МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
Кафедра комп'ютерної фізики

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем магістр

«Розробка програмно-апаратної системи позиціонування»

Виконав: студент 2 курсу, групи НФ-64
Трикоза І. В.
спеціальність:
105 Прикладна фізика та наноматеріали
освітня програма: Комп'ютерна фізика
Керівник:
к.ф.-м.н., доцент Сухов Р.В.
Рецензент:

Харків – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра комп'ютерної фізики

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ проф. Нємченко К. Е.

підпис ініціали, прізвище

"____" _____2020 року

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Трикоза Іван Володимирович

1.Тема роботи "Розробка програмно-апаратної системи позиціонування" керівник роботи: Сухов Руслан Володимирович, кандидат фізико-математичних наук, доцент.

затверджені наказом по університету від 06 грудня 2020 року №0210-05/2267

2. Строк подання студентом роботи 12 травня 2020 р.

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

1) Огляд літератури та формулювання задачі про створення програмно-апаратної системи позиціонування
2) Теоретичні засади аналого-цифрових перетворень
3) Проектування апаратної частини пристрою.

4) Створення програмного забезпечення мікроконтролера.
5) Створення робочого зразку пристрою.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми, узгодження, а також затвердження її на кафедрі
2	Робота над літературою та іншими джерелами
3	Затвердження теми на кафедрі
4	Написання вступу до роботи та першого розділу
5	Написання другого розділу
5	Написання третього розділу
7	Завершення написання дипломної роботи(висновки та література)
8	Подача науковому керівнику
9	Відгук, рецензія, підготовка до захисту
10	Попередній захист
11	Захист

5. Дата видачі завдання « »_____2020 р

Студент _____ **Трикоза І. В.**

підпис ініціали, прізвище

Керівник роботи _____ **Сухов Р. В.**

Підпис ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Трикоза Іван Володимирович. Розробка програмно-апаратної системи позиціонування.

Дипломна робота представлена на 43 сторінках, складається з вступу, 3 розділів, та висновку, містить 18 рисунків, список використаної літератури з 30 найменувань.

Основною ціллю роботи є розробка пристрою для вимірювання лінійних розмірів об’єктів і обробка цих даних у цифровому вигляді за допомогою мікроконтролерного керування. Дана система ефективно організує обробку та передачу даних, які виникають у результаті вимірювання лінійних розмірів під час наукових досліджень. Розроблений пристрій продемонстрував ефективність використання інформаційних технологій у сучасних дослідженнях.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МІКРОКОНТРОЛЕР, ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНИХ РОЗМІРІВ, ОБРОБКА ДАНИХ, ПРОГРАМНО-АПАРАТНА СИСТЕМА.

РЕФЕРАТ

Трикоза Иван Владимирович. Разработка программно-аппаратной системы позиционирования.

Дипломная работа представлена на 43 страницах, состоит из введения, 3 глав, и заключения, содержит 18 рисунков, список использованной литературы из 30 наименований.

Основной целью работы является разработка устройства для измерения линейных размеров объектов и обработка этих данных в цифровом виде с помощью микроконтроллерного управления. Данная система эффективно организует обработку и передачу данных, возникающих в результате измерения линейных размеров во время научных исследований. Разработанное устройство продемонстрировало эффективность использования информационных технологий в современных исследованиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ, ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ, ОБРАБОТКА ДАННЫХ, ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ СИСТЕМА.

ABSTRACT

Trykoza Ivan. Development of a hardware-software positioning system. Graduate work is presented on 43 pages, consists of an introduction, 3 chapters, and conclusion, contains 18 figures, a list of used literature from 30 items.

The main purpose of the work is to develop a device for measuring the linear dimensions of objects and process this data in digital form using microcontroller control. This system effectively organizes the processing and transmission of data arising from the measurement of linear dimensions during scientific research. The developed device has demonstrated the effectiveness of using information technology in modern research.

KEYWORDS: MICROCONTROLLERS, MEASUREMENTS OF LINEAR DIMENSIONS, PROCESSING DATA, SOFTWARE AND HARDWARE SYSTEM.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА АБРЕВІАТУР

RAM - оперативна пам’ять

ROM - постійні запам'ятовуючі пристрої

I / O - вхід / вихід

A / D - аналого-цифрові перетворювачі

D / A - цифро-аналогові перетворювачі

МК - мікроконтролер

МПС – мікропроцесорна система

АЛП - арифметико-логічним пристроєм

MIPS - мільйон інструкцій в секунду

UART - універсальний асинхронний приймач / передавач

DSP - цифровий сигнальний процесор

ПК - персональний комп’ютер

ЗМІСТ

ВСТУП ……..….9

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Мікроконтролер - комп'ютер на одній мікросхемі ...…...….....11

1.2 Мікропроцесорні пристрої в засобах вимірювання…….....14

1.3 Цифровий штангенциркуль…….19

1.4 Цифрові штангенциркулі: як вони працюють?.....22

2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ

2.1 Принцип роботи ноніуса …….....25

2.2 Ємнісні датчики ……...……...26

2.3 Технічні характеристики елементів……..…….30

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ТА ЇЇ ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

3.1 Принцип побудови програмно-апаратного комплексу ……...32

ВИСНОВКИ ……..…..40

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ …….……..…..41

Додаток А …….….....42

ВСТУП

Розвиток мікроелектроніки та широке застосування її виробів в промисловому виробництві, в пристроях і системах управління найрізноманітнішими об'єктами і процесами в даний час є однією з основних рушійних сил науково-технічного прогресу.

Використання мікроконтролерів та радіо-компонентів у виробах виробничого та культурно-побутового призначення не тільки приводить до підвищення техніко-економічних показників виробів (вартості, надійності, споживаної потужності, габаритних розмірів) і дозволяє багаторазово скоротити терміни розробки і відсунути терміни морального старіння виробів, а й надає їм принципово нові споживчі якості, такі як: розширені функціональні можливості, удосконалення модифікацій, адаптивність та ін.

