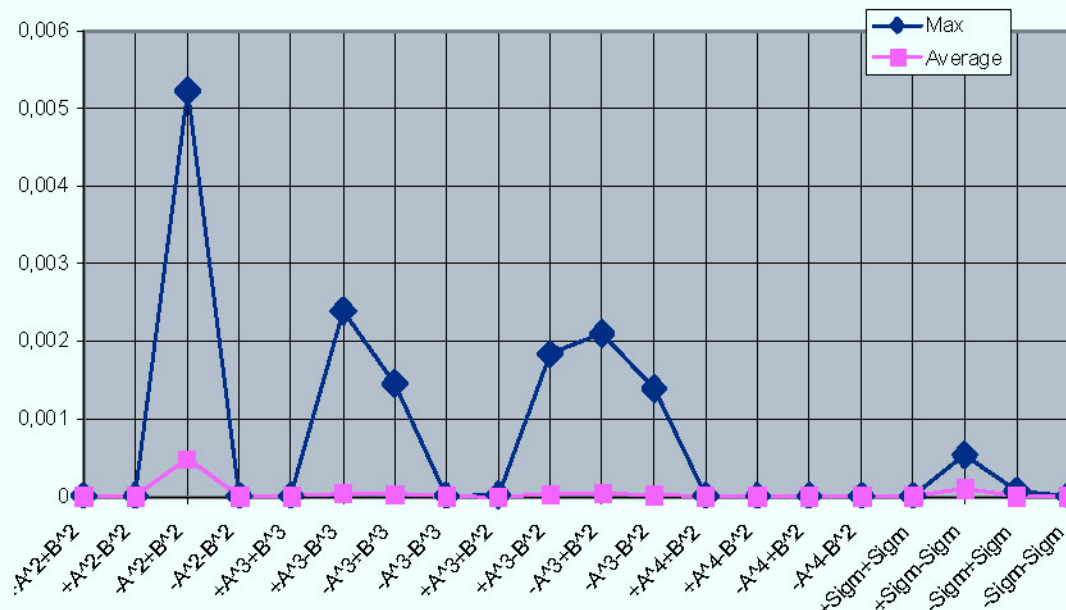


Рис. 2.15 Результати досліджень похибки для точки 34

Як видно з додатків Б та В, пропонуваній метод дозволяє прогнозувати результати повірки з досить високою точністю. Крім того, видно, що похибка прогнозу, при поліноміальному її характері, який моделювався згідно формул (2.3), (2.9), (2.14), (2.19) та (2.25), слабо залежить від степені полінома. Результати різних запусків навчання нейронних мереж, як це видно з рис. 2.14 та 2.15 і додатків Г та Д, дають суттєво різні рівні похибок.

Слід відзначити, що в деяких випадках (під час окремих запусків програми навчання нейронної мережі), представлених на рис. 2.14 та 2.15, похибка прогнозу майже для всіх варіантів прогнозу була дуже мала (не більше 0,003% ... 0,005%). Однак при прогнозі результатів повірки багатопараметричних сенсорів, які мали максимальні відхилення від номінальної ФП, похибка прогнозу стрибкоподібно зростала в 3 ... 6 разів. Хоча в таких випадках похибка прогнозу також не перевищувала значень, характерних для даного

варіанту комбінації похибок, такий характер розподілу похибок вказує на проблеми навчання тришарового персептрона.

Отже, проведені дослідження похибки пропонованого методу при відсутності випадкової похибки показали, що значення похибки не перевищували у максимумі значення 0,015%, та у середньому 0,00142%.

Надалі необхідно вивчити стійкість методу до впливу випадкових похибок.

2.5 Дослідження невиключеної похибки пропонованого методу при наявності випадкової похибки

Згідно методу, запропонованого у § 2.1, та моделі, описаній у § 2.2, проведемо дослідження похибки пропонованого методу при наявності випадкової похибки.

Дослідження пропонованого методу було проведено на базі тришарового персептрона, який мав 38 вхідних розподільчих нейронів, три нейрони схованого шару із сигмоїдною функцією активації та один вихідний нейрон з лінійною функцією активації.

Результати дослідження різних комбінацій похибок за (2.3), (2.9), (2.14), (2.19), (2.25) та значення шуму, при яких досліджувалася похибка прогнозу за формулою (2.30) (0,1%, 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,5%) від поточного сигналу БПС з § 2.2 для точок 14 та 34 (див. рис. 2.3) наведено в таблицях Е.1 - Е.5 (додаток Е) та таблицях Ж.1 - Ж.5 (додаток Ж) відповідно.

У заголовках таблиці (верхня лінійка і перший стовпчик) вказано характер похибки та знаки при K_1 , K_2 . Верхнє число в цих таблицях представляє максимальне значення похибки прогнозу, вибране серед п'яти запусків навчання нейронних мереж. Нижнє число в таблицях представляє середнє з максимальних значень похибки прогнозу для цих п'ятьох запусків навчання нейронних мереж.

Наведемо графічну інтерпретацію табличних значень для максимальних та середніх значень похибки прогнозу результатів повірки БПС пропонуваним методом для точки 14 (рис. 2.16 та рис. 2.17).

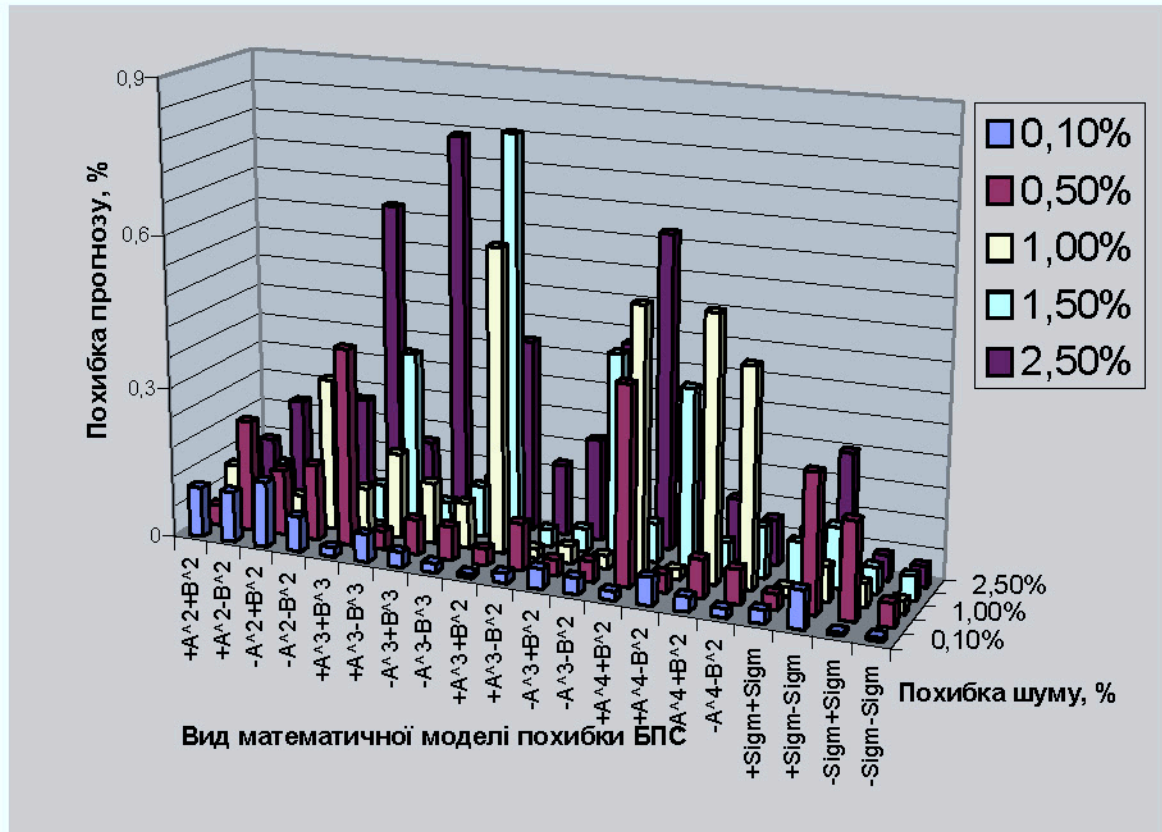


Рис. 2.16. Гістограма максимальної (із 100 реалізацій) похибки прогнозу результатів повірки БПС запропонованим методом для точки 14

На рисунку 2.16 показано гістограму максимальної (із 100 реалізацій) похибки прогнозу результатів повірки БПС пропонуваним методом для точки 14. По осі ординат відкладені значення шуму, при яких досліджувалася похибка прогнозу за формулою (2.30) – 0,1%, 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,5% від поточного сигналу БПС (див. легенду рис. 2.16). По осі абсцис відкладені значення максимальної похибки прогнозу результатів повірки (із 100 реалізацій) проведених досліджень для кожного виду моделі) багатопараметричних сенсорів з допомогою пропонуваного у параграфі 2.1 методу.

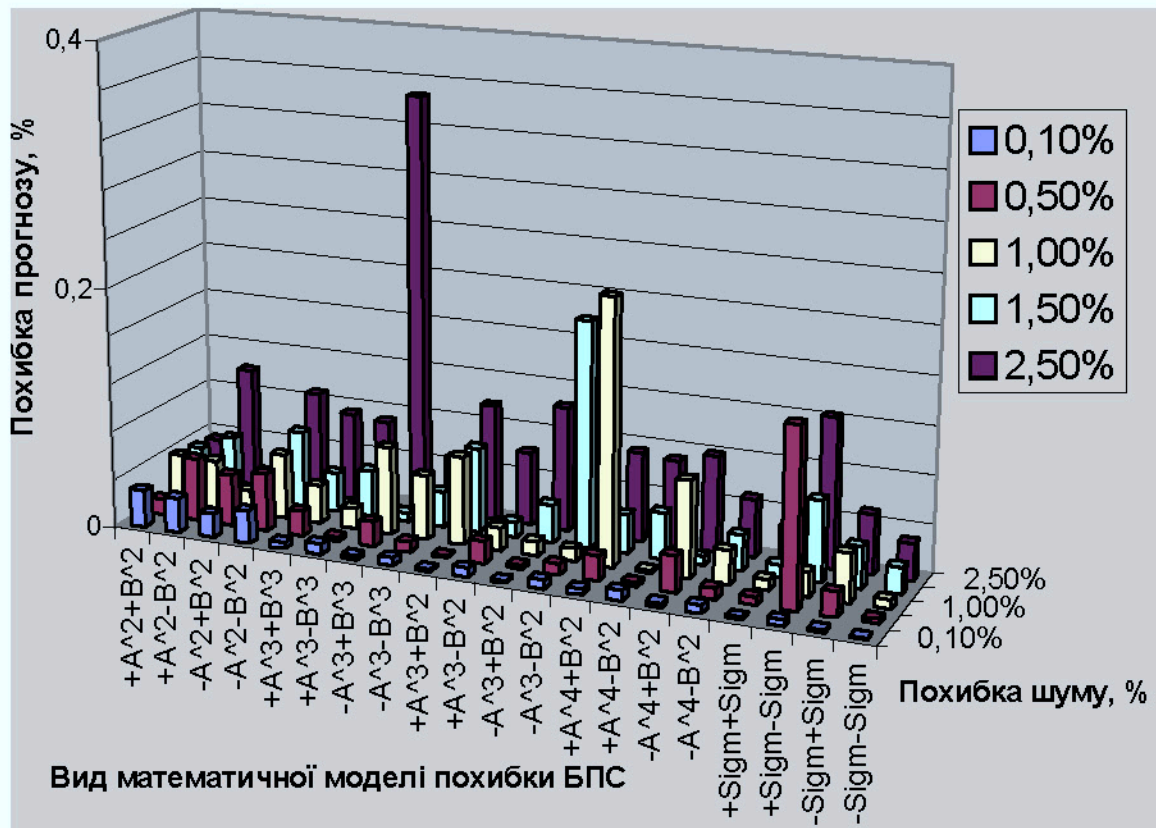


Рис. 2.17. Гістограма середньої (із 100 реалізацій) похибки прогнозу результатів повірки БПС запропонованим методом для точки 14

Наведемо результати досліджень для точки 34, графічна інтерпретація табличних значень Ж.1 – Ж.5 подана у додатку Ж.

На рисунку 2.18 та 2.19 показано гістограму максимальної та середньої (із 100 реалізацій) похибки прогнозу результатів повірки БПС методом запропонованим у параграфі 2.1, для точки 34 відповідно. По осі ординат відкладені значення шуму, при яких досліджувалася похибка прогнозу за формулою (2.30) (0,1%, 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,5%) від поточного сигналу БПС (див. також легенду). По осі абсцис відкладені значення максимальної похибки прогнозу результатів повірки (із 100 реалізацій проведених досліджень для кожного виду моделі) багатопараметричних сенсорів з допомогою запропонованого у параграфі 2.1 методу.

Екранні знімки графіків типових похибок прогнозу результатів повірки для точок 14 та 34 подано на рис. 2.20 - 2.21.

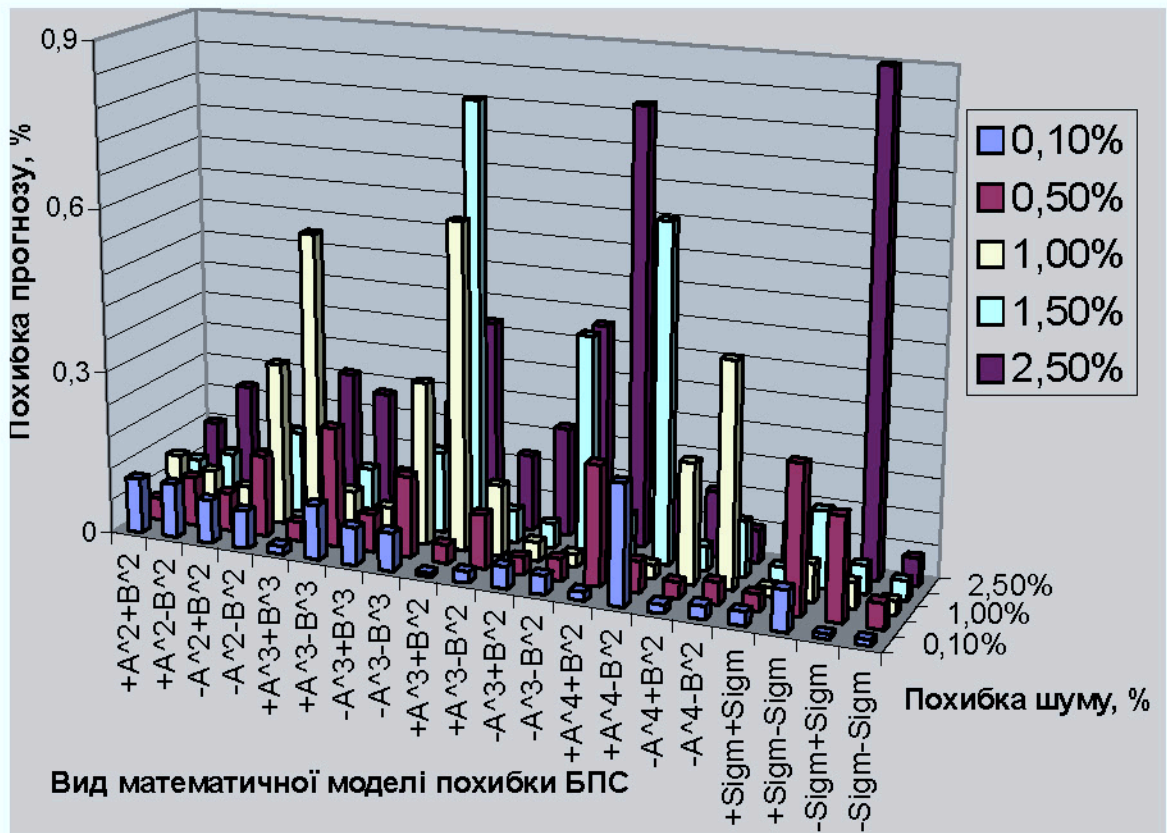


Рис. 2.18. Гістограма максимальної (із 100 реалізацій) похибки прогнозу результатів перевірки БПС запропонованим методом для точки 34

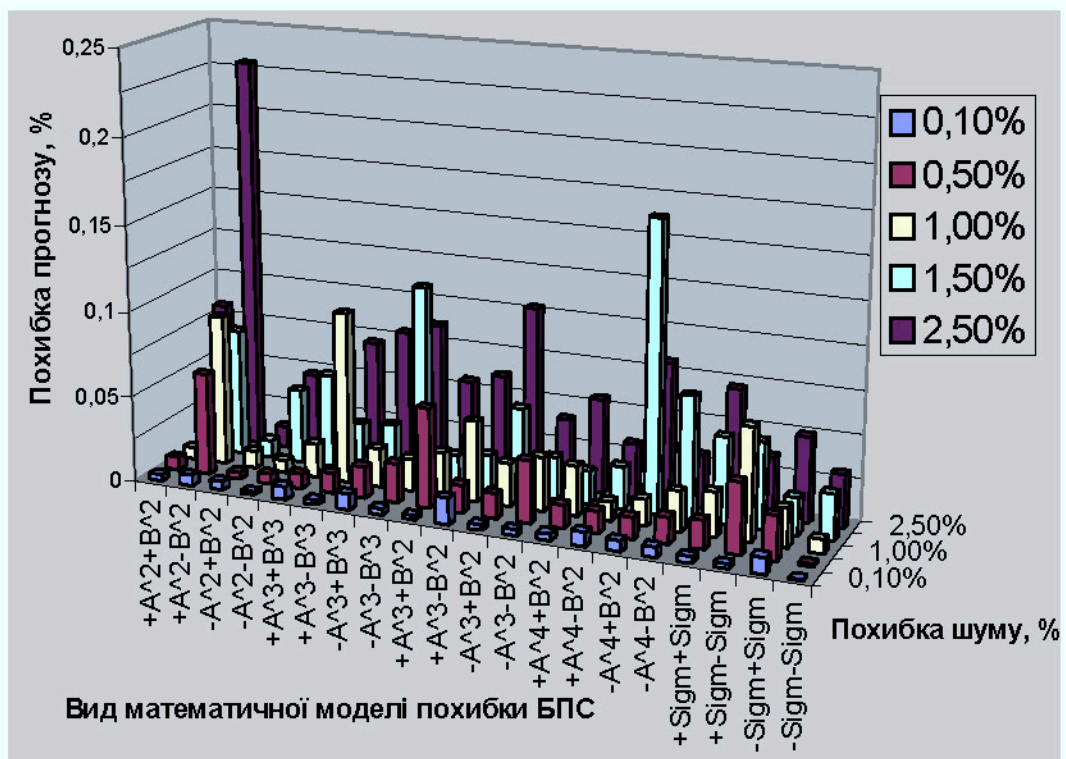


Рис. 2.19. Гістограма середньої (із 100 реалізацій) похибки прогнозу результатів перевірки БПС запропонованим методом для точки 34

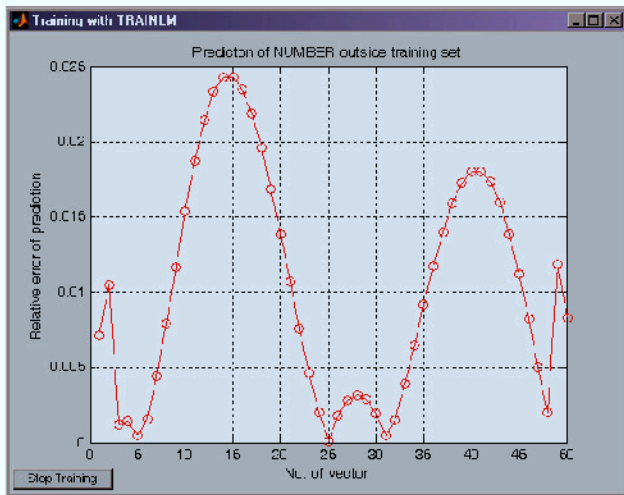


Рис. 2.20. Похибка прогнозу результатів перевірки в точці 14 БПС, похибка якого описується згідно (2.2), знаки $K1$, $K2$ додатні

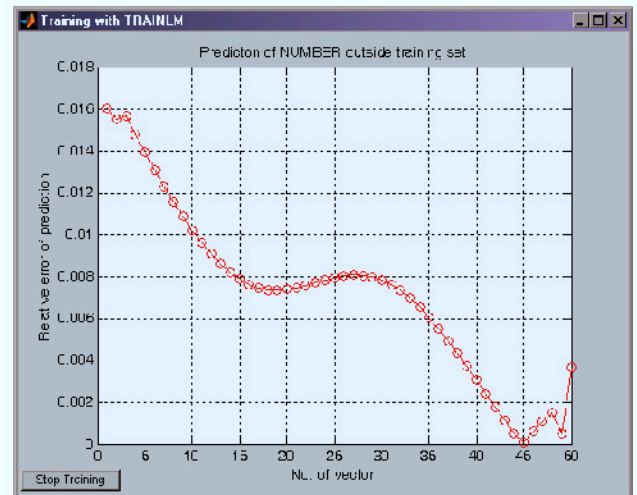


Рис. 2.21. Похибка прогнозу результатів перевірки в точці 34 БПС, похибка якого описується згідно (2.3), знак $K1$ додатній, знак $K2$ – від'ємний

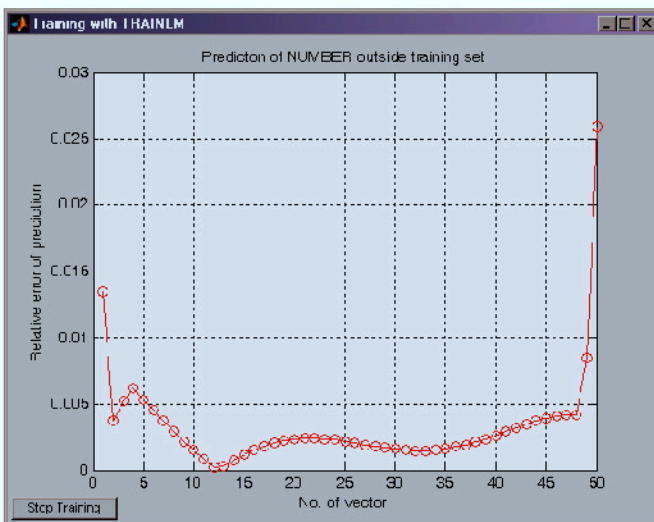


Рис. 2.22. Похибка прогнозу результатів перевірки в точці 14 БПС, похибка якого описується згідно (2.4), знак $K1$ від'ємний, знак $K2$ – додатній

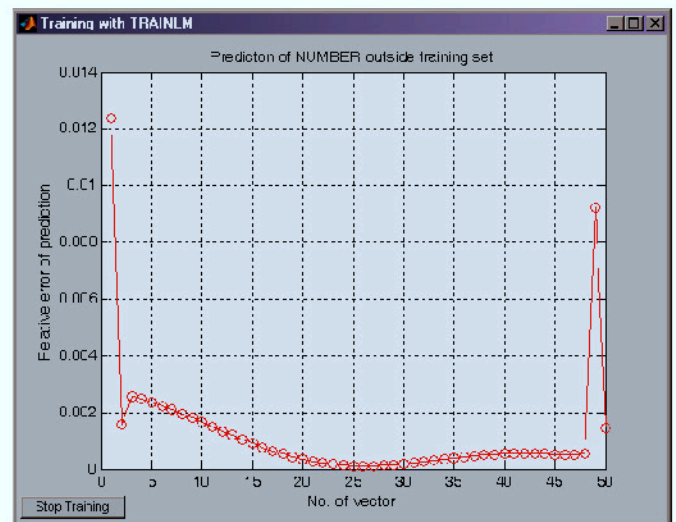


Рис. 2.23. Похибка прогнозу результатів перевірки в точці 34 БПС, похибка якого описується згідно (2.4), знаки $K1$, $K2$ додатні

Як видно, похибка прогнозу досить мала, незважаючи на досить велику випадкову похибку. Як видно з рис. 2.16 - 2.19, при використанні тришарового перцептрона виникають проблеми з його навчанням – хоча похибка прогнозу

залишається малою, максимальне значення виходів у приблизно у 5 разів перевищує середнє значення.

Як видно з таблиць Е.1 - Е.5 (додаток Е) та Ж.1 – Ж.5 (додаток Ж) та графіків рис. 2.20 та рис. 2.23, похибка прогнозу пропонованим методом, незважаючи на дію випадкової похибки, є досить малою, а подавлення випадкової похибки зазвичай перевищує 10 разів. Також видно, що пропонований метод дозволяє прогнозувати результати перевірки з досить високою точністю, незважаючи на високий рівень випадкової похибки результатів окремих вимірювань. Крім того, видно, що похибка прогнозу, при поліноміальному її характері, який моделювався згідно (2.3), (2.9), (2.14), (2.19), (2.25), слабо залежить від степені полінома. Результати різних запусків навчання нейронних мереж, як це видно з рис. 2.21 та рис. 2.22 і таблиць Е.1 - Е.5 (додаток Е) та Ж.1 (додаток Ж), дають суттєво різні значення похибок. Такий стан можна пояснити як дією випадкової похибки на процес прогнозу, так і проблемами навчання тришарового персептрона.

Слід відзначити, що в деяких випадках, наприклад під час окремих запусків програми навчання нейронної мережі, (див. рис. 2.21 та рис. 2.23), похибка прогнозу майже для всіх варіантів прогнозу була дуже мала (не більше 0,003% ... 0,005%). Однак при прогнозі результатів перевірки БПС, які мали максимальні відхилення від номінальної ФП, похибка прогнозу стрибкоподібно зростала в 3 ... 6 разів. Хоча в таких випадках похибка прогнозу також не перевищувала значень, характерних для даного варіанту комбінації похибок, такий характер розподілу похибок вказує на проблеми навчання тришарового персептрона.

Як видно з рис. 2.20 – рис. 2.23, в основній масі похибка прогнозу результатів перевірки багатопараметричних сенсорів запропонованим методом є меншою від значення шуму, який спотворював імітовані результати вимірювання. Слід відзначити, що на рисунках 2.20 та 2.22 представлені виключно максимальні значення похибки, які часто в десятки разів перевищують їх середні значення.

Таким чином, досліджено завадостійкість розробленого нейромережевого методу ідентифікації індивідуальних ФП багатопараметричних сенсорів за результатами їх експериментальних досліджень і показано, що запропонований метод, на відміну від існуючих, забезпечує зменшення майже на порядок випадкової складової похибки експериментальних досліджень.

Висновки по розділу 2

1. Запропоновано метод ідентифікації індивідуальної ФП БПС, зокрема, ФД, який базується на експериментальних дослідженнях їх похибки (повірки), але має значно, майже в п'ять разів, знижену трудомісткість за рахунок нейромережевого прогнозу результатів повірки в точках, де повірка не проводилася (повірка проводилася у 9 точках замість 49).
2. Розроблено методику дослідження запропонованого методу, для чого побудовано модель всіх можливих індивідуальних відхилень ФП БПС від номінальної на базі добутку поліномів від другої до четвертої степені з коефіцієнтами різного знаку, а також сигмоїдної функції та випадкових похибок. Запропоновано загальну методику дослідження запропонованого методу у вигляді 12 кроків.
3. Досліджено стійкість запропонованого методу до випадкової складової похибки результатів повірки багатопараметричних сенсорів. Показано, що при зростанні випадкової похибки завадостійкість в основному зростає (зростає степінь зменшення її впливу на результат повірки багатопараметричних сенсорів, тобто зростає коефіцієнт подавлення випадкової похибки).
4. Виявлено, що деякі реалізації прогнозу результатів повірки багатопараметричних сенсорів містять точки з аномально великою похибкою прогнозу, яка в десятки разів перевищує середню похибку, тому в результатах досліджень вказано як середнє, так і максимальне значення похибки прогнозу.

РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ СТРУКТУРИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

3.1 Синтез схем вимірювальних каналів інформаційно-вимірювальної системи

Для створення можливості синтезу схем вимірювальних каналів ІВС УФВ використаємо дані про ФД УФВ, приведені у першому розділі. На основі цих даних можна сформулювати наступні спец. вимоги до вимірювальних каналів ІВС УФВ.

- при вимірюванні освітленості слід вимірювати струм КЗ ФД, тобто забезпечити режим КЗ ФД (режим КЗ). Найменший вхідний опір, тобто найкращий режим КЗ, забезпечує перетворювач струм-напруга на операційному підсилювачі (ОП) [113], схема якого подана на рис. 3.1. Вихідна напруга U_{OUT} такої схеми визначається як

$$U_{OUT} = I_{PD}R1 \quad , \quad (3.1)$$

де I_{PD} – струм КЗ ФД;

$R1$ – опір резистора.

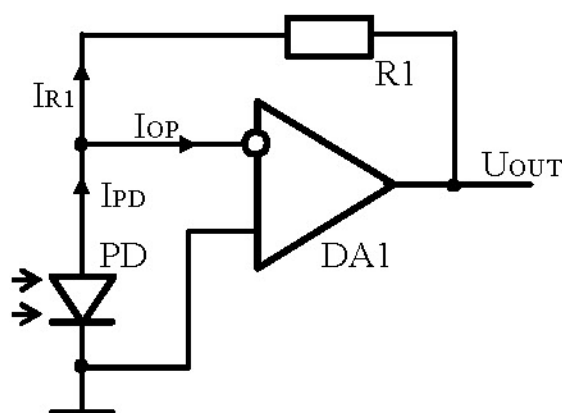


Рис. 3.1. Схема вимірювального каналу при вимірюванні освітленості (режим КЗ ФД)

Через те, що струм ФД УФВ знаходиться в межах $10...15\mu A$ для отримання напруги $1...2V$, яку можна подати на аналого-цифровий перетворювач (АЦП) без додаткового підсилення, опір $R1$ не повинен бути меншим, ніж $100...150k\Omega$.

- при вимірюванні температури кристала ФД слід вимірювати спад напруги на ФД [114], тобто забезпечити режим неробочого ходу ФД (режим НХ). Однак, навіть при відсутності струму навантаження, спад напруги на ФД буде залежати від струму, що протікає через нього [115]. При автономному живленні ІВС УФВ забезпечення стабільного струму ФД вимагає використання стабілізатора напруги або струму. Однак ці стабілізатори, по-перше, споживають енергію автономного джерела живлення, і, по-друге, суттєво збільшують апаратну складність розроблюваної ІВС УФВ. Для зменшення енергоспоживання стабілізаторів можна відключати їх на час, коли температура кристалу не вимірюється, однак схема відключення додатково збільшить апаратну складність ІВС УФВ. Тому пропонується дослідити вплив змін струму через ФД на його індивідуальну ФП в режимі вимірювання температури. Такі дослідження незначно збільшать трудомісткість експериментальних досліджень, тому що для корекції похибок ФД при вимірюванні освітленості в робочих умовах все одно прийдеться визначати індивідуальну ФП ФД під час вимірювання температури. Із схеми врахування струму через ФД в режимі НХ (рис. 3.2) можна визначити струм ФД

$$I_{PD1} = U_{R2} / R2 \quad , \quad (3.2)$$

де U_{R2} – спад напруги на резисторі $R2$;

$R2$ – опір резистора.

Через те, що ОП DA2 працює в режимі повторювача напруги, напруга на його виході рівна (з врахуванням зміщення ОП DA2) напрузі на ФД $PD1$, а вхідний опір такого повторювача визначається, фактично, вхідним струмом ОП DA2. При відповідному виборі ОП DA2 вхідний опір буде більший декількох

мОм, тобто схема реалізує режим НХ.

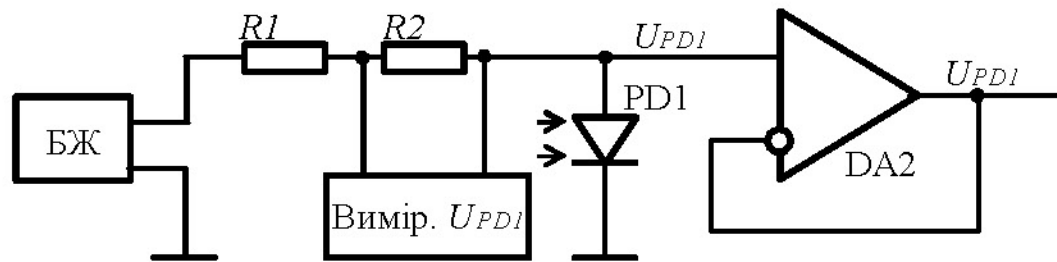


Рис. 3.2. Схема вимірювального каналу при вимірюванні температури (режим холостого ходу фотодіода)

Важливою особливістю ІВС УФВ є те, що вони (див. розділ 1), як це показано в першому розділі, рідко використовуються в стаціонарному режимі, а їх мобільне використання викликає необхідність живлення від автономного джерела (батареї або акумулятора). Тому, при синтезі принципової схеми вимірювальних каналів ІВС УФВ необхідно забезпечити живлення як вимірювальних, так і обчислювальних каналів системи від одного джерела. При цьому слід взяти всі заходи для збільшення терміну роботи ІВС УФВ від автономного джерела.

При вимірюванні температури кристала ФД режим НХ забезпечує ОП в неінвертуючому режимі роботи (див. рис. 3.2), який мусить мати напругу живлення вищу за напругу “землі”. Так само вищою за напругу “землі” мусить бути напруга джерела БЖ, яке створює робочий струм ФД (див. рис. 3.2). Однак режим КЗ передбачає від’ємну напругу на виході ОП (див. рис. 3.1), який працює в інвертуючому режимі. Тому для живлення ОП слід забезпечити формування “середньої точки” автономного джерела (використання двох автономних джерел тільки для створення “середньої точки” економічно не виправдане). Традиційно її формує ОП в режимі повторювача напруги, підключений до виходу подільника напруги автономного джерела [115]. Але тоді напруги живлення обидвох полярностей будуть мінятися при розряді

автономного джерела, що вимагає додаткового стабілізатора напруги живлення аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Економніше використати стабілізатор (рис. 3.3) для формування двополярних напруг живлення обидвох ОП, як того, що формує режим КЗ ФД, так і того, що працює в режимі НХ ФД.

Таким чином, можна сформулювати наступні вимоги до синтезу вимірювальних каналів ІВС УФВ:

1. при вимірюванні освітленості слід вимірювати струм короткого замикання ФД (режим КЗ);
2. при вимірюванні температури кристалу ФД слід вимірювати спад напруги на ФД, (неробочий хід – режим НХ);
3. ФП ФД в режимі НХ залежить від струму через ФД;
4. для зменшення похибки результату вимірювання температури струм через ФД слід стабілізувати або контролювати;
5. струм ФД при автономному живленні доцільно контролювати;
6. слід швидко перемикаєти режими ФД при мінімумі затрат;
7. слід забезпечити великий термін роботи автономного джерела (АД);
8. слід забезпечити живлення схеми від одного джерела (акумулятора АД або батареї).

Реалізацію цих вимог показано на рис. 3.3. Тоді первинне автономне джерело АД напругою $U_z = 9V$ (батарея “Крона” або відповідний акумулятор) живить стабілізатор 5 В. Його вихід служить одночасно “уявною землею” U_{z1} для ОП вимірювальної схеми та напругою живлення АЦП і мікроконтролера опрацювання даних. Напруга U_{z2} призначена для живлення обидвох ОП (див. рис. 3.1 і 3.2), що входять в схему ІВС УФВ. Конденсатори С1 і С2 зменшують імпульсні завади в колі живлення, викликані роботою мікроконтролера.

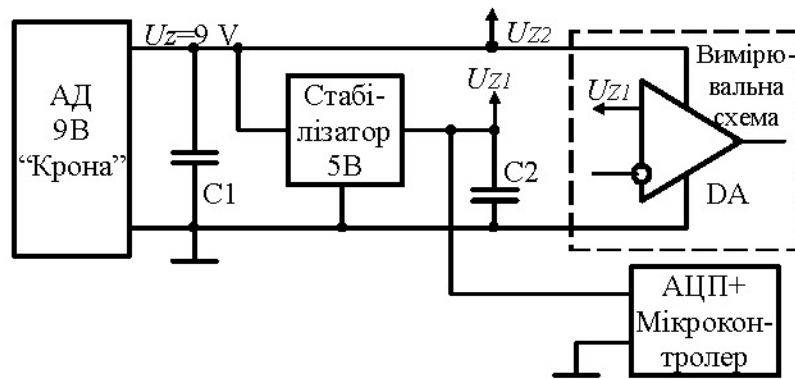


Рис. 3.3. Структурна схема живлення елементів ІВС УФВ

Доброю елементною базою для розробленої ІВС УФВ є мікроконвертори фірми Analog Devices. В їх склад входить високоякісний АЦП та мікроконтролер. У даному випадку доцільно використати мікроконвертор типу ADuC-845, в склад якого входять прецизійний 24-х розрядний сигма-дельта АЦП, мікроконтролер серії MCS-51 та комутатор на 10 каналів. Надлишкова для вимірювання УФВ розрядність АЦП може бути використана для спрощення схеми ІВС.

Через те, що теплоємність кристала ФД є невисокою, його температура при дії УФВ швидко наростає. При відсутності дії УФВ спад температури також досить швидкий (до 1°C за секунду), тому слід забезпечити швидке перемикання ФД з режиму КЗ (при вимірюванні струму КЗ ФД під час вимірювання освітленості) в режим НХ (під час вимірювання спаду напруги на ФД при вимірюванні температури його кристала). При цьому слід забезпечити також мінімальні апаратні затрати на схему перемикання, а, для зменшення дії завад та паразитних напруг і струмів витоку, слід перемикання режимів проводити не безпосередньо в колі ФД.

Функціональна схема вимірювальних каналів ІВС УФВ, що реалізує перелічені до них вимоги, подана на рис. 3.4. З неї видно, що розроблена ІВС повинна мати щонайменше три вимірювальні канали, причому функції кожного з них будуть різними. Хоча всі канали можуть працювати не одночасно, їх робота повинна бути чітко синхронізована, як між собою, так і з перемиканням

режимів НХ і КЗ (кола синхронізації на рис. 3.4 не показані). Для реалізації п. 5 перелічених вище вимог до вимірювальних каналів ІВС УФВ, як джерело струму ФД доцільно використати напругу насичення ОП, який реалізує режим КЗ (див. рис. 3.1). В такому випадку вимикання режиму КЗ і вмикання режиму НХ проходить одночасно. Для реалізації такого перемикавання можна використати ключ в колі неінвертуючого входу цього ОП (а не в колі ФД), що відповідає вимозі 5.

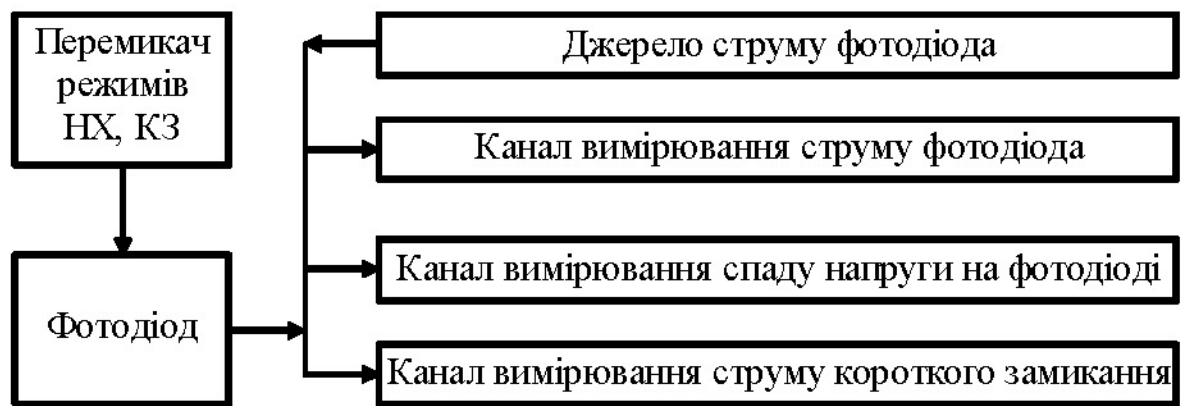


Рис. 3.4. Функціональна схема вимірювальних каналів ІВС УФВ

Перший варіант принципової схеми вимірювальних каналів ІВС УФВ, що забезпечує реалізацію режимів КЗ і НХ згідно викладених вище вимог 1 і 2 (див. рис. 3.1 і 3.2) і перемикає ці режими згідно вимоги 5, подана на рис. 3.5. У цій схемі (див. рис. 3.5) враховано, що напруги на виходах ОП DA1 і DA2, при їх живленні від автономного джерела згідно схеми рис. 3.3, будуть вищі (від 3 В до 9 В) за діапазон перетворення АЦП (2,5 В) при живленні АЦП від напруги 5 В. Тому на виходах ОП DA1 і DA2 ввімкнено резисторні подільники $R2$, $R4$ і $R3$, $R5$, що узгоджують рівні напруги U_{v1} і U_{v2} на виходах ОП DA2 і DA1 та діапазон перетворення АЦП. Хоча при такому методі узгодження втрачається чутливість схеми, порівняно з чутливістю ФД, надлишкова розрядність ADuC-845 приводить до того, що даною втратою можна нехтувати.