За останній час в мікроелектроніці швидкий розвиток одержав напрямок, пов’язаний з виробництва однокристальних контролерів, ціль яких «інтелектуалізація» обладнання різного застосування та призначення. Дана дипломна робота присвячена створенню електронного обладнання для штангенциркуля із наступною функціональністю:

- вимірювання лінійних розмірів в інтервалі від 0 до 250 мм з точністю 0,02 мм
- графічне відображення результатів вимірювання
- підтримка протоколу BLE 5.0 для дистанційного керування та отримання результатів вимірювання.

Мета роботи – розробка системи вимірювання лінійного зміщення в інтервалі від 0 до 250 мм з точністю 0,02 мм.

Завдання, що були вирішені для досягнення мети роботи:

- Провести дослідження вже існуючих рішень подібного роду
- Обрати апаратні компоненти для розробки прототипу

- Інтегрувати розроблену систему із системою графічного відображення величини зміщення та системою бездротової передачі даних за протоколом BLE 5.0
- Розробити програмне забезпечення для головного мікроконтролера із використанням сучасних шаблонів програмування

Об'єкт дослідження – сучасні практичні й теоретичні засади побудови вимірювальних систем.

Предмет дослідження – програмно-апаратні системи для прецизійного вимірювання лінійних розмірів.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Мікроконтролер - комп'ютер на одній мікросхемі

Основним призначенням мікроконтролера є управління різними електронними приладами і виконання взаємодії між ними, відповідно до запрограмованої в мікроконтролер програмою. Основна відмінність від мікропроцесорів, які вбудовані в персональні комп’ютери, мікроконтролери мають в собі вбудовані додаткові пристрої[23]. Ці пристрої можуть виконувати свої завдання під керуванням мікропроцесорного ядра, який містить мікроконтролер

До найбільш поширених вбудованим пристроїв відносяться пристрої пам'яті і порти введення / виводу (I / O), інтерфейси зв'язку, таймери, системний годинник. Пристрої пам'яті включають оперативну пам'ять (RAM), постійні запам'ятовуючі пристрої (ROM), перепрограмовану ROM (EPROM), електрично перепрограмовану ROM (EEPROM). Таймери включають і годинник реального часу, і таймери переривань. Засоби I / O включають послідовні порти зв'язку, паралельні порти (I / O лінії), аналого-цифрові перетворювачі (A / D), цифро-аналогові перетворювачі (D / A), драйвери рідкокристалічного дисплея (LCD) або драйвери вакуумного флуоресцентного дисплея (VFD) . Вбудовані пристрої мають підвищену надійність, так як вони не вимагають зовнішніх електричних ланцюгів[27].

На відміну від мікроконтролера контролером зазвичай називають плату, побудовану на основі мікроконтролера, але досить часто при використанні поняття "мікроконтролер" застосовують скорочену назву цього пристрою, відкидаючи приставку "мікро" для простоти. Також при згадці мікроконтролерів можна зустріти слова "чіп" або "мікрочіп", "кристал" (більшість мікроконтролерів виготовляють на єдиному кристалі кремнію), скорочення МК або від англійського microcontroller - MC.

Мікроконтролери можна зустріти у величезній кількості сучасних промислових і побутових приладів: верстатах, автомобілях, телефонах, телевізорах, холодильниках, пральних машинах і навіть кавоварках[13]. Серед виробників мікроконтролерів можна назвати Intel, Motorola, Hitachi, Microchip, Atmel, Philips, Texas Instruments, Infineon Technologies (колишня Siemens Semiconductor Group) і багатьох інших. Для виробництва сучасних мікросхем потрібні надчисті приміщення. Основним класифікаційним ознакою мікроконтролерів є розрядність даних, які обробляються арифметико-логічним пристроєм (АЛП). За цією ознакою вони діляться на 4, 8, 16, 32 і 64-розрядні.

Сьогодні найбільша частка світового ринку мікроконтролерів належить восьмирозрядним пристроям (близько 50% у вартісному вираженні). За ними слідують 16-розрядні і DSP-мікроконтролери (DSP - Digital Signal Processor - цифровий сигнальний процесор), орієнтовані на використання в системах обробки сигналів (кожна з груп займає приблизно по 20% ринку). Усередині кожної групи мікроконтролери діляться на CISC - і RISC-пристрої. Найбільш численною групою є CISC-мікроконтролери, але в останні роки серед нових чіпів намітилася явна тенденція зростання частки RISC-архітектури[12]. Тактова частота, або, точніше, швидкість шини, визначає, скільки обчислень може бути виконано за одиницю часу. В основному продуктивність мікроконтролера і споживана їм потужність збільшуються з підвищенням тактової частоти. Продуктивність мікроконтролера вимірюють в MIPS (Million Instructions per Second - мільйон інструкцій в секунду).

Термін контролер з’явився від англійського слова to control - керувати. Ці пристрої можуть бути реалізовані на різних принципах роботи від механічних пристроїв до електронних аналогових або цифрових пристроїв. Пристрої управління побудовані на механічній базі мають низьку надійність і високу вартість в порівнянні з електронними блоками управління, тому в подальшому ми такі пристрою розглядати не будемо. Електронні аналогові пристрої

потребують постійного налаштування в процесі експлуатації, що збільшує їх вартість. Тому такі пристрої до теперішнього часу майже не використовуються.