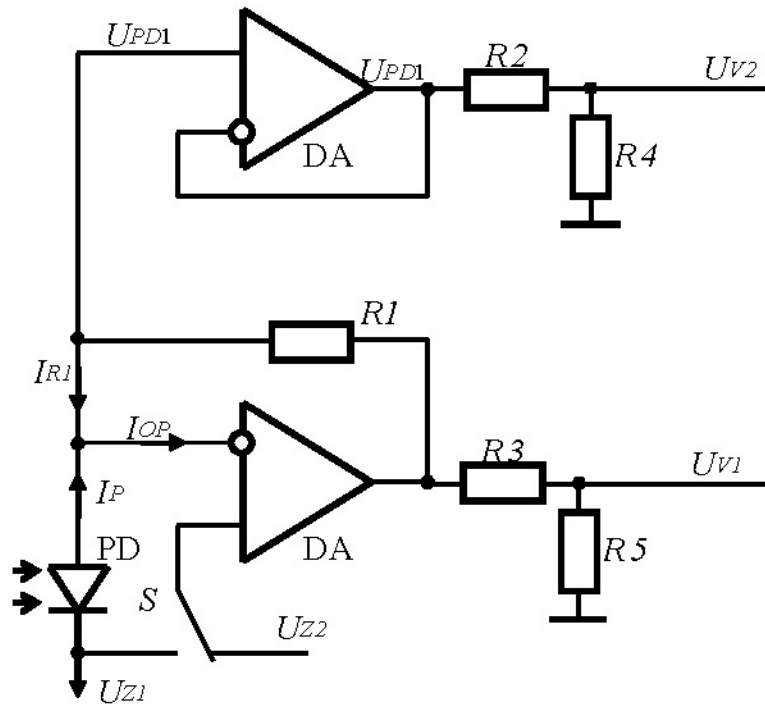


Рис. 3.5. Перший варіант принципової схеми вимірювальних каналів ІВС УФВ

На принциповій схемі (див. рис. 3.5), на відміну від функціональної схеми (див. рис. 3.4), відсутній третій вимірювальний канал – канал вимірювання струму ФД. Однак цей канал існує, хоча його можна назвати „віртуальним”. Струм I_{PD1} через ФД можна знайти знаючи опір резистора $R1$ та спад напруги на ньому U_{R1} . Цей спад напруги U_{R1} може бути визначений як різниця напруг виходу ОП DA2 (визначається при вимірюванні напруги U_{V1} на виході подільника $R3, R5$) та напруги на ФД (визначається при вимірюванні напруги U_{V2} на виході подільника $R2, R4$). Таким чином, на основі поточних результатів вимірювання напруг U_{V1} і U_{V2} , а також результатів вимірювання резисторів $R1 \dots R5$ під час налаштування схеми, можна знайти струм

$$I_{PD1} = \frac{U_{R1}}{R1} = \frac{U_{OUT-DA2} - U_{PD1}}{R1} = \frac{\frac{U_{V1}(R3+R5)}{R5} - \frac{U_{V2}(R2+R4)}{R4}}{R1}, \quad (3.3)$$

і перейти до висновку, що принципова схема рис. 3.5 повністю відповідає функціональній схемі рис. 3.4.

Недоліком схеми вимірювальних каналів ІВС УФВ, поданої на рис. 3.5, є малий робочий струм ФД I_{PD1} в режимі НХ при вимірюванні температури кристалу ФД. Цей струм формується резистором $R1$. Спад напруги на $R1$ U_{R1} можна обчислити згідно схеми рис. 3.5:

$$U_{R1} = U_{Z2} - U_{Z1} - U_{SAT-DA2} - U_{PD1} = 8,2 - 5 - 1 - 0,7 = 1,5V \quad , \quad (3.4)$$

де $U_{Z2} = 8,2V$ – напруга розрядженого автономного джерела живлення;

$U_{Z1} = 5V$ – напруга „землі”, до якої підключено ФД;

$U_{SAT-DA2} = 1V$ – напруга насичення ОП DA2;

$U_{PD1} = 0,7V$ – спад напруги на ФД.

В свою чергу, як було вказано у вимозі 1 вимог до вимірювальних каналів ІВС УФВ, опір резистора $R1$ не повинен бути меншим, ніж $100...150k\Omega$. Відповідно до цього, струм ФД $I_{R1} = I_{PD1}$, який формує ОП DA2, не буде перевищувати

$$I_{PD1} = \frac{U_{R1}}{R1} = \frac{1,5}{150} = 10\mu A \quad . \quad (3.5)$$

Даний струм ФД є надто малим для ефективного використання ФД як сенсора температури – його чутливість в такому режимі мала, впливи завад та дробових шумів на результат вимірювання температури зростають. Тому треба збільшити струм ФД до $0,4...1mA$. Таке збільшення можна реалізувати шляхом ввімкнення паралельно до резистора $R1$ додаткового резистора. Для того, щоб додатковий резистор не зменшував коефіцієнт передачі при перетворенні струму КЗ в напругу (при вимірюванні освітленості), він повинен бути ввімкненим послідовно з діодом, який буде пропускати струм лише тоді, коли

на виході ОП DA2 напруга додатня відносно „землі” U_{z1} .

Вдосконалений варіант принципової схеми вимірювальних каналів ІВС УФВ, синтезований згідно сформульованих вище вимог, подано на рис. 3.6 [20].

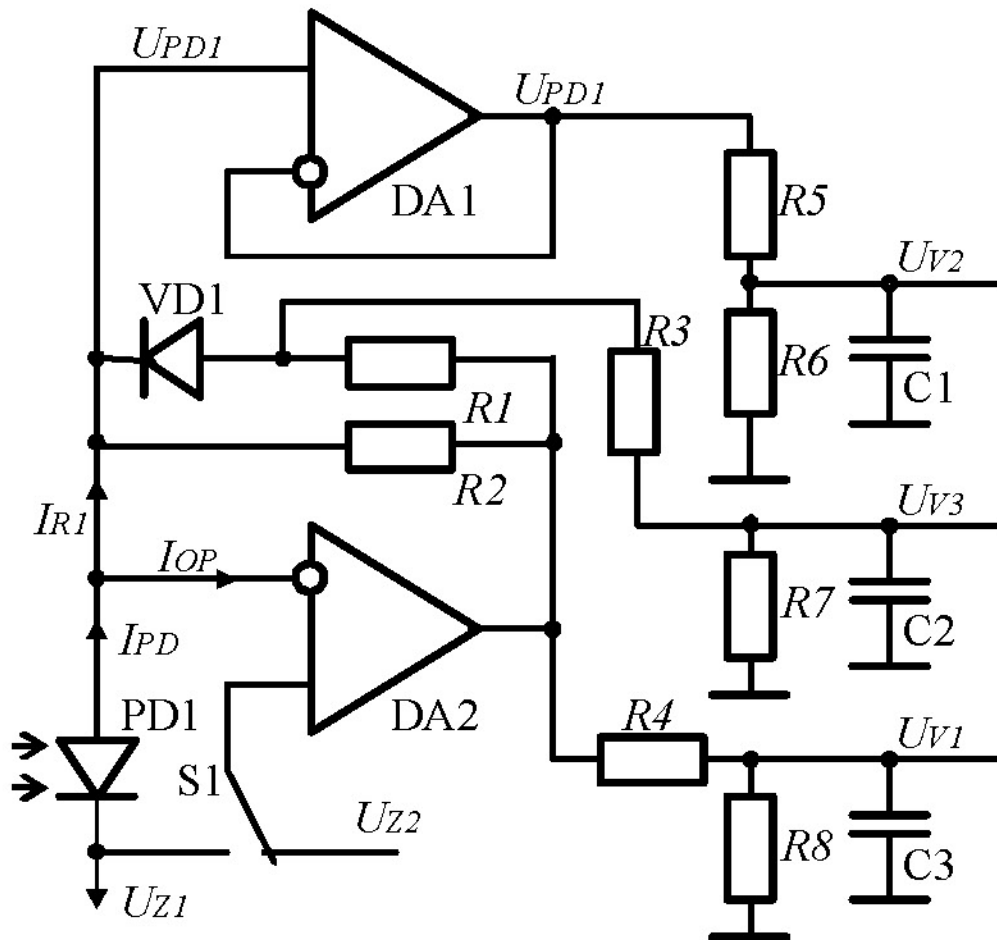


Рис. 3.6. Вдосконалений варіант принципової схеми вимірювальних каналів ІВС УФВ

На основі викладених міркувань і з врахуванням сформульованих вище вимог розроблено вдосконалений варіант принципової схеми вимірювальних каналів ІВС УФВ (рис. 3.6) [20]. Вимірювальний канал освітленості (ФД FD1 в режимі КЗ) складається з ОП DA2 (в інвертуючому режимі), охопленого зворотнім зв'язком (резистор $R2$), та подільника напруги (резистори $R4$ і $R8$), що узгоджує рівні сигналів, які подаються на АЦП (вихід U_{v1}). Так як на виході ОП DA2, під час режиму КЗ PD1, напруга нижча, ніж напруга “уявної землі”

U_{z1} , діод VD1 запертий і резистор $R1$ на роботу ОП DA2 не впливає.

Вимірювальний канал температури (див. рис. 3.6) (ФД PD1 в режимі НХ) містить ОП DA1 (в неінвертуючому режимі). Його великий вхідний опір не дає подільнику на резисторах $R5$ і $R6$ навантажувати PD1. При вимірюванні температури напруга на виході ОП DA1 перевищує напругу “уявної землі” U_{z1} , тому подільник напруги (резистори $R5$ і $R6$) узгоджує рівні сигналів, що подаються на АЦП (напруга на U_{v2} стає завжди нижча, ніж напруга “уявної землі” U_{z1}). Від схеми рис. 3.5 вимірювальний канал температури відрізняється лише наявністю резистора $R1$, що збільшує струм ФД PD1 в режимі НХ, діода VD1, що вмикає резистор $R1$ паралельно до резистора $R2$ при додатній відносно „землі” U_{z1} напрузі на виході ОП DA2, і подільника $R3, R7$, призначеного для узгодження рівнів напруги на ФД PD1 та діоді VD1 з діапазоном перетворення АЦП (всі введені деталі використовуються лише під час вимірювання температури кристалу ФД).

Перемикання режимів роботи PD1 (КЗ і НХ) виконується в схемі (див. рис. 3.6) за допомогою ключа S1. Якщо ключ S1 знаходиться в лівому положенні, то ОП DA2 працює в нормальному режимі, напруга на ФД PD1 не перевищує зміщення ОП DA2 (десятки мкВ) – реалізується режим КЗ ФД PD1. Якщо він знаходиться в правому положенні, то ОП DA2, знаходиться в режимі насичення (його вихідна напруга наближається до напруги АД). Це пов'язано з тим, що напруга зміщення U_{z2} значно перевищує суму напруги “уявної землі” U_{z1} та спаду напруги U_{PD1} на ФД PD1 (тобто $U_{z2} \gg U_{z1} + U_{PD1}$). Тому діод VD1 переходить в стан провідності та через ФД PD1 протікає струм I_{PD1} , що є сумою струмів I_{R1} та I_{R2} . ОП DA1 і DA2 мають на вході польові транзистори з р-п переходом, тому ОП DA2 при насиченні не втрачає високого вхідного опору. В результаті при правому положенні ключа S1 реалізується режим НХ ФД PD1, а конденсатори $C1 \dots C3$ на виходах $U_{v1} \dots U_{v3}$ зменшують рівень завад.

Зовнішній вигляд схеми вимірювальних каналів ІВС УФВ показано на рис. 3.7.

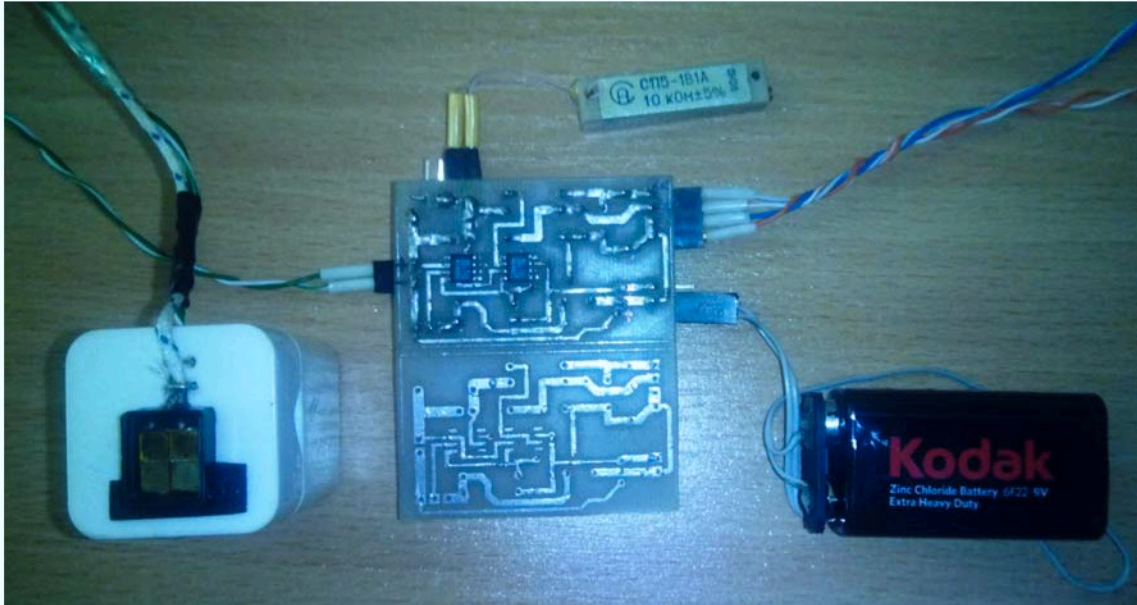


Рис. 3.7. Зовнішній вигляд схеми вимірювальних каналів ІВС УФВ

Таким чином, в даному параграфі на основі обґрунтованих вимоги до вимірювальних каналів ІВС УФВ синтезовано їх структурну схему і розроблено принципові схеми.

3.2 Опрацювання результатів вимірювань

У ІВС УФВ, принципова схема вимірювальних каналів якої подана на рис. 3.6, прямі вимірювання не мають місця – жодна вимірювана величина (ні освітленість, ні температура кристала ФД) не вимірюються безпосередньо. Також ці вимірювання не можна класифікувати як непрямі, адже і освітленість, і температура кристала ФД розпізнаються попередньо навченими мережами. Таким чином, пропонована ІВС УФВ реалізує сукупні вимірювання – на основі прямих вимірювань (результатів аналого-цифрового перетворення напруг на виході каналів U_{V1} , U_{V2} , U_{V3}) проводяться обчислення напруг і струмів, що характеризують стан ФД (тобто виконуються непрямі вимірювання), а потім, на основі цих непрямих вимірювань, отримуємо спочатку значення температури кристалу ФД (шляхом розпізнавання за допомогою відповідної, попередньо

навченої, НМ1), а потім отримуємо значення освітленості (шляхом розпізнавання за допомогою іншої, попередньо навченої, НМ2).

Тому для отримання значень вимірюваних системою величин необхідно відповідним чином опрацювання результати проміжних вимірювань.

Струм КЗ I_{PD}^{KZ} ФД PD1 визначається за напругою на виході каналу в режимі КЗ U_{V1}^{KZ} схеми рис. 3.6 [21]. При цьому можна записати

$$U_{V1}^{KZ} = U_{DA2}^{KZ} \frac{R8}{R4+R8} = I_{PD}^{KZ} R1 \frac{R8}{R4+R8} \quad , \quad (3.6)$$

де U_{DA2}^{KZ} – напруга на виході ОП DA2 при роботі ФД PD1 в режимі КЗ;

$R1...R8$ – значення опорів резисторів у схемі рис. 3.6.

Перетворивши (3.6), отримаємо

$$I_{PD}^{KZ} = \frac{U_{V1}^{KZ} (R4+R8)}{R1 \cdot R8} \quad . \quad (3.7)$$

Температуру кристалу T_{PD} ФД PD1 можна визначити за різницею поточного спаду напруги на ньому U_{PD}^{POT} та спаду напруги на ньому U_{PD}^{T0} при нульовій температурі

$$T_{PD} = (U_{PD}^{POT} - U_{PD}^{T0}) / TKU_{PD} \quad , \quad (3.8)$$

де TKU_{PD} – температурний коефіцієнт ФД PD1.

За даними [8, 9, 56] температурний коефіцієнт ФД $TKU_{PD} \approx -3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Спади напруг U_{PD}^{POT} і U_{PD}^{T0} теж залежать від струму ФД I_{PD}^{MX} . Як було вказано раніше, ФД при вимірюванні температури (в режимі НХ) слід теж розглядати як БПС, на входах якого є робочий струм I_{PD}^{MX} і викликаний ним поточний спад напруги U_{PD}^{POT} , а на виході – температура кристалу T_{PD} .

Як було зазначено, спади напруги U_{PD}^{POT} та U_{PD}^{T0} на ФД PD1 визначається його робочим струмом I_{PD}^{MX} , який, в свою чергу, є сумою струмів

$$I_{PD}^{NX} = I_{R1} + I_{R2} - I_{R3} \quad , \quad (3.9)$$

де I_{R1} , I_{R2} , I_{R3} – струми через резистори $R1$, $R2$, $R3$, відповідно, при роботі в режимі НХ.

В свою чергу, згідно схеми рис. 3.6, можна записати

$$I_{R1} = (U_{DA2}^{NAS} - U_{PD} - U_{VD1}) / R1 \quad , \quad (3.10)$$

$$I_{R2} = (U_{DA2}^{NAS} - U_{PD}) / R2 \quad , \quad (3.11)$$

$$I_{R3} = U_{V3} / R7 \quad , \quad (3.12)$$

де U_{DA2}^{NAS} – напруга насичення ОП DA2, $U_{DA2}^{NAS} \approx U_{Z2} \approx 8,7 \text{ V}$;

U_{VD1} – спад напруги на діоді VD1 в стані провідності.

Слід відзначити, що як U_{DA2}^{NAS} , так і U_{VD1} , по-перше, відомі приблизно, а по-друге – мають значні температурні зміни. Тому необхідне визначення струмів I_{R1} , I_{R2} , I_{R3} в процесі експлуатації ІВС УФВ. Визначити струм I_{R2} можна за вихідними напругами U_{V1}^{NX} і U_{V2}^{NX} . Згідно схеми рис. 3.6, можна записати

$$U_{V1}^{NX} = U_{DA2}^{NAS} \frac{R8}{R4 + R8} \quad , \quad (3.13)$$

$$U_{V2}^{NX} = U_{PD}^{NX} \frac{R6}{R5 + R6} \quad . \quad (3.14)$$

Перетворивши (3.13) і (3.14), отримаємо

$$U_{DA2}^{NAS} = U_{V1}^{NX} \frac{R4 + R8}{R8} \quad , \quad (3.15)$$

$$U_{PD}^{NX} = U_{V2}^{NX} \frac{R5 + R6}{R6} \quad . \quad (3.16)$$

Підставивши (3.15) і (3.16) у (3.11), отримаємо

$$I_{R2} = (U_{V1}^{NX} \frac{R4+R8}{R8} - U_{V2}^{NX} \frac{R5+R6}{R6}) / R2 \quad . \quad (3.17)$$

У (3.10) входить також невідоме значення U_{VD1} . Тому для визначення I_{R1} введемо вимірювальний канал U_{V3} , створений подільником на резисторах $R3$ і $R7$. Тоді, згідно схеми рис. 3.6, можна записати

$$U_{V3}^{NX} = U_{R1}^L \frac{R7}{R3+R7} \quad . \quad (3.18)$$

де U_{R1}^L – напруга на лівому виводі резистора $R1$.

Напругу U_{R1}^L з (3.18) можна визначити як

$$U_{R1}^L = U_{V3}^{NX} \frac{R3+R7}{R7} \quad . \quad (3.19)$$

В такому випадку напругу на резисторі $R1$ можна визначити як

$$U_{R1} = U_{V1}^{NX} \frac{R4+R8}{R8} - U_{V3}^{NX} \frac{R3+R7}{R7} \quad . \quad (3.20)$$

Звідси, струм I_{R1}

$$I_{R1} = \frac{1}{R1} \left(U_{V1}^{NX} \frac{R4+R8}{R8} - U_{V3}^{NX} \frac{R3+R7}{R7} \right) \quad . \quad (3.21)$$

Таким чином, всі струми і напруги в схемі рис. 3.6 можуть бути визначені за результатами вимірювання напруг на виході вимірювальних каналів U_{V1} , U_{V2} і U_{V3} . Далі за результатами обчислень проміжних параметрів схеми (струму КЗ I_{PD}^{KZ} , струмів I_{R1} , I_{R2} , I_{R3} , робочого струму фотодіода I_{PD}^{NX} та спаду напруги на ньому U_{PD}^{POT}) за формулами (3.7), (3.9), (3.12), (3.17) і (3.21) визначаємо вхідні дані для НМ, які визначають температуру кристалу T_{PD} ФД PD1 та освітленість E .

Загальна схема опрацювання результатів вимірювань при визначенні освітленості за допомогою схеми рис. 3.6 подана на рис. 3.8. З цієї схеми видно, що основою для обчислень служать чотири результати аналого-цифрового перетворення U_{V1}^{KZ} , U_{V1}^{NX} , U_{V2}^{NX} , U_{V3}^{NX} напруг на виході вимірювальних каналів U_{V1} , U_{V2} і U_{V3} у режимах КЗ і НХ. Для обчислення проміжних напруг і струмів використовуються значення опору резисторів $R1...R8$. Якщо при обробленні даних використовувати дійсні значення опору резисторів, визначені при виготовленні схеми рис. 3.6, то похибку в результат вимірювання освітленості будуть вносити лише температурні та часові зміни опору резисторів $R1...R8$. При використанні неточних (з великими допустимими відхиленнями опору від номінального), але стабільних резисторів (наприклад, металоплівкових) отримаємо високу точність вимірювання освітленості при невисоких затратах.

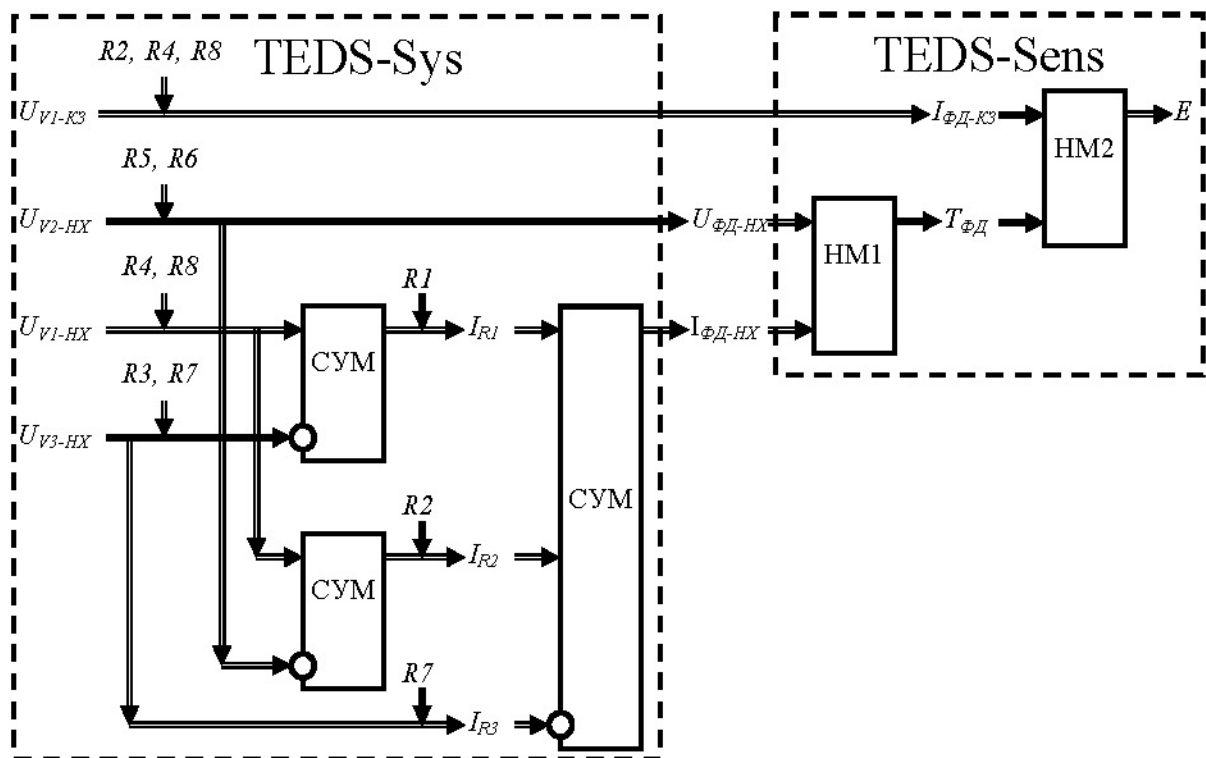


Рис. 3.8. Схема опрацювання результатів вимірювань при визначенні освітленості

З рис. 3.8 також видно, що як значення результатів аналого-цифрового перетворення U_{V1}^{KZ} , U_{V1}^{NX} , U_{V2}^{NX} , U_{V3}^{NX} , так і значення опору резисторів $R1...R8$

багатократно входять у результат вимірювання освітленості, тому пряма аналітична оцінка впливу похибки окремих компонентів схеми рис. 3.6 на результат вимірювання освітленості вимагає значних зусиль. Значно ефективніше таку оцінку можна провести методом імітаційного моделювання.

Однак, як було показано в першому розділі, основним джерелом похибки вимірювання освітленості є фотодіод, а основним шляхом підвищення точності – перехід до індивідуальної ФП ФД. Слід відзначити, що, незважаючи на суттєве скорочення кількості точок повірки ФД (з 49-ти до 9-ти), при переході до ІФП ФД повірка залишається найбільш трудомісткою операцією. Тому доцільно розробити спеціалізований стенд експериментального дослідження ФД, за допомогою якого їх можна повірять у необхідному діапазоні температур експлуатації та значень освітленості.

Таким чином, у даному параграфі виведено всі формули, що потрібні при опрацюванні результатів аналого-цифрового перетворення з метою отримання вхідних даних для нейронних мереж, а також розроблено схему опрацювання результатів вимірювань при визначенні освітленості.

3.3 Методика переходу до індивідуальних функцій перетворення сенсорів

Для переходу до індивідуальної ФП ФД слід розробити відповідне обладнання та методику його використання.

Стенд визначення індивідуальних ФП ФД (повірки ФД) повинен складатися з двох підсистем. Основним завданням першої підсистеми є встановлення освітленості ФД, температури оточуючого його середовища та його робочого струму в необхідному діапазоні. Друга підсистема - вимірювальна підсистема стенду повинна забезпечити (в заданих стендом умовах) достатньо точне вимірювання струму КЗ ФД, а також його робочого струму та спаду напруги на ньому в режимі НХ.

Структурна схема розробленого стенду подана на рис. 3.9, а на рис. 3.10 -

його зовнішній вигляд. Вона складається з двох підсистем – підсистеми задання режимів роботи світлодіода і фотодіода та вимірювальної підсистеми. В першу підсистему входять стабілізатори напруги і струму, світлодіод, блоки живлення № 1 та №2, вольтметр і амперметр, нагрівач, а також пристрій задання відстані світлодіода від фотодіода. Друга підсистема є, практично, класичною ІВС. В неї входять перемикач каналів, універсальний вимірювальний прилад В7-46, підключений через блок спряження до комп'ютера. Вимірювання температури в термостаті виконується за допомогою платиного термометра опору типу 100П та взірцевої котушки R_N .

Як тимчасовий еталонний засіб, використано світлодіод EDISON EDEV-3LA1 [116], повірений згідно ГОСТ Р 8.590-2001 [117]. Під час повірки ФД необхідно стабілізувати струм еталонного світлодіода та контролювати його температуру. Такий контроль виконується сенсором LM335М [118], розміщеним безпосередньо на клеммах кріплення світлодіода до радіатора. Зміна освітленості задається зміною відстані h між еталонним світлодіодом і досліджуваним ФД. Аналіз показав, що похибка задання освітленості не перевищує 1,2%.

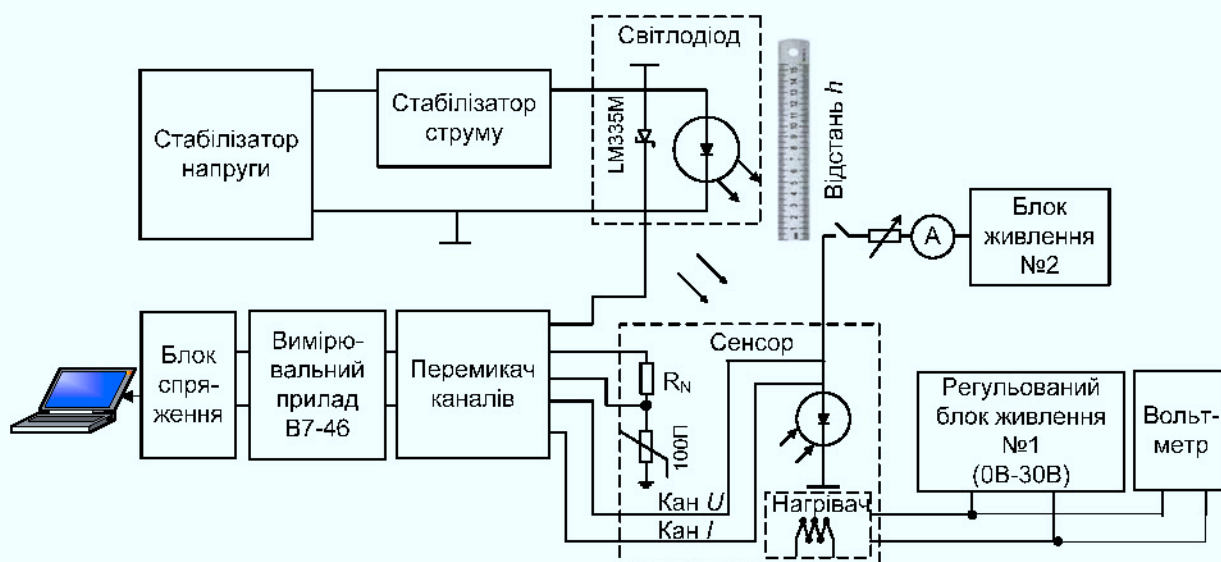


Рис. 3.9. Структурна схема розробленого стенда визначення індивідуальних ФП ФД (повірки ФД)



Рис. 3.10. Розроблений стенд визначення індивідуальних ФП ФД.

Температура в термостаті досліджуваного ФД задається нагрівачем. Він підключений до регульованого блоку живлення, напруга якого контролюється цифровим вольтметром, його похибка не перевищує 0,05%, а роздільна здатність – 0,00125% [119]. Контроль напруги нагрівача доцільний для встановлення заданої температури термостата з похибкою не більше 0,2°C, що дозволяє приводити результати вимірювань до значення температури точки повірки ФД за спрощеними лінійними залежностями. Відносно малі відхилення заданої температури термостата дозволяють використовувати лінійні поправки, методичною похибкою, що виникає при цьому можна нехтувати. Для зменшення градієнтів температури в термостаті, викликаних вікном, через яке УФВ поступає на ФД, останній оснащений пінопластовою трубкою, приклеєною одним торцем до стінки термостата. Інший її торець щільно прилягає до корпусу сенсора, що містить досліджуваний ФД.

Для вимірювання сигналу сенсора температур еталонного світлодіода та термостата з досліджуваним ФД, робочого струму досліджуваного ФД і спаду напруги ньому, а також його струму КЗ, використано вольтамперметр В7-46 класу 0,02 [120], підключений до комп'ютера, та перемикач каналів.

Контроль температури еталонного світлодіода, як було вказано,

виконується аналоговим інтегральним сенсором LM335M [118], його чутливість складає $10 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$. Через те, що він служить лише для того, щоб температура еталонного світлодіода знаходилася у заданих межах, його похибка практично не впливає на похибку визначення індивідуальної ФП ФД. Якщо температура еталонного світлодіода знаходиться у заданих межах $(50 \pm 3)^\circ\text{C}$, то похибка задання освітленості не перевищує 1,2%.

Для контролю температури термостата з досліджуваним ФД використані повірений платиновий термоперетворювач опору типу 100П [121] та взірцева котушка опору P331 (100 Ом) [122]. За допомогою перемикача каналів їх виходи підключаються до входів прецизійного цифрового вольтметра В7-46. Схема підключення подана на рис. 3.9. Резистор R_D , що обмежує струм в колі, взірцева котушка опору R_N і платиновий термометр опору R_t ввімкнені послідовно. Через те, що значення опору R_N взірцевої котушки опору відомо з високою точністю, струм I_{Rt} через термометр опору можна визначити з високою точністю за результатами вимірювання спаду напруги U_N на R_N

$$I_{Rt} = \frac{U_N}{R_N} \quad . \quad (3.22)$$

Знаючи I_{Rt} , можна розрахувати опір термометра R_t за результатами вимірювання спаду напруги U_T

$$R_t = \frac{U_T}{I_{Rt}} \quad . \quad (3.23)$$

Температуру в термостаті можна визначити за ФП термометра опору.

Похибка вимірювання температури визначається похибками взірцевої котушки, термометра опору і методу заміщення при вимірюванні опору термометра. Похибки від проводів сполучення ($r1 \dots r8$ на схемі рис. 3.11) практично не впливають на результат вимірювання – проводи $r1 \dots r4$ ввімкнені

послідовно з великим (не менше 10 ГОм) входним опором вольтметра В7-46, а опір проводів $r_5...r_8$ враховується при визначенні струму за (3.22).

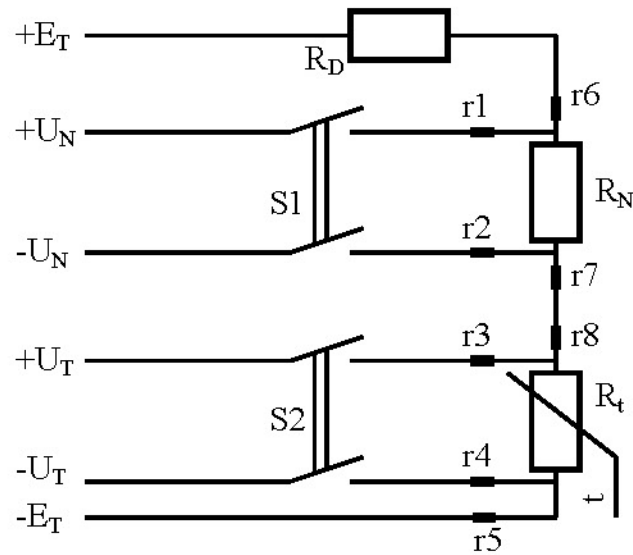


Рис. 3.11. Схема підключення взірцевої котушки та термометра опору

Похибку вимірювання температури Δ_{RN} , що вносить взірцева котушка класу 0,01 ($\delta_N \leq 0,01\%$), можна визначити за чутливістю термометра опору $S_{Rt} \approx 0,4\%/^{\circ}C$

$$\Delta_{RN} = \frac{\delta_N}{S_{Rt}} \approx 0,025^{\circ}C \quad . \quad (3.24)$$

Похибка вимірювання температури Δ_{Rt} , що вносить термометр опору R_t , з врахуванням результатів повірки не перевищує похибки його повірки δ_{Rt}^{POV} , яка не більша за п'яту частину допустимої похибки $\delta_{Rt}^{DOP} \leq 0,1\%$ [121] при випуску, тобто $\delta_{Rt}^{POV} \leq 0,02\%$. В такому випадку похибку вимірювання температури Δ_{Rt} можна визначити аналогічно, як і похибку, що вносить взірцева котушка

$$\Delta_{Rt} = \frac{\delta_{Rt}^{POV}}{S_{Rt}} \approx 0,05^{\circ}C \quad . \quad (3.25)$$

Похибка методу заміщення δ_{MZ} , згідно [123], визначається за формулою

$$\delta_{MZ} = 4\delta_{PRYL}^{DOP} \frac{U_{Rt}^{MAX} - U_{RN}}{U_{RN}} \approx 4 \cdot 0,02 \frac{114 - 100}{100} \leq 0,09\%, \quad (3.26)$$

де δ_{PRYL}^{DOP} – допустима похибка нелінійності вимірювального приладу, в нашому випадку В7-46 (через те, що похибка нелінійності для В7-46 окремо не нормується, приймаємо, що вона рівна допустимій похибці приладу в цілому, тобто $\delta_{PRYL}^{DOP} \leq 0,02\%$);

U_{Rt}^{MAX} та U_{RN} – напруги на термометрі опору та взірцевій котушці відповідно, для термометра опору при температурі 36°C (максимальній температурі дослідження ФД), що відповідає максимальному значенню похибки методу заміщення.

Абсолютну похибку методу заміщення Δ_{MZ} можна визначити аналогічно, як і похибку, що вносить взірцева котушка

$$\Delta_{MZ} = \frac{\delta_{MZ}}{S_{Rt}} \approx 0,045^\circ\text{C} \quad . \quad (3.27)$$

Крім того, в склад похибки вимірювання температури входять дві похибки дискретності цифрового вольтметра В7-46 (при вимірюванні спадів напруги на взірцевій котушці та термометрі опору). Ці похибки не перевищують $0,005\%$, тому їх впливом можна нехтувати.

Сумарна похибка вимірювання температури не буде перевищувати

$$\Delta_T = \sqrt{\Delta_{RN}^2 + \Delta_{Rt}^2 + \Delta_{MZ}^2} \leq 0,08^\circ\text{C} \quad . \quad (3.28)$$

Приймаємо із запасом, що похибка вимірювання температури не перевищує $0,1^\circ\text{C}$.

При визначенні індивідуальної ФП ФД, крім зміни температури ФД, змінюють його робочий струм в межах від 0,4 мА до 1 мА. При цьому цифровий амперметр, підключений до блоку живлення №2 служить для зручності встановлення заданого значення струму, дійсне значення робочого струму ФД вимірюється прецизійним цифровим вольтметром В7-46. При цьому, для виключення розривів у колі струму ФД, його робочий струм обчислюється за спадом напруги на резисторі типу С5-5 [124], опір R_{C5-5} якого попередньо виміряний прецизійним вольтметром В7-46. Робочий струм I_{PD} ФД обчислюють за формулою

$$I_{PD} = \frac{\Delta U_R}{R_{C5-5}} = \frac{U_R^1 - U_R^2}{R_{C5-5}}, \quad (3.29)$$

де U_R^1, U_R^2 – результати вимірювання напруги на резисторі типу С5-5.

Похибка вимірювання опору резистора типу С5-5 δ_R^{VYM} , згідно [120], не перевищує 0,03%. Похибка вимірювання спадів напруги δ_{UR}^{VYM} цим вольтметром не перевищує, згідно [120], 0,02%. Однак слід відзначити, що для визначення струму проводиться два вимірювання напруги, а результат вимірювання (спад напруги на резисторі С5-5) визначається у (3.29) як різниця напруг. При цьому похибка обох результатів вимірювання може бути різною, навіть мати інший знак, тому її слід додавати до виміряної різниці напруг. Для того, щоб ця похибка надто не зростала, опір резистора С5-5 вибрано достатньо великим – 1 кОм, в такому разі різниця напруг приблизно рівна половині більшої з напруг і сумарна похибка різниці δ_{UR}^S , викликана похибкою вимірювання напруг, зросте не більше, ніж у 2 рази, тобто

$$\delta_{UR}^S = 2\sqrt{(\delta_{UR}^{VYM})^2 + (\delta_{UR}^{VYM})^2} \leq 0,06\% \quad , \quad (3.30)$$

Сумарна похибка вимірювання робочого струму δ_{IPD} в даному випадку не буде перевищувати

$$\delta_{IPD} = \sqrt{(\delta_R^{VIM})^2 + (\delta_{UR}^S)^2} \leq 0,08\% \quad (3.31)$$

Напруга на ФД під час визначення його індивідуальної ФП не буде перевищувати 1 В. Похибка вимірювання цієї напруги, з врахуванням того, що найближчий діапазон вимірювання вольтметра В7-46 складає 2 В, не буде перевищувати 0,03%.

Струм КЗ I_{KZ} ФД, який не перевищує 10 мкА, під час визначення індивідуальної ФП ФД вимірюється вольтметром В7-46, ввімкненим у режим вимірювання струму. При цьому похибка вимірювання струму, з врахуванням того, що найближчий діапазон вимірювання вольтметра В7-46 складає 20 мкА, не буде перевищувати 0,14%.

Необхідно відзначити, що, як при вимірюванні освітленості, так і при визначенні індивідуальної ФП ФД, вести корекцію похибки ФД треба за температурою його кристала. Тому слід спочатку провести дослідження індивідуальної ФП ФД за температурою від струму через ФД та спаду на ньому напруги в режимі НХ. Через те, що під час проведення цих досліджень на кристал ФД не діє ні УФВ, ні інші види випромінювання (відповідне вікно закрито) температура кристалу є, практично, рівною температурі в термостаті. Відсутність нагріву кристалу вимірюваним випромінюванням означає, що, якщо градієнти температури в термостаті достатньо малі (якість термоізоляції достатньо висока), то методична похибка від різниці температур кристалу і термометра опору буде мала і нею можна нехтувати.

Таким чином, у даному параграфі оцінено похибки розробленого стенда визначення індивідуальних ФП ФД, які будуть використані при оцінці похибки результатів вимірювання освітленості за допомогою розробленої ІВС УФВ.

3.4 Методика експериментальних досліджень сенсорів ультрафіолетового випромінювання і їх результати

Відповідно до запропонованого в другому розділі методу прогнозу результатів повірки ФД в точках, де дійсна повірка не проводилася, необхідно провести дослідження 30-50 однотипних ФД у всіх 49 точках діапазону перетворення обидвох фізичних величин (освітленості та температури). Однак такої кількості ФД в наявності не було, тому всі дослідження проведено для групи 11 ФД.

Індивідуальну ФП ФД в режимі НХ (дослідження ФП ФД при вимірюванні температури) визначали одночасно для всіх ФД, які були розміщені в термостаті. Методика експериментальних досліджень полягає у наступному:

1. встановлюють в термостаті температуру $T_j^{NOMINAL}$ (де j – поточний номер температури з ряду 24; 26; 28; 30; 32; 34; 36°C) з похибкою не більше 0,2°C. Встановлену температуру в термостаті T_j^{REAL} вимірюють з похибкою не більше 0,05°C;

2. встановлюють струм через ФД в режимі НХ $I_{jk-NX}^{NOMINAL}$ (де k – поточний номер струму з ряду 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1 мА) з похибкою не більше 0,5 мкА (тобто 0,05%);

3. вимірюють спад напруги на кожному ФД U_{ijk-NX}^{REAL} (де i – поточний номер ФД);

4. в процесі вимірювань їх результати записують у файл t1.txt у рядку їх визначення, тобто T_j^{REAL} , $I_{jk-NX}^{NOMINAL}$, U_{ijk-NX}^{REAL} ;

5. імпортують файл t1.txt у Excel, а потім переставляють колонки значень так, щоб отримати порядок $I_{jk-NX}^{NOMINAL}$, T_j^{REAL} , U_{ijk-NX}^{REAL} , і запам'ятовують отриману таблицю під іменем t2.txt;

6. навчають апроксимуючу НМ, використовуючи файл t2.txt як навчальну вибірку, при цьому на вхід НМ подаються значення $I_{jk-NX}^{NOMINAL}$, T_j^{REAL} ,

а обчислене НМ значення порівнюють з бажаним значенням U_{ijk-NX}^{REAL} ;

7. прогнозують за допомогою НМ, навченої при виконанні п. 6, значення $U_{ijk-NX}^{REAL-TN}$ для струмів $I_{jk-NX}^{NOMINAL}$ та температур $T_j^{NOMINAL}$. Отримані значення записують у файл t3.txt, вони будуть використовуватися для прогнозу результатів повірки інших ФД в точках, де ці ФД не були повірені, згідно методу, запропонованого в другому розділі.

Індивідуальну ФП ФД в режимі КЗ (при дослідженні ФП ФД при вимірюванні освітленості) необхідно визначати індивідуально для кожного ФД, для чого його розміщують в термостаті. Методика цих експериментальних досліджень полягає у наступному:

1. встановлюють в термостаті температуру $T_j^{NOMINAL}$ (де j – поточний номер температури з ряду 24; 26; 28; 30; 32; 34; 36°C) з похибкою не більше 0,2°C.

2. встановлюють шляхом зміни відстані між світлодіодом і ФД освітленість ФД E_m^{REAL} (де m – поточний номер відстані між світлодіодом і ФД з ряду 160; 200; 240; 280; 320; 360 мм) з похибкою не більше 0,2 мм;

3. вимірюють струм КЗ кожного ФД I_{ijm-KZ}^{REAL} (де i – поточний номер ФД);

4. для визначення індивідуальної температури кристалу T_{ij}^{REAL} відразу після вимірювання струму КЗ (згідно п. 3 даної методики) вимірюють, згідно вимог § 3.2, струм ФД в режимі НХ і спад напруги на ньому. Температуру кристалу T_{ij}^{REAL} визначають за допомогою навченої НМ1, отриманої в результаті виконання попередньої методики;

5. в процесі вимірювань їх результати записують у файл f1.txt у порядку їх визначення, тобто I_{ijm-KZ}^{REAL} , T_j^{REAL} ;

6. імпортують файл f1.txt у Excel, а потім вставляють колонку із значенням E_m^{REAL} так, щоб отримати порядок T_j^{REAL} , I_{ijm-KZ}^{REAL} , E_m^{REAL} , і запам'ятовують отриману таблицю під іменем f2.txt;

7. навчають апроксимуючу НМ, використовуючи файл f2.txt як навчальну вибірку, при цьому на вхід НМ подаються значення T_j^{REAL} , I_{ijm-KZ}^{REAL} , а обчислене

НМ значення порівнюють з бажаним значенням E_m^{REAL} ;

8. прогнозують за допомогою НМ, навченої при виконанні п. 7, значення освітленості $E_m^{NOMINAL}$ для значень струмів КЗ $I_{ijm-KZ}^{NOMINAL}$ та температур $T_j^{NOMINAL}$.

Отримані значення записують у файл f3.txt, вони будуть використовуватися для прогнозу результатів повірки інших ФД в точках, де ці ФД не були повірені, згідно методу, запропонованого в другому розділі.

Отримані при експериментальних дослідженнях результати вимірювань температури в термостаті T_j^{REAL} та спаду напруги на кожному ФД U_{ijk-NX}^{REAL} для заданого струму ФД $I_{jk-NX}^{NOMINAL}$ при роботі в режимі НХ, а також струму КЗ кожного ФД I_{ijm-KZ}^{REAL} для заданих температури кристалу T_{ij}^{REAL} та освітленості E_m^{REAL} при роботі в режимі КЗ подано у відповідних таблицях додатків К та Л. Як приклад, на рис. 3.12а подано індивідуальну ФП першого ФД за температурою, а на рис. 3.12б індивідуальну ФП цього ж сенсора за освітленістю.

На рис. 3.13а подано похибку відтворення ІФП ФД за температурою, отриманою в результаті нейромережевого прогнозу точок повірки, де результати повірки прогнозувались за допомогою методу, розробленого в розділі 2.

На рис. 3.13б подано похибку відтворення ІФП ФД за освітленістю, отриманою в результаті нейромережевого прогнозу точок повірки, де результати повірки прогнозувались за допомогою методу, розробленого в розділі 2.

Результати опрацювання цих експериментальних даних, де вказано температури $T_j^{NOMINAL}$ для спадів напруги на ФД $U_{ijk-NX}^{REAL-TN}$ та струмів $I_{jk-NX}^{NOMINAL}$, а також значення освітленості $E_m^{NOMINAL}$ для значень струмів КЗ $I_{ijm-KZ}^{NOMINAL}$ та температур $T_j^{NOMINAL}$, тобто результати дослідження ФП групи однотипних сенсорів, підготовлені для використання при реалізації запропонованого у другому розділі методу прогнозу результатів повірки ФД в точках, де повірка насправді не проводилася, подано у відповідних таблицях додатків М та Н.

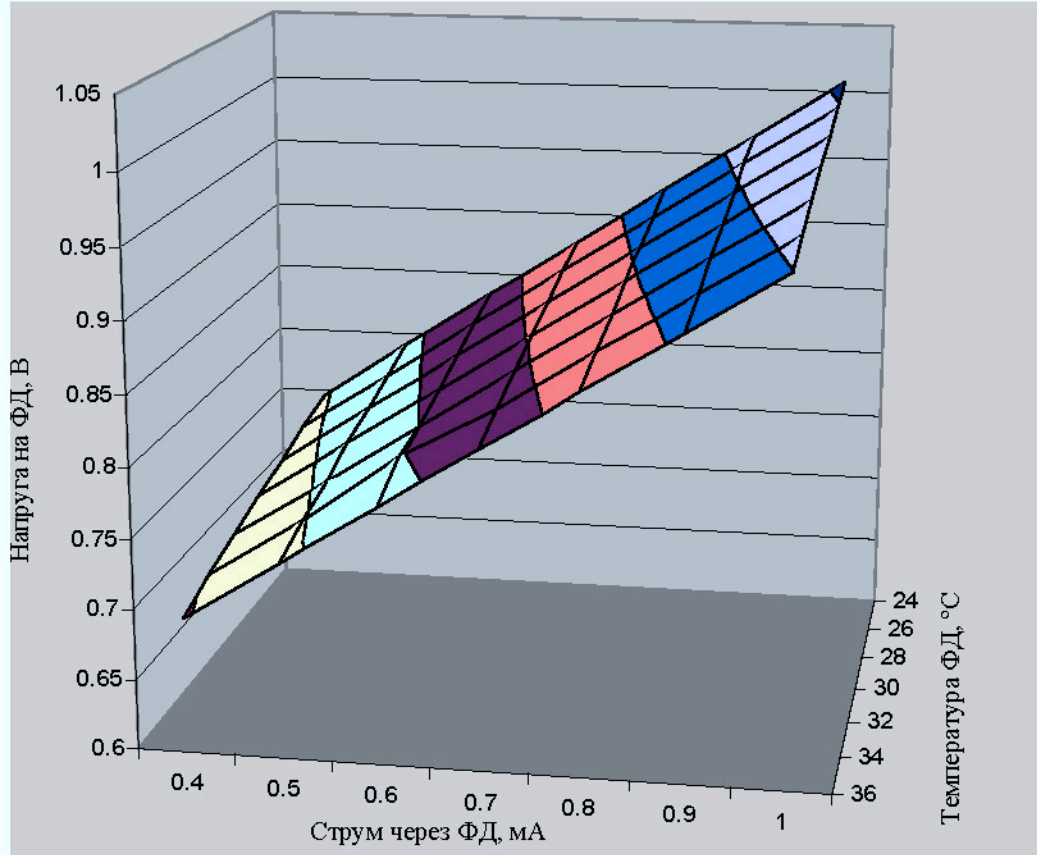


Рис. 3.12а. Індивідуальна ФП першого ФД за температурою

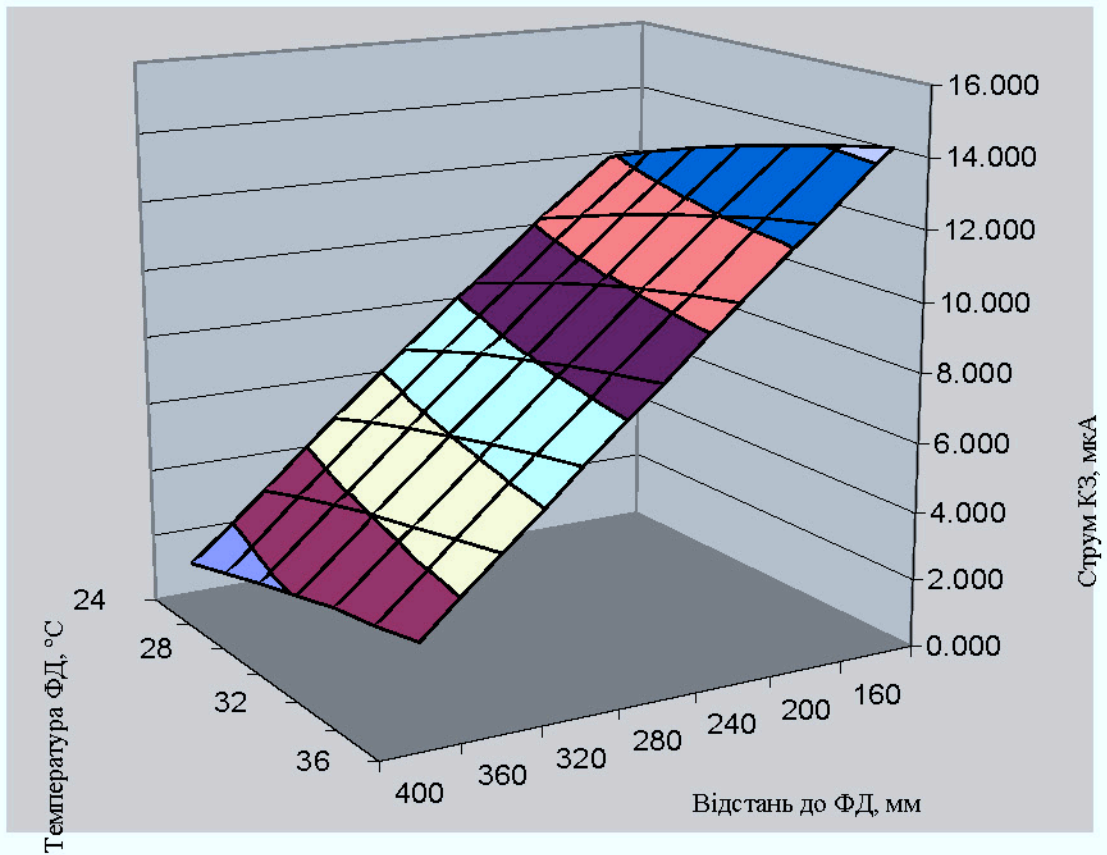


Рис. 3.12б. Індивідуальна ФП першого ФД за освітленістю

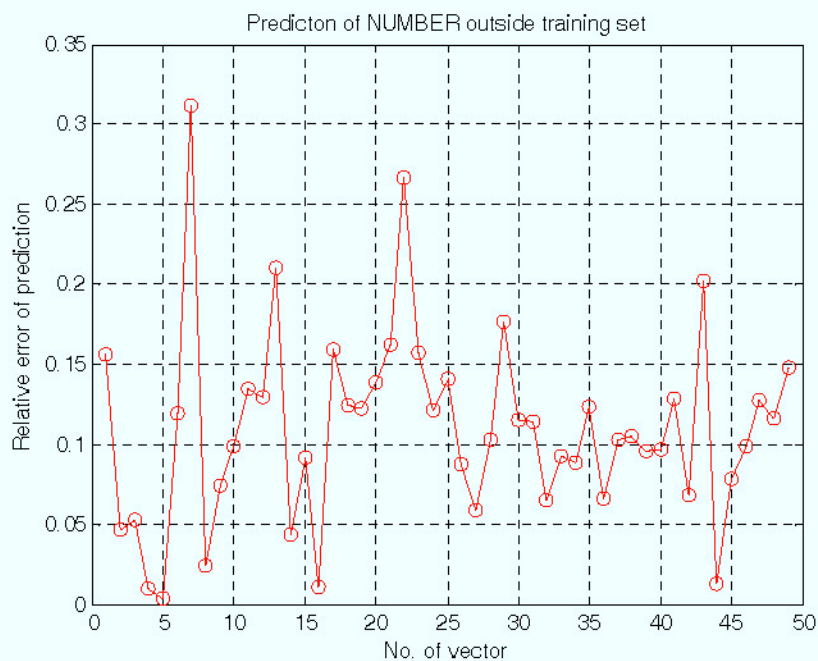


Рис. 3.13а. Похибка відтворення ІФП ФД за температурою за допомогою нейронної мережі

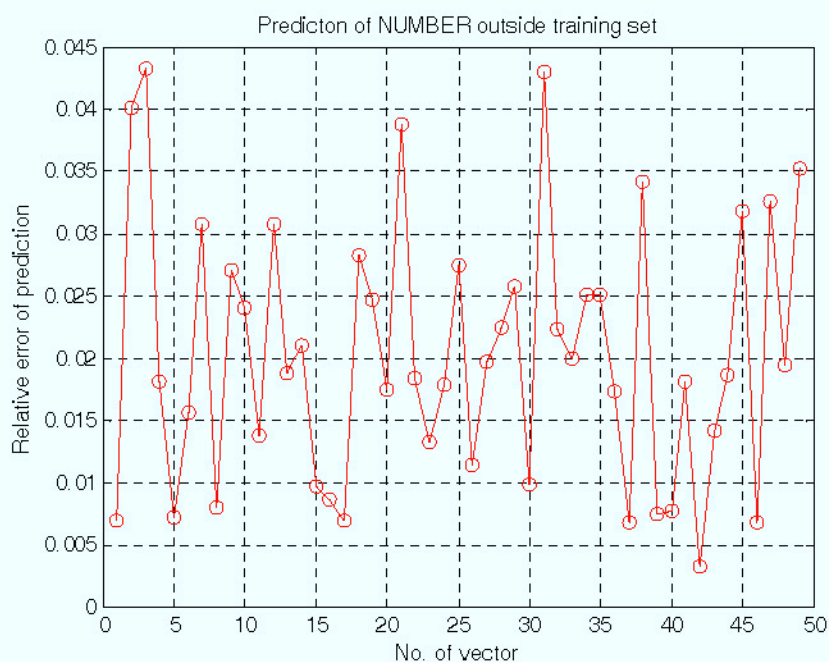


Рис. 3.13б. Похибка відтворення ІФП ФД за освітленістю за допомогою нейронної мережі

На основі даних таблиць додатків М та Н проведено оцінку похибки

прогнозу результатів повірки для досліджених ФД УФВ за методом, запропонованим у другому розділі. При дослідженні кожен раз один із ФД приймався за той, результати повірки якого необхідно прогнозувати, а решта 10 відігравали роль групи однотипних сенсорів. Похибка прогнозу оцінювалася за відхиленням результату прогнозу від дійсного значення повірки, відомого із таблиць додатків М та Н.

Максимальні значення похибок температури кристалу ФД, отримані згідно таблиць додатків М та Н, подано на рис. 3.14, а похибок визначення світлового потоку УФВ – на рис. 3.15.

Як видно з рис. 3.14, похибка прогнозу значень температури має співмірні як систематичну, так і випадкову складові. При цьому систематична складова приблизно однакова для всіх точок прогнозу. Однак, для спрощення аналізу похибки вимірювання світлового потоку, можна прийняти, що похибка прогнозу температури не перевищує $0,056^{\circ}\text{C}$. Як видно з рис. 3.15, у похибці прогнозу світлового потоку випадкова складова значно перевищує систематичну. Однак, аналогічно до похибки прогнозу температури, можна прийняти, що похибка прогнозу світлового потоку не перевищує $\pm 0,11\%$. Ці значення похибок прогнозу будуть використані при оцінці сумарної похибки вимірювання світлового потоку УФВ.

У даному параграфі розроблено методику експериментального дослідження ФД УФВ, як сенсорів температури і енергетичної освітленості, для визначення їх індивідуальних ФП при підході до них, як до БПС. Визначено похибки прогнозу значень температури кристалу фотодіоду та освітленості для фотодіодів, досліджених експериментально.

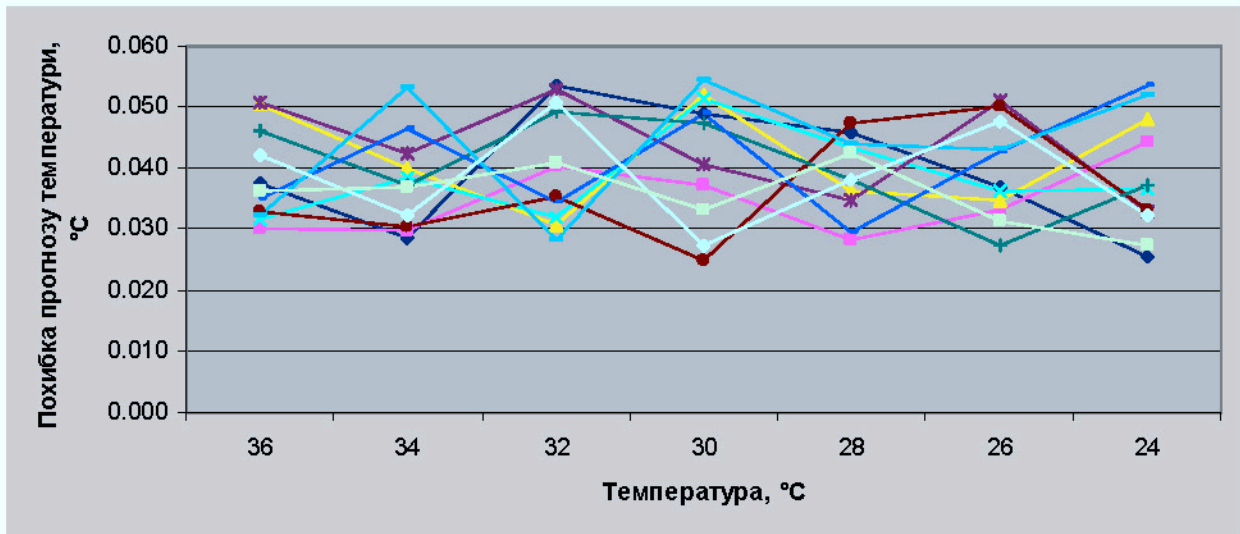


Рис. 3.14. Результати дослідження похибки прогнозу температури

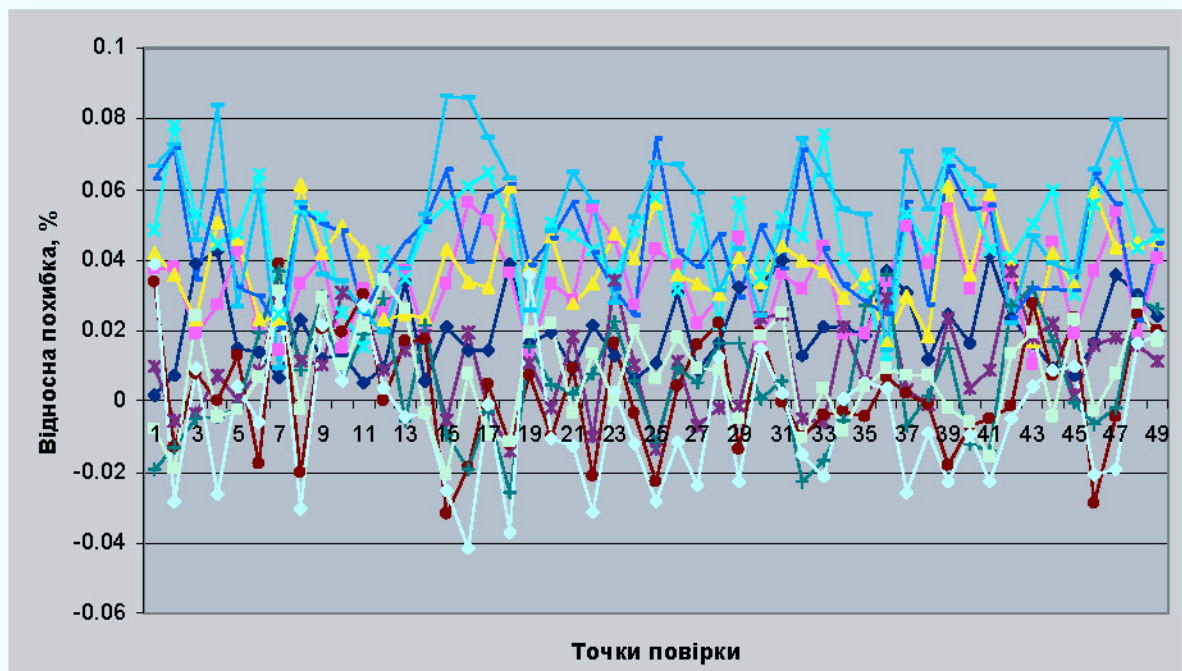


Рис. 3.15. Результати дослідження похибки прогнозу світлового потоку

У додатку К наведено результати вимірювань залежності спаду напруги на одинадцяти ФД-х від струму через ФД (від 0,4 мА до 1 мА) та температури (від 24°C до 36°C).

У додатку Л наведено результати вимірювань залежності струму КЗ на одинадцяти ФД-х від відстані до взірцевого джерела світла (від 160 до 400 мм) та температури (від 24°C до 36°C).

У додатку М наведено результати нейромережевого прогнозу спаду напруги на одинадцяти ФД-х від струму через ФД (від 0,4 мА до 1 мА) та температури (від 24°C до 36°C).

У додатку Н наведено результати нейромережевого прогнозу залежності струму КЗ на одинадцяти ФД-х від відстані до взірцевого джерела світла (від 160 до 400 мм) та температури (від 24°C до 36°C).

Висновки по розділу 3

1. Сформульовано основні вимоги до вимірювальних каналів прецизійної ІВС УФВ і на основі цих вимог синтезовано їх структурну і принципову схеми, а також виведено всі формули, потрібні при опрацюванні результатів аналого-цифрового перетворення з метою отримання вхідних даних для нейронних мереж. Також розроблено схему опрацювання результатів вимірювань при визначенні освітленості.
2. Розроблено стенд визначення індивідуальних ФП ФД та оцінено його похибки, які будуть використані при оцінці похибки результатів вимірювання освітленості за допомогою розроблюваної ІВС УФВ.
3. Розроблено методику експериментального дослідження ФД УФВ як сенсорів температури і енергетичної освітленості для визначення їх індивідуальних ФП при підході до них, як до БПС. Визначено похибки прогнозу значень температури кристалу ФД та освітленості для фотодіодів, досліджених експериментально.

РОЗДІЛ 4. ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

4.1 Структурна схема пропонованої інформаційно-виміральної системи ультрафіолетового випромінювання

У розділі 2 запропоновано нейромережевий метод ідентифікації індивідуальних ФП БПС, зокрема ФД, а у розділі 3 синтезовано принципову схему виміральної каналів струмів і напруг ФД в режимах вимірювання температури його кристалу та освітленості, орієнтовану на використання в ІВС. Тому виникає задача об'єднання вищенаведених компонентів у ІВС УФВ.

Сформуємо вимоги до такої ІВС:

1. ІВС повинна вимірювати значення освітленості та значення температури кристалу фотодіода;
2. ІВС повинна складатись з двох взаємозамінних блоків – блока сенсора і блока вимірювань;
3. Для забезпечення високої точності ІВС повинна використовувати індивідуальні ФП як блоку сенсора, так і блоку вимірювань;
4. ІВС повинна забезпечувати уніфікацію сенсорів УФВ, для чого в склад блоку сенсорів повинен входити електронний паспорт (TEDS – Transducer Electronic Data Sheet), розроблений згідно стандарту IEEE-1451.2 [125];
5. Корекція похибок ФД і виміральної каналів ІВС, а також уніфікація блоків сенсорів досягається за рахунок використання цифрової обробки сигналів у виміральному блоці;
6. Виміральної блок повинен забезпечувати аналогове перетворення сигналів до рівня, прийнятого для аналого-цифрового перетворення аналогового сигналу, що надходить від блоку сенсорів;
7. Інформація (поточна та службова) повинна виводитись на РК дисплей;

8. Вимірювальний блок повинен забезпечувати обробку натискань кнопок управління;
9. Вимірювальний блок повинен забезпечувати видачу звукових сигналів за допомогою зумера;
10. Комунікація із зовнішніми пристроями може здійснюватись через послідовний інтерфейс RS-232;
11. ІВС повинна мати можливість роботи від портативного автономного блока живлення;
12. Блок живлення повинен входити у вимірювальний блок;
13. Первинним джерелом живлення повинна бути батарейка «Крона» (9В) або аналогічний акумулятор;
14. Блок живлення повинен виробляти напругу +5В для живлення мікросхем вимірювального блоку і +9В для живлення операційних підсилювачів блоку сенсорів.

Відповідно до запропонованого підходу до ФД як до БПС, ІВС УФВ повинна виконувати наступні функції:

1. Переключити вимірювальну схему так, щоб ФД працював в режимі КЗ;
2. Виміряти струм КЗ ФД;
3. Переключити вимірювальну схему так, щоб ФД працював в режимі НХ;
4. Задати відповідний струм через ФД для вимірювання температури його кристалу;
5. Виміряти заданий згідно п. 4 струм;
6. Виміряти спад напруги на ФД;
7. Обчислити температуру кристалу ФД за результатами вимірів пп. 5, 6;
8. Обчислити освітленість ФД за результатами вимірів п. 2 і обчислень п.7;
9. Видавати періодично результати вимірювань на індикатор та в інтерфейс (за запитом).

Як основу для такої ІВС УФВ доцільно використати мікроконвертор типу ADuC-845 [126] фірми Analog Devices, який відрізняється високою якістю

компонентів, низьким енергоспоживанням та невисокою ціною. В склад мікроконвертора входить 24-х розрядний багатоканальний сигма-дельта АЦП і мікроконтролер популярної серії MCS-51 (продуктивність до 12,58 MIPS). Даний мікроконвертор містить: 62 кБ Flash/EEPROM пам'яті програм, 4 кБ Flash/EEPROM пам'яті даних, 2304 байт ОЗП. Енергоспоживання такого мікроконвертора: до 25 mA max при живленні напругою 5 В (на частоті кварцового резонатора – 12,58 MHz), що робить його перспективним при живленні від портативних джерел живлення.

Блок живлення, як це прийнято в §3.1, виконано на базі 9-ти вольтового автономного джерела (батарея типу “Крона” або аналогічна, чи відповідний акумулятор). Однак як батарея, так і акумулятор, змінюють свою напругу в процесі експлуатації (розряджаються), а АЦП, що входить в склад мікроконвертора, вимагає стабільного живлення. Для цього в схему введено стабілізатор напруги 5 В, вихід якого живить мікроконвертор. Для забезпечення індикації в інформаційно-вимірювальній системі доцільно використати рідкокристалічний індикатор, а для сигналізації – п'єзоелектричний зумер. Це забезпечить мінімальне енергоживлення.

Узагальнена структурна схема такої ІВС УФВ приведена на рис. 4.1. Відповідно до приведених вище функцій ІВС УФВ і вимог до неї, вона включає:

1. Власне сенсор УФВ – фотодіод ФД;
2. Вимірювальну схему, що забезпечує всі режими роботи ФД;
3. Аналого-цифровий перетворювач АЦП;
4. МК, який проводить поточне опрацювання результатів вимірювань і керує роботою АЦП та інших вузлів ІВС;
5. Цифровий рідкокристалічний індикатор;
6. Кнопки керування ІВС;
7. П'єзоелектричний зумер;
8. Джерело первинного автономного живлення – батарея “Крона” чи акумулятор;

9. Стабілізатор напруги +5В, що усуває вплив розряду батареї на результати вимірювань.

Пропонована ІВС УФВ складається з двох блоків – блоку сенсора і блоку вимірювання. В склад блоку сенсора входить ФД та електронний паспорт (Transducer Electronic Data Sheet, TEDS [125]), що відповідає вимогам стандарту IEEE-1451.

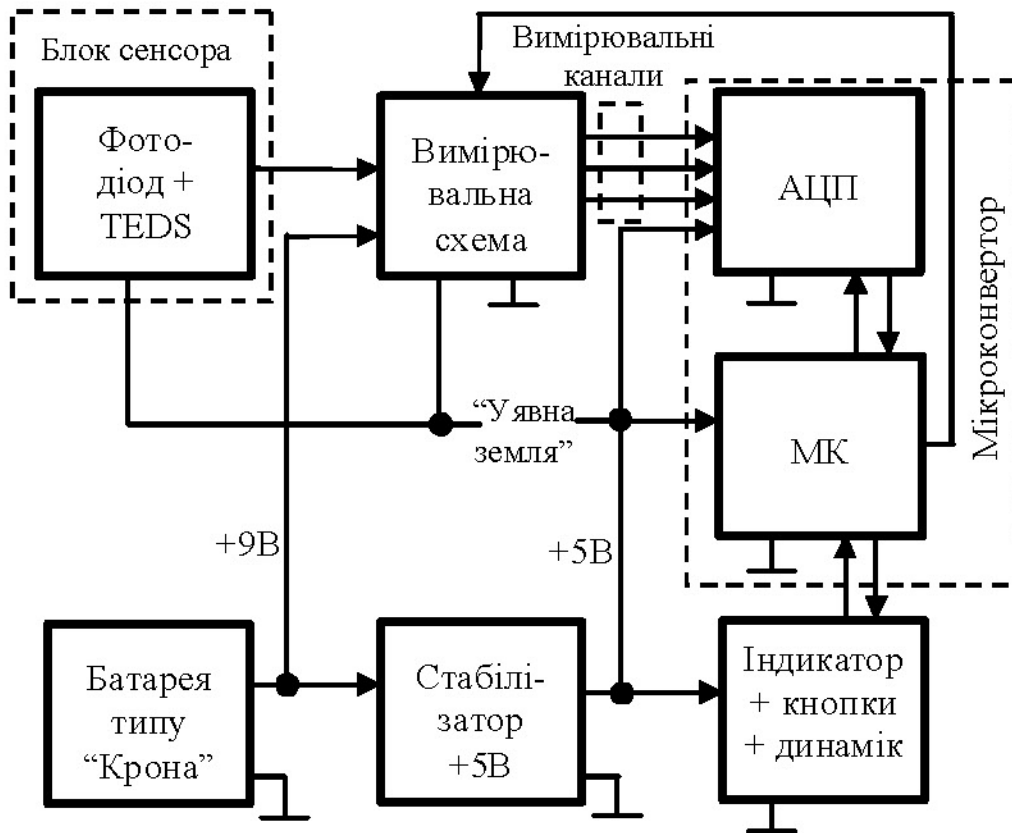


Рис. 4.1. Узагальнена структурна схема ІВС УФВ

Формат електронного паспорта TEDS, відповідно до вимог стандарту IEEE-1451, наступний. У частині користувача (128 Байт) TEDS записано вагові коефіцієнти та зміщення NM1 (розпізнавання температури кристалу ФД) і NM2 (розпізнавання освітленості), навчених за результатами експериментальних досліджень індивідуальної ФП ФД згідно методу, описаного у розділі 2. Це забезпечує перехід до індивідуальної ФП сенсора. Інтерфейс 1-Wire має відносно малу швидкодію, тому не обов'язково кожного разу зчитувати всю інформацію про записані в TEDS NM1 і NM2. Достатньо при кожному

вимірюванні контролювати номер сенсора, записаний у стандартній частині TEDS та зчитувати дані HM1 і HM2 лише при заміні сенсора.

Деталізована структурна схема ІВС УФВ показана на рис. 4.2. В ній, крім самих блоків ІВС УФВ, показані всі входи і виходи цих блоків, а також всі зв'язки між блоками. Не показано лише механізм керування шторкою сенсора, що включає двигун та редуктор.

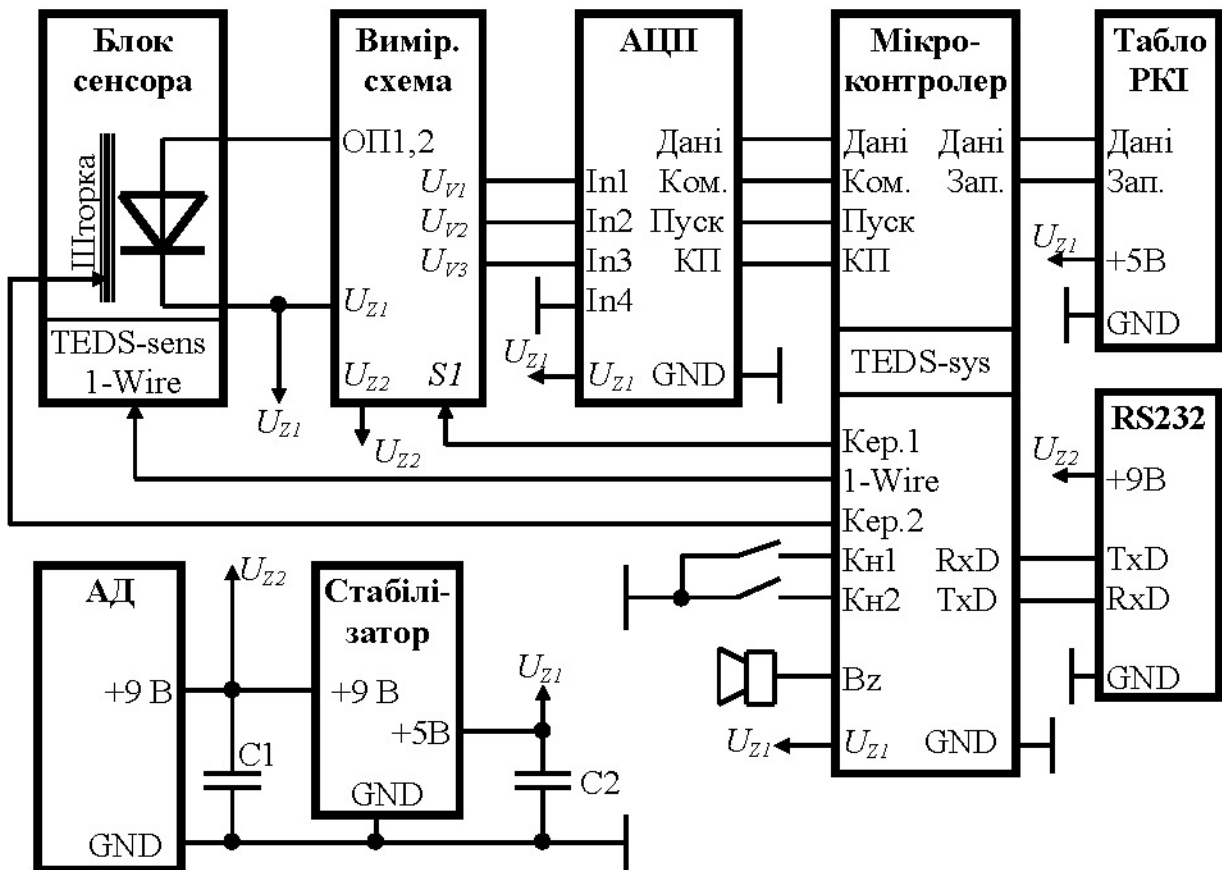


Рис. 4.2. Деталізована структурна схема ІВС УФВ

Головним завданням подальшого розроблення ІВС УФВ є забезпечення високої точності вимірювання УФВ. При цьому, через те, що ФД та ІВС розміщуються в окремих корпусах, слід вирішити питання розміщення вимірювальної схеми. Якщо розмістити вимірювальну схему в корпусі ФД (блок сенсора), то у TEDS можна записати індивідуальну ФП не лише самого ФД, а ФД і вимірювальної схеми разом. В цьому випадку похибки, які вносять відхилення опору резисторів вимірювальної схеми від номінального значення,

будуть враховані у TEDS. Ніякі змінні резистори не будуть потрібні, що потенційно зменшує вартість ІВС УФВ за рахунок скорочення кількості елементів. Однак в такому випадку всі блоки сенсорів, належні до кожної ІВС УФВ, будуть включати свої вимірювальні схеми, хоча, за кожним вимірюванням освітленості, використовується лише одна з них, яка входить в склад блоку сенсора, що при даному вимірюванні підключений до блоку вимірювань. Тому включення вимірювальної схеми в склад блоку сенсора насправді веде до збільшення апаратних затрат на ІВС УФВ.

Однак включення вимірювальної схеми в склад блоку вимірювань вимагає уніфікації її ФП з високою точністю. Традиційно така вимога виконується за допомогою налаштування ФП каналів вимірювальної схеми змінними резисторами, які вносять додаткову температурну та часову нестабільність, а також є досить дорогими. Пропонується під час випуску ІВС УФВ визначити індивідуальну ФП блоку вимірювань і записати функцію поправки у TEDS, розміщений у пам'яті самого мікроконтролера. В такому випадку високу точність вимірювання сигналів ФД можна досягнути без використання змінних резисторів, а сталі резистори вимірювальної схеми можуть мати великі відхилення опору від номінальних значень. В цьому випадку, як це показано на рис. 4.2, у блоці сенсора розміщується електронний паспорт ФД (TEDS-sens), а у пам'яті мікроконтролера блоку вимірювань виділяється область для електронного паспорта вимірювальної схеми разом з АЦП (TEDS-sys). В склад мікроконверторів типу ADuC-845 [126] входить 4 kB Flash/EE енергонезалежної пам'яті даних, в які можна записувати TEDS-sys без перезапису програми роботи мікроконтролера. Таким чином, TEDS-sys можна міняти за результатами кожної періодичної перевірки блоку вимірювань, що підвищує експлуатаційну метрологічну надійність такої ІВС УФВ.

При пропонованому розміщенні електронних паспортів необхідна уніфікація ФП блоку вимірювань з відносно високою точністю, для того, щоб при підключенні до них різних блоків сенсорів не виникало значної похибки від того, що індивідуальні ФП блоків вимірювань, на яких проводили визначення

індивідуальної ФП ФД та на яких проводять поточне вимірювання УФВ, відрізняються. Тому необхідно розробити методику забезпечення високої точності визначення індивідуальної ФП блока вимірювань.

Як видно з викладеного, ІВС УФВ, деталізована структурна схема якої подана на рис. 4.2 (в додатку П приведена принципова схема), повністю виконує сформульовані на початку параграфу вимоги. Вона складається з двох блоків. У перший блок входить мінімум компонентів ІВС – лише сам ФД та його електронний паспорт (крім того, в нього входять механічні вузли – шторка, вузол приведення її в дію, світлофільтри, їх кріплення, тощо – які необхідні всім варіантам ІВС УФВ, не позначені на схемі рис. 4.2 і не мають відношення до структурної схеми електричної частини ІВС). Передбачено підвищення точності вимірювання шляхом використання індивідуальних ФП як сенсора, так і каналів вимірювання його сигналів, при цьому параметри функцій корекції зберігаються в електронних паспортах. Сама корекція виконується програмно, вбудованим мікроконтролером. В ІВС передбачено рідкокристалічне табло для виводу результатів вимірювання, кнопки для керування режимами роботи і зумер для сигналізації. Блок живлення включає автономне джерело АД напругою +9В та стабілізатор напруги +5В.

Таким чином, у даному параграфі, на основі сформульованих вимог до ІВС УФВ та її основних функцій, розроблено узагальнену та детальну структурні схеми ІВС УФВ (принципова схема подана в додатку П). Також, на основі аналізу особливостей розміщення вимірювальної схеми в блоці сенсора або в блоці вимірювання, вирішено розміщувати вимірювальну схему в блоці вимірювання. Таке рішення вимагає подальших досліджень з метою забезпечення високої точності визначення індивідуальної ФП блоку вимірювань.

4.2 Методика визначення індивідуальних функцій перетворення каналів блоку вимірювань

Як було вказано в попередньому параграфі, для забезпечення високих економічних параметрів ІВС УФВ необхідно розробити методи визначення індивідуальних ФП вимірювальних каналів блоку вимірювання з високою точністю. Для цього можна застосувати або метод взірцевих сигналів, або метод зіставлення. В даному випадку, в зв'язку з особливостями вимірювальних каналів пропонованої ІВС УФВ, застосування згаданих методів у їх класичному виді, особливо для каналів вимірювання температури, недоцільне. Рациональніше застосувати модифікацію методу взірцевих сигналів, згідно якої сам сигнал створюють вимірювальні канали, а його значення вимірюється взірцевим (еталонним) приладом.

Канали, для яких треба визначати індивідуальні ФП, можна визначити зі схеми опрацювання результатів вимірювань при визначенні освітленості, поданої на рис. 3.8. Згідно цієї схеми кінцеве опрацювання даних здійснюють НМ1 і НМ2. Вони відображають індивідуальні ФП ФД в різних режимах роботи при вимірюванні температури та освітленості відповідно. Їх параметри зберігаються в електронних паспортах блока сенсора (TEDS-sens). На вхід НМ1 і НМ2 подаються обчислена за (3.16) напруга НХ ФД U_{PD}^{NX} і струм I_{PD}^{NX} , що проходять через ФД в режимі НХ, та I_{PD}^{KZ} – струм КЗ ФД під час вимірювання освітленості. Саме похибки вимірювання та обчислення струмів I_{PD}^{NX} , I_{PD}^{KZ} та напруги U_{PD}^{NX} приведуть до похибки обчислення значень температури кристалу ФД і освітленості за допомогою НМ1 і НМ2.