Найбільш популярними на цей час схемами управління є схеми, зроблені на базі цифрових мікросхем. Залежно від ціни та розмірів пристрою, яким треба керувати, виявляються і критерії до контролера. Якщо об’єкт правління має розмір в десятки метрів за площею, то в якості контролерів можна задіяти універсальні комп’ютери. Управління при такому сценарію можна здійснювати за допомогою вбудованих портів комп’ютера (LPT, COM, USB або Ethernet). У такі універсальні комп'ютери при ввімкненні живлення додається керуюча програма, яка і робить універсальний комп'ютер в контролер. Використання такого комп'ютера в якості контролера позволяє в найкоротші сроки проводити розробку нових систем, легко їх удосконалювати (шляхом простої зміни програми) а також задіювати готові масові (а значить дешеві) блоки[19]. Якщо до контролера з’являються особливі вимоги, такі, як робота в умовах тряски, розширеному діапазоні температур, впливу агресивних середовищ, то доводиться використовувати промислові варіанти універсальних комп'ютерів. Зрозуміло, що ці комп'ютери значно дорожче звичайних універсальних комп'ютерів, але все одно вони дозволяють значно економити час на розробку системи, за рахунок того, що не потрібно роботи розробку апаратури контролера.

Контролери використовують не тільки для великих систем, але і для пристроїв з малими габаритами, такі як магнітофони, радіоприймачі, стільникові апарати. У таких приладах до контролерів пред'являються обмеження по вартості, габаритам і температурному діапазону роботи. Навіть промислові варіанти універсальних комп’ютерів не можуть досягнути цих параметрів. Доводиться розробляти контролер на основі однокристальних ЕОМ, які і отримали назву мікроконтролери[18]. Будь-які пристрої радіо-автоматики чи пристрої зв’язку,

вимагають наявності контролера в своєму пристрої управління. Контролери потребують практично всі предмети і пристрої, які оточують нас.

1.2 Мікропроцесорні пристрої в засобах вимірювання

Сучасна вимірювальна техніка широко використовує обчислювальні блоки і мікропроцесорні системи в складі вимірювальних приладів. Відзначимо, що просте введення до складу вимірювального приладу мікропроцесора на характеристики результату не впливає. Точність буде визначатися метрологічними параметрами аналогових і аналого-цифрових вимірювальних перетворювачів[20]. Застосування мікропроцесорів у вимірювальних приладу дозволяє вирішити кілька груп завдань:

- Перетворення цифрової вимірювальної інформації (після АЦП), первинна обробка дослідницьких даних, розрахунок результатів непрямих вимірювань, статистична обробка дослідницьких даних і оцінка випадкових похибок та ін.
- Управління роботою приладу, обслуговування органів управління (клавіатури, ручок тощо.), виведення інформації на індикатори і екран, управління пам'яттю приладу і зовнішніми блоками вимірювальної схеми (перемикачами, двигунами, блоками живлення).
- Виконання одного або декількох дослідів (вимірювань) по заздалегідь введеному алгоритму (програмне управління).
- Автоматизація приладу - установка меж вимірювання без участі оператора, автоматизація процесу врівноваження в приладах, що використовують компенсаційні методи вимірювання, виконання спільних вимірів. Часто повністю автоматизовані прилади називають «інтелектуальними».

Нагадаємо, що під мікропроцесором (або мікропроцесорної системою - МПС) зазвичай розуміють обчислювальний пристрій (мікроЕОМ), виконане у вигляді однієї або декількох інтегральних схем (чіпів). Мікропроцесори бувають універсальні і спеціалізовані, однокристальні і багатокристальні.

Універсальні МПС зазвичай дешевше і простіше. До них існує відпрацьований стандартне програмне забезпечення і хороша апаратна підтримка у вигляді додаткових плат, блоків, пристроїв введення / виводу та ін. Засоби вимірювання з універсальними МПС зазвичай називають обчислювальними приладами з відкритою архітектурою. Спеціалізовані МПС можуть володіти кращими технічними характеристиками (швидкодією, розрядністю, споживаної потужністю, вартістю та ін.), однак вимагають розробки спеціального програмного забезпечення.

Типова МПС, яка використовується в мікропроцесорних вимірювальних приладах, містить власне мікропроцесор, ОЗУ і постійний запам'ятовуючий пристрій, призначений для зберігання програм управління оточенням. Генератор тактових імпульсів МПС задає часовий інтервал - одиницю тривалості виконання команди. Чим вище тактова частота, тим при інших рівних умовах, більш швидкодіючою є МПС. Інтерфейси введення і виведення - це пристрої сполучення МПС з органами управління і відліковими пристроями приладу. Для мікропроцесорних вимірювальних приладів характерні пристрої введення сигналів управління у вигляді кнопкового пульта на передній панелі приладу (виносна клавіатура використовується рідше - зазвичай як додаткова опція). Вимірювані сигнали подають на вхідні вимірювальні перетворювачі (АЦП, датчики, блоки введення цифрової інформації, лічильники та ін.). Пристрої виведення мікропроцесорних приладів зазвичай являють собою цифрові табло або екран (дисплей). Сучасні обчислювальні пристрої, як правило, використовують стандартні пристрої зберігання інформації - жорсткі диски і USB - флеш-карти[22].

Всі блоки МПС пов'язані між собою магістральними шинами передачі цифрової інформації. Кількість ліній в шині даних зазвичай відповідає кількості біт в слові даних МПС (зазвичай 8, 16 біт). Шина адреси застосовується для вказівки осередки пам'яті чи блоку введення виведення, які отримують або передають інформацію в даний момент. Шина управління служить для передачі

сигналів, що синхронізують всю роботу МПС. Таким чином, мікропроцесорний прилад виглядає як мікро-ЕОМ з додатковими вимірювальними блоками, характерними для традиційних цифрових приладів. В обчислювальних приладах з відкритою архітектурою використовують вбудовані МПС .

Основні переваги мікропроцесорних засобів вимірювання порівняно з традиційними цифровими приладами з апаратної логікою роботи.

Підвищена точність. Вона досягається за рахунок:

- виключення систематичних похибок в процесі самокалібрування приладу, корекції зміщення нуля, обліку власної АЧХ, нелінійності вимірювальних перетворювачів. Самокалібровка в даному випадку - це вимір поправок або поправочних множників і запам'ятовування їх в ОЗУ з метою використання на етапі обробки дослідних даних;
- зменшення впливу випадкових похибок шляхом проведення багаторазових вимірювань з подальшою обробкою вибірки-усереднюванням, обчисленням мат. очікування та ін .;
- виявлення та усунення грубих помилок (промахів);
- визначення і виведення на індикатор оцінки похибки прямо в процесі вимірювання.

Багатофункціональність. Заміна сукупності різних вимірювальних приладів одним, багатофункціональним. Така заміна в приладах з «жорсткою» логікою неекономічна, так як додавання нової функції вимагає установки додаткового вимірювального блоку. Програмована логіка дозволяє зробити це всього лише додаванням блоку програми[24].

Компенсація внутрішніх шумів дозволяє підвищити чутливість засобу вимірювання і знизити похибки вимірювання при малих вхідних сигналах. Її виконують обчислювальним способом, проводячи багаторазові вимірювання і усереднюючи їх результати. Інший варіант компенсації - цифрова фільтрація часовій послідовності миттєвих значень сигналу. У програмному забезпеченні

приладу передбачають цифрову фільтрацію відліків вимірювального сигналу, які надходять з АЦП в реальному масштабі часу.

Розширення вимірювальних можливостей шляхом використання непрямих, спільних і сукупних вимірювань, які сприймаються оператором в цьому випадку як прямі. Результат обробки дослідних даних в мікропроцесорному приладі виводиться на індикатор практично відразу після проведення вимірювання. Мікропроцесор здійснює управління процесом вимірювання за програмою і проводить обробку дослідних даних[26]. Результат розрахунків сприймається оператором як результат прямих вимірювань, оскільки розрахунок робиться швидко.

Спрощення та полегшення управління приладом. В автоматичних мікропроцесорних приладах управління проводиться шляхом перемикання блоків програм з кнопкової панелі. Чим менше кнопок, тим більш «розумним» є прилад. Автоматизація установок приладу призводить до спрощення його використання (автоматичний вибір меж вимірювання, самокалібрування та ін.). Корисний контроль за помилковими діями оператора з індикацією його невірних дій на табло або екрані[18].

Математичні операції з результатом вимірювань - множення на константу, обчислення відхилення від еталону, зміщення (віднімання константи), висновок у відсотках, подання до логарифмічних величинах, введення характеристик датчиків та ін[28].

Статистична обробка даних, отримання характеристик випадкових сигналів - математичного очікування, дисперсії, коефіцієнта кореляції та ін.

Запам'ятовування великого обсягу даних і при необхідності відтворення їх з пам'яті. У сучасних приладах для цього передбачають розширену пам'ять ОЗУ і жорсткі диски великого об'єму.

Спрощення організації вимірювальних систем. Мікропроцесор дозволяє програмно реалізувати інтерфейсні протоколи, необхідні для включення приладу в вимірювальну систему.

Малі габарити, висока надійність, невелика споживана потужність (у порівнянні з приладами з жорсткою логікою). Самотестування - програмне виявлення несправності і збоїв у роботі - підвищує надійність.

Скорочення часу розробки приладів за рахунок уніфікації конструкції апаратної частини. Проектування нового приладу зводиться до розробки алгоритму функціонування приладу і написання програми.

Області використання мікропроцесорних приладів:

- багатофункціональні прилади з можливістю розширення функціональності (шляхом заміни програмного забезпечення);
- прилади з великою кількістю вхідних пристроїв (датчиків);
- засоби вимірювання із запам'ятовуванням великих обсягів даних;
- прилади, що реалізують непрямими і спільні вимірювання;
- обчислювальні прилади, які проводять обробку дослідних даних, оцінку похибки в процесі вимірювань, математичні перетворення результатів вимірювань та ін.

Програмне забезпечення мікропроцесорних приладів включає:

- програми реалізації методу вимірювання;
- програми обслуговування вимірювальних перетворювачів (АЦП та ін.);
- програми калібрування і корекції систематичних похибок (дрейфу і зміщення нуля та ін.);
- програми цифрової обробки і фільтрації вимірювальних сигналів (наприклад, усереднення даних за вибіркою, згладжування шумів);
- програми автоматизації процесу вимірювання (вибір меж вимірювання, оптимальних параметрів перетворювачів);

- програмне забезпечення математичної обробки результатів вимірювань (порівняння результатів з номіналом, масштабне перетворення та ін.);
- програмне керування вимірами (програмовані прилади).

Особливості програмування для МП приладів пов'язані, в ряді випадків, з обмеженим обсягом ПЗУ програм. Потрібно розробляти компактні програми з використанням мов низького рівня. Інша особливість програмного забезпечення пов'язана з роботою приладу в режимі «реального часу». Повинна бути витримана синхронність між надходженням вимірювальної інформації і виконанням необхідних програмних дій. Вимоги до швидкодії таких програм зазвичай високі. Вони повинні забезпечувати також підвищену надійність. При наявності помилок в програмному забезпеченні прилад стає непрацездатним, а коригування та виправлення програмних кодів користувачем, як правило, не передбачається.

Через складність введення / виведення керуючої інформації в вимірювальних приладах часто відсутня можливість управління командним рядком. Введення зазвичай обмежене цифровою інформацією з передньої панелі приладу, висновок на цифрове табло не передбачає розширену текстову інформацію.

У мікропроцесорних приладах зазвичай використовують модульну побудову програм. Це дозволяє використовувати в різних приладах однакові програмні фрагменти.

1.3 Цифровий штангенциркуль

Штангенциркуль - пристрій, що використовується для вимірювання відстані між двома протилежними сторонами предмета. Багато типів штангенциркуля дозволяють зчитувати вимірювання за лінійною шкалою, циферблатом або цифровим дисплеєм. Наконечники штангенциркуля відрегульовані таким чином , щоб вони відповідали вимірюваним точкам, а потім штангенциркуль віддаляється, а відстань зчитується шляхом

вимірювання між наконечниками вимірювального інструмента, таким як лінійка.