Корекцію отриманих за результатами вимірювання напруги по каналах U_{v1} , U_{v2} і U_{v3} у режимах КЗ і НХ, та обчислення з використанням значень резисторів $R1...R8$ струмів I_{PD}^{NX} , I_{PD}^{KZ} та напруги U_{PD}^{NX} згідно схеми опрацювання результатів вимірювань (див. рис. 3.8) можна вести двома методами – елементним та комплектним. При використанні першого методу необхідно під

час випуску з виробництва виміряти дійсні опори всіх резисторів $R1...R8$, визначити індивідуальні ФП каналів U_{V1} , U_{V2} і U_{V3} та записати отримані значення в електронний паспорт блока вимірювання (TEDS-sys). В подальшому слід використовувати при обробленні результатів вимірювання саме ці значення опорів резисторів та індивідуальних ФП. Такий шлях має відносно високу трудомісткість і його важко використати при періодичній повірці (особливо вимірювання опорів резисторів $R1...R8$ – ця операція вимагає випаювання частини з них).

Значно меншу трудомісткість має комплектна повірка і корекція. В цьому випадку коригують лише значення напруги U_{PD}^{NX} і струмів I_{PD}^{NX} та I_{PD}^{KZ} , отримані в результаті опрацювання результатів вимірювання, що подаються, згідно рис. 3.8, на НМ1 і НМ2. Такий шлях зручніший також тому, що результати як повірки при випуску з виробництва, так і періодичної повірки, можуть бути отримані без порушення пломб блоку вимірювання і записані в його електронний паспорт (TEDS-sys). Тому розглянемо детально лише цей метод.

Опишемо канал вимірювання спаду напруги U_{PD}^{NX} на ФД в режимі НХ.

Відповідна схема для знаходження параметрів корекції значення спаду напруги U_{PD}^{NX} на ФД в режимі НХ подана на рис. 4.3.

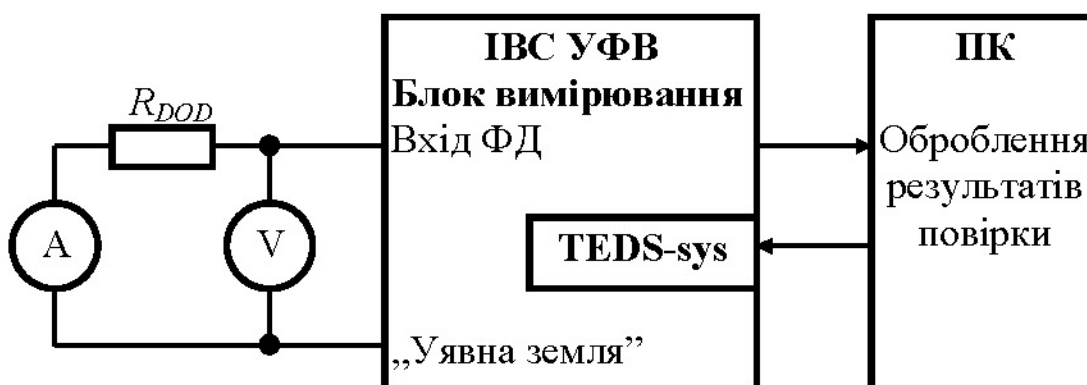


Рис. 4.3. Схема знаходження параметрів корекції значення спаду напруги U_{PD}^{NX} на ФД в режимі НХ (V – взірцевий, прецизійний вольтметр, наприклад, UT70D; А – додатковий тестер контролю струму)

Спад напруги ФД імітується проходженням через резистор R_{DOD} робочого струму ФД I_{PD}^{NX} , що формується резисторами $R1$ і $R2$ вимірювальної схеми (див. рис. 3.6). Спочатку слід визначити адитивну похибку ΔU_{ADD}^{NX} вимірювання спаду напруги U_{PD}^{NX} на ФД в режимі НХ. Для цього закорочують вхід ФД блока вимірювання і запам'ятовують значення адитивної похибки ΔU_{ADD}^{NX} , обчислене як значення спаду напруги U_{PD}^{NX} . Потім визначають мультиплікативну похибку вимірювання спаду напруги U_{PD}^{NX} . Для цього на вході ФД блока вимірювання, за допомогою резистора R_{DOD} встановлюють напругу, близьку до 1В і запам'ятовують результат опрацювання даних U_{1V}^{NX} , обчислений як значення спаду напруги U_{PD}^{NX} . Також запам'ятовують встановлену на вході ФД блока вимірювання напругу U_{1V}^{NX} . При виконанні поточних вимірювань спаду напруги U_{POT}^{NX} відкориговане значення U_{POT}^{NX-K} обчислюють за формулою

$$U_{POT}^{NX-K} = U_{1V} \frac{U_{POT}^{NX} - \Delta U_{ADD}^{NX}}{U_{1V}^{NX} - \Delta U_{ADD}^{NX}} \quad (4.1)$$

Слід відзначити, що нелінійність каналу вимірювання спаду напруги U_{PD}^{NX} дуже мала. В склад каналу (див. рис. 3.6) входять: повторювач напруги на ОП (використано один з ОП, що входять в мікросхему OP177 [127]), коефіцієнт підсилення якої більше 1000000 (нелінійністю повторювача можна нехтувати), резисторний подільник (лінійний) та АЦП, нелінійність якого не перевищує 0,0015%, чим теж можна нехтувати. Таким чином, корекція адитивної та мультиплікативної похибки каналу вимірювання спаду напруги U_{PD}^{NX} є цілком достатньою.

Невиключена похибка каналу вимірювання спаду напруги U_{PD}^{NX} буде визначатися похибками взірцевого засобу вимірювання та випадковою похибкою АЦП. Як взірцевий засіб, використано атестований мультиметр UT70D [119]. Його прийнятні діапазони вимірювання складають 800 мВ і 8 В. Однак, використання діапазону 8В недоцільне через те, що напруга

калібрування 1В знаходиться на початку діапазону вимірювань і похибка її встановлення буде значно перевищувати допустиму похибку мультиметра. Тому доцільно під час описаної вище операції визначення мультиплікативної похибки вимірювання спаду напруги U_{PD}^{NX} встановлювати за допомогою резистора R_{DOD} напругу не близьку до 1В, а в межах 780...800 мВ. В такому випадку похибка δ_{PD-NX}^U встановлення цієї напруги, згідно [119], не буде перевищувати

$$\delta_{PD-NX}^U \leq \pm(0,05\% + 10q) \approx 0,06\% \quad , \quad (4.2)$$

де q – похибка квантування мультиметра UT70D, при використанні режиму підвищеної чутливості на діапазоні 800 мВ становить 10 мкВ.

Випадкова похибка АЦП визначається відношенням його шуму до максимальної напруги перетворення каналу вимірювання спаду напруги U_{PD}^{NX} . Для АЦП, що входить в склад мікроконвертора ADuC-845, напруга шуму на діапазоні перетворення 2,5 В не перевищує, згідно [126], 2,5 розряду, що відповідає 6-ти квантам. Тому абсолютну випадкову похибку АЦП можна обчислити за формулою

$$\Delta_{ADuC}^{SH} \leq \frac{U_{ADuC}^D \cdot N_{ADuC}^N}{N_{ADuC}^D} = \frac{2,5 \cdot 6}{2^{24}} \approx 10^{-6} V = 1 \mu V \quad , \quad (4.3)$$

де U_{ADuC}^D , N_{ADuC}^N , N_{ADuC}^D – відповідно, напруга діапазону перетворення мікроконвертора ADuC-845 - 2,5 В, його кількість квантів шуму - 6, та кількість квантів діапазону перетворення - 2^{24} .

Згідно (4.3), відносну випадкову похибку АЦП δ_{ADuC}^{SH} можна обчислити за формулою

$$\delta_{ADuC}^{SH} \leq \frac{\Delta_{ADuC}^{SH} \cdot 100\%}{U_{ADuC}^{NX}} = \frac{1 \cdot 10^{-6} \cdot 100}{0,25} = 4 \cdot 10^{-4}\% \quad , \quad (4.4)$$

де U_{ADuC}^{NX} – максимальна напруга, що поступає на вхід АЦП при перетворенні в код напруги U_{PD}^{NX} .

Отриманим згідно (4.4) значенням відносної випадкової похибки АЦП δ_{ADuC}^{SH} цілком можна нехтувати. В такому разі похибка каналу вимірювання спаду напруги U_{PD}^{NX} не буде перевищувати $\delta_{PD-NX}^U \leq 0,06\%$.

Опишемо канал вимірювання струму I_{PD}^{NX} через ФД при його роботі в режимі НХ.

Відповідна схема для знаходження параметрів корекції значення струму I_{PD}^{NX} через ФД в режимі НХ подана на рис. 4.4.

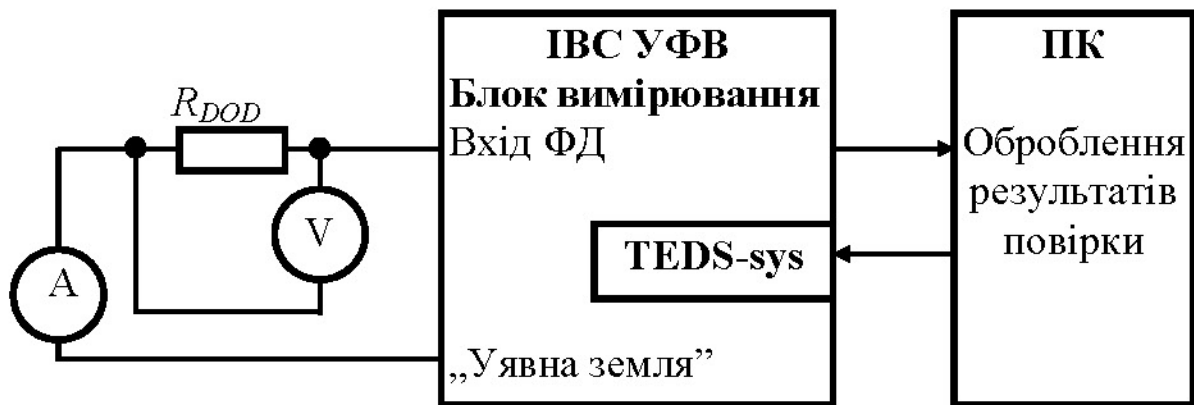


Рис. 4.4. Схема знаходження параметрів корекції значення струму I_{PD}^{NX} через ФД при роботі в режимі НХ (V – вірцевий, прецизійний вольтметр, наприклад, UT70D; А – допоміжний цифровий тестер)

Струм через ФД імітується проходженням через резистор R_{DOD} струму від додаткового джерела напруги. Спочатку слід визначити адитивну похибку ΔI_{ADD}^{NX} вимірювання струму I_{PD}^{NX} через ФД в режимі НХ. Для цього вибирають $R_{DOD}^1 \approx 800 \text{ Ohm}$ (для встановлення струму і виключення переповнення мультиметра UT70D, а також забезпечення відповідної точності, як R_{DOD} використаємо магазин опору, наприклад, типу МСР-63 класу 0,05) і встановлюють значення струму $I_{PD}^{NX} \approx 0,4 \text{ mA}$ (цей струм контролюють допоміжним цифровим тестером). Дійсне значення струму I_{PD}^{NX1} визначають як

$$I_{PD}^{NX1} = \frac{U_{UT70D}^{R1}}{R_{DOD}^{1N}} , \quad (4.5)$$

де U_{UT70D}^{R1} – спад напруги на резисторі R_{DOD} , виміряний мультиметром UT70D [119]; R_{DOD}^{1N} – дійсне значення опору резистора R_{DOD} , встановлене під час вимірювання U_{UT70D}^{R1} .

Мультиплікативну похибку ΔI_{MUL}^{NX} вимірювання струму I_{PD}^{NX} через ФД в режимі НХ визначають аналогічно до адитивної. Тільки значення струму необхідно встановити близьким до $I_{PD}^{NX} \approx 1mA$, в результаті чого отримаємо результат вимірювання I_{1mA}^{NX} . Дійсне значення струму I_{PD}^{NX2} визначають як

$$I_{PD}^{NX2} = \frac{U_{UT70D}^{R2}}{R_{DOD}^{2N}} , \quad (4.6)$$

де U_{UT70D}^{R2} – спад напруги на резисторі R_{DOD} , виміряний мультиметром UT70D [119]; R_{DOD}^{2N} – дійсне значення опору резистора R_{DOD} , встановлене під час вимірювання U_{UT70D}^{R2} .

При виконанні поточних вимірювань спаду напруги I_{POT}^{NX} відкориговане значення I_{POT}^{NX-K} обчислюють за формулою

$$I_{POT}^{NX-K} = \left(I_{PD}^{NX2} - I_{PD}^{NX1} \right) \frac{I_{POT}^{NX} - \Delta I_{ADD}^{NX}}{I_{1mA}^{NX} - \Delta I_{ADD}^{NX}} + I_{PD}^{NX1} . \quad (4.7)$$

Слід відзначити, що нелінійність каналу вимірювання струму I_{PD}^{NX} , незважаючи на наявність у вимірювальному колі нелінійних елементів (діоди $PD1$ і $V1$, див рис. 3.6), також буде досить високою. Справа в тому, що зміни спаду напруги на цих діодах при зміні струму в допустимих межах (від 0,4 мА до 1 мА) доволі малі - не перевищують 60 мВ (динамічний опір діодів $PD1$ і $V1$ не перевищує 100 Ом), а нелінійність вимірювального кола відноситься лише до цих 60 мВ. Тому, аналогічно до каналу вимірювання спаду напруги U_{PD}^{NX} на

ФД в режимі НХ, корекція адитивної та мультиплікативної похибки каналу вимірювання струму I_{PD}^{NX} є цілком достатньою.

Невиключена похибка δ_{I-PD}^{NX} каналу вимірювання струму I_{PD}^{NX} буде визначатися похибками резисторів δR_{DOD} , похибками вимірювання спаду напруги на цих резисторах δU_{DOD}^1 і δU_{DOD}^2 та випадковою похибкою АЦП. Як взірцевий засіб, аналогічно до каналу вимірювання спаду напруги U_{PD}^{NX} , використано атестований мультиметр UT70D [119] на діапазоні вимірювання 800 мВ. Відповідні відносні похибки вимірювання не будуть перевищувати

$$\delta R_{DOD} \leq \pm(0,05\% + 2q) \approx 0,05\% \quad , \quad (4.8)$$

$$\delta U_{DOD}^1 \leq \pm(0,05\% + 10q) \approx 0,16\% \quad , \quad (4.9)$$

$$\delta U_{DOD}^2 \leq \pm(0,05\% + 10q) \approx 0,06\% \quad , \quad (4.10)$$

де q – похибка квантування мультиметра UT70D, при використанні режиму підвищеної чутливості на діапазоні 800 мВ, для (4.9) і (4.10) становить 10 мкВ.

Випадкову похибку АЦП δ_{ADC}^{SH} було оцінено у (4.4), нею і в цьому випадку можна нехтувати.

Сумарну невиключену похибку δ_{INX}^{Σ} каналу вимірювання струму I_{PD}^{NX} цілком коректно можна оцінити за частковими похідними рівності (4.7). Однак спрощено можна оцінити цю сумарну невиключену похибку як суму похибок, визначених згідно (4.8) - (4.10). В останньому випадку отримаємо дещо завищене значення сумарної невиключеної похибки, що не суперечить вимогам метрології. Через те, що похибки, визначені згідно (4.8) - (4.10), не мають явних кореляційних зв'язків, сумарну невиключену похибку можна оцінити за формулою

$$\delta_{INX}^{\Sigma} = \sqrt{(\delta R_{DOD})^2 + (\delta U_{DOD}^1)^2 + (\delta U_{DOD}^2)^2} = \sqrt{0,05^2 + 0,16^2 + 0,06^2} \approx 0,18\% \quad , \quad (4.11)$$

Розглянемо канал вимірювання струму I_{PD}^{KZ} ФД при його роботі в режимі КЗ.

Відповідна схема для знаходження параметрів корекції значення струму I_{PD}^{KZ} ФД при його роботі в режимі КЗ (коли ІВС УФВ працює в режимі вимірювання освітленості) подана на рис. 4.5.

Струм КЗ ФД імітується проходженням через резистор R_{DOD}^2 (магазин опору МСР-63 класу 0,05) струму від додаткового джерела напруги. Спочатку слід визначити адитивну похибку ΔI_{ADD}^{KZ} вимірювання струму I_{PD}^{KZ} через ФД в режимі КЗ. Для цього розмикають вхід ФД (відключають від входу ІВС УФВ блок сенсора та інші пристрої) і запам'ятовують значення адитивної похибки ΔI_{ADD}^{KZ} .

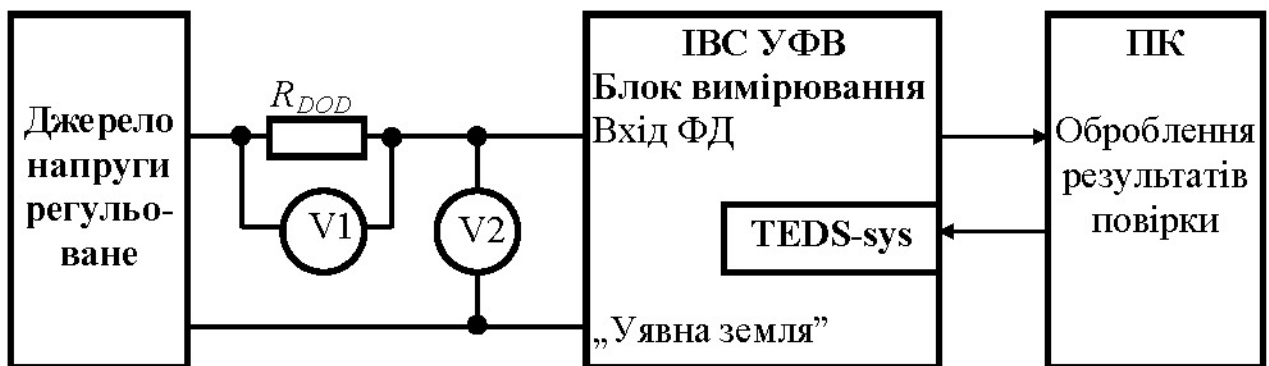


Рис. 4.5. Схема знаходження параметрів корекції значення струму I_{PD}^{KZ} ФД при його роботі в режимі КЗ (V1 – вірцевий, прецизійний вольтметр, наприклад, UT70D; V2 – додатковий тестер контролю напруги)

Потім визначають мультиплікативну похибку вимірювання струму I_{PD}^{KZ} . Для цього встановлюють $R_{DOD}^2 \approx 5 \text{ kOhm}$, далі за допомогою регульованого джерела напруги встановлюють значення струму $I_{PD}^{KZ} \approx 15 \mu\text{A}$ (тоді показ V1 буде приблизно 750 мВ). Далі незначно міняють напругу регульованого джерела та, можливо, R_{DOD}^2 так, щоби результат вимірювання V1 знаходився в межах 700...800 мВ, а напруга на V2 не перевищувала 10 мкВ (одиниця останнього розряду). Дійсне значення струму I_{PD}^{KZ1} визначають як

$$I_{PD}^{KZ1} = \frac{U_{UT70D}^{R3}}{R_{DOD}^{2N}} \quad , \quad (4.12)$$

де U_{UT70D}^{R3} – спад напруги на резисторі R_{DOD}^2 , виміряний мультиметром UT70D [119]; R_{DOD}^{2N} – дійсне значення опору резистора R_{DOD} під час вимірювання U_{UT70D}^{R3} .

При виконанні поточних вимірювань струму I_{POT}^{KZ} відкориговане значення I_{POT}^{KZ-K} обчислюють за формулою

$$I_{POT}^{KZ-K} = I_{PD}^{KZ1} \frac{I_{POT}^{KZ} - \Delta I_{ADD}^{KZ}}{I_{15\mu A}^{KZ} - \Delta I_{ADD}^{KZ}} \quad . \quad (4.13)$$

Слід відзначити, що нелінійність каналу вимірювання струму I_{PD}^{KZ} також дуже мала. В склад каналу (див. рис. 3.6) входять інвертуючий перетворювач струм-напруга на ОП (використано ОП ОР177 [127]), коефіцієнт підсилення якого більше 1000000 (тому нелінійністю перетворювача можна нехтувати), резисторний подільник (лінійний) та АЦП, нелінійність якого не перевищує 0,0015%, чим теж можна нехтувати. Таким чином, корекція адитивної та мультиплікативної складових похибки каналу вимірювання струму I_{PD}^{KZ} є цілком достатньою.

Невиключена похибка каналу вимірювання струму I_{PD}^{KZ} буде визначатися похибкою δR_{DOD}^2 магазину опору при відтвореннях опору R_{DOD}^{2N} , похибкою δU_{DOD}^3 вимірювання спаду напруги на R_{DOD}^{2N} та випадковою похибкою АЦП. Похибку δR_{DOD}^2 магазину опору МСР-63 можна оцінити за (4.8), вона не перевищить 0,05%

Похибка вимірювання спаду напруги на цьому резисторі δU_{DOD}^3 , згідно [119], не буде перевищувати

$$\delta U_{DOD}^3 \leq \pm(0,05\% + 2q) \approx 0,06\% \quad , \quad (4.14)$$

де q – похибка квантування мультиметра UT70D, при використанні режиму підвищеної чутливості на діапазоні 800 мВ становить 10 мкВ.

Сумарну невиключену похибку δ_{IKZ}^{Σ} каналу вимірювання струму I_{PD}^{KZ} можна оцінити як суму похибок, визначених згідно (4.13) і (4.14). Через те, що похибки, визначені згідно (4.13) і (4.14), не мають явних кореляційних зв'язків, сумарну невиключену похибку можна оцінити за формулою

$$\delta_{IKZ}^{\Sigma} = \sqrt{(\delta R_{DOD}^2)^2 + (\delta U_{DOD}^3)^2} = \sqrt{0,05^2 + 0,06^2} \approx 0,08\% \quad (4.15)$$

В результаті запропонованих заходів, що дають змогу суттєво підвищити точність блока вимірювання без його ускладнення та збільшення трудомісткості налаштування, процес корекції похибок зводиться до додаткового опрацювання результатів обчислених згідно формул §3.2 струмів і напруг за допомогою формул (4.1), (4.7) і (4.13). Схема алгоритму, що реалізує вищезгадані операції має вигляд, показаний на рис. 4.6.

Висока точність вимірювання напруги НХ ФД U_{PD}^{NX} і струмів I_{PD}^{NX} та I_{PD}^{KZ} дає змогу не лише забезпечити високу точність вимірювання освітленості за допомогою пропонованої ІВС УФВ, а й забезпечує взаємозамінність сенсорів. Розглянемо це питання детальніше.

Таким чином, в даному параграфі розроблено методику визначення індивідуальних функцій перетворення каналів блоку вимірювань, подано формули корекції похибок цих каналів згідно визначених параметрів функцій корекції та проведено оцінку невиключеної похибки цих каналів.

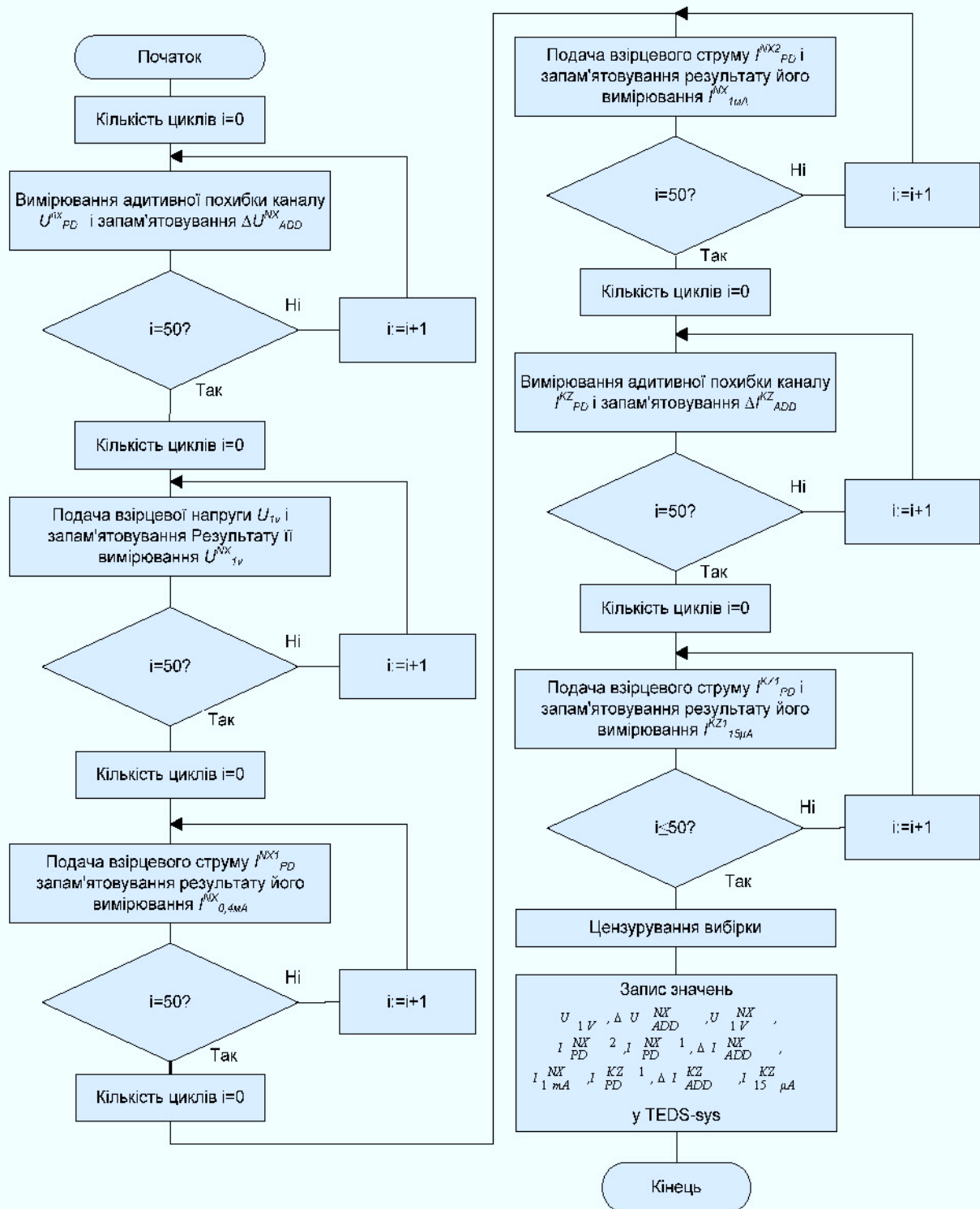


Рис 4.6. Схема алгоритму визначення ІФП каналів блоку вимірювань

4.3 Метод забезпечення взаємозамінності сенсорів ультрафіолетового випромінювання

Як видно з викладеного, запропонована в попередньому параграфі методика переходу до індивідуальних ФП блока вимірювання забезпечує досить високу точність корекції похибок цього блока навіть при використанні розповсюджених і не дорогих взірцевих засобів. Як було вказано в §4.2, корекцію отриманих за результатами вимірювання значеннями напруги та струму можна вести двома методами – поелементним та комплектним. Хоча в §4.2 проведено детальний аналіз лише комплектної повірки та корекції, можна показати, що поелементна корекція забезпечить співмірну з комплектною похибку визначення напруги U_{PD}^{NX} і струмів I_{PD}^{NX} та I_{PD}^{KZ} .

В той же час, згідно [128], взірцеві засоби вимірювання освітленості або її створення навіть на рівні еталонів та взірцевих засобів першого розряду мають досить великі допустимі похибки – 1% та більші. Такий стан дозволяє забезпечити одночасно як перехід до індивідуальних ФП компонентів ІВС УФВ (блока сенсора і блока вимірювання), так і взаємозамінність сенсорів. Це пов'язано з тим, що індивідуальні ФП блока сенсора і блока вимірювання, за рахунок використання розробленої в §4.2 методики визначення індивідуальних ФП каналів блока вимірювань, можна привести до номінальних ФП з достатньо високою точністю, набагато вищою за точність взірцевих засобів вимірювання освітленості.

Невиключні похибки корекції відхилення напруги U_{PD}^{NX} і струмів I_{PD}^{NX} та I_{PD}^{KZ} не перевищують $\delta_{PD-NX}^U \leq 0,06\%$, $\delta_{INX}^\Sigma \leq 0,18\%$ та $\delta_{IKZ}^\Sigma \leq 0,08\%$ відповідно. Таким чином, складові невиключених похибок відповідних вимірювальних каналів після корекції їх похибок будуть в 16, 6 і 12 разів меншими за похибку 1% взірцевих засобів вимірювання освітленості. Такі співвідношення похибок показують, що невиключеними похибками вимірювальних каналів блока вимірювання, порівняно з похибками визначення ФП ФД, можна нехтувати

(якщо похибки не мають значних кореляційних зв'язків, то, згідно [129, 130], складові похибки, які в 5 разів менші за домінуючу похибку, практично не впливають на сумарну похибку результату вимірювання).

Перший метод забезпечення взаємозамінності сенсорів полягає в тому, що, якщо в склад блока сенсора включити вимірювальну схему рис. 3.8, то експериментальні дослідження при визначенні індивідуальної ФП ФД будуть проведені в комплекті з вимірювальними каналами, з якими ФД буде експлуатуватися. В такому випадку визначені шляхом експериментальних досліджень, у системі, яку поставляють замовнику, індивідуальні відхилення ФП ФД та вимірювальної схеми від номінальних будуть враховані в електронному паспорті сенсора TEDS-sens (вони ввійдуть у вагові коефіцієнти та зміщення нейронів NM1 і NM2 корекції похибок сенсора). При реалізації першого методу забезпечення взаємозамінності сенсорів, дійсні значення опорів резисторів $R1-R8$ будуть враховані в результатах повірки, а похибку в результат вимірювання освітленості будуть вносити лише температурні та часові зміни опору цих резисторів. При використанні неточних (з великими допустимими відхиленнями дійсного опору від номінального значення), але стабільних резисторів (наприклад, металоплівкових, зокрема, типу C2-29), можна отримати високу точність вимірювання при невисоких затратах. Однак такий метод вимагає значного збільшення постійних затрат при серійному виробництві, адже вимірювальна схема рис. 3.6 буде повністю входити в кожен блок сенсора, а не тільки у кожен блок вимірювання (для вимірювання освітленості різного рівня та у різних діапазонах спектру в комплект ІВС УФВ входять, зазвичай, декілька блоків сенсорів та один блок вимірювання).

Другим методом забезпечення взаємозамінності сенсорів УФВ є розмежування функцій корекції похибки сенсора та вимірювальних каналів. В такому разі, кожен блок сенсора оснащується, так як і при реалізації першого методу, окремою мікросхемою електронного паспорта TEDS-sens, в якому записуються вагові коефіцієнти нейронів та їх зміщення лише для НМ корекції похибок цього сенсора, без врахування вимірювальної схеми (таким чином

реалізується перехід до індивідуальної ФП саме цього сенсора). А кожен блок вимірювання оснащується своїм TEDS-sys корекції похибок вимірювальної схеми та АЦП (головним чином, джерела його опорної напруги). В такому випадку, якщо ІВС УФВ, які випускають з виробництва, та ІВС УФВ, яка служить для дослідження сенсорів (під час ідентифікації індивідуальних ФП ФД), аналогічні та мають значно вищу точність порівняно із блоком сенсора, то кожен блок сенсора може бути підключений до довільного блока вимірювання. При цьому похибка такого поєднання компонентів, практично, буде визначатися лише похибкою блока сенсора.

Не дивлячись на ніби то ускладнення схеми (окремі TEDS для блока сенсора і блока вимірювання), апаратні затрати на забезпечення взаємозамінності відсутні – блок сенсора оснащується своїм TEDS-sens, як і в попередньому випадку, а TEDS-sys розміщується у Flash пам'яті даних мікроконвертора.

На рисунку 4.7 представлено узагальнену схему передачі значень вимірюваних або заданих фізичних величин від взірцевих (еталонних) засобів вимірювання до блоків сенсора і вимірювань. Тому еталонна база випуску ІВС УФВ включає як засоби ідентифікації індивідуальних ФП блока вимірювання (напруга U_{PD}^{NX} і струми I_{PD}^{NX} та I_{PD}^{KZ}), так і засоби ідентифікації індивідуальних ФП ФД, що входить у блок сенсора. На схемі рис. 4.7 показано передачу значень вимірюваних або заданих величин до двох систем – дослідження, що служить для ідентифікації індивідуальних ФП ФД, що входить у блок сенсора, та тієї, що поставляється замовнику.

Спочатку, при використанні взірцевих (еталонних) засобів вимірювання або задання напруги U та струму I проводять визначення похибок каналів вимірювання спаду напруги на ФД та струму через нього як ІВС УФВ, що їх поставляють замовнику, так і ІВС дослідження сенсорів. Обчислення корегуючих коефіцієнтів проводить персональний комп'ютер ПК та записує їх результати в TEDS-sys відповідних ІВС.

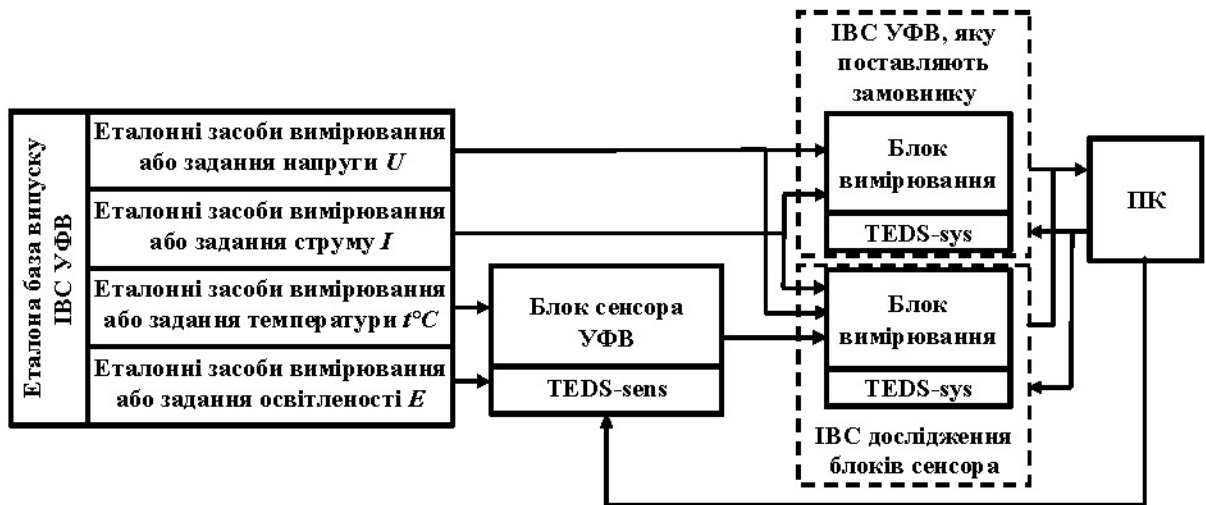


Рис. 4.7. Узагальнена схема передачі значень вимірюваних або заданих ФВ від взірцевих (еталонних) засобів вимірювання до блоків сенсора і вимірювань

Дослідження блока сенсора проводяться з використанням еталонних засобів вимірювання або задання температури та освітленості, таким чином визначаючи індивідуальну ФП ФД. При цьому, за рахунок використання одних і тих же взірцевих (еталонних) засобів вимірювання або задання напруги та струму, всі ІВС (і ті, що поставляються замовнику, і ІВС дослідження сенсорів) будуть мати ідентичні ФП сигналів фотодіодів за всіма каналами у всіх режимах. Різниця їх функцій перетворення між собою будуть визначатися лише їх випадковими похибками. Навіть оцінені у §4.2 невиключені похибки не будуть себе проявляти. В такому разі вплив похибки вимірювання сигналів блока сенсора на вагові коефіцієнти та зміщення НМ, які відповідають індивідуальним ФП за температурою та освітленістю, буде визначатися, в основному, випадковою похибкою АЦП, яка згідно (4.4), не перевищує 0,0004%, тому її впливом можна нехтувати (при похибці вимірювання освітленості не менше 1%).

Таким чином, при наступному підключенні блока сенсора до ІВС УФВ, записані в його TEDS-sens значення вагових коефіцієнтів та зміщень нейронів НМ, які відповідають індивідуальним ФП за температурою та освітленістю забезпечать корекцію похибки ФД так само, якби блок сенсора був би

підключений до ІВС його дослідження.

При періодичній повірці блока вимірювання у TEDS-sys будуть записані параметри функцій корекції (значення U_{IV} , ΔU_{ADD}^{NX} , U_{IV}^{NX} , I_{PD}^{NX2} , I_{PD}^{NX1} , ΔI_{ADD}^{NX} , I_{mA}^{NX} , I_{PD}^{KZ1} , ΔI_{ADD}^{KZ} та $I_{15\mu A}^{KZ}$), визначені під час цієї періодичної перевірки. При цьому оцінені у §4.2 невиключені похибки проявлять себе повністю. Однак, як вже було зазначено, вони у 6 ... 16 разів менші за похибку вимірювання освітленості (не менше 1%), тому додатковою похибкою від різниці ФП вимірювальних каналів теж можна нехтувати.

Слід відзначити, що пропонуваній метод забезпечує взаємозамінність блоків сенсорів не в межах приналежності до однієї ІВС, а за принципом – довільний сенсор може бути підключений до довільного блока вимірювання без погіршення точності вимірювання УФВ. Така взаємозамінність значно підвищує зручність експлуатації пропонуванних ІВС УФВ та їх живучість.

Таким чином, у даному параграфі обґрунтовано метод забезпечення взаємозамінності блоків сенсорів та блоків вимірювання без втрати точності вимірювання УФВ.

4.4 Алгоритми обробки даних у інформаційно-вимірювальній системі ультрафіолетового випромінювання

У відповідності до сформованих вимог до ІВС, із врахуванням функцій, які повинна забезпечувати ІВС для реалізації запропонованого підходу до ФД як до БПС, та запропонованої у § 4.1 структурної схеми (див. рис. 4.2), а також врахуванням запропонованої у § 4.2 методики визначення ІФП каналів блоку вимірювань з високою точністю, методу забезпечення взаємозамінності сенсорів УФВ та узагальненої схеми передачі значень вимірюваних або заданих фізичних величин від взірцевих (еталонних) засобів вимірювання до блоків сенсора і вимірювань (див. рис. 4.6). Необхідно розробити алгоритми обробки даних ІВС УФВ.

Алгоритм обробки даних, що функціонує у МК (за схемою рис. 4.2) має вигляд, представлений на рис. 4.8.

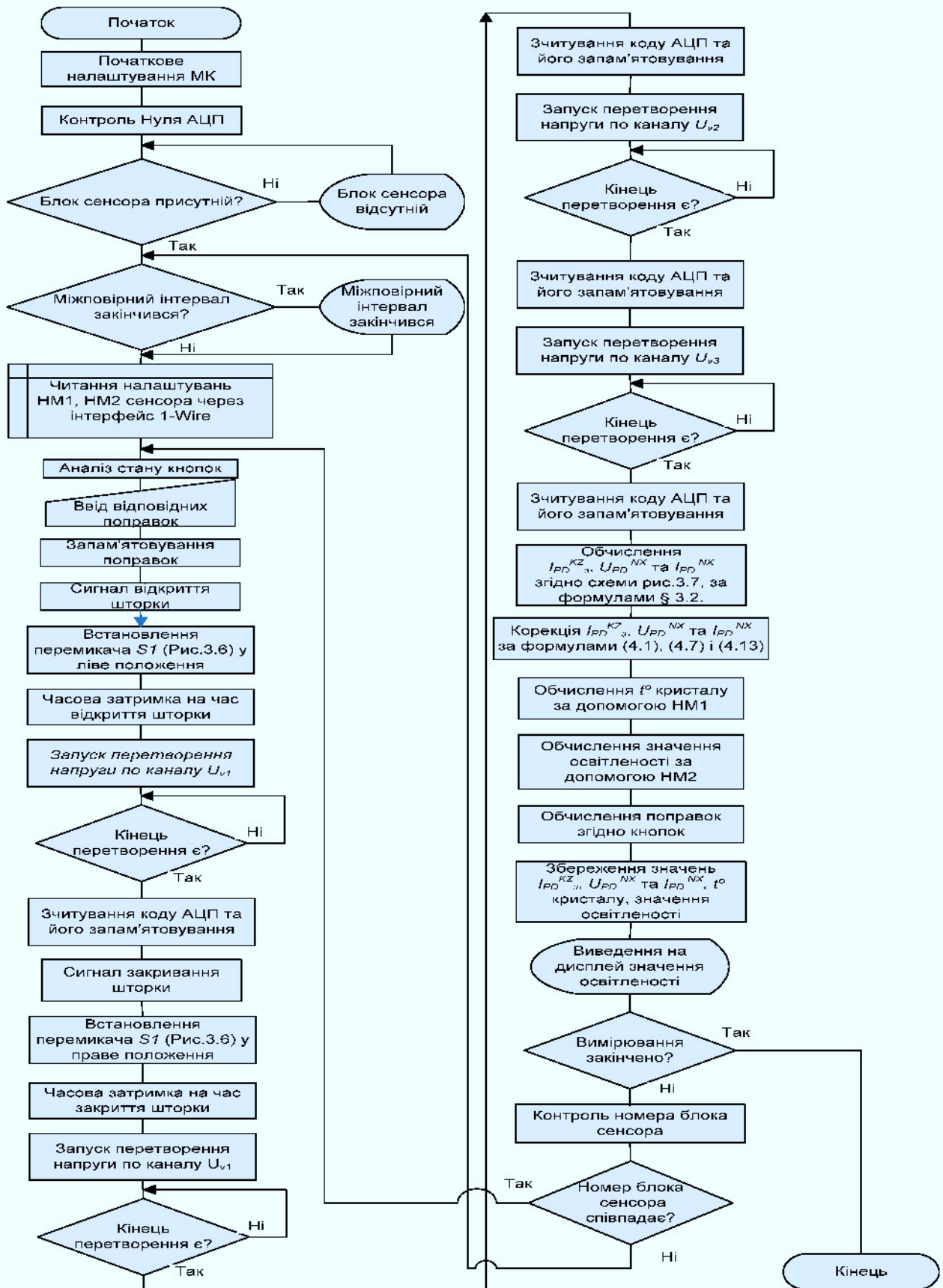


Рис. 4.8. Алгоритм обробки даних основної програми, що функціонує у МК

Опишемо основні складові даного алгоритму.