Він використовується в багатьох галузях, таких як машинобудування, металообробка, лісове господарство, деревообробка, наука та медицина.

З плином часу аналоговий циферблат змінює цифровий дисплей, який відображає показання як числове значення. Замість рейок ці штангенциркулі використовують лінійний енкодер. Деякі цифрові штангенциркулі можна перемикати між сантиметрами або міліметрами і дюймами. Всі вони забезпечують обнулення дисплея в будь-якій точці на слайді, що дозволяє проводити диференціальні вимірювання. Цифрові штангенциркулі можуть містити функцію «утримання читання», що дозволяє зчитувати розміри після використання в незручних місцях, де дисплей непомітний. Звичайні 6-дюймові / 150-мм цифрові штангенциркулі виготовлені з нержавіючої сталі, мають номінальну точність 0,001 дюйма (0,02 мм) і дозвіл 0,0005 дюйма (0,01 мм). Ця ж технологія використовується для виготовлення довгих 8-дюймових і 12-дюймових штангенциркулів; точність для більш довгих вимірювань знижується до 0,001 дюйма (0,03 мм) для 100-200 мм і 0,0015 дюйма (0,04 мм) для 200-300 мм[24].

Цифрові вимірювачі все частіше пропонують послідовне виведення даних, що дозволяє їм взаємодіяти зі спеціальним рекордером або персональним комп'ютером. Цифровий інтерфейс значно скорочує час виконання і запису серії вимірювань, а також підвищує надійність записів. Можна побудувати або придбати відповідне пристрій для перетворення виведення послідовних даних в звичайні комп'ютерні інтерфейси, такі як RS-232, універсальна послідовна шина або бездротовий зв'язок. З таким перетворювачем вимірювання можуть бути безпосередньо введені в електронну таблицю, статистичну програму управління процесом або аналогічне програмне забезпечення.

Деякі цифрові штангенциркулі містять ємнісний лінійний датчик. Шаблон смужок вигравіруваний прямо на друкованій платі в повзунку. Під шкалою штангенциркуля інша друкована плата також містить витравлений малюнок ліній. Комбінація цих друкованих плат утворює два змінних конденсатора. Дві ємності не в фазі. При переміщенні повзунка ємність змінюється лінійно і повторюється. Схема, вбудована в повзунок, зчитує смуги по мірі руху повзунка и виконує лінійну інтерполяцію на основі величин конденсаторів, щоб знайти точне положення повзунка. Інші цифрові штангенциркулі містять індуктивний лінійний датчик, який забезпечує надійну роботу при наявності забруднень, таких як охолоджуючі рідини[16]. Магнітні лінійні енкодери використовуються в інших цифрових штангенциркулях.

Лінійний датчик являє собою датчик, зчитуючу голівку в парі зі шкалою, яка кодує положення. Датчик зчитує шкалу, щоб перетворити кодоване положення в аналоговий або цифровий сигнал, який потім може бути декодований за допомогою цифрового пристрою, що зчитує (DRO) або контролера руху. Кодувальник може бути інкрементним або абсолютним. Рух може бути визначено по зміні положення в часі. Технології лінійного датчика включають оптичний, магнітний, індуктивний, ємнісний і вихровий струм[23]. Лінійні енкодери використовуються в метрологічних приладах, системах управління рухом і високоточних оброблювальних інструментах, починаючи від цифрових штангенциркулів і координатно-вимірювальних машин до каскадів, фрез з ЧПУ та ін.

Ємнісні лінійні енкодери працюють шляхом вимірювання ємності між зчитувачем і шкалою. Типові області застосування - цифрові штангенциркулі. Одним з недоліків є чутливість до бруду, який може локально змінювати відносну діелектричну проникність.

1.4 Цифрові штангенциркулі: як вони працюють?

Цифрові штангенциркулі не мають механізму рейкової передачі. Замість цього вони можуть проводити вимірювання завдяки ряду ємнісних датчиків, які проходять по довжині променя (рис. 1.1).

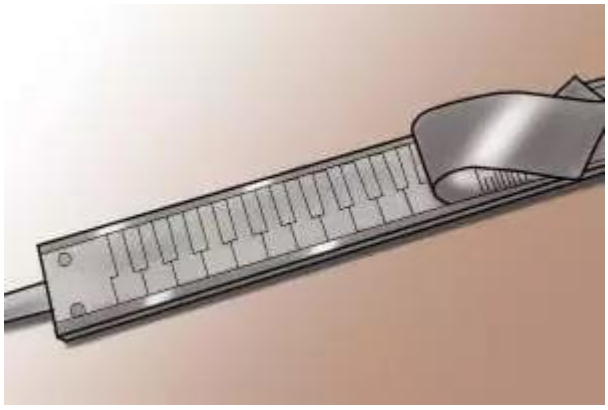


Рис. 1.1

Ці датчики виявляють зміни електричного заряду, що виникають при зміні відстані між наконечниками. Під шкалою супорта є ряд прямокутних пластин, вигравіруваних на мідній або скляній смузі. На нижньому боці рухомого наконечника (Рис. 1.2) знаходиться друкована плата. З мідними пластинами це формує сітку конденсаторів.

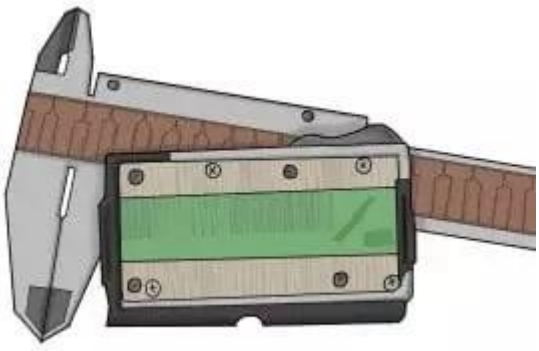


Рис 1.2

У міру того, як змінна губка переміщається уздовж основної шкали, прямокутні пластини вирівнюються і зміщуються, і ємність (величина електричного заряду) між пластинами змінюється (Рис. 1.3). Це посилає сигнал

на чіп всередині супорта, який генерує свідчення, які відображаються на ЖК-дисплеї.

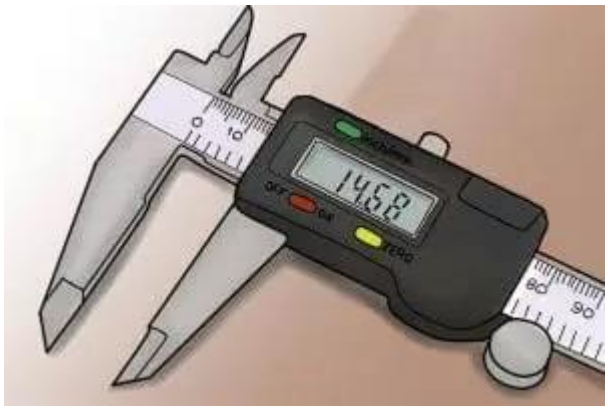


Рис. 1.3

2 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ

2.1 Принцип роботи ноніуса

Ноніус (Vernier Caliper) - це візуальний засіб для точного зчитування результатів вимірювань між двома позначками на лінійній шкалі з використанням механічної інтерполяції; тим самим збільшуючи роздільну здатність і зменшуючи похибку вимірювання, використовуючи гостроту Вернье для зменшення помилки оцінки людиною.

Ноніус є допоміжною шкалою, що замінює один покажчик вимірюваної величини, і має, наприклад, десять поділок, рівних по відстані до дев'яти поділів в основній шкалі. Інтерпольоване читання виходить шляхом спостереження, яка з градацій за ноніус-шкалою збігається з градацією по основній шкалі, що легше сприймати, ніж візуальна оцінка між двома точками. Таке розташування може перейти до більш високій роздільній здатності, використовуючи вищі масштабні відносини, відомі як константа Вернье. Ноніус можна використовувати в круглих або прямих масштабах, де досить простого лінійного механізму. Прикладами є штангенциркулі і мікрометри, секстанти для навігації, теодоліти при зйомці і, як правило, наукові прилади. Принцип інтерполяції Вернье також використовується для електронних датчиків зсуву, таких як абсолютні датчики, для вимірювання лінійного або обертального руху, як частина електронної вимірювальної системи[17].

Принцип роботи шкали заснований на тому факті, що людина набагато точніше зауважує збіг розподілів, ніж визначає відносне розташування одного поділу між іншими.

Шкала-ноніус має поділки, відстань між якими на певну величину менше, ніж між поділами основної шкали. Одну поділку ноніуса може відповідати як одному поділу основної шкали, так і декільком. В останньому випадку різниця довжин пропорційно збільшується. Ціну поділки ноніуса F_{non} можна визначити за формулою:

$$F_{non} = (L_{main} - \frac{L_{non}}{n}) * F_{main} \qquad (2.1)$$

де:

L_{main}, L_{non} - довжина ділення відповідно основної шкали і ноніуса;

n - кількість всіх повних поділок основної шкали і одного неповного, які відповідають одному поділу ноніуса;

L_{main} - ціна поділки основної шкали.

На цьому малюнку (рис 2.1) ноніус (нижня шкала) показує 7 цілих 6 десятих поділу основного (верхньої) шкали. Ціла частина зазвичай визначається за показаннями нульового розподілу ноніуса, а дрібна частина визначається за номером тієї поділки ноніуса, яка точно збігається з діленням основної шкали (обведено червоним пунктиром).

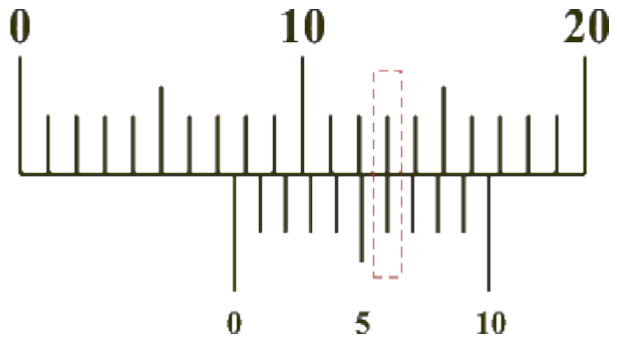


Рис. 2.1

При виконанні вимірювань по положенню нульової позначки ноніуса визначають цілу кількість ділень основної шкали N_{main}, а по найкращому збігу позначок ноніуса з відмітками основної шкали - кількість поділів

ноніуса N_{non}. Значення V вимірюваної величини визначається як сума добутку кількості ділень основної шкали на ціну її поділу і відповідного добутку для ноніуса за формулою:

$$V = N_{main} * F_{main} + N_{non} * F_{non} \qquad (2.2)$$

2.2 Ємнісні датчики

Ємнісний датчик являє собою одну або кілька ємностей зі змінними параметрами. При русі контрольованого об'єкта його ємність може змінюватися [11] шляхом:

- зміни величини зазору між пластинами;
- зміни взаємного положення пластин і як наслідок цього збільшення (зменшення) зони взаємного перекриття;
- зміни діелектричної проникності ізолюючого шару.

При зміні ємності пристрою ця величина може сама по собі служити сигналом, що передається до електронних блоків управління, і може включати генератор імпульсів, які більш легко піддаються подальшій обробці[18].