На початковому етапі роботи МК здійснюється його початкове налаштування. Виконується контроль нуля АЦП. Перевіряється наявність (під'єднання) блоку сенсора, при наявності якого виконується наступний крок. Якщо блок сенсора відсутній, на дисплей виводиться повідомлення про відсутність блоку сенсора і програма знову переходить на етап перевірки наявності блоку сенсора. На наступному кроці виконується перевірка міжповірного інтервалу, якщо він не закінчився, то виконується наступний крок, якщо закінчився – то виводиться відповідне повідомлення на дисплей та попередження, що висока точність в такому випадку не може бути гарантована. На наступному кроці здійснюється зчитування налаштувань НМ1 та НМ2 сенсора через інтерфейс 1-Wire. Виконується опитування натискань кнопок, введення відповідних поправок та їх запам'ятовування. Далі подається сигнал відкриття шторки та сигнал встановлення перемикача $S1$ (див. рис. 3.6) у ліве положення (режим виміру струму КЗ I_{PD}^{KZ} ФД за посередництвом виміру напруги U_{v1}) та виконується часова затримка на час тривалості процесу відкриття шторки. Далі подається команда запуску АЦП для перетворення напруги по каналу U_{v1} і очікується сигнал кінця перетворення. Після поступлення сигналу кінця перетворення, виконується зчитування коду АЦП та його запам'ятовування і подається сигнал закривання шторки. Далі перемикач $S1$ (див. рис. 3.6) встановлюється у праве положення та здійснюється часова затримка на час закриття шторки. Після затримки подається команда АЦП на запуск перетворення напруги по каналу U_{v1} . Зчитується сигнал кінця перетворення, якщо воно триває, то проводиться циклічне опитування цього сигналу. Якщо перетворення закінчилось, то виконується зчитування коду АЦП та його запам'ятовування. Подається команда АЦП на запуск перетворення напруги по каналу U_{v2} . Зчитується сигнал кінця перетворення, якщо воно триває, то проводиться циклічне опитування цього сигналу. Якщо перетворення закінчилось, то виконується зчитування коду АЦП та його запам'ятовування. Подається команда АЦП на запуск перетворення напруги по каналу U_{v3} .

Зчитується сигнал кінця перетворення, якщо воно триває, то проводиться циклічне опитування цього сигналу. Якщо перетворення закінчилось, то виконується зчитування коду АЦП та його запам'ятовування. Після закінчення всіх перетворень виконується обчислення значень I_{PD}^{KZ} , U_{PD}^{NX} та I_{PD}^{NX} згідно схеми рис. 3.7, за формулами § 3.2. Далі виконується корекція I_{PD}^{KZ} , U_{PD}^{NX} та I_{PD}^{NX} за формулами (4.1), (4.7), (4.13). На наступному кроці обчислюється температура кристалу за допомогою НМ НМ1. Далі обчислюється значення освітленості за допомогою НМ2, а також виконується обчислення поправок згідно значень, введених за допомогою кнопок.

Значення I_{PD}^{KZ} , U_{PD}^{NX} та I_{PD}^{NX} , температури кристалу, значення освітленості зберігаються для того, щоб їх можна було видати при запиті по інтерфейсу 1-Wire, а значення освітленості виводиться на дисплей.

Якщо вимірювання закінчено, то відбувається перехід на кінець алгоритму.

Якщо робота із приладом продовжується, то виконується контроль номера блока сенсора. Якщо номер блока сенсора співпадає, то виконується повернення на етап перевірки аналізу стану кнопок, якщо номер не співпадає, то виконується перехід на перевірку міжповірного інтервалу.

При виниканні переривань від інтерфейсу RS-232, під час виконання основної програми, підпрограма обробки переривань буде мати вигляд, представлений на рис. 4.9.

Підпрограма обробки переривань працює наступним чином.

Виконується перевірка надходження команди видачі результату і, у випадку надходження такої команди, виконується видача значень I_{PD}^{KZ} , U_{PD}^{NX} та I_{PD}^{NX} , температури кристалу, значення освітленості, терміну до закінчення міжповірного інтервалу та виконується вихід з підпрограми обробки переривань.

Якщо це не команда видачі результату, то виконується перевірка чи це не команда корекції. Якщо це команда корекції, то у Flash пам'яті даних TEDS-sys записуються нові значення U_{IV} , ΔU_{ADD}^{NX} , U_{IV}^{NX} , I_{PD}^{NX2} , I_{PD}^{NX1} , ΔI_{ADD}^{NX} , I_{1mA}^{NX} , I_{PD}^{KZ1} , ΔI_{ADD}^{KZ} ,

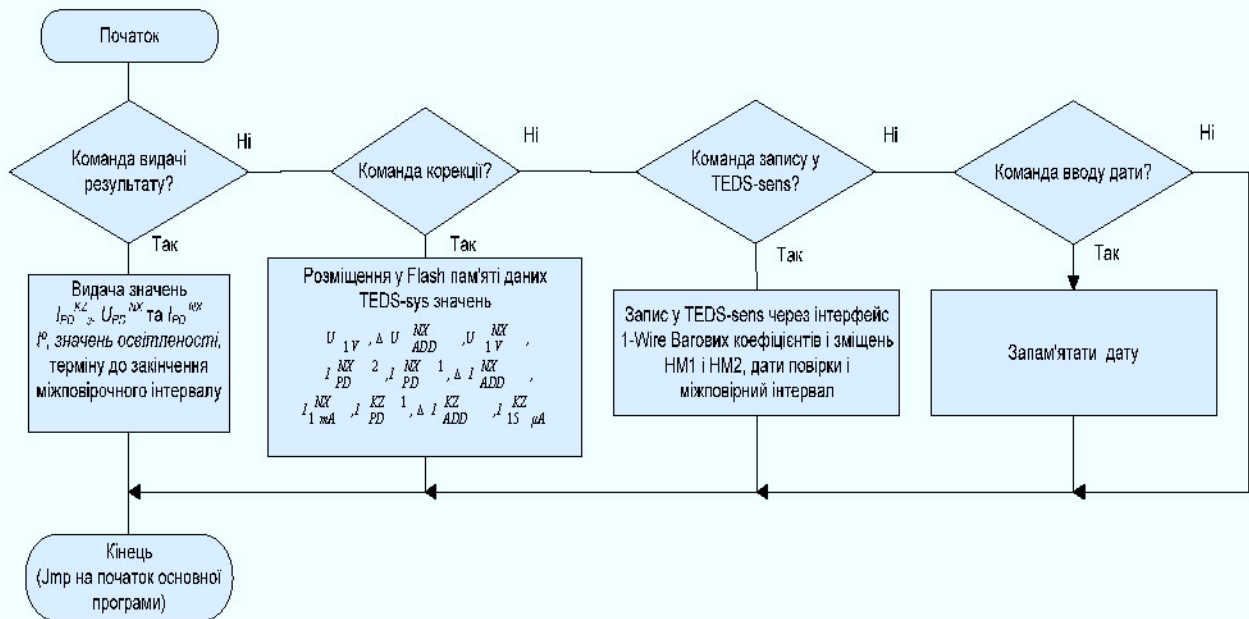


Рис. 4.9. Алгоритм роботи підпрограми обробки переривань від інтерфейсу RS-232

$I_{15\mu A}^{KZ}$. Якщо це не команда корекції, то виконується перевірка чи це не команда запису у TEDS-sens. Якщо так, то виконується запис через інтерфейс 1-Wire у TEDS-sens вагових коефіцієнтів і зміщень HM1 і HM2, дати повірки і міжповірного інтервалу. Якщо ні, то виконується перевірка чи це не команда введення дати. Якщо так – виконується запам'ятовування дати, якщо ні – вихід з підпрограми обробки переривань (повернення до основної програми).

Таким чином, у даному параграфі розроблено структуру програмного забезпечення запропонованої ІВС УФВ, яке реалізує запропонований і досліджений у другому розділі нейромережевий метод корекції похибки ФД.

4.5 Оцінка похибки вимірювання рівня ультрафіолетового випромінювання

Пропонована ІВС УФВ реалізує сумісні вимірювання освітленості. Це пов'язане з тим, що ФД, як сенсор УФВ, використовується як БПС. Тобто освітленість, по-перше, не вимірюється безпосередньо, а є нелінійною функцією струму КЗ ФД I_{PD}^{KZ} , а, по-друге, при обчисленні освітленості за

допомогою НМ2, враховується температура T_{PD} кристалу ФД, яка, в свою чергу, є нелінійною функцією двох аргументів – спаду напруги U_{PD}^{NX} на ФД та його струму I_{PD}^{NX} в режимі неробочого ходу (T_{PD} обчислюється за допомогою НМ1). При цьому температуру T_{PD} кристалу ФД необхідно вимірювати безпосередньо після вимірювання освітленості, при зростанні часу між дією УФВ і вимірюванням T_{PD} кристал ФД остигає, що є причиною появи методичної похибки вимірювання температури. Такий доволі складний алгоритм і виникнення методичної похибки, пов'язаної з тривалістю можливої паузи між вимірюваннями, характерний саме для сумісних вимірювань.

Строге аналітичне дослідження похибки сумісних вимірювань освітленості УФВ за допомогою пропонованої ІВС досить складне і вимагає багатьох спрощень, що знижує його достовірність. Більш ефективним при дослідженні похибок сукупних та сумісних вимірювань є поєднання інтервальних оцінок похибки від деяких складових з класичним методом оцінки сумарних похибок як квадратного кореня із суми квадратів їх складових. В нашому випадку інтервальні оцінки доцільні при оцінках похибок результатів обчислень при використанні НМ, в інших випадках доцільно використовувати класичний метод. Така методика оцінки похибок простіша за аналітичні дослідження і є достатньо коректною через те, що значення інтервальних оцінок похибок є більшими за значення, отримані класичним методом. Таким чином, використання інтервальних оцінок в процесі аналізу похибок є допустимим, воно не завищує точність результатів вимірювання (радіше їх занижує) і не приховує впливу складових похибки на результат вимірювання.

Оцінка похибки вимірювання освітленості УФВ може бути проведена на базі експериментальних досліджень, результати яких приведено в §3.4, з використанням оцінок невиключених похибок каналів вимірювання спаду напруги U_{PD}^{NX} та струмів неробочого ходу I_{PD}^{NX} і КЗ I_{PD}^{KZ} , отриманих у §4.2.

Для початку оцінимо вплив невиключеної похибки вимірювання спаду напруги U_{PD}^{NX} на результат вимірювання температури T_{PD} кристалу ФД.

Розрахунок ведемо для максимальних значень напруг і струмів, в такому випадку і абсолютні похибки будуть максимальні. Зміна спаду напруги U_{PD}^{NX} на ФД при зміні температури на 12°C складає $U_{24GRAD}^{1mA} - U_{36GRAD}^{1mA} = 0,0576 \text{ V}$, тобто чутливість каналу вимірювання температури по напрузі складає $dU_T^{1mA}/dt = 0,0048 \text{ V}$. Невиключена похибка каналу вимірювання спаду напруги U_{PD}^{NX} не перевищує $\delta_{PD-NX}^U \leq 0,06\%$, що веде до абсолютної похибки вимірювання напруги $\Delta_{PD-NX}^U = (\delta_{PD-NX}^U \cdot U_{PD-MAX}^{NX})/100\% \approx 0,0006 \text{ V}$, яка, в свою чергу, спричиняє абсолютну похибку вимірювання температури

$$\Delta_T^U = \frac{\Delta_{PD-NX}^U}{dU_T^{1mA}/dt} \approx 0,13^\circ\text{C} \quad (4.16)$$

Далі оцінимо вплив невиключеної похибки вимірювання струму I_{PD}^{NX} неробочого ходу ФД на результат вимірювання температури T_{PD} кристалу ФД. Розрахунок також ведемо для максимальних значень напруг і струмів, в такому випадку і абсолютні похибки будуть максимальні. Еквівалентна зміна спаду напруги U_{PD}^{NX} на ФД при зміні струму I_{PD}^{NX} неробочого ходу ФД складає $U_{24GRAD}^{1mA} - U_{24GRAD}^{0,4mA} = 0,261 \text{ V}$, тобто чутливість каналу вимірювання температури по струму складає $dU_{24GRAD}^I/dt = 0,0268 \text{ V}$. Невиключена похибка каналу вимірювання струму I_{PD}^{NX} неробочого ходу ФД не перевищує $\delta_{I-NX}^\Sigma \approx 0,18\%$, що веде до абсолютної похибки вимірювання напруги $\Delta_{PD-NX}^I = (\delta_{I-NX}^\Sigma \cdot U_{PD-MAX}^{NX})/100\% \approx 0,00047 \text{ V}$, яка, в свою чергу, спричиняє абсолютну похибку вимірювання температури

$$\Delta_T^I = \frac{\Delta_{PD-NX}^I}{dU_{24GRAD}^I/dt} \approx 0,097^\circ\text{C} \quad (4.17)$$

Похибка відтворення індивідуальної ФП ФД за температурою за допомогою НМ1, як це показано в §3.4, не перевищує $\Delta_T^{NV} \approx 0,056^\circ\text{C}$. В такому

випадку сумарна максимальна абсолютна похибка вимірювання температури, що буде впливати на визначення освітленості, буде становити

$$\Delta_T^\Sigma = \sqrt{(\Delta_T^U)^2 + (\Delta_T^I)^2 + (\Delta_T^{MN})^2} = \sqrt{(0,13)^2 + (0,097)^2 + (0,056)^2} \approx 0,17^\circ\text{C} . \quad (4.18)$$

Оцінимо вплив сумарної максимальної абсолютної похибки вимірювання температури $\Delta_T^\Sigma \approx 0,17^\circ\text{C}$ на похибку вимірювання освітленості. Еквівалентна зміна струму I_{PD}^{KZ} КЗ ФД складає $I_{36GRAD}^{MAX} - I_{24GRAD}^{MAX} = 2,5 \mu\text{A}$, тобто чутливість каналу вимірювання температури по струму складає $dI_T^{MAX}/dt = 0,208 \mu\text{A}$. Сумарна максимальна абсолютна похибка вимірювання температури $\Delta_T^\Sigma \approx 0,17^\circ\text{C}$ приведе до абсолютної похибки вимірювання струму I_{PD}^{KZ} КЗ ФД

$$\Delta_T^{I-KZ} = \frac{\Delta_T^\Sigma}{dI_T^{MAX}/dt} \approx 0,0348 \mu\text{A} . \quad (4.19)$$

В такому випадку відносна похибка вимірювання освітленості, викликана похибкою вимірювання температури $\Delta_T^\Sigma \approx 0,17^\circ\text{C}$, не буде перевищувати

$$\delta_T^{I-KZ} = \frac{\Delta_T^{I-KZ} \cdot 100\%}{I_E^{MAX}} \approx 0,29\% . \quad (4.20)$$

Оцінку впливу невиключеної похибки вимірювання струму I_{PD}^{KZ} КЗ ФД на похибку вимірювання освітленості оцінимо аналогічно до попередніх. Зміна струму I_{PD}^{KZ} при зміні освітленості складає $I_{24GRAD}^{MAX} - I_{24GRAD}^{MIN} = 11 \mu\text{A}$. Невиключена похибка каналу вимірювання струму I_{PD}^{KZ} КЗ ФД, згідно оцінки, проведеної в §4.2, не перевищує $\delta_{IKZ}^\Sigma = 0,08\%$, що практично визначає вплив невиключеної похибки вимірювання струму I_{PD}^{KZ} КЗ ФД на похибку вимірювання освітленості – зміна струму I_{PD}^{KZ} практично відповідає діапазону вимірювання, тому що еквівалентна зміна майже рівна дійсній зміні.

На похибку вимірювання освітленості впливає також похибка відтворення індивідуальної ФП ФД за освітленістю за допомогою НМ2, яка, як це показано в §3.4, не перевищує $\Delta_E^{NN} \approx 0,013 \mu A$, що відповідає відносній похибці

$$\delta_E^{NN} = \frac{\Delta_E^{NN} \cdot 100\%}{I_E^{MAX}} \approx 0,11\% \quad . \quad (4.21)$$

В такому випадку сумарна максимальна відносна похибка вимірювання освітленості буде становити

$$\delta_E^{\Sigma} = \sqrt{(\delta_{I-KZ}^{\Sigma})^2 + (\delta_T^{I-KZ})^2 + (\delta_E^{NN})^2} = \sqrt{(0,08)^2 + (0,292)^2 + (0,11)^2} \approx 0,32\% \quad . \quad (4.22)$$

Як видно з (4.22), у пропонованій ІВС УФВ домінуючою похибкою залишається температурний вплив. Запропоновані методи корекції спираються на індивідуальні ФП ФД за температурою і мають доволі високу ефективність – температурний коефіцієнт ФД, який, як це показано в першому розділі, для більшості типів ФД є не меншим за $0,1\%/^{\circ}C$, зменшується в кількість разів відповідно до коефіцієнту ефективності K_{EFF} . Його можна оцінити за формулою

$$K_{EFF} = \frac{TKI_{PD} \cdot \Delta T}{\delta_E^{\Sigma}} \quad , \quad (4.23)$$

де TKI_{ED} – температурний коефіцієнт ФД;

ΔT – температурний діапазон, для якого досліджено ефективність корекції.

В свою чергу, TKI_{ED} можна визначити за результатами експериментальних досліджень, описаних в §3.4. При максимальних струмах КЗ I_{PD}^{KZ} температурна зміна $\Delta I_T^{KZ} \approx 2,5 \mu A$, що відповідає $TKI_{PD}^{ABS} = 2,5 \mu A / 12^{\circ}C \approx 0,208 \mu A / ^{\circ}C$, що, в свою чергу, відповідає

$$TKI_{PD} = (0,208 \cdot 100) / 14,4 \approx 1,44\% / ^{\circ}C \quad . \quad (4.24)$$

Підставивши (4.24) у (4.23), отримаємо

$$K_{EFF} = \frac{1,44 \cdot 12}{0,32} = 54 \quad , \quad (4.25)$$

Отримане у (4.25) значення коефіцієнта ефективності показує, що запропонований підхід до корекції температурної похибки має високу ефективність, тому запропоновані методи і засоби є перспективними як для підвищення точності ІВС УФВ, так і для інших ІВС, в яких сенсори мають великі нелінійні температурні коефіцієнти, що змінюються під дією вимірюваної або іншої впливаючої величини.

Слід відзначити, що отримане значення максимальної відносної похибки вимірювання освітленості $\delta_{\Sigma}^{\%} \approx 0,32\%$ є значно меншим за похибку взірцевих засобів вимірювання освітленості, яка, згідно [128], є не меншою за 1%. Це означає, що, згідно [129, 130], власною похибкою ІВС УФВ можна нехтувати. Відповідно розроблена ІВС УФВ має технологічний запас точності, який можна ефективно використати при появі досконаліших взірцевих та еталонних засобів, як це заплановано в найближчому майбутньому [131].

Аналіз апаратної складності існуючих ІВС УФВ [132, 133] показав, що розроблена ІВС УФВ (її принципова схема подана в додатку П) простіша. Крім того, вона не вимагає власне налаштування – вся інформація про індивідуальні ФП всіх вузлів отримується під час перевірки і лише записується в електронні паспорти.

Слід зазначити, що трудомісткість підготовки виробництва розробленої ІВС УФВ значно вища, ніж описаної в [133], особливо щодо розробленого у другому розділі методу прогнозу результатів перевірки сенсора у точках, де перевірка не проводилася (необхідне попереднє дослідження 30...50 однотипних сенсорів у всіх точках перевірки). Однак ці дослідження є разовими.

Таким чином, у даному параграфі оцінено сумарну максимальну відносну похибку вимірювання освітленості та проведено аналіз ефективності запропонованих методів корекції похибок, показано, що розроблена ІВС УФВ

має меншу похибку за наявні взірцеві та еталонні засоби, а також нижчі апаратну складність та кошти на метрологічне обслуговування за існуючі [133].

Висновки по розділу 4

1. Розроблено, на основі сформульованих вимог до ІВС УФВ та її основних функцій, узагальнену та детальну структурні схеми ІВС УФВ. На основі аналізу особливостей розміщення вимірювальної схеми в блоці сенсора або в блоці вимірювання, вирішено розміщувати вимірювальну схему в блоці вимірювання. Це вимагає подальших досліджень для забезпечення високої точності визначення індивідуальної ФП блоку вимірювань.
2. Розроблено методику визначення індивідуальних функцій перетворення каналів блоку вимірювань, подано формули корекції похибок цих каналів згідно визначених параметрів функцій корекції та проведено оцінку невиключеної похибки цих каналів.
3. Запропоновано та обґрунтовано метод забезпечення взаємозамінності блоків сенсорів та блоків вимірювання без втрати точності вимірювання УФВ.
4. Розроблено структуру програмного забезпечення запропонованої ІВС УФВ, яке реалізує запропонований і досліджений у другому розділі нейромережвий метод корекції похибки ФД.
5. Оцінено сумарну максимальну відносну похибку вимірювання освітленості та проведено аналіз ефективності запропонованих методів корекції похибок, показано, що розроблена ІВС УФВ має суттєво меншу похибку за наявні взірцеві та еталонні засоби, а також нижчі апаратну складність та кошти на метрологічне обслуговування за існуючі системи.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз відомих методів і засобів вимірювання ультрафіолетового випромінювання, і виявлено недоліки інформаційно-вимірювальних систем та сенсорів ультрафіолетового випромінювання. На основі проведеного аналізу зроблено висновок, що для підвищення точності вимірювань, необхідно перейти до індивідуальних функцій перетворення фотодіодів та розробити методи корекції їх температурної похибки за температурою власне кристалу фотодіода. Для цього доцільно розглядати фотодіоди як багатопараметричні сенсори, але тоді значно збільшується трудомісткість визначення їх індивідуальних функцій перетворення.
2. Запропоновано метод ідентифікації індивідуальних функцій перетворення багатопараметричних сенсорів за результатами їхньої повірки, який забезпечує високу точність прогнозу за допомогою нейронних мереж результатів повірки багатопараметричних сенсорів в точках, де повірка не проводилась. Він дає можливість суттєвого скорочення кількості дійсних точок повірки (у розглянутому випадку замість 49-ти точок повірки достатньо виконати її в 9-ти точках) і дозволяє відповідно знизити трудомісткість ідентифікації індивідуальної функції перетворення фотодіодів.
3. Отримала подальший розвиток модель функції перетворення багатопараметричних сенсорів та його похибок, яка враховує всі можливі комбінації систематичних похибок нелінійності різного характеру по кожній фізичній величині, а також випадкову похибку. На основі моделі розроблено систему автоматизованого формування вибірки навчання нейронної мережі при дослідженні похибок запропонованого методу.
4. Проведені експериментальні дослідження показали, що пропонуваній метод забезпечує максимальну похибку прогнозу результатів повірки багатопараметричних сенсорів менше 0,2% при зменшенні впливу випадкових похибок від 6-ти до 10-ти разів, причому при збільшенні амплітуди випадкової похибки зростає її подавлення. Показано, що деякі

реалізації прогнозу результатів повірки мають аномально велику похибку в одній двох точках, але максимальна похибка прогнозу не виходить за вказані межі 0,2%.

5. Синтезовано структурну та принципову схеми вимірювальних каналів для інформаційно-вимірювальної системи, що має автономне живлення, які дають змогу вимірювати як температуру кристала фотодіода (за спадом напруги та струмом фотодіода в режимі неробочого ходу), так і освітленість (за температурою кристала фотодіода і його струмом короткого замикання). При цьому апаратна складність синтезованих вимірювальних каналів менша за відомі.
6. Реалізовано спеціалізований стенд для переходу до індивідуальних функцій перетворення фотодіода, дослідження якого показали, що похибка розпізнавання нейронними мережами температури не перевищує 0,06°C, а освітленості - 0,17%.
7. Запропоновано метод корекції похибок компонентів вимірювальних каналів інформаційно-вимірювальної системи, що полягає у записі параметрів індивідуальних функцій перетворення вимірювальних каналів і фотодіода в окремі електронні паспорти та відповідному калібруванні вимірювальних каналів, який забезпечує одночасно високу точність вимірювання температури кристала фотодіода та освітленості, а також взаємозамінність сенсорів.
8. Застосування запропонованих технічних рішень у прецизійній ІВС ультрафіолетового випромінювання дозволило звести її похибку до рівня 0,32%, а це дає змогу стверджувати, що похибка вимірювання освітленості визначається лише похибкою еталонних засобів, використаних при визначенні індивідуальної функції перетворення фотодіода.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рощупкін. О. Сучасний стан і перспективи розвитку детекторів ультрафіолетового випромінювання [Текст] / О. Рощупкін // Науковий вісник Чернів. Ун-ту. - 2009. Фізика. Електроніка. - Вип. 438. - С. 122-132.
2. Артюков И. Детекторы ультрафиолетового излучения [Текст] / О. Рощупкін // журнал Фотоника.- вип. 5. - 2008. С. 26-33. <http://www.photonics.su/journal/article/2641>
3. Knoll F.G. Radiation detection and measurement [Text] / Knoll F.G. - 4th ed. - Wiley, Hoboken, NJ. - 2010. - p. 298. ISBN 978-0-470-13148-0
4. Silvano Donati. Photodetectors: Devices, Circuits and Applications [Text] / Donati Silvano.- Prentice Hall. - 1 ed. - November 13. - 1999. Prentice Hall. - Pp. 432. ISBN-10:0130203378.
5. Silicon Photodiodes of series s1226. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s1226_series_kspd1034e.pdf (дата звернення 01.05.2015). – Назва з екрана.
6. Photodiodes of series s2592. [Електронний ресурс]. : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s2592-03_etc_kspd1003e.pdf (дата звернення 02.05.2015). – Назва з екрана.
7. Photodiodes of series s4349. [Електронний ресурс]. : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/4001/4204/4106/S4349/index.html> (дата звернення 30.01.2015). – Назва з екрана.
8. Photodiode s8550. [Електронний ресурс]. : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/4003/4112/S8550-02/index.html> (дата звернення 22.01.2015). – Назва з екрана.
9. Photodiode SG01M. [Електронний ресурс]. : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: http://www.sglux.com/uploads/tx_tproducts/datasheet/SG01M-18_01.pdf (дата звернення 22.04.2015). – Назва з екрана.
10. Dorosh V. Method of Multisensor Conversion Characteristics Based on Neural Networks [Text] / V. Dorosh, O. Roshchupkin, I. Turchenko, V. Kochan, A. Sachenko // Proc. of the Int. Conf. - TCSET'2010 X-th Int. Conf. "Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science". - Lviv-Slavsko, Ukraine, 2010. - ел. опт. диск (CD-ROM), А.314 (Scopus).
11. Рощупкін О.Ю. Нейромережевий метод обробки даних калібрування багатопараметричних сенсорів [Текст] / О.Ю. Рощупкін, В.І. Дорош, А.О. Саченко, В.В. Кочан, І. В. Турченко. // Мат. XI між. научно-практической конф-ции «Современные информационные и электронные технологии» (СИЭТ-2010): тез. доп. / ОНПУ. - Одесса. - 2010. - С.43.
12. Рощупкін О. Використання нейронних мереж у 8-розрядних мікроконтролерах [Текст] / О. Рощупкін. // Мат. між. Наук.-техн. конф.

- мол. учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»: тез. доп. / ТНТУ.- Тернопіль. - 21-22 грудня. - 2010. - С. 99.
13. Roshchupkin O. Neural Processing of Multisensor Signals at the 8-bit Microcontroller [Text] / O. Roshchupkin, A. Sachenko, V. Kochan // Proc. of the 6th IEEE Int. Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS-2011). - Prague (Czech Republic), 2011. - ISBN: 978-1-4577-1426-9. - Pp. 383-387 (Scopus).
 14. Roshchupkin O. Multisensors Signal Processing Using Microcontroller and Neural Networks Identification. [Text] / O. Roshchupkin, R. Smid, V. Kochan, A. Sachenko // Sensors & Transducers Journal, 2013. - Vol. 24. - No. 8. - Pp. 1-6 (Scopus).
 15. Турченко І.В. Нейромережевий метод ідентифікації характеристики перетворення мультисенсора [Текст] / І.В. Турченко, О.Ю. Рошчупкін, В.В. Кочан // Науковий вісник Чернів. Ун-ту. - 2009. - Комп'ютерні системи та компоненти. - №2 (3). - С. 36-41.
 16. Спосіб ідентифікації індивідуальної функції перетворення багатопараметричного сенсора [Текст] : Патент № 103802 України: МПК Н 03К 19/173 (2006.01), Н 03 К 19/177 (2006.01) / Винахідники: Рошчупкін О.Ю., Кочан В.В., Саченко А.О. Власник: Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича. - № а201113840; заявл. 06.04.2010; опубл. 10.01.2012, Бюл. №1.
 17. Воробець Г.І. Оптимізація апаратно – програмного забезпечення системи контролю параметрів ультрафіолетового випромінювання [Текст] / Г.І. Воробець, С.Л. Воропаєва, Р.Д. Гуржуй, Ю.Г. Добровольський, М.А. Кузь, С.В. Мельничук, Р.В. Рогов, О.Ю. Рошчупкін, та ін. // Мат. 1-ї всеукр. наук.-практ. конф. “Фізико - технологічні проблеми радіотехніки пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки”: тез. доп. / ЧНУ. - Чернівці. - 13-15 жовтня 2011. - С. 69-71.
 18. Roshchupkin O. Reducing the Calibration Points of Multisensors [Text] / Oleksiy Roshchupkin, Radislav Smid, Volodymyr Kochan, Anatoly Sachenko // Proc. of the 9th IEEE Int. Multi-Conference on Systems, Signals and Devices (SSD'2012). - Chemnitz (Germany), March 20 - 23, 2012. DOI: 10.1109/SSD.2012.6197987. - Pp. 1-6 (Scopus).
 19. Рошчупкін О.Ю. Прецизійна інформаційно-вимірювальна система ультрафіолетового випромінювання [Текст] / О.Ю. Рошчупкін, А.О. Саченко, В.В. Кочан // Науковий вісник Чернів. Ун-ту. - 2012. - Комп'ютерні системи та компоненти. № 3 (2). - С. 97-100.
 20. Пристрій для вимірювання інтенсивності ультрафіолетового випромінювання. [Текст] : Патент № 96370 України на корисну модель: МПК (2015.01) G01D 21/00, G06N 3/00 / Винахідники: Рошчупкін О.Ю., Кочан В.В., Саченко А.О. Власник: Рошчупкін О.Ю. - № u201404489; заявл. 28.04.2014; опубл. 10.02.2015, Бюл. №3.
 21. Roshchupkin O. Development of Precision Information Measuring System for Ultraviolet Radiation [Text] / O. Roshchupkin, R. Smid, A. Sachenko, V.

- Kochan // Journal “Advances in Electrical and Computer Engineering”. - 2014. - Vol.14. - No. 3. - Pp.101-106 (Web of Science та Scopus).
22. Roshchupkin O. Mobile Ad Hoc Wireless Network for Pre- and Post-Emergency Situations in Nuclear Power Plant [Text] / Robert E. Hiromoto, Anatoliy Sachenko, Volodymyr Kochan, Volodymyr Turchenko, Oleksiy Roshchupkin, Vasyi Yatskiv, Kostiantyn Kovalok // Proc. of the IEEE 2ND IDAACS Symposium Wireless Systems within the IEEE International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. - Offenburg, (Germany). - 2014. Pp. 92-96 (Scopus).
 23. Яковлева І.Д. Апаратна реалізація модуля збору та обробки інформації телеметричного дослідницького комплексу [Текст] / Яковлева І.Д., Кузь М.А., Рощупкін О.Ю., Галін Ю.О., Сидорчук В.В., Пшеничний О.О. // Мат. III-ї між. наук.-практ. конф. «Інформаційні технології та захист інформації»: тез. доп. / Харків. - 20 - 21 квітня. - 2012. - С. 194.
 24. Яковлева І.Д. Апаратна реалізація модуля збору та обробки інформації телеметричного дослідницького комплексу [Текст] / Яковлева І.Д., Кузь М.А., Рощупкін О.Ю., Галін Ю.О., Сидорчук В.В., Пшеничний О.О. // «Системи обробки інформації»: темат. зб.-к. - Вип. 4 (102). - том 1. - 2012. - с. 92-96. ISSN: 1681-7710.
 25. Pavliuk D.D. Improved genetic algorithm for neural networks training with parallelization [Текст] / Pavliuk D.D., Sachenko A.S., Madani K., Roshchupkin O.Y. // Proc. of the II Int. Sci.-Pract. Conf. “Physical and Technological Problems of Radio Engineering Devices, Telecommunication, Nano- and Microelectronics”: тез. доп. / Чернівецький нац. унів. – Чернівці. 25-27 Жовтня. - 2012. - С. 148.
 26. Рощупкіна Н.В. Дослідження методу обробки сигналів багатопараметричних сенсорів [Текст] / Рощупкіна Н.В., А.О. Саченко, С.В. Баловсяк, О.Ю. Рощупкін // Науковий вісник Чернів. Ун-ту. - 2014. - Комп’ютерні системи та компоненти. - №5(2). С.57-63.
 27. Roshchupkina N. Improved Multisensors Signal Processing [Text] / Nataliia Roshchupkina, Serhii Balovsiak, Oleksiy Roshchupkin, Radislav Smid, Anatoliy Sachenko, Volodymyr Kochan // Proc. of the IEEE 35th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2015). - 21-24 April. - Kyiv. - 2015. - Pp. 341 - 346 (Scopus).
 28. Yagura T. Biological sensors for solar ultraviolet radiation [Text] / Yagura T., Makita K., Yamamoto H., Menck C.F., Schuch A.P. // Sensors (Basel). - 11.- No.4. - Special Issue: Bioinspired Sensor Systems: Apr 12. - 2011. - Pp. 4277 - 4294.
 29. Sommer Regina. Measurement of UV radiation using suspensions of microorganisms [Text] / Regina Sommer, Alexander Cabaj, Tudor Sandu, Miranda Lhotsky // Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology Vol. 53.- Is. 1-3.- 1.- November 1999.- Pp. 1–6.

30. Ronto G. Phage T7 in biological UV dose measurement. [Text] / Ronto G., Gaspar S., Berces A. // Journal of Photochemistry and Photobiology B Biology. - 12(3).- 03.1992.- DOI:10.1016/1011-1344(92)85030-X. Pp. 285-94.
31. Podgorsak E. B. Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students. [Text] / Podgorsak E. B. // Vienna: International Atomic Energy Agency.- 2005.- ISBN 92-0-107304-6.- 696 p.
32. Radiometer. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Radiometer> (дата звернення 28.04.2015). - Назва з екрана.
33. Dosimeter. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Dosimeter> (дата звернення 28.04.2015). - Назва з екрана.
34. Роцупкін. О. Сенсори ультрафіолетового випромінювання інформаційно-вимірювальних систем. Сучасний стан і перспективи розвитку [Текст] / О. Роцупкін. // Мат. IV міжн. наук. конф. мол. вчених «Комп'ютерні науки та інженерія 2010»: тез. доп. / CSE. - Львів. - 2010. - С. 318-319.
35. Phototubes & Photomultipliers. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <https://www.hofstragroup.com/category/measurement/imaging-photonics/phototubes-photomultipliers> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
36. Ultra-Fast Vacuum Biplanar Phototube ITT F4014 (S1). [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <https://www.hofstragroup.com/product/itt-f4014-s1-ultra-fast-vacuum-biplanar-phototube> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
37. Product Comparison: MU-100. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.apogeeinstruments.co.uk/compare/50/48/49> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
38. SU-100: UV Sensor. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.apogeeinstruments.co.uk/uv-sensor-su-100/> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
39. UV power meter C9536-02 H9958 (Hamamatsu Photonics). [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/5001/3037/C9536-02%20H9958/index.html> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
40. Jason Keck. Reynard Corporation. ColorLock™ Filter Stacks Enable Better Wide-Angle Imaging. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=57178> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
41. Product Groups (Sglux). [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: http://www.sglux.com/products_of_sglux_SiC_photodio.22.0.html?&tx_tproducts_pi1%5Bcat%5D=10 (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.

42. Radiometer RM-22. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: http://www.uv-groebel.com/pmr_rm22.php (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
43. Radiometric Sensors. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: http://www.uv-groebel.com/ps1_rm11s.php (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
44. SPDIUV UV Control 4C Radiometer - UV Measuring Device. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.cureuv.com/spdiuv-control-4c-uv-radiometer.html> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
45. Official Site of Hamamatsu. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.hamamatsu.com/> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
46. Official Site of Sglux. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.sglux.com/> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
47. Official Site of Lasercomponents. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.lasercomponents.com/> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
48. Official Site of Ams. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.ams.com/eng/Products> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
49. Si photodiode S1226-18BU. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/4001/4103/S1226-18BU/index.html> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
50. Avalanche Photodiodes. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/4003/index.html> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
51. Photodiode s12023. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s12023-02_etc_kapd1007e.pdf (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
52. Photodiode g8931. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/g8931-04_kapd1018e03.pdf55 (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
53. Photodiodes of series s4111. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s4111-16r_etc_kmpd1002e07.pdf (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
54. Photodiodes of series s5980. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s5980_etc_kpin1012e04.pdf (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.

55. Digital UV SENSOR “UV-Surface-D” (DIGIPROBE). [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: http://www.sglux.com/uploads/tx_tproducts/datasheet/UV-Surface-D_02.pdf (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
56. SG01L. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: http://www.sglux.com/uploads/tx_tproducts/datasheet/SG01L-18ISO90_01.pdf (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
57. Product Categories. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: http://www.sglux.com/Products.2.0.html?&tx_tproducts_pil%5bcat%5d=7 (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
58. Official Site of Dexterresearch. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.dexterresearch.com> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
59. Shaffer R. E. A comparison study of chemical sensor array pattern recognition algorithms [Text] / Shaffer R. E., Rose-Pehrsson S. L., McGill A.R. // *Analytica Chimica Acta*. - Vol. 384. - No. 3. - 1999. - Pp. 305-317.
60. Bangalore A. S. Automated Detection of Trichloroethylene by Fourier Transform Infrared Remote Sensing Measurements [Text] / Bangalore A. S., Small G. W., Combs R. J., Knapp R. B., Kroutil R. T. // *Analytical Chemistry*. - Vol. 69. - No. 2. - 1997. - Pp. 118-129.
61. Ortega A. An intelligent detector based on temperature modulation of a gas sensor with a digital signal processor [Text] / Ortega A., Marco S., Perera A., Sundic T., Pardo A., Samitier J. // *Sensors and Actuators B*. - Vol. 78. - No. 1-3. - 2001. - Pp. 32-39.
62. Daqi G. An electronic nose and modular radial basis function network classifiers for recognizing multiple fragrant materials [Text] / Daqi G., Shuyan W., Yan J. // *Sensors and Actuators B*. - Vol. 97. - No. 2-3. - 2004. - p. 391-401.
63. Zhang H. Improving pattern recognition of electronic nose data with time-delay neural networks [Text] / Zhang H., Balaban M., Principe J. // *Sensors and Actuators B*. - Vol. 96. - No. 1-2. - 2003. - Pp. 385-389.
64. Llobet E. Building parsimonious fuzzy ARTMAP models by variable selection with a cascaded genetic algorithm: application to multisensor systems for gas analysis [Text] / Llobet E., Brezmes J., Gualdron O., Vilanova X., Correig X. // *Sensors and Actuators B*. - Vol. 99. - No. 2-3. - 2004. - Pp. 267-272.
65. Luo D. Application of ANN with extracted parameters from an electronic nose in cigarette brand identification [Text] / Luo D., Hosseini G., Stewart J. // *Sensors and Actuators B*. - 2004. - Vol. 99. - No. 2-3. - 2004. - Pp. 253-257.
66. Martin M. Application of artificial neural networks to calculate the partial gas concentrations in a mixture [Text] / Martin M., Santos J., Agapito J. // *Sensors and Actuators B*. - Vol. 77. - No. 1-2. - 2001. - Pp. 468-471.
67. Srivastava A.K. Detection of volatile organic compounds (VOCs) using SnO₂ gassensor array and artificial neural network [Text] / Srivastava A.K. // *Sensors and Actuators B*. - Vol. 96. - No. 1-2. - 2003. - Pp. 24-37.