Залежність ємності від величини зміщення виражається формулою:

$$C = 0,89\frac{S}{d-\delta} \qquad (2.3)$$

де:

C – емність датчика; δ - величина зсуву, тобто величина зміни зазору між пластинами; d - зазор між пластинами при δ = 0, мм; S - площа пластин;

Чутливість такого датчика:

$$F = 4,43*10^{-7}\frac{U^2S}{d^2} \qquad (2.4)$$

У різних датчиках, що застосовуються для контролю будь-якої неелектричної величини, може змінюватися один із зазначених параметрів[25]. На (рисунку 2.2а) представлений датчик з двох паралельних

пластин, що застосовується для вимірювання невеликих зсувів. В даному датчику зміною величини є відстань між пластинами.

Для перетворення кутових переміщень в зміні ємності застосовуються поворотні датчики (рисунок 2.2 б), в яких змінною величиною є площа конденсатора[26]. Для збільшення ємності датчика зазвичай беруть не одну пару пластин, а систему, що складається з декількох нерухомих і рухомих пластин. Прикладом такого датчика може бути звичайний повітряний конденсатор змінної ємності, застосовуваний в радіотехніці. Для вимірювання переміщень застосовуються циліндричні ємнісні датчики (рисунок 2.2 в) зі зміною площею[29].

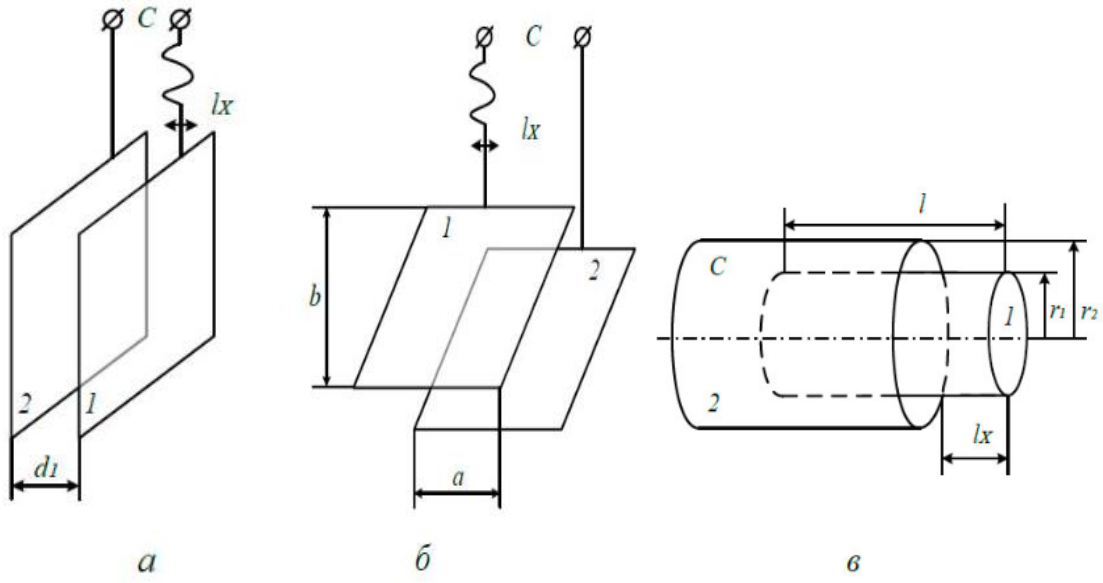


Рисунок 2.2 – одноємнісні датчики лінійних переміщень

Залежність ємності від переміщень для наведених схем:

для рисунка 2.2 а:

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{s}{d + l_x}; \qquad (2.5)$$

для рисунка 2.2 б:

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{b(a + l_x)}{d}; \qquad (2.6)$$

для рисунка 2.2 в:

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{2\pi(l + l_x)}{\ln(r_2 / r_1)}. \qquad (2.7)$$

Одноємнісний датчик досить не складний за своєю конструкцією і представляє собою один конденсатор зі змінною ємністю[5]. До його недоліків відноситься достатньо значний вплив зовнішніх факторів, таких як вологість і температура. Для врівноваження цих похибок використовують диференціальні конструкції. Мінусом таких датчиків в порівнянні з одноємнісними є потреба як мінімум в трьох (замість двох) екранованих сполучних контактів із проводів між датчиком і вимірювальним пристроєм для погашання так званих паразитних ємностей. Але цей недолік виправдовує себе суттєвим збільшенням точності, стабільності і розширенням області використання таких пристроїв[10].

У декотрих випадках диференційний датчик виготовити важко з конструкторських міркувань (насамперед це відноситься до диференціальних датчиків з не стійким зазором). Але якщо зразковий конденсатор помістити в один корпус з робочим, зробити їх ідентичними за характеристиками конструкції, розмірами, матеріалом, то буде набагато менша чутливість пристрою до зовнішніх дестабілізуючих факторів і впливів[30]. У таких випадках можна говорити про півдиференціальний ємнісний датчик , який як і диференційний, має відношення до двухємнісних.

Особливість вихідного параметра двухємнісних датчиків (рис. 2.3), який виглядає як безрозмірне відношення двох ємностей, дає підставу називати такі датчики – датчиками відношення[22]. При застосуванні двухємнісних датчиків пристрій вимірювання може навіть взагалі не містити зразкових мір ємності, що натомість сприяє підвищенню точності вимірювання.