68. Bicego M. A comparative analysis of basic pattern recognition techniques for the development of small size electronic nose [Text] / Bicego M., Tessari G., Tecchiolli G., Bettinelli M., *Sens. Actuators B.* - vol. 85. - 2002. - Pp. 137-144.
69. Ayoubi Mihar. Identification and Supervision of a Thermal Works With Locally Distributed Dynamics Plant Based On Multi-Layer Perceptron Net [Text] / Ayoubi Mihar, Isermann Rolf, Huber Jiirgen // *Proc. of the 34th Conf. on Decision & Control New Orleans.* - December 1995. Pp. 1825-1830.
70. Isermann Rolf. *Fault-Diagnosis Systems* [Text] / Isermann R. / Springer Berlin Heidelberg. - 2006. - ISBN: 978-3-540-24112-6. 475 p.
71. Rivera-Mejia J. Self-compensation to build reconfigurable measurement systems [Text] / Rivera-Mejia J., Carrillo-Romero M., Herrera-Ruiz G. // *Instrumentation & Measurement Magazine.* - IEEE. - vol.16. - no.2 .- doi: 10.1109/MIM.2013.6495675. - April 2013 .- Pp.10 - 19.
72. Van der Horn G. *Integrated Smart Sensors Design and Calibration* [Text] / Van der Horn G., Huijsing J. L., // Norwell, USA: Kluwer Academic Publisher. - ISBN 978-0-7923-8004-7. - 1998. - 202 p.
73. Schoukens J. Linearization of nonlinear dynamics systems [Text] / J. Schoukens, J. G. Nemeth, G. Vandersteen, R. Pintelon and P. Crama // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* - vol. 53. - no. 4. - Aug. - 2004.Pp. 1245-1248.
74. Rivera M. J. Improved progressive polynomial algorithm for self- adjustment and optimal response in intelligent sensors [Text] / M. J. Rivera, R. G. Herrera, M. M. Chacon, P. Acosta and R. M. Carrillo // *Sensors.*- vol. 8. - Nov. - 2008. - Pp. 7410-7427.
75. Rivera M. J. Quantitative evaluation of self-compensation algorithms applied in intelligent sensors [Text] / M. J. Rivera, R. M. Carrillo, and R. G. Herrera // *Proc. Of 2010 IEEE Int. Instr. and Meas. Tech. Conf.* - Austin. - TX. - USA. - ISBN 978-1-4244-2833-5. - May. - 2010. Pp. 3-6.
76. Bishop C. M. *Neural Networks for Pattern Recognition* [Text] / Bishop C. M. - New York: Oxford University Press. - 1995. - ISBN: 978-0198538646. - 504 p.
77. Derde M. P. Supervised pattern recognition: the ideal method? [Text] / Derde M. P., Massart D. L. // *Analytica Chimica Acta.* - 1986. - Vol. 191. - Pp. 1-16.
78. Michie Donald. *Machine Learning, Neural and Statistical Classification* [Text] / Donald Michie, David Spiegelhalter, Charles Taylor. - New York: Ellis Horwood. - 1994.- ISBN-13: 978-8188689736. - 290 p.
79. Tou J. T. *Pattern Recognition Principles* [Text] / Tou J. T., Gonzalez R. C. - Reading. - MA: Addison-Wesley: 2nd edition. - 1977. - ISBN-13:978-0201075878. - 377 p.
80. Lavine B. K. Identification of Underground Fuel Spills by Pattern Recognition Analysis of High-Speed Gas Chromatograms [Text] / Lavine B. K., Mayfield H., Kromann P. R., Faruque A. // *Analytical Chemistry.* - Vol. 67 (21). - 1995. - Pp. 3846-3852.
81. Fukunaga K. *Introduction to Statistical Pattern Recognition* [Text] / Fukunaga Keinosuke. - Academic Press. - 2nd Edition. - New York. - 1990. - ISBN-13: 978-0122698514. - 592 p.

82. Werther W. Classification of mass spectra: A comparison of yes/no classification methods for the recognition of simple structural properties [Text] / Werther W., Lohninger H., Stancl F. and Varmuza K. // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. - 1994. - Vol. 22. - No. 1. - Pp. 63-76.
83. Devroye L. A Probabilistic Theory of Pattern Recognition [Text] / Luc Devroye, Laszlo Gyorfi, Gabor Lugosi. - Springer. - New York. - 1996. - ISBN-13: 978-0387946184. - 638 p.
84. Wettschereck D. Locally adaptive nearest neighbor algorithms [Text] / D. Wettschereck, T.G. Dietterich, // *Adv. Neural Inform. Process. Syst.* - 6. - 1994. - Pp. 184-191.
85. Hastie T. Discriminant adaptive nearest neighbor classification [Text] / T. Hastie, R. Tibshirani // *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* - 18 (6). - 1996. - Pp. 607-616.
86. Duda R. O. Pattern Classification and Scene Analysis [Text] / Richard O. Duda, Peter E. Hart. - New York: Wiley. - 1973. - ISBN-13: 978-0471223610. - 512 p.
87. Turchenko I. Accurate Recognition of Multi-Sensor Output Signal Using Modular Neural Networks [Text] / Turchenko I., Kochan V., Sachenko A. // *Int. Jour. of Information Tech. and Intelligent Computing*. - Vol. 2. - No. 1. - 2007. - Pp. 27- 47.
88. Jolliffe I.T. Principal Component Analysis [Text] / I.T. Jolliffe. - Springer. - New York. - 2nd edition. - 2002. - ISBN-13: 978-0387954424. - 488 p.
89. Theodoridis S. Pattern Recognition [Text] / Sergios Theodoridis, Konstantinos Koutroumbas. - Academic Press. - 4 edition. - New York. - 2008. - ISBN-13:978-1597492720.- 984 p.
90. Fisher R.A. The use of multiple measurements in taxonomic problems [Text] / R.A. Fisher. - (1936). - Re-printed on *Contributions to Mathematical Statistics*. - Wiley. - New York. - 1950. - Pp. 179-188.
91. Zhao W. Discriminant Analysis of Principal Components for Face Recognition [Text] / W. Zhao, R. Chellappa, A. Krishnaswamy // *10th IEEE International Conference and Workshops on Automatic Face and Gesture Recognition (FG)*, 2013.- doi:10.1109/AFGR.1998.670971. - 336 p.
92. Hertz J. Introduction to the Theory of Neural Computation [Text] / J. Hertz, A. Krogh, R.G. Palmer. - Westview Press. - New Ed edition .- 1991. - ISBN-13: 978-0201515602. - 350 p.
93. Pantazopoulos D. Static cytometry and neural networks in the discrimination of lower urinary system lesions [Text] / D. Pantazopoulos, P. Karakitsos, A. Pouliakis, A. Iokim-Liossi, M.A. Dimopoulos // *Urology*. - No. 51. - 1998. - Pp. 946-950.
94. Chtioui Y. Reduction of the size of the learning data in a probabilistic neural network by hierarchical clustering. Application to the discrimination of seeds by artificial vision [Text] / Chtioui Y., Bertrand D., Barba D. // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. - Vol. 35. - No. 2. - 1996. - Pp. 175-186.
95. Specht D. F. Probabilistic neural networks [Text] / Specht D. F. // *Neural Networks*. - Vol. 3. - No. 1. - 1990. - Pp. 109-118.

96. Guo D. Application of artificial neural network technique to the formulation design of dielectric ceramics [Text] / Guo D., Wang Y., Nan C., Li L., Xia J. // *Sensors and Actuators A*. - Vol. 102. - No. 1-2. - 2002. - Pp. 93-98.
97. Rosenblatt F. Principle of Neurodynamics: Perceptions and the Theory of Brain Mechanisms [Text] / Rosenblatt Frank.- Springer Berlin Heidelberg. - 1984. - ISBN: 978-3-642-70913-5. - Pp 245-248.
98. Battiti R. Training neural nets with the reactive Tabu search [Text] / R. Battiti, G. Tecchiolli // *IEEE Trans. Neural Network*. - 6 (5). - 1995. - Pp. 1185-1200.
99. Blayo F. Enhanced learning for evolutive neural architecture (ELENA)-task B4, Benchmarks, Technical report [Text] / F. Blayo, Y. Cheneval, A. Guerin-Dugue, R. Chentouf, C. Aviles- Cruz, J. Madrenas, M. Moreno, J.L. Voz. - Esprit Basic Research Project no. 6891. - 1995.
100. Lonergan M.C. Array-based vapor sensing using chemically sensitive carbon black-polymer resistors [Text] / M.C. Lonergan, E.J. Severin, B.J. Doleman, S.A. Beaber, R.H. Grubbs, N.S. Lewis. - *Chem. Mater.* - No. 8. - 1996. - Pp. 1198-1312.
101. Doleman B.J. Quantitative study of the resolving power of arrays of carbon black- polymer composites in various vapor-sensing tasks [Text] / B.J. Doleman, M.C. Lonergan, E.J. Severin, T.P. Vaid, N.S. Lewis // *Anal. Chem.* - No.70. - 1998. - Pp.4177-4190.
102. Kohonen T. Self-organizing maps [Text] / Kohonen Teuvo. - 3rd edition. - Berlin, Springer - Verlag.- 2000. - ISBN-13: 978-3540679219. - 521 p.
103. Capone S. Analysis of CO and CH₄ gas mixtures by using a micromachined sensor array [Text] / Capone S., Siciliano P., Barsan N., Weimar U., Vasanelli L. // *Sensors and Actuators B: Chemical*. - Vol.78. - No.1-3. - 2001. - Pp. 40-48.
104. Hahn S. Investigation of CO/CH₄ mixture measured with differently doped SnO₂ sensors [Text] / Hahn S., Barsan N., Weimar U. // *Sensors and Actuators B*. - Vol. 78. - No. 1-3. - 2001. - Pp. 64-68.
105. Turchenko V. Estimation of Computational Complexity of Sensor Accuracy Improvement Algorithm Based on Neural Networks [Text] / Turchenko V., Kochan V., Sachenko A. // Ed. G.Dorffner, H.Bischof, and K.Hornik // *Lecture Notes in Computing Science*. - Springer-Verlag. - No. 2130. - 2001. - Pp. 743-748.
106. Besley L.M. Two-point calibration of standard capsule platinum resistance thermometers for the range 13.81 K to 273.15 K [Text] / L.M. Besley, R.C. Kemp // *Cryogenics*. - Vol. - 18. - Is. 8. - 1978. - ISSN 0011-2275. Pp. 497-500.
107. McLaren E.H. The Pt/Au thermocouple [Text] / E.H. McLaren, E.G. Murdock // Ottawa. - National Research Council of Canada. - Publ. NRCC/27703. - 1987.
108. Abdelaziz Y.A. Stability and calibration of platinum/palladium thermocouples following heat treatment [Text] / Y.A. Abdelaziz, F.M. Megahed, M.M. Halawa // *Measurement*. - Vol. 35. - Is. 4.- 2004.- ISSN 0263-2241. - Pp. 413-420.
109. Standard Guide for Thermocouple Verification. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. -Режим доступу:

- <http://www.astm.org/Standards/E2846.htm> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
110. Zhang P. Fractal study of the fluctuation characteristic in the calibration of the cryogenic thermocouples [Text] / P. Zhang, Y.X. Xu, R.Z. Wang, M. Murakami // *Cryogenics*. - Vol. 43. - Is.1.- 2003. - ISSN 0011-2275. - Pp. 53-58.
 111. Peter R.N. Childs. Thermocouples, In *Practical Temperature Measurement*, [Text] / Butterworth-Heinemann. - 2001. - ISBN 9780750650809.- 386 p.
 112. Рогельберг И. Сплавы для термопар [Текст] / М.- : Металлургия. - 1983. -, С. 360.
 113. Horowitz Paul. *The Art of Electronics* [Text] / Paul Horowitz, Winfield Hill., 3rd Edition. - 2015. - ISBN: 9780521809269. - 1223 p.
 114. Ocaya O. Richard. A linear, wide-range absolute temperature thermometer using a novel p-n diode sensing technique [Text] / *Measurement*. - Vol. - 46. -Is. - 4. - 2013. - ISSN 0263-2241. - Pp. 1464-1469.
 115. Paul E. Gray. *Electronic principles: Physics, models, and circuits*. [Text] / Paul E. Gray, Campbell L. Searle // Wiley. - 1969. - ISBN-13: 978-0471323983. - 1016 p.
 116. High Power LED Edison Edixeon 3W Emitter EDEV-SLC1-03. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: https://www.led-tech.de/de/High-Power-LEDs-Edison/Edixeon-3W/Edison-Edixeon-3W-Emitter-LT-1467_142_143.html (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
 117. ГОСТ Р 8.590-2001 Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений характеристик ультрафиолетового излучения в охране труда. Методика поверки [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://vsegost.com/Catalog/65/6522.shtml> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
 118. LMx35, LMx35A Precision Temperature Sensors. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm335.pdf> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
 119. Modern Digital Multi-Purpose Meters UT70D. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: http://www.uni-trend.com/en/product/2014_0729_815.html (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
 120. В7-46 Вольтметр универсальный электрометрический [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.tpspribor.ru/pribdescr.php?sheet=1&look=7&look2=7&path=b7-46&nov=519> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
 121. ГОСТ 6651-94. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://temperatures.ru/pdf/GOST/gost6651-2009.pdf> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.

122. ГОСТ 23737-79. Меры электрического сопротивления. Общие технические условия. [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://vsegost.com/Catalog/30/30973.shtml> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
123. Самсонов Г.В. Датчики для измерения температуры в промышленности [Текст] / Г.В. Самсонов, А.И. Киц, О.А. Кюздени и др. - К.: Наук. Думка. - 1972. - 224с.
124. Прецизионные проволочные резисторы С5-5, С5-5В. [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: http://perina.org/pdf/cap_rezist/s5_5w_1_ru.pdf (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
125. IEEE 1451 Smart Transducer Interface Standard. [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.nist.gov/el/isd/ieee/ieee1451.cfm> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
126. ADUC845: Precision Analog Microcontroller. [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.analog.com/en/products/processors-dsp/analog-microcontrollers/8052-core-products/aduc845.html#product-overview> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
127. Precision Operational Amplifiers. OP177. [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.analog.com/en/products/amplifiers/operational-amplifiers/high-voltage-amplifiers-greaterthanequalto-12v/op177.html#product-overview> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
128. ГОСТ Р 8.658-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений характеристик ультрафиолетового излучения соляриев. Методика поверки. [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/48794/> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.
129. Taner A. Virtual instrumentation and intelligent sensors [Text] / A. Taner, J. Brignell // Sensors and Actuators A: Physical. - Vol. 61. - No. 1-3. - 1997.- Pp. 427-430.
130. Brignell E. Digital compensation of sensors [Text] / Scientific Instruments. - Vol. 20. - N 9. - 1987. - Pp. 1097-1102.
131. Неєжмаков П. І. Науково-технічні засади перебудови еталонної бази України у відповідності до реформи Міжнародної системи одиниць (SI) : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.01.02 / П. І. Неєжмаков; Нац. ун-т "Львів. політехніка". - Львів, 2014. - 40 с. - укр.
132. Радиометр энергетической освещенности ультрафиолетового диапазона Тензор-31. [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.tensor.ua/products/izmerenie-opticheskikh-harakteristik/pribory-dlya-izmereniya-harakteristik-ultrafioletovogo-izlucheniya/tensor-31> (дата звернення 29.04.2015). - Назва з екрана.

133. Бутенко В.К. Радиометр ультрафиолетового излучения “Тензор-31” [Текст] / В.К. Бутенко, В.Г. Юрьев, Ю.Г. Добровольский, Б.Г. Шабашкевич // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 2006. - № 6. - С. 36-38. - Библиогр.: 16 назв. - рос.
134. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование.: Учеб. пособие для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат. - 1985. – С. 438.
135. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю Є.Т. Володарський, В.В. Кухарчук, В.О. Поджаренко, Г.Б. Сердюк. - Навчальний посібник.- Вінниця ВДТУ: Велес, - 2001.- С. 219.

Додаток А

ПЗ для автоматизованого дослідження №1

```

unit Unit1;
interface
uses
  Windows, Messages,
  SysUtils, Variants, Classes,
  Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, ComObj, StdCtrls,
  Grids, math;
type
  TForm1 = class(TForm)
    StringGrid1: TStringGrid;
    Button1: TButton;
    OpenDialog1: TOpenDialog;
    Button2: TButton;
    SaveDialog1: TSaveDialog;
    StringGrid2: TStringGrid;
    Edit1: TEdit;
    Label1: TLabel;
    Edit2: TEdit;
    Edit3: TEdit;
    Edit4: TEdit;
    StringGrid3: TStringGrid;
    Button4: TButton;
    StringGrid4: TStringGrid;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    Edit10: TEdit;
    Edit11: TEdit;
    Button3: TButton;
    ST: TStringGrid;
    Button5: TButton;

    procedure
    Button1Click(Sender:
    TObject);
    procedure
    Button2Click(Sender:
    TObject);
    procedure
    Edit1Exit(Sender: TObject);
    procedure
    FormCreate(Sender: TObject);
    procedure
    Button4Click(Sender:
    TObject);
    procedure
    Button3Click(Sender:
    TObject);
    procedure
    Button5Click(Sender:
    TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;
var
  Form1: TForm1;
  cAd: integer;

  s10, s025, s015, s010, s005, s001,
  s000, kol :array [0..90, 0..50]
  of string;
implementation
  {$R *.dfm}
  function RefToCell(RowID,
  ColID: Integer): string;
  var
    ACount, APos: Integer;
  begin
    ACount := ColID div 26;
    APos := ColID mod 26;
    if APos = 0 then
      begin
        ACount := ACount - 1;
        APos := 26;
      end;
    if ACount = 0 then
      Result := Chr(Ord('A') +
      ColID - 1) + IntToStr(RowID);
    if ACount = 1 then
      Result := 'A' +
      Chr(Ord('A') + APos - 1) +
      IntToStr(RowID);
    if ACount > 1 then

```



```

        Result := Chr(Ord('A') +
ACount - 1) + Chr(Ord('A') +
APos - 1) + IntToStr(RowID);
end;
// StringGrid Inhalt in Excel
exportieren
// Export StringGrid contents
to Excel
function
Xls_To_StringGrid(AGrid:
TStringGrid; AXLSFile:
string): Boolean;
const
xlCellTypeLastCell =
$0000000B;
var
XLApp, Sheet: OLEVariant;
RangeMatrix: Variant;
x, y, k, r: Integer;
begin
Result := False;
// Create Excel-OLE Object
XLApp :=
CreateOleObject('Excel.Applic
ation');
try
    // Hide Excel
    XLApp.Visible := False;
    // Open the Workbook

XLApp.Workbooks.Open(AXLSFile
);
    // Sheet :=
XLApp.Workbooks[1].Worksheets
[1];
    Sheet :=
XLApp.Workbooks[ExtractFileNa
me(AXLSFile)].Worksheets[1];
    // In order to know the
dimension of the Worksheet,
i.e the number of rows
    // and the number of
columns, we activate the last
non-empty cell of it

    // Get the value of the
last row
    x := XLApp.ActiveCell.Row;
    // Get the value of the
last column
    y :=
XLApp.ActiveCell.Column;
    // Set Stringgrid's row
&col dimensions.
    AGrid.RowCount := x;
    AGrid.ColCount := y;
    // Assign the Variant
associated with the WorkSheet
to the Delphi Variant
    RangeMatrix :=
XLApp.Range['A1',
XLApp.Cells.Item[X,
Y]].Value;
    // Define the loop for
filling in the TStringGrid
    k := 1;
    repeat
        for r := 1 to y do
            AGrid.Cells[(r - 1),
(k - 1)] := RangeMatrix[K,
R];
            Inc(k, 1);
            AGrid.RowCount := k + 1;
        until k > x;
        // Unassign the Delphi
Variant Matrix
        RangeMatrix := Unassigned;
    finally
        // Quit Excel
        if not VarIsEmpty(XLApp)
then
            begin
                // XLApp.DisplayAlerts
:= False;
                XLApp.Quit;
                XLAPP := Unassigned;
                Sheet := Unassigned;
                Result := True;
            end;
        end;
    end;
end;
Sheet.Cells.SpecialCells(xlCe
llTypeLastCell,
EmptyParam).Activate;

```

```

procedure
TForm1.Button1Click(Sender:
TObject);
var
i:integer;
  rowa: integer;
begin
OpenDialog1.InitialDir:=Extra
ctFilePath(Application.ExeNam
e);
OpenDialog1.Execute();
try begin
if
Xls_To_StringGrid(StringGrid1
,OpenDialog1.FileName) then
  for rowa:=0 to
Form1.StringGrid1.RowCount -
1 do
  begin
  if
Trim(StringGrid1.Rows[rowa].T
ext) = '' then
  StringGrid1.RowCount :=
StringGrid1.RowCount - 1;
  end;
  StringGrid1.RowCount :=
StringGrid1.RowCount + 1;
  for I :=
StringGrid1.RowCount-1 downto
0 do
  StringGrid1.Rows[i+1]:=
StringGrid1.Rows[i];
  StringGrid1.colCount :=
StringGrid1.colCount + 1;
  for I :=
StringGrid1.colCount-1 downto
0 do
  StringGrid1.cols[i+1]:=
StringGrid1.cols[i];
  for I :=
StringGrid1.ColCount downto 0
do
  StringGrid1.cells[i+1,0]:=
inttostr(i+1);
  for I :=
StringGrid1.rowCount downto 0
do
  StringGrid1.cells[0,i]:=
inttostr(StringGrid1.rowCount
-i);

StringGrid1.cells[0,0]:='1';
  end;
except
  ShowMessage('Ошибка при
открытии файла!');
end;
end;
procedure
TForm1.Button2Click(Sender:
TObject);
var
Col, Row: Word;
ExcelApp, Sheet: variant;
begin
ExcelApp :=
CreateOleObject('Excel.Applic
ation');
try
ExcelApp.Visible :=
false;

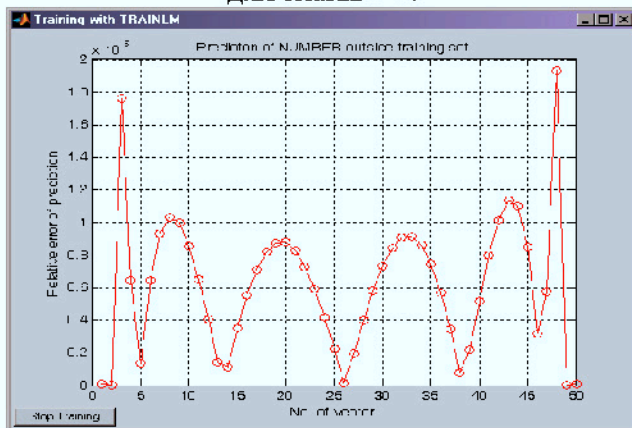
```

Додаток Б

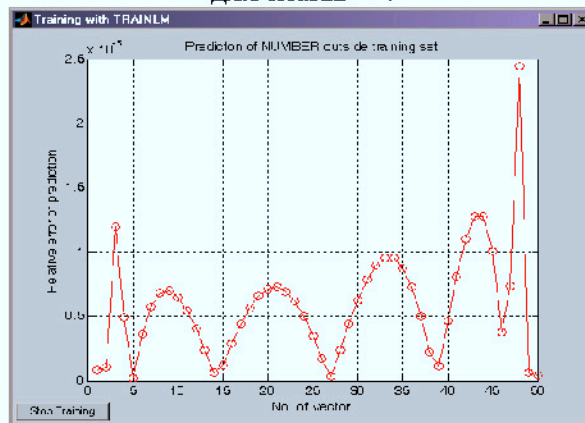
Комбінації знаків для точки 14

(згідно формул (2.3), (2.9), (2.14), (2.19) та (2.25))

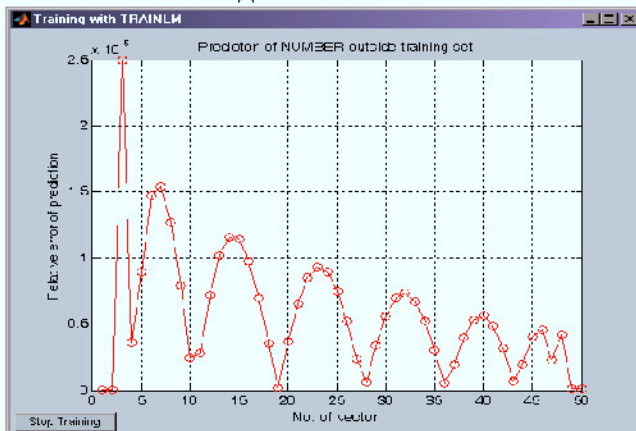
для знаків ++:



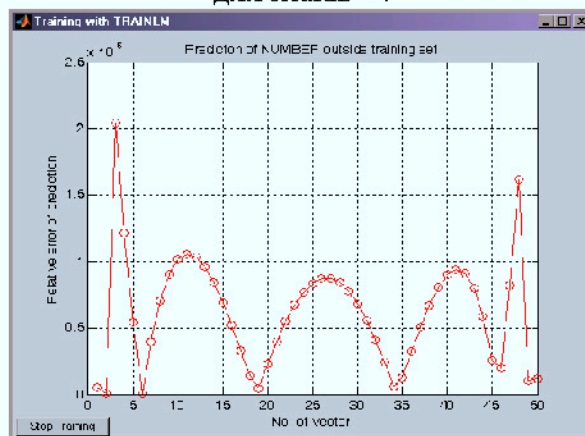
для знаків --:



для знаків +-:

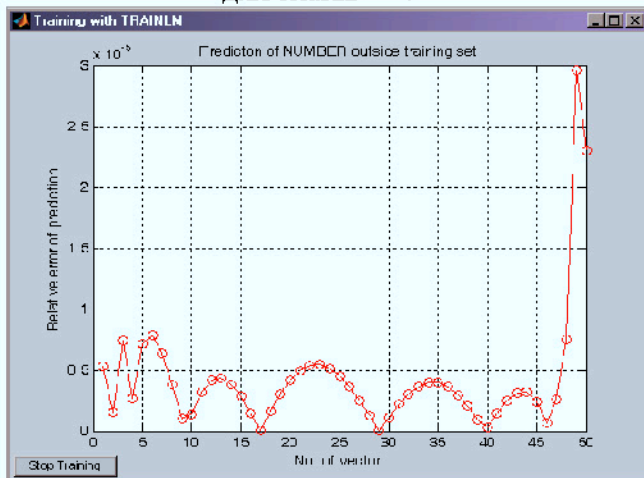


для знаків --:

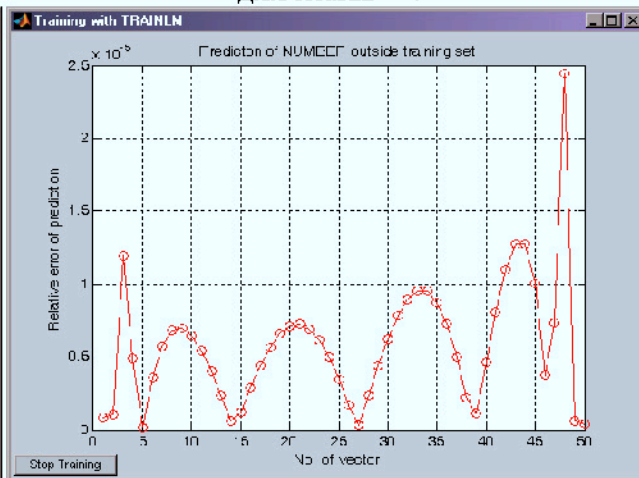


Для формули третьої степені виду (2.14),

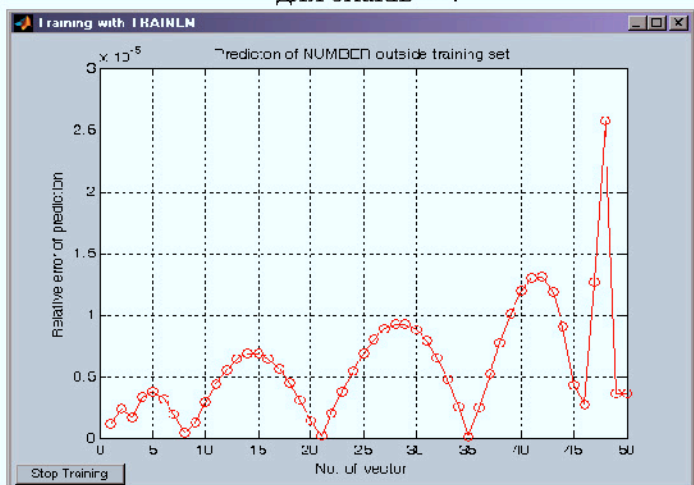
для знаків ++:



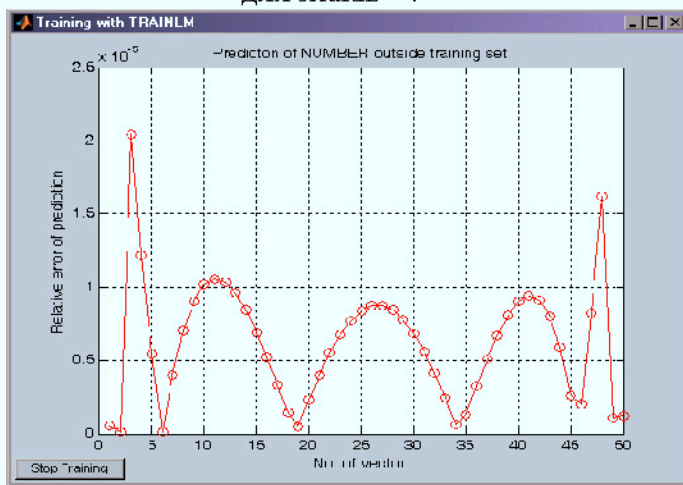
для знаків -+:



для знаків +-:

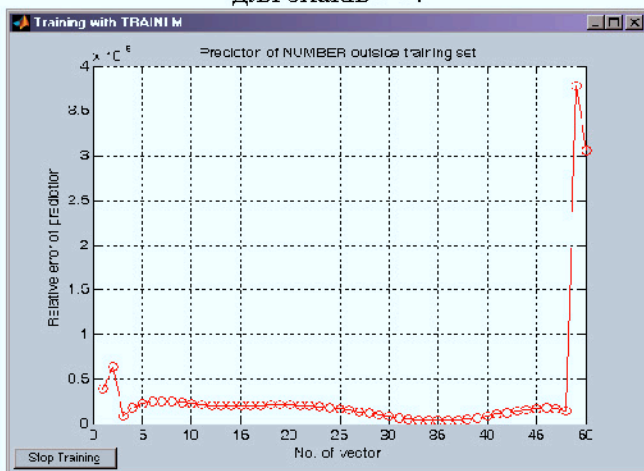


для знаків --:

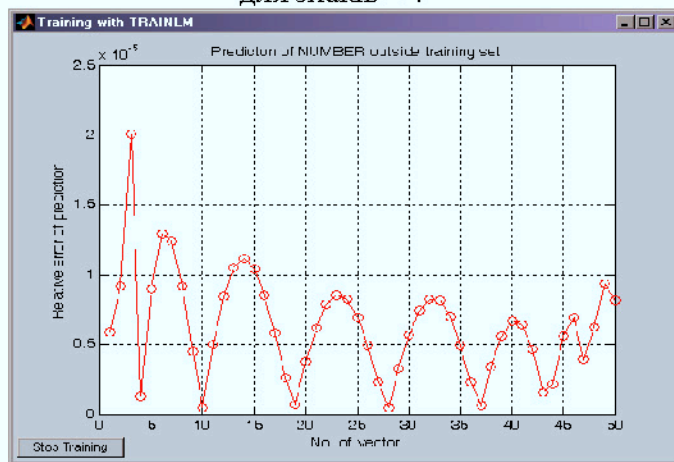


Для формули другої та третьої степені виду (2.3),

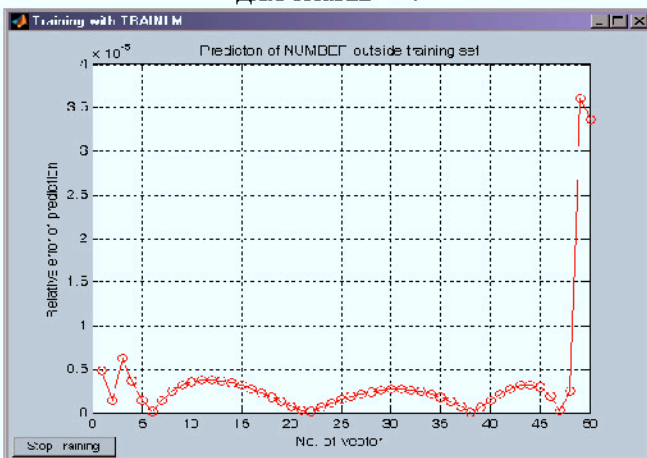
для знаків ++:



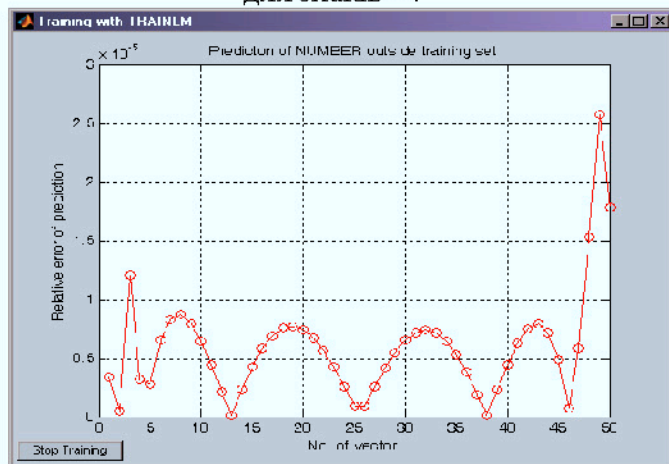
для знаків -+:



для знаків +-:

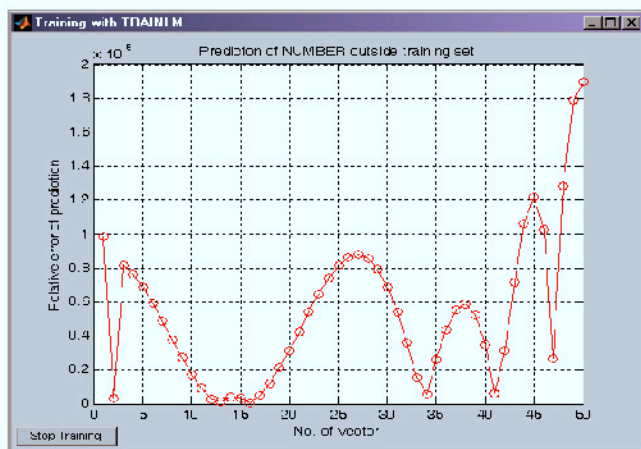


для знаків --:

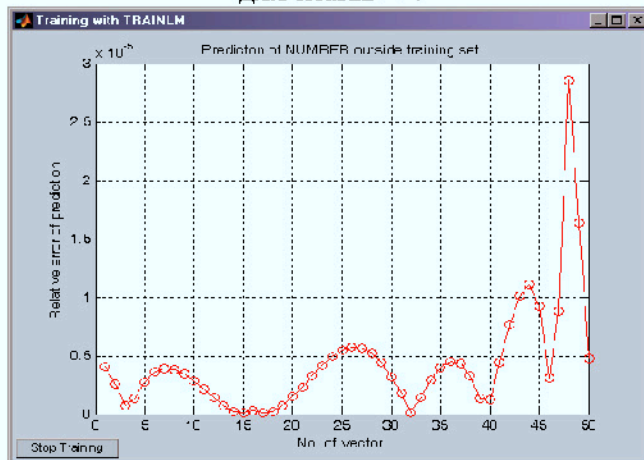


Для формули четвертої степені та другої степені виду (2.9),

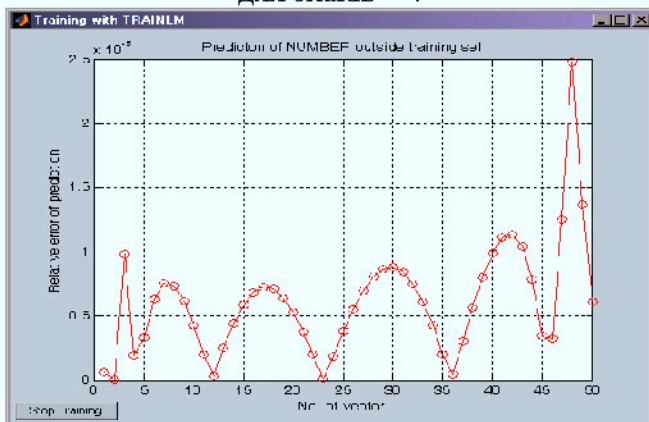
для знаків ++:



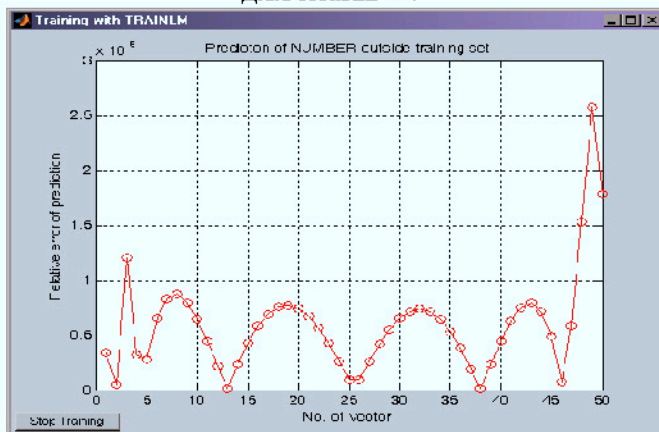
для знаків -+:



для знаків +-:

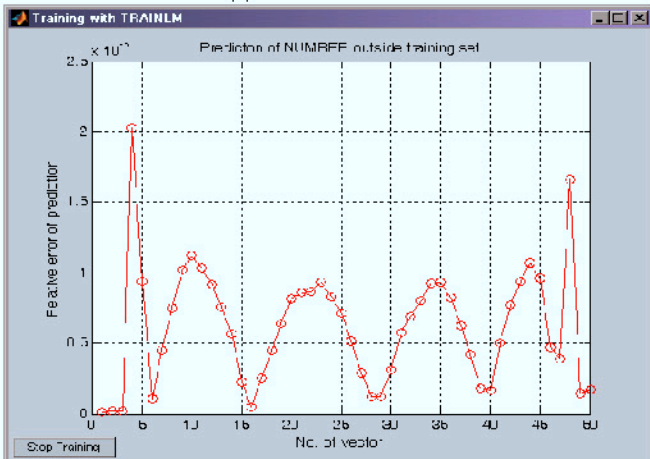


для знаків --:

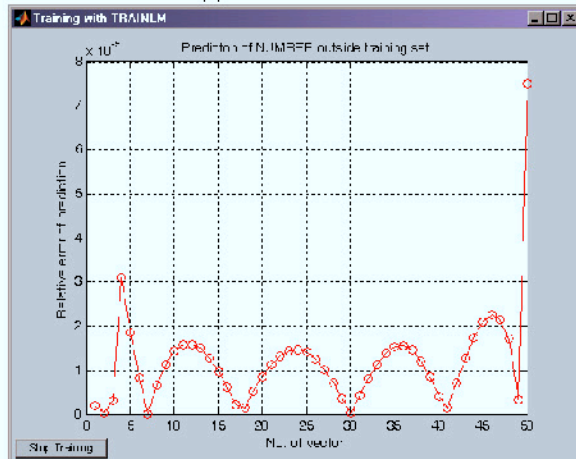


Для сигмоїдної формули виду (2.14),

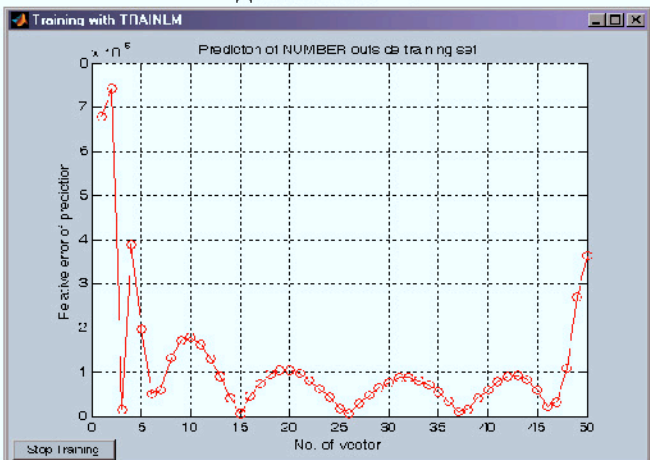
для знаків ++:



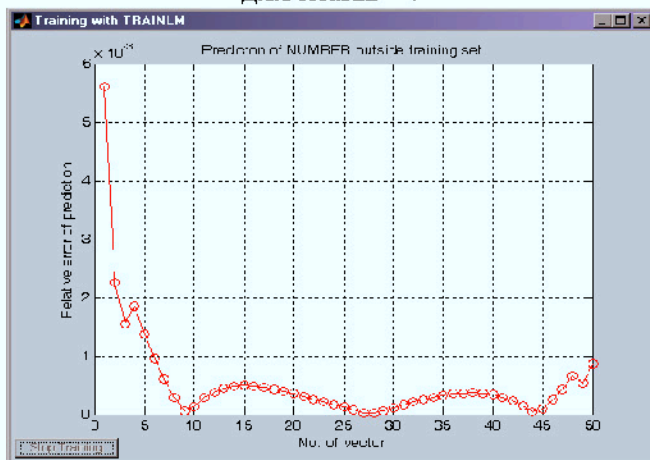
для знаків -+:



для знаків +-:



для знаків --:



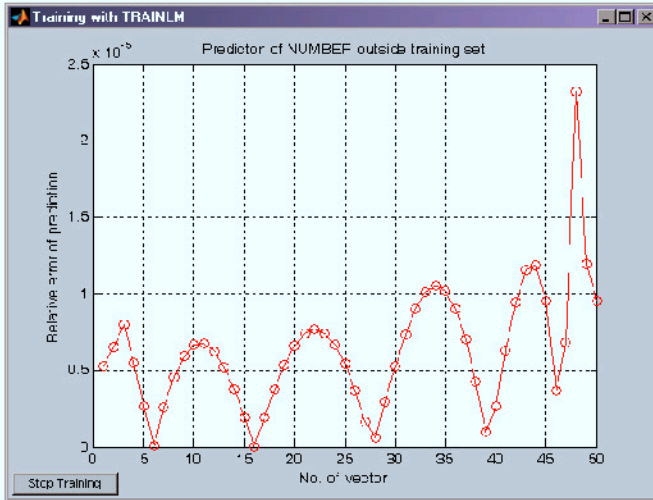
Додаток В

Комбінації знаків для точки 34

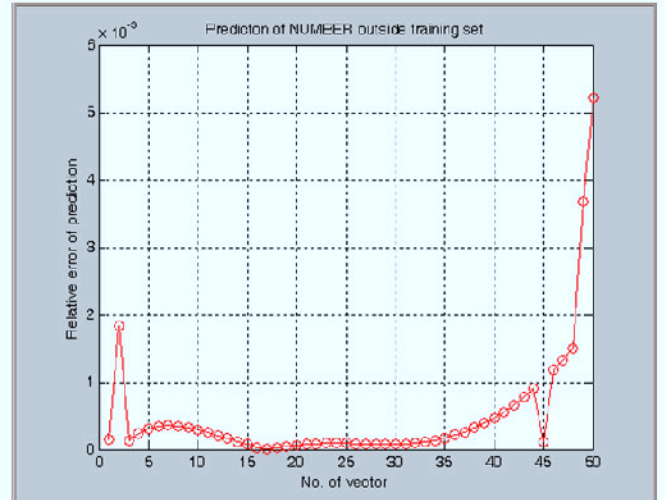
(згідно формул (2.3), (2.9), (2.14), (2.19) та (2.25))

Для знаків ++ другої степені (2.3),

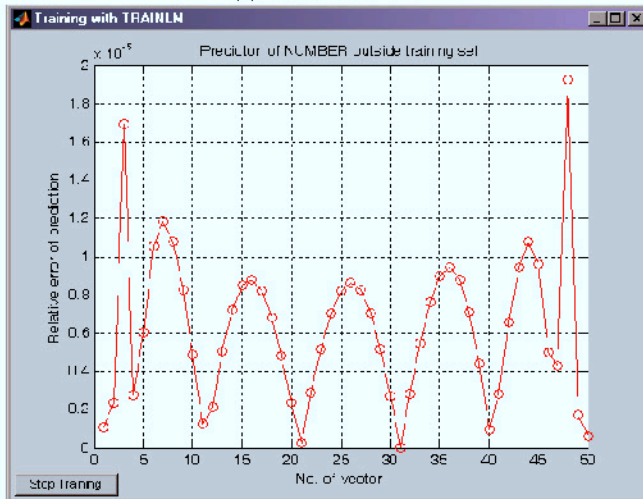
для знаків +/-:



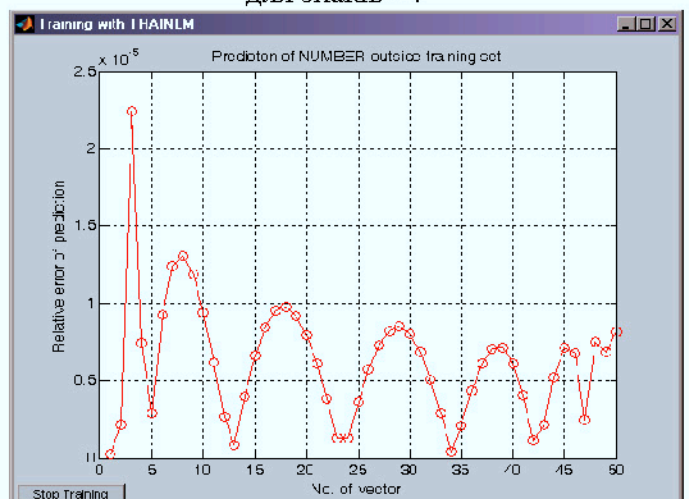
для знаків -/+:



для знаків +/+:

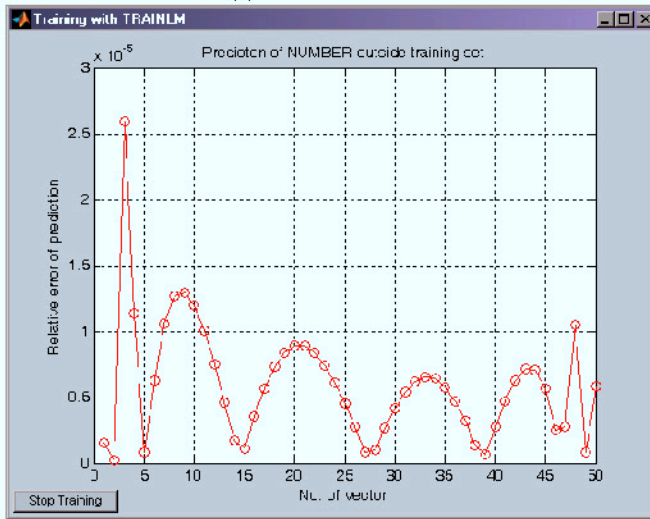


для знаків -/-:

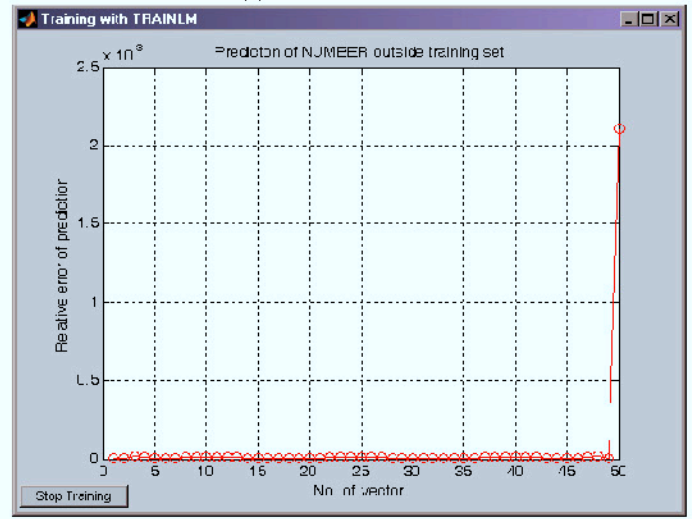


Для формули третьої степені (2.14),

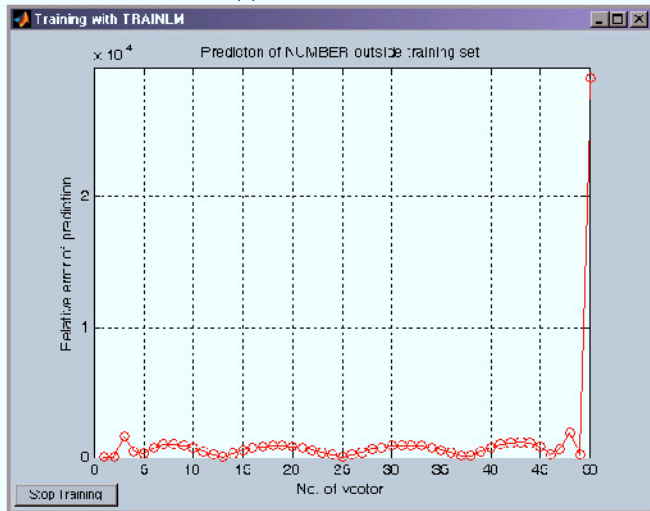
для знаків ++:



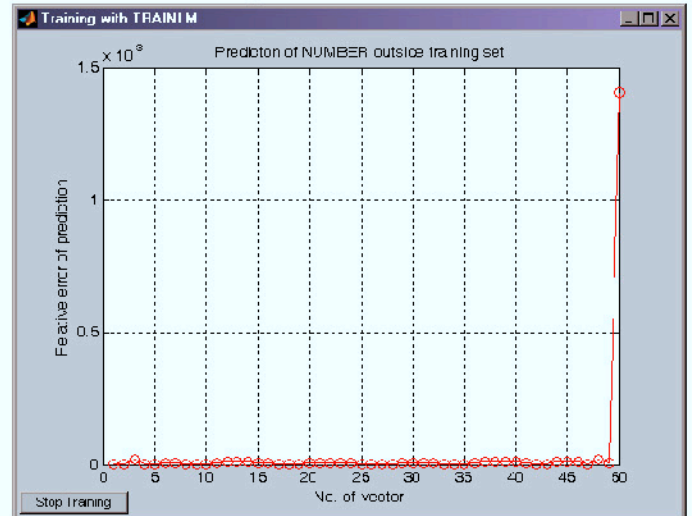
для знаків -+:



для знаків +-:

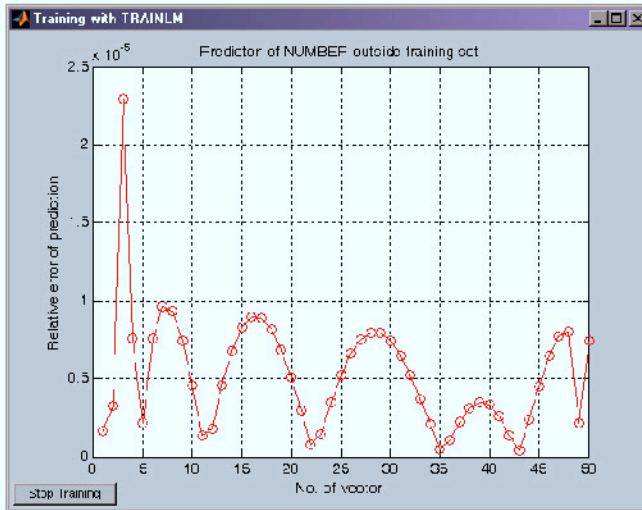


для знаків --:

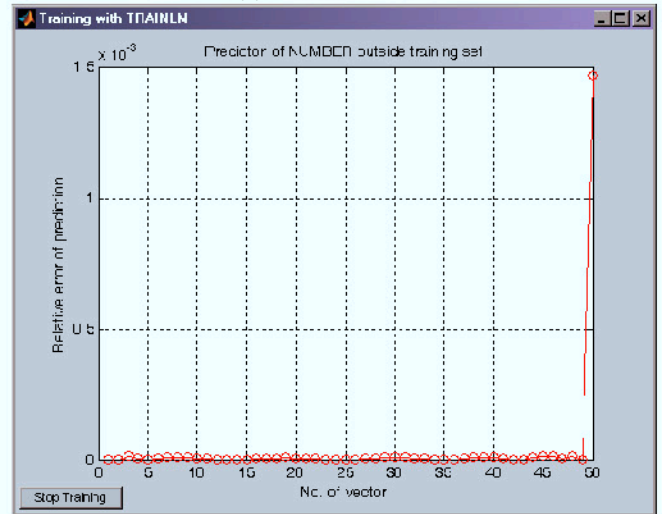


Для формули другої та третьої степені виду (2.9),

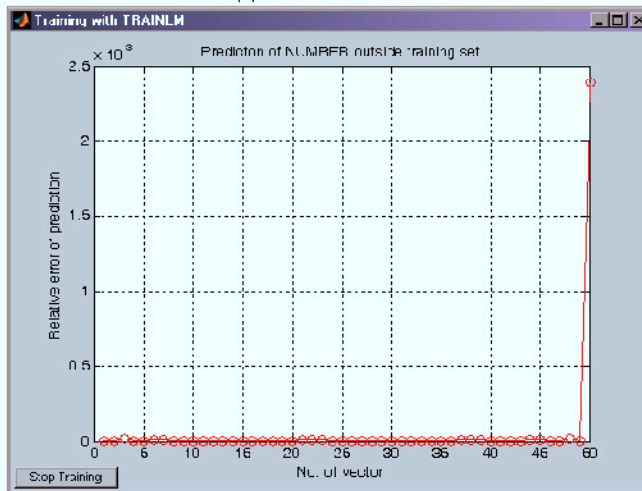
для знаків ++:



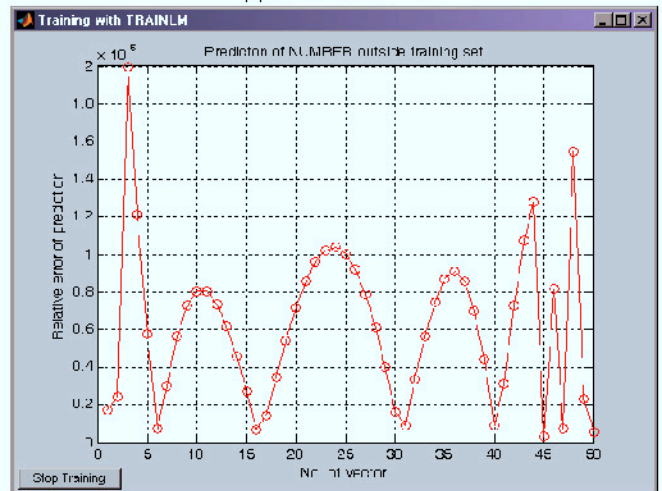
для знаків -+:



для знаків +-:

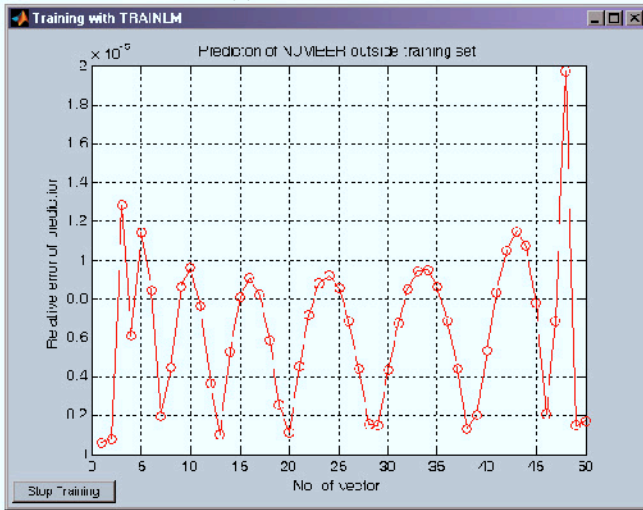


для знаків --:

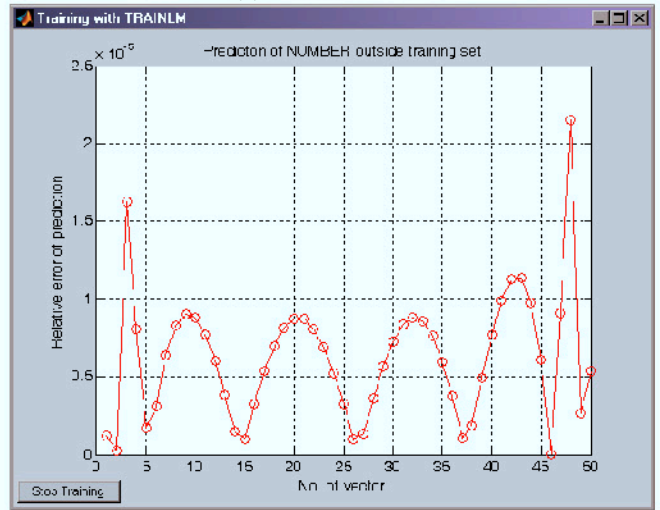


Для формули четвертої степені та другої степені виду 2.19,

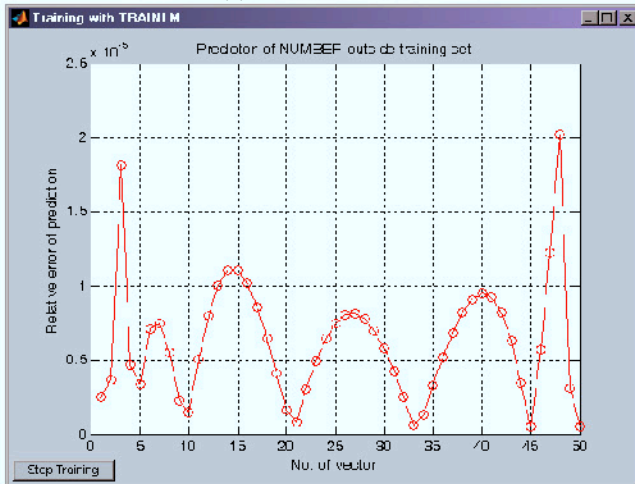
для знаків ++:



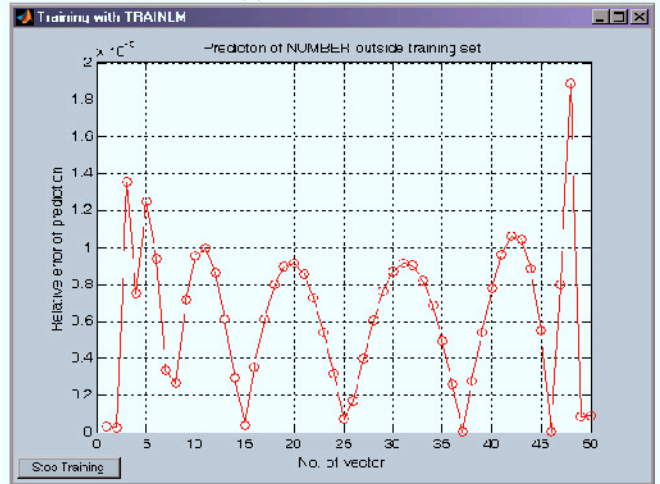
для знаків -+:



для знаків +-:

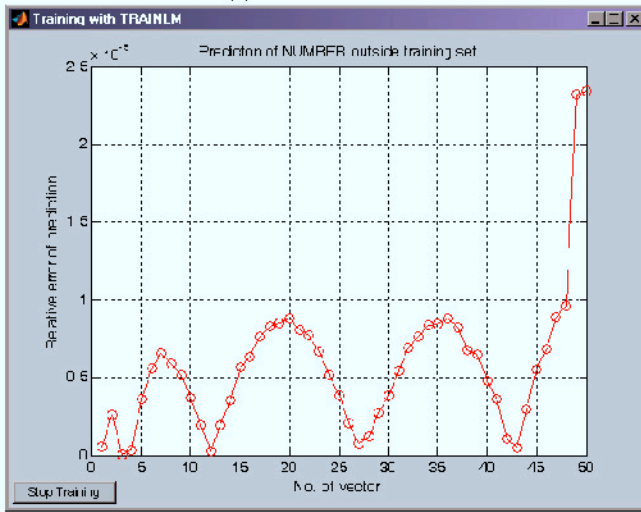


для знаків --:

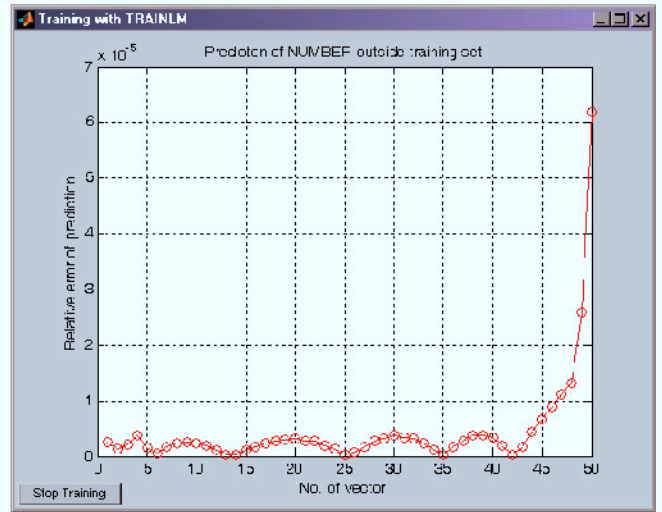


Для сигмоїдної формули виду (2.25),

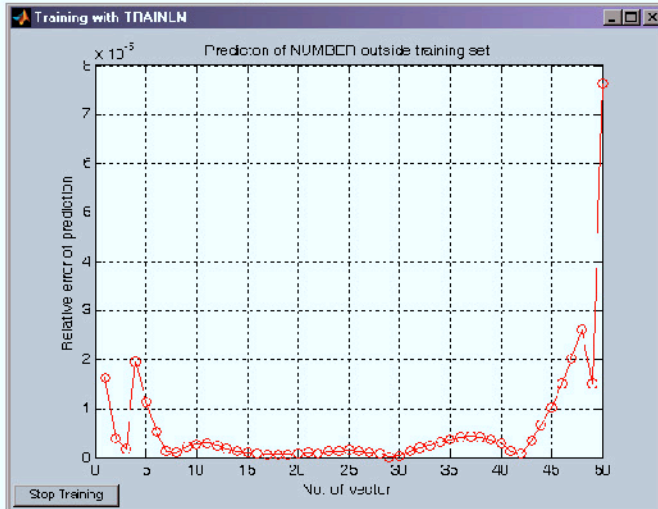
для знаків ++:



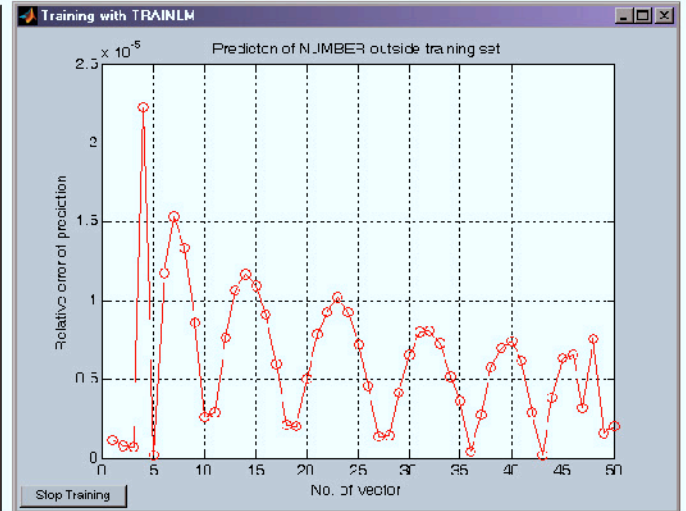
для знаків -+:



для знаків +-:



для знаків --:



Додаток Г

Таблиця Г.1

Значення похибок для точки 14

$\Phi В А$	$K_1 \rightarrow +, k=2$	$K_1 \rightarrow -, k=2$	$K_1 \rightarrow +, k=3$	$K_1 \rightarrow -, k=3$	$K_1 \rightarrow +, k=4$	$K_1 \rightarrow -, k=4$	$K_1 \rightarrow +, e^x$	$K_1 \rightarrow -, e^x$
$K_2 \rightarrow +, k=2$	0.00002 % /0.00001 %	0,01495% /0,00142 %	0.00004 % /0.000001 %	0.00002 % /0.00001 %	0.00002 % /0.00001 %	0.00002 % /0.00001 %	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=2$	0.00002 % /0.00001 %	0.00002 % /0.00001 %	0.00003 % /0.00001 %	0.00003 % /0.00001 %	0.00003 % /0.00001 %	0.00003 % /0.00001 %	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=3$	0.00004 % /0.000001 %	0.00003 % /0.00001 %	0.00002 % /0.00001 %	0.00002 % /0.00001 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=3$	0.00002 % / 0.00001 %	0.00003 % / 0.00001 %	0.00002 % / 0.00001 %	0.00002 % / 0.00001 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=4$	0.00002 % / 0.00001 %	0.00003 % / 0.00001 %	-	-	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=4$	0.00002 % / 0.00001 %	0.00003 % / 0.00001 %	-	-	-	-	-	-
$K_1 \rightarrow +, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.00002 % / 0.00001 %	0.00050 % / 0.00007 %
$K_1 \rightarrow -, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.00007 % / 0.00001 %	0.00561 % / 0.00054 %

Додаток Д

Таблиця Д.1

Значення похибки для точки 34

$\Phi B A$ $\Phi B B$	$K_1 \rightarrow +, k=2$	$K_1 \rightarrow -, k=2$	$K_1 \rightarrow +, k=3$	$K_1 \rightarrow -, k=3$	$K_1 \rightarrow +, k=4$	$K_1 \rightarrow -, k=4$	$K_1 \rightarrow +, e^x$	$K_1 \rightarrow -, e^x$
$K_2 \rightarrow +, k=2$	0.00002 % / 0.00001 %	0.00522 % / 0.00049 %	0.00003 % / 0.000001 %	0.00211 % / 0.00005 %	0.00002 % / 0.00001 %	0.00002 % / 0.00001 %	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=2$	0.00002 % / 0.00001 %	0.00002 % / 0.00001 %	0.00184 % / 0.00004 %	0.00140 % / 0.00003 %	0.00002 % / 0.00001 %	0.00002 % / 0.00001 %	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=3$	0.00003 % / 0.000001 %	0.00211 % / 0.00005 %	0.00002 % / 0.00001 %	0.00146 % / 0.00004 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=3$	0.00184 % / 0.00004 %	0.00140 % / 0.00003 %	0.00239 % / 0.00005 %	0.00002 % / 0.00001 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=4$	0.00002 % / 0.00001 %	0.00002 % / 0.00001 %	-	-	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=4$	0.00002 % / 0.00001 %	0.00002 % / 0.00001 %	-	-	-	-	-	-
$K_1 \rightarrow +, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.00002 % / 0.00001 %	0.00008 % / 0.00001 %
$K_1 \rightarrow -, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.00054 % / 0.00011 %	0.00002 % / 0.00001 %

Додаток Е

Таблиця Е.1

Значення похибки прогнозу для точки 14 при рівні випадкової похибки 0,1%

$\Phi B A$ $\Phi B B$	$K_1 \rightarrow +, k=2$	$K_1 \rightarrow -, k=2$	$K_1 \rightarrow +, k=3$	$K_1 \rightarrow -, k=3$	$K_1 \rightarrow +, k=4$	$K_1 \rightarrow -, k=4$	$K_1 \rightarrow +, e^x$	$K_1 \rightarrow -, e^x$
$K_2 \rightarrow +, k=2$	0.10679 %/ 0.03180 %	0.13365 %/ 0.02048 %	0.00772 %/ 0.00163 %	0.04092 %/ 0.00203 %	0.01889 %/ 0.00524 %	0.03026 %/ 0.00351 %	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=2$	0.09806 %/ 0.02972 %	0.07397 %/ 0.02757 %	0.01954 %/ 0.00730 %	0.03350 %/ 0.00774 %	0.05615 %/ 0.00872 %	0.01882 %/ 0.00659 %	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=3$	0.00772 %/ 0.00163 %	0.04092 %/ 0.00203 %	0.01889 %/ 0.00524 %	0.03026 %/ 0.00351 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=3$	0.01954 %/ 0.00730 %	0.03350 %/ 0.00774 %	0.05615 %/ 0.00872 %	0.01882 %/ 0.00659 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=4$	0.01889 %/ 0.00524 %	0.03026 %/ 0.00351 %	-	-	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=4$	0.05615 %/ 0.00872 %	0.01882 %/ 0.00659 %	-	-	-	-	-	-
$K_1 \rightarrow +, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.02585 %/ 0.00237 %	0.00738 %/ 0.00248 %
$K_1 \rightarrow -, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.07379 %/ 0.00500 %	0.00924 %/ 0.00088 %

Таблиця Е.2

Значення похибки прогнозу для точки 14 при рівні випадкової похибки 0,5%

$\Phi B A$	$K_1 \rightarrow +, k=2$	$K_1 \rightarrow -, k=2$	$K_1 \rightarrow +, k=3$	$K_1 \rightarrow -, k=3$	$K_1 \rightarrow +, k=4$	$K_1 \rightarrow -, k=4$	$K_1 \rightarrow +, e^x$	$K_1 \rightarrow -, e^x$
$K_2 \rightarrow +, k=2$	0.04061 % / 0.01328 %	0.13951 % / 0.04262 %	0.03382 % / 0.00182 %	0.03172 % / 0.00381 %	0.39670 % / 0.02070 %	0.07682 % / 0.02984 %	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=2$	0.22097 % / 0.05186 %	0.15524 % / 0.04814 %	0.09351 % / 0.01821 %	0.04069 % / 0.00961 %	0.03708 % / 0.00370 %	0.06745 % / 0.00875 %	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=3$	0.03382 % / 0.00182 %	0.03172 % / 0.00381 %	0.39670 % / 0.02070 %	0.07682 % / 0.02984 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=3$	0.09351 % / 0.01821 %	0.04069 % / 0.00961 %	0.03708 % / 0.00370 %	0.06745 % / 0.00875 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=4$	0.39670 % / 0.02070 %	0.07682 % / 0.02984 %	-	-	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=4$	0.03708 % / 0.00370 %	0.06745 % / 0.00875 %	-	-	-	-	-	-
$K_1 \rightarrow +, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.03081 % / 0.00644 %	0.18927 % / 0.02043 %
$K_1 \rightarrow -, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.27122 % / 0.14666 %	0.04764 % / 0.00413 %

Таблиця Е.3

Значення похибки прогнозу для точки 14 при рівні випадкової похибки 1%

$\Phi B A$ $\Phi B B$	$K_1 \rightarrow +, k=2$	$K_1 \rightarrow -, k=2$	$K_1 \rightarrow +, k=3$	$K_1 \rightarrow -, k=3$	$K_1 \rightarrow +, k=4$	$K_1 \rightarrow -, k=4$	$K_1 \rightarrow +, e^x$	$K_1 \rightarrow -, e^x$
$K_2 \rightarrow +, k=2$	0.09773 % / 0.04114 %	0.05745 % / 0.01909 %	0.61130 % / 0.07318 %	0.03489 % / 0.01180 %	0.52403 % / 0.21875 %	0.52121 % / 0.08004 %	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=2$	0.07330 % / 0.04032 %	0.31165 % / 0.05409 %	0.02578 % / 0.01868 %	0.02611 % / 0.01073 %	0.01995 % / 0.00237 %	0.43901 % / 0.02817 %	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=3$	0.61130 % / 0.07318 %	0.03489 % / 0.01180 %	0.09006 % / 0.03179 %	0.12065 % / 0.07270 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=3$	0.02578 % / 0.01868 %	0.02611 % / 0.01073 %	0.17869 % / 0.01694 %	0.09278 % / 0.05336 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=4$	0.52403 % / 0.21875 %	0.52121 % / 0.08004 %	-	-	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=4$	0.01995 % / 0.00237 %	0.43901 % / 0.02817 %	-	-	-	-	-	-
$K_1 \rightarrow +, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.01690 % / 0.00931 %	0.04794 % / 0.03982 %
$K_1 \rightarrow -, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.07235 % / 0.01976 %	0.02393 % / 0.00745 %

Таблиця Е.4

Значення похибки прогнозу для точки 14 при рівні випадкової похибки 1,5 %

$\Phi B A$ $\Phi B B$	$K_1 \rightarrow +, k=2$	$K_1 \rightarrow -, k=2$	$K_1 \rightarrow +, k=3$	$K_1 \rightarrow -, k=3$	$K_1 \rightarrow +, k=4$	$K_1 \rightarrow -, k=4$	$K_1 \rightarrow +, e^x$	$K_1 \rightarrow -, e^x$
$K_2 \rightarrow +, k=2$	0.06394 % / 0.03781 %	0.09663 % / 0.02448 %	0.79163 % / 0.07037 %	0.04509 % / 0.03187 %	0.07699 % / 0.03267 %	0.05942 % / 0.00716 %	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=2$	0.09106 % / 0.05061 %	0.14348 % / 0.06367 %	0.03482 % / 0.01259 %	0.40893 % / 0.18769 %	0.35905 % / 0.03880 %	0.10203 % / 0.02964 %	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=3$	0.79163 % / 0.07037 %	0.04509 % / 0.03187 %	0.07699 % / 0.03267 %	0.05942 % / 0.00716 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=3$	0.03482 % / 0.01259 %	0.40893 % / 0.18769 %	0.35905 % / 0.03880 %	0.10203 % / 0.02964 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=4$	0.07699 % / 0.03267 %	0.05942 % / 0.00716 %	-	-	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=4$	0.35905 % / 0.03880 %	0.10203 % / 0.02964 %	-	-	-	-	-	-
$K_1 \rightarrow +, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.08105 % / 0.01011 %	0.05173 % / 0.03394 %
$K_1 \rightarrow -, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.12734 % / 0.06683 %	0.04614 % / 0.02219 %

Таблиця Е.5

Значення похибки прогнозу для точки 14 при рівні випадкової похибки 2,5 %

$\Phi В А$ $\Phi В Б$	$K_1 \rightarrow +, k=2$	$K_1 \rightarrow -, k=2$	$K_1 \rightarrow +, k=3$	$K_1 \rightarrow -, k=3$	$K_1 \rightarrow +, k=4$	$K_1 \rightarrow -, k=4$	$K_1 \rightarrow +, e^x$	$K_1 \rightarrow -, e^x$
$K_2 \rightarrow +, k=2$	0.11131 % / 0.03506 %	0.08250 % / 0.02969 %	0.38519 % / 0.09653 %	0.20835 % / 0.10304 %	0.62642 % / 0.07371 %	0.11850 % / 0.07923 %	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=2$	0.21567 % / 0.09997 %	0.22293 % / 0.08713 %	0.14110 % / 0.06087 %	0.41665 % / 0.04045 %	0.15602 % / 0.07095 %	0.09513 % / 0.04783 %	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=3$	0.38519 % / 0.09653 %	0.20835 % / 0.10304 %	0.62642 % / 0.07371 %	0.77349 % / 0.34672 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=3$	0.14110 % / 0.06087 %	0.41665 % / 0.04045 %	0.15602 % / 0.07095 %	0.09513 % / 0.04783 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=4$	0.62642 % / 0.07371 %	0.11850 % / 0.07923 %	-	-	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=4$	0.15602 % / 0.07095 %	0.09513 % / 0.04783 %	-	-	-	-	-	-
$K_1 \rightarrow +, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.08307 % / 0.02821 %	0.05223 % / 0.04929 %
$K_1 \rightarrow -, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.24885 % / 0.12329 %	0.04701 % / 0.03056 %

Додаток Ж

Таблиця Ж.1

Значення похибки прогнозу для точки 34 при рівні випадкової похибки 0,1%

$\Phi В А$ $\Phi В Б$	$K_1 \rightarrow +, k=2$	$K_1 \rightarrow -, k=2$	$K_1 \rightarrow +, k=3$	$K_1 \rightarrow -, k=3$	$K_1 \rightarrow +, k=4$	$K_1 \rightarrow -, k=4$	$K_1 \rightarrow +, e^x$	$K_1 \rightarrow -, e^x$
$K_2 \rightarrow +, k=2$	0.01114 % / 0.00350 %	0.01152 % / 0.00520 %	0.01179 % / 0.00243 %	0.02348 % / 0.00313 %	0.01704 % / 0.00409 %	0.03379 % / 0.00616 %	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=2$	0.01575 % / 0.00609 %	0.00521 % / 0.00182 %	0.02901 % / 0.01554 %	0.01032 % / 0.00351 %	0.01737 % / 0.00817 %	0.18629 % / 0.00564 %	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=3$	0.01179 % / 0.00243 %	0.02348 % / 0.00313 %	0.02041 % / 0.00765 %	0.02241 % / 0.00906 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=3$	0.02901 % / 0.01554 %	0.01032 % / 0.00351 %	0.02712 % / 0.00271 %	0.04935 % / 0.00365 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=4$	0.01704 % / 0.00409 %	0.03379 % / 0.00616 %	-	-	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=4$	0.01737 % / 0.00817 %	0.18629 % / 0.00564 %	-	-	-	-	-	-
$K_1 \rightarrow +, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.01645 % / 0.00363 %	0.27275 % / 0.00945 %
$K_1 \rightarrow -, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.01132 % / 0.00265 %	0.00356 % / 0.00039 %

Таблиця Ж.2

Значення похибки прогнозу для точки 34 при рівні випадкової похибки 0,5%

$\Phi B A$ $\Phi B B$	$K_{1 \rightarrow +}, k=2$	$K_{1 \rightarrow -}, k=2$	$K_{1 \rightarrow +}, k=3$	$K_{1 \rightarrow -}, k=3$	$K_{1 \rightarrow +}, k=4$	$K_{1 \rightarrow -}, k=4$	$K_{1 \rightarrow +}, e^x$	$K_{1 \rightarrow -}, e^x$
$K_{2 \rightarrow +}, k=2$	0.02477 % / 0.00751 %	0.01617 % / 0.00383 %	0.19514 % / 0.05777 %	0.02637 % / 0.01421 %	0.22885 % / 0.01331 %	0.02856 % / 0.01247 %	-	-
$K_{2 \rightarrow -}, k=2$	0.92528 % / 0.05989 %	0.02312 % / 0.00575 %	0.03149 % / 0.01622 %	0.49249 % / 0.03603 %	0.05626 % / 0.01294 %	0.04123 % / 0.01560 %	-	-
$K_{2 \rightarrow +}, k=3$	0.19514 % / 0.05777 %	0.02637 % / 0.01421 %	0.11986 % / 0.00867 %	0.08144 % / 0.01832 %	-	-	-	-
$K_{2 \rightarrow -}, k=3$	0.03149 % / 0.01622 %	0.49249 % / 0.03603 %	0.04593 % / 0.01158 %	0.51860 % / 0.02283 %	-	-	-	-
$K_{2 \rightarrow +}, k=4$	0.22885 % / 0.01331 %	0.02856 % / 0.01247 %	-	-	-	-	-	-
$K_{2 \rightarrow -}, k=4$	0.05626 % / 0.01294 %	0.04123 % / 0.01560 %	-	-	-	-	-	-
$K_{1 \rightarrow +}, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.60570 % / 0.01660 %	0.13297 % / 0.02529 %
$K_{1 \rightarrow -}, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.21822 % / 0.04115 %	0.00866 % / 0.00158 %

Таблиця Ж.3

Значення похибки прогнозу для точки 34 при рівні випадкової похибки 1%

$\Phi B A$	$K_1 \rightarrow +, k=2$	$K_1 \rightarrow -, k=2$	$K_1 \rightarrow +, k=3$	$K_1 \rightarrow -, k=3$	$K_1 \rightarrow +, k=4$	$K_1 \rightarrow -, k=4$	$K_1 \rightarrow +, e^x$	$K_1 \rightarrow -, e^x$
$K_2 \rightarrow +, k=2$	0.05243 %/ 0.00686 %	0.03175 %/ 0.01004 %	0.04718 %/ 0.02562 %	0.03100 %/ 0.02499 %	0.24839 %/ 0.02895 %	0.03480 %/ 0.01554 %	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=2$	0.75439 %/ 0.08821 %	0.07683 %/ 0.00722 %	0.60270 %/ 0.04664 %	0.10855 %/ 0.03147 %	0.04824 %/ 0.01123 %	0.14276 %/ 0.02318 %	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=3$	0.04718 %/ 0.02562 %	0.03100 %/ 0.02499 %	0.29386 %/ 0.01984 %	0.04636 %/ 0.02264 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=3$	0.60270 %/ 0.04664 %	0.10855 %/ 0.03147 %	0.10925 %/ 0.09973 %	0.18941 %/ 0.01909 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=4$	0.24839 %/ 0.02895 %	0.03480 %/ 0.01554 %	-	-	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=4$	0.04824 %/ 0.01123 %	0.14276 %/ 0.02318 %	-	-	-	-	-	-
$K_1 \rightarrow +, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.32400 %/ 0.02553 %	0.03680 %/ 0.02244 %
$K_1 \rightarrow -, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.10447 %/ 0.06494 %	0.04134 %/ 0.00787 %

Таблиця Ж.4

Значення похибки прогнозу для точки 34 при рівні випадкової похибки 1,5 %

$\Phi B A$ $\Phi B B$	$K_1 \rightarrow +, k=2$	$K_1 \rightarrow -, k=2$	$K_1 \rightarrow +, k=3$	$K_1 \rightarrow -, k=3$	$K_1 \rightarrow +, k=4$	$K_1 \rightarrow -, k=4$	$K_1 \rightarrow +, e^x$	$K_1 \rightarrow -, e^x$
$K_2 \rightarrow +, k=2$	0.04318 % / 0.01534 %	0.10102 % / 0.01025 %	0.04595 % / 0.01747 %	0.40334 % / 0.05050 %	0.06186 % / 0.01918 %	0.47609 % / 0.16789 %	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=2$	0.27427 % / 0.07430 %	0.11342 % / 0.04324 %	0.12959 % / 0.02023 %	0.05352 % / 0.02479 %	0.07681 % / 0.02486 %	0.15351 % / 0.07085 %	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=3$	0.04595 % / 0.01747 %	0.40334 % / 0.05050 %	0.16631 % / 0.05485 %	0.24413 % / 0.03032 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=3$	0.12959 % / 0.02023 %	0.05352 % / 0.02479 %	0.44401 % / 0.02825 %	0.45844 % / 0.11374 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=4$	0.06186 % / 0.01918 %	0.47609 % / 0.16789 %	-	-	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=4$	0.07681 % / 0.02486 %	0.15351 % / 0.07085 %	-	-	-	-	-	-
$K_1 \rightarrow +, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.22490 % / 0.04999 %	0.06030 % / 0.02118 %
$K_1 \rightarrow -, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.05789 % / 0.05019 %	0.03332 % / 0.02648 %

Таблиця Ж.5

Значення похибки прогнозу для точки 34 при рівні випадкової похибки 2,5 %

$\Phi В А$ $\Phi В Б$	$K_1 \rightarrow +, k=2$	$K_1 \rightarrow -, k=2$	$K_1 \rightarrow +, k=3$	$K_1 \rightarrow -, k=3$	$K_1 \rightarrow +, k=4$	$K_1 \rightarrow -, k=4$	$K_1 \rightarrow +, e^x$	$K_1 \rightarrow -, e^x$
$K_2 \rightarrow +, k=2$	0.50213 % / 0.08191 %	0.25013 % / 0.01226 %	0.11023 % / 0.05524 %	0.20835 % / 0.10304 %	0.81484 % / 0.05480 %	0.11498 % / 0.08108 %	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=2$	0.77610 % / 0.22932 %	0.06198 % / 0.04656 %	0.14110 % / 0.06087 %	0.41665 % / 0.04045 %	0.10344 % / 0.03120 %	0.06491 % / 0.03030 %	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=3$	0.11023 % / 0.05524 %	0.20835 % / 0.10304 %	0.40024 % / 0.08475 %	0.11850 % / 0.07923 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=3$	0.14110 % / 0.06087 %	0.41665 % / 0.04045 %	0.15602 % / 0.07095 %	0.18881 % / 0.08637 %	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow +, k=4$	0.81484 % / 0.05480 %	0.11498 % / 0.08108 %	-	-	-	-	-	-
$K_2 \rightarrow -, k=4$	0.10344 % / 0.03120 %	0.06491 % / 0.03030 %	-	-	-	-	-	-
$K_1 \rightarrow +, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.10555 % / 0.07110 %	0.05223 % / 0.04929 %
$K_1 \rightarrow -, e^x$	-	-	-	-	-	-	0.03649 % / 0.03507 %	0.04701 % / 0.03056 %

Додаток К

Результати вимірювань залежності спаду напруги на одинадцяти ФД-х від струму через ФД (від 0,4 мА до 1 мА) та температури (від 24°C до 36°C)

Таблиця К.1

36	0.697851	0.740118	0.782564	0.825897	0.866785	0.908626	0.949484
34	0.706016	0.747928	0.799848	0.834891	0.877548	0.918612	0.961105
32	0.716056	0.757113	0.80243	0.84439	0.887826	0.929447	0.970147
30	0.725111	0.767273	0.811238	0.854331	0.896754	0.939427	0.98105
28	0.731211	0.775851	0.818576	0.863963	0.905524	0.948033	0.990138
26	0.739716	0.784797	0.826779	0.871371	0.913756	0.956174	0.998772
24	0.748962	0.79063	0.834614	0.880842	0.92324	0.967294	1.007347
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблиця К.2

36	0.697803	0.740637	0.782065	0.826272	0.866633	0.9082	0.95037
34	0.707007	0.747985	0.799437	0.836341	0.87684	0.919902	0.959975
32	0.715865	0.759954	0.801233	0.843909	0.888083	0.928296	0.972441
30	0.723713	0.768696	0.809589	0.852476	0.89554	0.939956	0.979934
28	0.73347	0.776216	0.818566	0.863773	0.906408	0.946812	0.989767
26	0.740738	0.784923	0.829135	0.871209	0.915594	0.958053	0.999001
24	0.746603	0.790902	0.837164	0.880853	0.923773	0.96587	1.009208
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблиця К.3

36	0.696897	0.738836	0.781525	0.82622	0.867303	0.909146	0.95216
34	0.707257	0.749884	0.799298	0.833582	0.878149	0.92038	0.961826
32	0.713955	0.759255	0.803118	0.843391	0.887726	0.930601	0.972322
30	0.723186	0.768434	0.811397	0.85448	0.895743	0.940201	0.981137
28	0.731549	0.775419	0.818129	0.86306	0.907118	0.947477	0.989892
26	0.738504	0.783702	0.828068	0.872102	0.915345	0.956007	1.000009
24	0.748464	0.793163	0.835346	0.878903	0.923328	0.96659	1.0074
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица К.4

36	0.698233	0.739881	0.783857	0.824955	0.868531	0.908285	0.951904
34	0.705661	0.749382	0.799798	0.83472	0.876936	0.920037	0.96093
32	0.716043	0.758914	0.800994	0.845324	0.88587	0.92847	0.971439
30	0.724788	0.766394	0.810353	0.854736	0.895727	0.937615	0.97992
28	0.731755	0.777257	0.819866	0.861217	0.905165	0.946904	0.98953
26	0.740959	0.783849	0.827214	0.872528	0.915596	0.956293	1.000162
24	0.747599	0.7921	0.837132	0.878886	0.921982	0.96694	1.008032
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица К.5

36	0.695657	0.738414	0.782462	0.823647	0.867562	0.908999	0.949963
34	0.706008	0.749392	0.797736	0.834632	0.876148	0.919181	0.962279
32	0.715278	0.758487	0.801066	0.843859	0.887633	0.929194	0.971846
30	0.722944	0.767414	0.809949	0.853601	0.895292	0.938059	0.982293
28	0.731144	0.775694	0.819379	0.861341	0.905434	0.948293	0.990395
26	0.739386	0.785127	0.828829	0.871962	0.914586	0.95808	0.999659
24	0.74616	0.79138	0.836025	0.878129	0.924114	0.965089	1.008578
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица К.6

36	0.695912	0.74025	0.783785	0.824312	0.866289	0.908777	0.950376
34	0.706655	0.750417	0.798888	0.836119	0.875982	0.918423	0.960456
32	0.714671	0.758667	0.802076	0.84331	0.887464	0.93028	0.972475
30	0.722526	0.766891	0.811973	0.854784	0.895104	0.940168	0.981454
28	0.731817	0.777333	0.818111	0.861324	0.904574	0.948737	0.992097
26	0.741307	0.784913	0.828946	0.869811	0.915566	0.956184	1.000338
24	0.74677	0.791736	0.837027	0.87904	0.924258	0.966157	1.009503
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица К.7

36	0.698344	0.740571	0.783597	0.823678	0.868412	0.908871	0.951329
34	0.707209	0.750143	0.799674	0.833495	0.876784	0.91885	0.960795
32	0.714408	0.758309	0.800213	0.843837	0.885697	0.928266	0.970091
30	0.723085	0.766614	0.809726	0.852388	0.897826	0.939024	0.979952
28	0.732759	0.777325	0.818304	0.861355	0.90527	0.948408	0.990437
26	0.740354	0.784197	0.827947	0.869871	0.913312	0.956786	1.000138
24	0.748181	0.7922	0.836173	0.878115	0.922117	0.964449	1.008642
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица К.8

36	0.698128	0.739767	0.783984	0.823711	0.867354	0.910051	0.950402
34	0.706282	0.748676	0.799942	0.835717	0.877162	0.920212	0.962343
32	0.716489	0.760016	0.800862	0.843696	0.886322	0.929908	0.972244
30	0.723514	0.76829	0.811934	0.853683	0.895315	0.939061	0.982451
28	0.732046	0.77523	0.818916	0.862666	0.906525	0.948209	0.991964
26	0.740106	0.783559	0.82913	0.871138	0.914193	0.957725	0.999703
24	0.747967	0.792524	0.835775	0.878709	0.921762	0.965355	1.009025
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица К.9

36	0.697936	0.739925	0.781384	0.824012	0.867565	0.910188	0.950295
34	0.706809	0.749098	0.799793	0.835432	0.878336	0.91836	0.96102
32	0.713722	0.759656	0.80056	0.843883	0.887549	0.927987	0.97235
30	0.723289	0.76831	0.811964	0.852945	0.897594	0.937657	0.98049
28	0.732074	0.775838	0.820645	0.862948	0.906894	0.947574	0.992072
26	0.740303	0.784038	0.828606	0.872595	0.914294	0.958625	1.000512
24	0.746638	0.791347	0.836427	0.880514	0.92269	0.965675	1.007382
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица К.10

36	0.695714	0.740999	0.782568	0.826373	0.866373	0.909223	0.951451
34	0.706693	0.748016	0.79945	0.834855	0.877013	0.919112	0.960538
32	0.715478	0.757586	0.802797	0.84421	0.886075	0.929015	0.970071
30	0.72284	0.767142	0.81214	0.853029	0.896634	0.93928	0.980515
28	0.731949	0.774491	0.82047	0.862244	0.906325	0.949455	0.991537
26	0.739709	0.783039	0.829076	0.872395	0.915386	0.956499	0.998566
24	0.747072	0.792383	0.834933	0.878284	0.92214	0.966165	1.009019
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица К.11

36	0.697967	0.738448	0.783227	0.825506	0.868269	0.909773	0.951706
34	0.707337	0.750485	0.797974	0.83612	0.877833	0.920436	0.96134
32	0.716369	0.758137	0.803093	0.844598	0.886703	0.928874	0.970889
30	0.72332	0.768523	0.809664	0.855081	0.895728	0.937876	0.980223
28	0.730958	0.775185	0.818853	0.863826	0.905003	0.947268	0.992179
26	0.738658	0.783188	0.826759	0.87258	0.915257	0.958239	0.999416
24	0.746935	0.792672	0.837051	0.879096	0.921834	0.964823	1.007449
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Додаток Л

Результати вимірювань залежності струму КЗ на одинадцяти ФД-х від відстані до взірцевого джерела світла (від 160 до 400 мм) та температури (від 24°C до 36°C)

Таблиця Л.1

36	3.003288	4.986624	6.952098	8.863472	10.74121	12.59364	14.40397
34	2.73585	4.711716	6.649692	8.575557	10.44816	12.30422	14.10629
32	2.484152	4.394369	6.341641	8.254054	10.13482	11.96639	13.76043
30	2.077263	4.05303	6.002915	7.89626	9.759038	11.58793	13.35087
28	1.721863	3.677013	5.620931	7.509734	9.367764	11.18024	12.92598
26	1.336612	3.294222	5.198997	7.081562	8.914058	10.69999	12.4478
24	0.919524	2.870343	4.777968	6.629089	8.430527	10.20392	11.91374
	400	360	320	280	240	200	160

Таблиця Л.2

36	3.002812	5.00096	6.937534	8.867501	10.74728	12.59864	14.40021
34	2.725323	4.70226	6.664382	8.569966	10.45311	12.29872	14.0945
32	2.486108	4.380197	6.340945	8.265406	10.12965	11.96277	13.75958
30	2.088422	4.049886	6.000241	7.905682	9.77859	11.60092	13.35449
28	1.726819	3.679491	5.62428	7.514247	9.360096	11.17005	12.91142
26	1.317343	3.289233	5.20836	7.088341	8.913068	10.70663	12.43747
24	0.904104	2.858458	4.772415	6.61924	8.441428	10.20462	11.90653
	400	360	320	280	240	200	160

Таблиця Л.3

36	3.001414	4.993314	6.933487	8.868097	10.73763	12.59868	14.40431
34	2.727861	4.707681	6.656517	8.585874	10.45596	12.296	14.11273
32	2.478701	4.3881	6.337693	8.261294	10.1411	11.97861	13.75904
30	2.076577	4.04324	5.994219	7.899125	9.759625	11.59123	13.35087
28	1.713334	3.680492	5.617143	7.515558	9.373963	11.18255	12.92913
26	1.326108	3.294764	5.203796	7.083444	8.911016	10.70051	12.44017
24	0.900508	2.863248	4.773541	6.616873	8.442989	10.20406	11.91337
	400	360	320	280	240	200	160

Таблиця Л.4

36	3.010592	4.991931	6.936687	8.868848	10.74183	12.59423	14.41075
34	2.716805	4.713513	6.648529	8.578811	10.45773	12.30644	14.10168
32	2.488593	4.395685	6.340647	8.262802	10.14297	11.98131	13.76348
30	2.073123	4.041519	6.00313	7.898651	9.769776	11.59209	13.36184
28	1.717282	3.685618	5.608357	7.509648	9.365996	11.17104	12.9274
26	1.327588	3.278962	5.212781	7.089251	8.922813	10.71497	12.43474
24	0.900458	2.859919	4.771463	6.626796	8.439655	10.20226	11.91165
	400	360	320	280	240	200	160

Таблиця Л.5

36	3.0094	4.99949	6.939565	8.85105	10.74021	12.59162	14.41847
34	2.721475	4.713515	6.653989	8.58353	10.46777	12.30123	14.11008
32	2.482576	4.383675	6.34436	8.256113	10.12718	11.96373	13.74856
30	2.088383	4.041723	5.992065	7.900701	9.764559	11.60243	13.35422
28	1.707399	3.681005	5.622476	7.513949	9.37062	11.17209	12.917
26	1.328061	3.287218	5.206487	7.090211	8.921198	10.71351	12.44552
24	0.90642	2.854666	4.766821	6.629433	8.443119	10.20524	11.90007
	400	360	320	280	240	200	160

Таблиця Л.6

36	3.002782	4.992249	6.940065	8.860721	10.73519	12.60221	14.41762
34	2.718746	4.695028	6.656966	8.569549	10.45236	12.29698	14.1017
32	2.488555	4.390698	6.345916	8.251072	10.14093	11.97414	13.75994
30	2.074013	4.043101	6.000624	7.894446	9.772562	11.58822	13.35499
28	1.708213	3.676666	5.618684	7.503251	9.366433	11.18099	12.91875
26	1.324932	3.287786	5.198748	7.089041	8.925371	10.7165	12.43748
24	0.905161	2.862036	4.771435	6.622911	8.43822	10.20084	11.9081
	400	360	320	280	240	200	160

Таблиця Л.7

36	3.00219	4.988202	6.947173	8.861992	10.74109	12.60286	14.4181
34	2.717532	4.695534	6.65236	8.57013	10.45782	12.29648	14.10305
32	2.482492	4.382459	6.347419	8.263709	10.12908	11.97899	13.75492
30	2.087878	4.042529	5.986773	7.900205	9.770163	11.58827	13.36374
28	1.71269	3.678545	5.624615	7.518249	9.360568	11.1687	12.92278
26	1.318873	3.285363	5.21531	7.088973	8.924225	10.70149	12.44537
24	0.910466	2.866761	4.772834	6.619493	8.443635	10.1866	11.90228
	400	360	320	280	240	200	160

Таблица Л.8

36	3.004397	5.000623	6.950289	8.859008	10.74845	12.59307	14.40811
34	2.73303	4.709906	6.654145	8.567576	10.46459	12.2964	14.11018
32	2.47793	4.393174	6.341688	8.249161	10.12544	11.97924	13.76369
30	2.080563	4.044969	6.005465	7.903588	9.769135	11.6015	13.36112
28	1.726834	3.684724	5.617747	7.511352	9.361265	11.17409	12.92168
26	1.324481	3.279135	5.209716	7.076094	8.919345	10.70419	12.44062
24	0.912201	2.866595	4.775722	6.631158	8.425153	10.20001	11.90564
	400	360	320	280	240	200	160

Таблица Л.9

36	3.017896	4.988875	6.936792	8.853227	10.74211	12.59064	14.41724
34	2.727613	4.697746	6.663358	8.579243	10.45917	12.30137	14.09655
32	2.472465	4.396148	6.350526	8.256862	10.13719	11.96694	13.74925
30	2.085404	4.043384	5.998908	7.894692	9.769022	11.59974	13.36022
28	1.725616	3.687634	5.608751	7.506639	9.368011	11.16354	12.92179
26	1.326316	3.284632	5.207714	7.076129	8.924645	10.70956	12.42816
24	0.916058	2.863049	4.759788	6.626186	8.435897	10.1878	11.91974
	400	360	320	280	240	200	160

Таблица Л.10

36	3.01125	4.983361	6.947187	8.867976	10.73756	12.59271	14.40328
34	2.720232	4.70517	6.652742	8.573618	10.45597	12.30873	14.10874
32	2.47055	4.385366	6.349949	8.264862	10.13189	11.97424	13.75063
30	2.078906	4.047477	6.000339	7.906774	9.771153	11.59572	13.35267
28	1.724603	3.689167	5.626172	7.515816	9.373649	11.17461	12.92211
26	1.33222	3.283804	5.207051	7.085061	8.924527	10.70739	12.42979
24	0.903398	2.871886	4.758205	6.623646	8.44288	10.19626	11.90362
	400	360	320	280	240	200	160

Таблица Л.11

36	3.002769	4.986495	6.942206	8.857155	10.74481	12.59408	14.40732
34	2.73121	4.700427	6.6499	8.570861	10.46558	12.31335	14.10199
32	2.487001	4.394976	6.341732	8.255172	10.14148	11.97144	13.75865
30	2.083429	4.045631	5.998197	7.893735	9.776166	11.60049	13.36642
28	1.716669	3.680545	5.62681	7.517086	9.357796	11.1658	12.91515
26	1.320759	3.292664	5.20453	7.077944	8.917419	10.71159	12.43604
24	0.905532	2.870265	4.766221	6.617642	8.424256	10.18953	11.9091
	400	360	320	280	240	200	160

Додаток М

Результати нейромережевого прогнозу спаду напруги на одинадцяти ФД-х від струму через ФД (від 0,4 мА до 1 мА) та температури (від 24°C до 36°C)

Таблиця М.1

36	0.701585	0.742809	0.792259	0.826675	0.869961	0.911001	0.957293
34	0.71404	0.753537	0.804156	0.84302	0.884178	0.924714	0.968644
32	0.720154	0.765456	0.804594	0.846191	0.892473	0.929467	0.970891
30	0.731681	0.770852	0.813975	0.85593	0.906124	0.943228	0.986525
28	0.735187	0.777202	0.820259	0.86959	0.915447	0.957528	0.996123
26	0.741776	0.786925	0.82811	0.880832	0.916101	0.956868	1.005738
24	0.75162	0.79215	0.839881	0.888032	0.929372	0.973452	1.015645
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблиця М.2

36	0.704751	0.749413	0.786429	0.826036	0.868573	0.912856	0.953025
34	0.707603	0.754819	0.809742	0.835551	0.879762	0.92328	0.964584
32	0.719861	0.767924	0.805747	0.853771	0.897837	0.937937	0.977605
30	0.730136	0.771729	0.820004	0.857986	0.901413	0.939673	0.984696
28	0.736245	0.781883	0.825628	0.864812	0.912913	0.951109	0.994991
26	0.741644	0.790269	0.837076	0.876498	0.917821	0.966387	1.002624
24	0.75141	0.80138	0.839831	0.880724	0.928596	0.972521	1.0152
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблиця М.3

36	0.701773	0.74412	0.790364	0.831937	0.874128	0.914289	0.956803
34	0.711908	0.753356	0.806651	0.837641	0.878911	0.924949	0.970111
32	0.715055	0.761884	0.805611	0.849819	0.891149	0.93851	0.974729
30	0.725107	0.772168	0.820506	0.859393	0.904328	0.943894	0.983009
28	0.732756	0.783876	0.818451	0.868817	0.907855	0.95629	0.994803
26	0.746023	0.785064	0.829775	0.876526	0.922238	0.958009	1.006009
24	0.753868	0.798037	0.843146	0.880794	0.923709	0.971085	1.015175
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица М.4

36	0.703719	0.741319	0.784035	0.825994	0.875122	0.915683	0.958863
34	0.714876	0.758391	0.801609	0.835955	0.883285	0.920254	0.963786
32	0.72263	0.766241	0.809678	0.851081	0.891341	0.928872	0.974209
30	0.730849	0.775772	0.817084	0.856869	0.901142	0.939101	0.982322
28	0.733394	0.787109	0.821687	0.86418	0.912925	0.947475	0.994439
26	0.741418	0.79134	0.834434	0.882464	0.918556	0.966042	1.003835
24	0.751	0.79869	0.846411	0.885202	0.926257	0.967006	1.011096
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица М.5

36	0.699483	0.74216	0.787485	0.8336	0.870807	0.914995	0.959203
34	0.712902	0.755539	0.806358	0.844503	0.878127	0.921648	0.969716
32	0.717875	0.767268	0.81068	0.849702	0.887975	0.938356	0.971969
30	0.724803	0.769582	0.816508	0.855411	0.902951	0.942745	0.984054
28	0.731578	0.777286	0.825342	0.862534	0.910283	0.951019	0.992325
26	0.747078	0.789785	0.836699	0.87724	0.918384	0.958456	1.000768
24	0.753043	0.798906	0.842106	0.883964	0.933803	0.96574	1.013148
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица М.6

36	0.702982	0.745543	0.784067	0.827536	0.866331	0.913302	0.951018
34	0.707123	0.756263	0.805906	0.842072	0.884657	0.919714	0.963426
32	0.718402	0.759596	0.80234	0.844658	0.892676	0.939427	0.972613
30	0.72318	0.769899	0.813085	0.855463	0.89732	0.941434	0.981467
28	0.737271	0.783294	0.826432	0.867791	0.910305	0.957445	0.993951
26	0.744364	0.791805	0.833879	0.87636	0.916923	0.963521	1.000405
24	0.751018	0.793204	0.846915	0.885303	0.930863	0.970204	1.0152
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица М.7

36	0.707611	0.747246	0.789566	0.829093	0.877877	0.915894	0.955934
34	0.710177	0.759072	0.804439	0.838968	0.877364	0.92679	0.965484
32	0.721742	0.760905	0.801803	0.850976	0.887976	0.931637	0.975034
30	0.725636	0.768747	0.817774	0.85308	0.906299	0.946391	0.985795
28	0.742067	0.786433	0.826804	0.867184	0.906978	0.95575	0.990439
26	0.745563	0.788596	0.837217	0.876582	0.913418	0.96393	1.001372
24	0.750908	0.801037	0.839285	0.887464	0.924944	0.972148	1.010179
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица М.8

36	0.706315	0.740206	0.790848	0.828633	0.875475	0.918326	0.953339
34	0.706735	0.751448	0.803034	0.840387	0.886364	0.927394	0.962739
32	0.720158	0.76199	0.802923	0.852367	0.888926	0.936288	0.979947
30	0.731177	0.76866	0.813301	0.854074	0.904469	0.948796	0.986705
28	0.73334	0.775485	0.826416	0.862923	0.91441	0.957384	0.999122
26	0.744633	0.7914	0.832641	0.875185	0.920869	0.963173	1.000726
24	0.750972	0.800336	0.836287	0.881632	0.930293	0.965419	1.018788
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица М.9

36	0.703117	0.746436	0.782619	0.826811	0.872838	0.913419	0.952886
34	0.713492	0.75136	0.808619	0.844041	0.881046	0.922788	0.965111
32	0.713757	0.768932	0.805263	0.849727	0.897082	0.936993	0.975689
30	0.732251	0.773911	0.818998	0.856001	0.898502	0.94663	0.982277
28	0.738774	0.784605	0.822167	0.871211	0.914297	0.956345	0.999745
26	0.744116	0.785272	0.836942	0.880904	0.920718	0.960983	1.001101
24	0.753804	0.796845	0.837121	0.881918	0.932445	0.970811	1.009449
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица М.10

36	0.697203	0.749283	0.790142	0.833927	0.869808	0.909422	0.952508
34	0.708606	0.756455	0.802904	0.843856	0.884469	0.925289	0.970174
32	0.720241	0.767329	0.805893	0.844244	0.88868	0.930625	0.973886
30	0.724253	0.767497	0.817338	0.858065	0.900933	0.943842	0.987002
28	0.733891	0.778249	0.82862	0.86457	0.913439	0.952134	0.992116
26	0.749673	0.784967	0.83663	0.872892	0.924467	0.956967	1.005327
24	0.747968	0.798704	0.84086	0.879627	0.928914	0.968488	1.018537
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Таблица М.11

36	0.704888	0.740007	0.786001	0.831126	0.87026	0.914799	0.960558
34	0.707792	0.751264	0.799255	0.840849	0.879232	0.925154	0.962995
32	0.725908	0.759819	0.805334	0.851071	0.89213	0.934356	0.979827
30	0.727906	0.777492	0.81337	0.855297	0.901131	0.942943	0.982493
28	0.737409	0.778602	0.822214	0.866706	0.905651	0.952512	0.999311
26	0.744975	0.79178	0.835906	0.87729	0.923469	0.95975	1.006491
24	0.750317	0.800008	0.838275	0.88828	0.927629	0.971191	1.015257
	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Додаток Н

Результати нейромережевого прогнозу залежності струму КЗ на одинадцяти ФД-х від відстані до взірцевого джерела світла (від 160 до 400 мм) та температури (від 24°C до 36°C)

Таблиця Н.1

36	3.014497	4.999782	6.966849	8.870262	10.74849	12.60344	14.41713
34	2.744549	4.723037	6.676625	8.576065	10.46924	12.32241	14.13518
32	2.51302	4.416431	6.344494	8.266768	10.14824	11.97142	13.78952
30	2.095355	4.081235	6.025773	7.912017	9.786161	11.5933	13.35707
28	1.727294	3.680828	5.629363	7.536592	9.376805	11.1926	12.93986
26	1.342005	3.306412	5.202412	7.1068	8.942946	10.7063	12.45797
24	0.944798	2.893815	4.79454	6.640921	8.436312	10.20909	11.94061
	400	360	320	280	240	200	160

Таблиця Н.2

36	3.013462	5.025313	6.945087	8.873157	10.76364	12.60347	14.42103
34	2.74462	4.704866	6.666477	8.588468	10.4584	12.32377	14.09554
32	2.496447	4.391462	6.351077	8.279627	10.14267	11.96683	13.76635
30	2.105154	4.055523	6.003476	7.931306	9.787128	11.6136	13.36673
28	1.732556	3.703812	5.638747	7.531205	9.388922	11.17088	12.92658
26	1.339166	3.2902	5.220052	7.116509	8.916474	10.70845	12.4673
24	0.91331	2.87997	4.783764	6.64644	8.448108	10.21239	11.91057
	400	360	320	280	240	200	160

Таблиця Н.3

36	3.029403	4.997597	6.946668	8.89687	10.75589	12.62034	14.40836
34	2.752558	4.720038	6.667748	8.593048	10.47323	12.3023	14.11461
32	2.484019	4.388161	6.351494	8.290592	10.16188	12.00665	13.77334
30	2.09867	4.05034	5.996682	7.927474	9.785018	11.6095	13.3541
28	1.734024	3.692424	5.642614	7.544251	9.394591	11.18319	12.9404
26	1.339123	3.304806	5.206555	7.094787	8.912031	10.72936	12.44557
24	0.914228	2.863757	4.791526	6.63953	8.458461	10.22621	11.9432
	400	360	320	280	240	200	160

Таблица Н.4

36	3.029489	5.010111	6.959557	8.890653	10.75594	12.60973	14.44027
34	2.730263	4.725335	6.670371	8.598386	10.48135	12.32431	14.12325
32	2.492858	4.401144	6.342792	8.279704	10.14427	11.99402	13.78628
30	2.088377	4.054365	6.028912	7.926618	9.793835	11.60305	13.38719
28	1.742301	3.708743	5.628953	7.523095	9.383229	11.17552	12.92745
26	1.339639	3.287001	5.232488	7.118184	8.932004	10.7277	12.45954
24	0.924114	2.86245	4.789152	6.629289	8.440029	10.22273	11.91875
	400	360	320	280	240	200	160

Таблица Н.5

36	3.013506	5.019044	6.948555	8.880025	10.75748	12.60992	14.44409
34	2.729463	4.714556	6.665999	8.590383	10.47247	12.31839	14.12249
32	2.499466	4.39208	6.346453	8.273066	10.1399	11.96373	13.7561
30	2.095818	4.070084	6.021382	7.929073	9.780619	11.609	13.38418
28	1.72556	3.700051	5.650529	7.51561	9.3727	11.18981	12.92521
26	1.348177	3.304633	5.213605	7.091545	8.935533	10.71502	12.45757
24	0.908741	2.856145	4.784085	6.640179	8.46903	10.23445	11.90613
	400	360	320	280	240	200	160

Таблица Н.6

36	3.005355	4.998869	6.961721	8.866358	10.75974	12.60308	14.43347
34	2.728452	4.724926	6.686623	8.582047	10.47061	12.31332	14.1134
32	2.498358	4.414221	6.362327	8.252297	10.1604	11.98144	13.76417
30	2.091808	4.050281	6.030039	7.914112	9.776223	11.60877	13.37885
28	1.708299	3.705269	5.643319	7.525669	9.375994	11.20327	12.93358
26	1.35063	3.313381	5.222789	7.106457	8.927154	10.71984	12.45782
24	0.912631	2.874327	4.778733	6.652407	8.452587	10.21682	11.92868
	400	360	320	280	240	200	160

Таблица Н.7

36	3.020579	5.004748	6.958177	8.868453	10.74782	12.60953	14.42086
34	2.719839	4.718855	6.664319	8.579267	10.47178	12.32006	14.10615
32	2.489947	4.403749	6.349607	8.276617	10.15771	12.00246	13.77101
30	2.095323	4.046392	6.005494	7.905134	9.774749	11.59717	13.38546
28	1.721775	3.698679	5.630327	7.546674	9.365639	11.1901	12.93451
26	1.337274	3.303902	5.223619	7.095543	8.948918	10.70623	12.45735
24	0.936702	2.867914	4.779325	6.630328	8.468486	10.21389	11.92193
	400	360	320	280	240	200	160

Таблиця Н.8

36	3.032692	5.028562	6.965022	8.886813	10.7548	12.61614	14.41711
34	2.756617	4.710722	6.665864	8.581941	10.47558	12.30192	14.12448
32	2.501909	4.420684	6.349089	8.261063	10.15445	12.00574	13.76942
30	2.089132	4.056588	6.023782	7.912394	9.780352	11.60697	13.37001
28	1.735082	3.701665	5.631393	7.517158	9.381896	11.18195	12.94583
26	1.326416	3.295884	5.223197	7.078981	8.945839	10.71251	12.44112
24	0.926272	2.890248	4.79794	6.641374	8.443416	10.20864	11.92781
	400	360	320	280	240	200	160

Таблиця Н.9

36	3.03548	5.007005	6.938025	8.866551	10.75809	12.59251	14.41803
34	2.747489	4.715901	6.690687	8.595142	10.46672	12.32504	14.1193
32	2.473706	4.42031	6.353904	8.259281	10.15055	11.98891	13.7542
30	2.10564	4.063269	6.008875	7.920458	9.779878	11.61598	13.36394
28	1.739102	3.715885	5.638649	7.519391	9.391939	11.17535	12.93382
26	1.331673	3.311212	5.217672	7.082935	8.925597	10.72713	12.44935
24	0.9441	2.882973	4.779888	6.648919	8.439369	10.19877	11.92222
	400	360	320	280	240	200	160

Таблиця Н.10

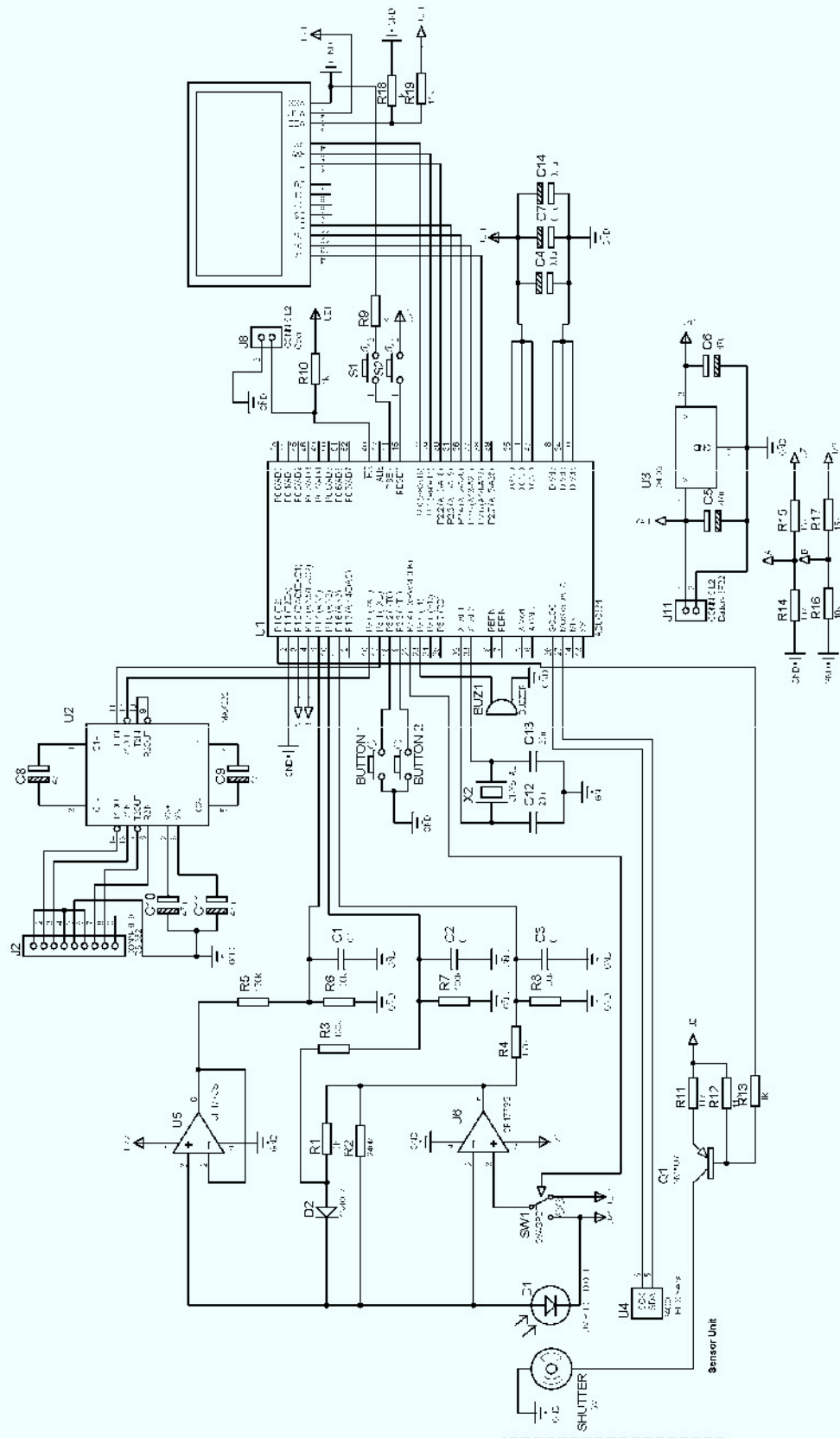
36	3.040957	4.992701	6.963305	8.897361	10.74446	12.62073	14.43009
34	2.734894	4.71169	6.673067	8.597516	10.4748	12.32393	14.13696
32	2.496468	4.388539	6.35843	8.271816	10.14336	11.993	13.77315
30	2.10885	4.07216	6.010393	7.930077	9.792251	11.61393	13.36867
28	1.747975	3.693835	5.629841	7.534436	9.399687	11.1772	12.95173
26	1.341322	3.290909	5.236392	7.102091	8.925931	10.73147	12.43404
24	0.925658	2.895222	4.761121	6.625024	8.470393	10.22142	11.9158
	400	360	320	280	240	200	160

Таблица Н.11

36	3.025189	4.991751	6.969665	8.881503	10.75112	12.60724	14.41982
34	2.751657	4.722343	6.672035	8.576584	10.48343	12.32926	14.13102
32	2.512904	4.41716	6.367533	8.283361	10.15091	11.98757	13.76659
30	2.100901	4.047699	6.012447	7.896654	9.788056	11.62865	13.37182
28	1.725311	3.685232	5.654179	7.539585	9.368501	11.19173	12.92401
26	1.330663	3.313066	5.233134	7.080978	8.945674	10.71178	12.45826
24	0.926308	2.887078	4.772881	6.62151	8.444386	10.20284	11.9201
	400	360	320	280	240	200	160

Додаток П

Принципова схема запропонованої ІВС УФВ



Додаток Р

Акт впровадження результатів дисертації у навчальний процес Тернопільського національного економічного університету



АКТ

про впровадження в навчальний процес Тернопільського національного економічного університету результатів дисертаційної роботи Рошупкіна Олексія Юрійовича "Методи і засоби підвищення точності інформаційно-вимірювальних систем ультрафіолетового випромінювання" що отримані в рамках виконання держбюджетних науково-дослідних тем 0112U008459 "Ідентифікація індивідуальних функцій перетворення багатопараметричних сенсорів", міжнародного наукового проекту 0114U006090 "Дистрибутивні сенсорні мережі з реконфігурацією обчислювальних вузлів".

Ми, комісія в складі: декана факультету комп'ютерних інформаційних технологій (ФКІТ) д.т.н., проф. Дивака М.П., завідувача кафедри інформаційно-обчислювальних систем та управління, д.т.н. проф. Саченка А.О. та директора Науково-дослідного інституту інтелектуальних комп'ютерних систем к.т.н., проф. Кочана В.В. склали цей акт про те, що в навчальному процесі ФКІТ ТНЕУ для студентів спеціальностей 6.050101 "Комп'ютерні науки" впровадженні та використовуються наступні результати дисертаційної роботи Рошупкіна О.Ю. :

1. при викладанні дисциплін "Нейронні мережі та еволюційні алгоритми":
 - нейромережевий метод ідентифікації індивідуальних функцій перетворення багатопараметричних сенсорів за результатами їх експериментальних досліджень - в лекційному курсі.
2. при викладанні дисциплін "Методи та системи штучного інтелекту":
 - методика обробки сигналів багатопараметричних сенсорів із використанням нейромережевого методу ідентифікації індивідуальних функцій перетворення - в лекційному курсі.
3. при викладанні дисципліни "Мікропроцесорні системи":
 - синтезовану структуру інформаційно-вимірювальної системи ультрафіолетового випромінювання на базі мікроконтролера ADUC 845- в лекційному курсі;
 - структуру та схеми вимірювальних каналів інформаційно-вимірювальних систем ультрафіолетового випромінювання - в лекційному курсі;
 - метод корекції похибок компонентів інформаційно-вимірювальних систем ультрафіолетового випромінювання що забезпечує взаємозамінність сенсорів - в лекційному курсі.

Ефект від використання дисертаційної роботи Рошупкіна О.Ю. полягає у підвищенні якості вивчення майбутніми фахівцями сучасних методів розв'язування прикладних задач за допомогою засобів штучного інтелекту, зокрема апарату штучних нейронних мереж, а також за допомогою мікропроцесорних систем і схемотехнічних рішень та отриманні навиків їх застосування, що в результаті забезпечить підвищення якості підготовки майбутніх фахівців.

Декан ФКІТ,
д.т.н. професор

Дивак М.П.

Завідувач кафедри
інформаційно-обчислювальних
систем та управління, д.т.н. професор


Саченко А.О.


Директор Науково-дослідного
інституту інтелектуальних
комп'ютерних систем, к.т.н., професор

Кочан В.В.

Додаток С

Акт впровадження результатів науково-дослідної роботи на НВФ «Тензор»

 УКРАИНА
 НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ
 ФИРМА "ТЕНЗОР"
 58029, г. Черновцы, ул. Гайдара, 1-е, офіс 407
 тел (03722) 7-28-62, тел/факс: (0372) 57-50-52
 http://www.tenzor.ua
 e-mail: td_tenzor@mail.ru

 УКРАЇНА
 НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА
 "ТЕНЗОР"
 58029, м. Чернівці, вул. Гайдара, 1-е, офіс 407
 Тел. (03722) 7-28-62, тел/факс: (0372) 57-50-52
 http://www.tenzor.ua
 e-mail: td_tenzor@mail.ru

Вих.№ 589 від 10 червня 2015 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор / Головний конструктор
 НВФ "Тензор", к.т.н.
 В.Г. Шабашкевич
 2015 р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Рошупкіна Олексія Юрійовича "Методи і засоби підвищення точності інформаційно-вимірювальних систем ультрафіолетового випромінювання", представленої до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, у модернізованому радіометрі енергетичної освітленості ультрафіолетового діапазону "Тензор-31", розробленому та впровадженому у серійне виробництво на НВФ "Тензор"

Рошупкін Олексій Юрійович у рамках виконання проекту зі створення, діагностики та підвищення надійності первинних перетворювачів сигналів для систем екологічного моніторингу рівня ультрафіолетового випромінювання, підвищення точності вимірювань і цифрової обробки сигналів радіометром енергетичної освітленості ультрафіолетового діапазону запропонував та реалізував нейромережвий метод ідентифікації індивідуальних функцій перетворення багатопараметричних сенсорів. На основі запропонованого методу реалізовано алгоритм та програмне забезпечення автоматизованого формування навчальної вибірки для дослідження похибки перетворення інформаційного сигналу вказаними сенсорами. Це дозволило підвищити точність прогнозу результатів повірки, суттєво скоротити кількість дійсних точок повірки і відповідно знизити трудомісткість ідентифікації індивідуальних функцій перетворення напівпровідникових фотодіодів.

Вище зазначені результати у відповідності з договором від 22.02.2010 р. про науково-технічну співпрацю між Чернівецьким національним університетом імені Юрія Федьковича та НВФ "Тензор" впроваджено при модернізації серійного приладу: радіометр енергетичної освітленості ультрафіолетового діапазону "Тензор-31".

Заступник директора
 НВФ "Тензор"
 з наукової роботи, к.т.н.

Добровольський Ю.Г.

Головний метролог
 НВФ "Тензор"

Мохунь Л.М.

Додаток Т

Акт впровадження результатів дисертації у в навчальний процес Чернівецького національного університету

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
 Перший проректор
 Чернівецького національного університету
 імені Юрія Федьковича
 доктор фіз.-мат. наук, професор
 Р.І. Петришин
 “ 10 ” червня 2015 р.

АКТ

**впровадження результатів дисертаційної роботи Рошупкіна Олексія Юрійовича
 “Методи і засоби підвищення точності інформаційно-вимірювальних систем
 ультрафіолетового випромінювання” в навчальний процес**

Комісія Чернівецького національного університету у складі директора інституту фізико-технічних та комп’ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, академіка АН ВШ України, доктора фіз.-мат. наук, професора Ангельського О.В., завідувача кафедрою комп’ютерних систем та мереж, доктора фіз.-мат. наук, професора Мельничука С.В., канд. фіз.-мат. наук, доцента Воробця Г.І. склали цей акт в тому, що результати дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня кандидата технічних наук Рошупкіна О.Ю. впроваджені у навчальний процес на кафедрі комп’ютерних систем та мереж, зокрема, в дисциплінах “Мікроконтролери” та “Комп’ютерні системи штучного інтелекту”.

При викладанні вказаних дисциплін використано наступні результати досліджень автора:

- варіант принципової схеми вимірювального каналу інформаційно-вимірювальної системи ультрафіолетового випромінювання;
- структурне рішення та принципова схема інформаційно-вимірювальної системи ультрафіолетового випромінювання на базі мікроконвертора ADuC845;
- нейромережевий метод ідентифікації індивідуальних функцій перетворення багатопараметричних сенсорів за результатами їх експериментальних досліджень;
- модель функції перетворення багатопараметричних сенсорів.

Використання зазначених результатів дозволили підвищити якість навчального процесу із згаданих дисциплін.

О.В. Ангельський

С.В. Мельничук

Г.І. Воробець