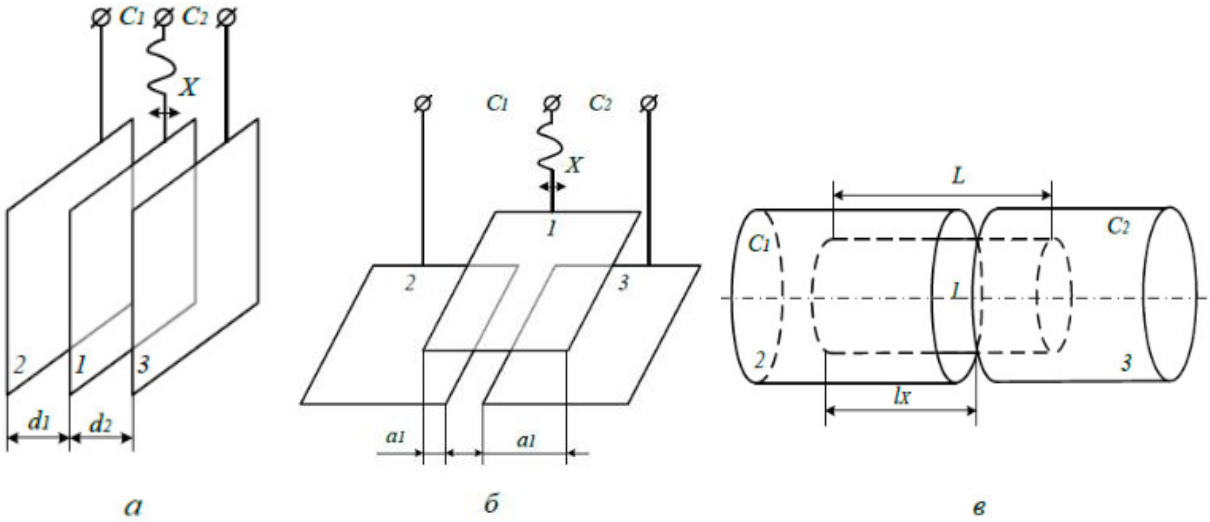


Рисунок 2.3 – двухємнісні датчики лінійних переміщень

Залежність ємності від переміщень для наведених схем:

для рисунка 2.3 а:

$$C_1 = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{s}{d_1 + l_x};\ C_2 = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{s}{d_2 + l_x}. \qquad (2.8)$$

для рисунка 2.3 б:

$$C_1 = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{b(a + l_x)}{d};\ C_2 = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{b(a - l_x)}{d}. \qquad (2.9)$$

для рисунка 2.3 в:

$$C_1 = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{2\pi(l + l_x)}{\ln(r_2 / r_1)};\ C_2 = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{2\pi(l - l_x)}{\ln(r_2 / r_1)}. \qquad (2.10)$$

Найважливішими характеристиками ємнісних датчиків є величина ємності датчика і його чутливість.

Розрахунок ємності датчиків проводиться по формулах, що відображають співвідношення величини ємності, геометричних розмірів датчика і діелектричної постійної середовища між обкладками конденсатора.

Чутливість датчика виражається величиною приросту ємності при зміні контрольованої неелектричної величини на одиницю її виміру. Чутливість знаходять[30] диференціюванням виразу для ємності по змінній неелектричної величини (щодо зміщення, куту повороту, висоті рівня).

2.3 Технічні характеристики елементів

Для розробки програмно-апаратної системи позиціонування було використано ble-контролер NRF51822QF [2]. Це бездротова система на чіпі (SoC) 2,4 ГГц з наднизьким енергоспоживанням який включає в себе nRF51 приймач 2.4 ГГц, 32-розрядний процесор ARM® Cortex ™ - M0, флеш-пам'ять і аналогово-цифрову периферію [9].

Технічні характеристики NRF51822QF:

- Багатопротокольна радіостанція з частотою 2,4 ГГц;
- 32-бітний процесор ARM Cortex M0;
- Flash 256 КБ / 128 КБ і ОЗУ 32 КБ / 16 КБ;
- Пакети програмного забезпечення доступні в якості завантажень;
- Pin сумісний з іншими пристроями серії nRF51;
- Розробка додатків незалежно від стека протоколів;
- Повністю сумісний з повітрям (on-air) з серією nRF24L;
- Програмована вихідна потужність від + 4dBm to -20dBm;
- RSSI;
- ОЗУ з відображенням FIFO з використанням EasyDMA;
- Динамічна навантаження на повітряну (on air) корисне навантаження до 256 байт;
- Гнучкий і настроюється 31-контактний GPIO;
- Програмований периферійний інтерфейс – PPI;
- Прості глобальні режими харчування ON / OFF;
- Повний набір цифрових інтерфейсів, включаючи: SPI / 2-дротовий / UART;

- 10-розрядний АЦП;
- 128-біт AES ECB / CCM / AAR співпроцесор квадратурного демодулятору;
- Low cost external crystal 16MHz ± 40ppm;
- Малогабаритні 16-мегагерцові генератори і RC-генератори;
- Надпотужні 32кГц кристальні і RC-генератори;
- Широкий діапазон напруги живлення (від 1,8 до 3,6 В);
- Вбудований стабілізатор DC / DC;
- Індивідуальне управління живленням для всіх периферійних пристроїв;
- Варіанти пакетів: 48-контактний 6x6 QFN / WLCSP, Thin-CSP;

Використовується:

- Низькоенергетичні додатки Bluetooth;
- Маяки;
- Комп'ютерна периферія;
- Пульт дистанційного керування CE для TB, STB і мультимедійних систем;
- Теги оповіщення про близькість і безпеки;
- Спортивні та фітнес-датчики;
- Охорона здоров'я та датчики способу життя;
- Ігрові контролери для комп'ютерів;
- Іграшки та електронні ігри;
- Внутрішній / промисловий контроль і збір даних;
- Інтелектуальні побутові прилади;

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ТА ЇЇ ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

3.1 Принцип побудови програмно-апаратного комплексу.

Головними вузлами нашого пристрою є головний мікроконтролер NRF51822Q з типовою обв'язкою та драйвер цифрового ноніусу. Принципова схема приладу наведена у ДОДАТКУ А.

Сполучення розробленого пристрою з комп'ютерною технікою відбувається за протоколом BLE 5.0, що забезпечує головний мікроконтролер NRF51822Q. За допомогою мікросхеми NRF51822QF ми можемо передавати всю необхідну нам інформацію на смартфон.

Для оцифрування був використаний АЦП який знаходиться в контролері з вбудованим ble - інтерфейсом NRF51822QF (рис. 3.1)

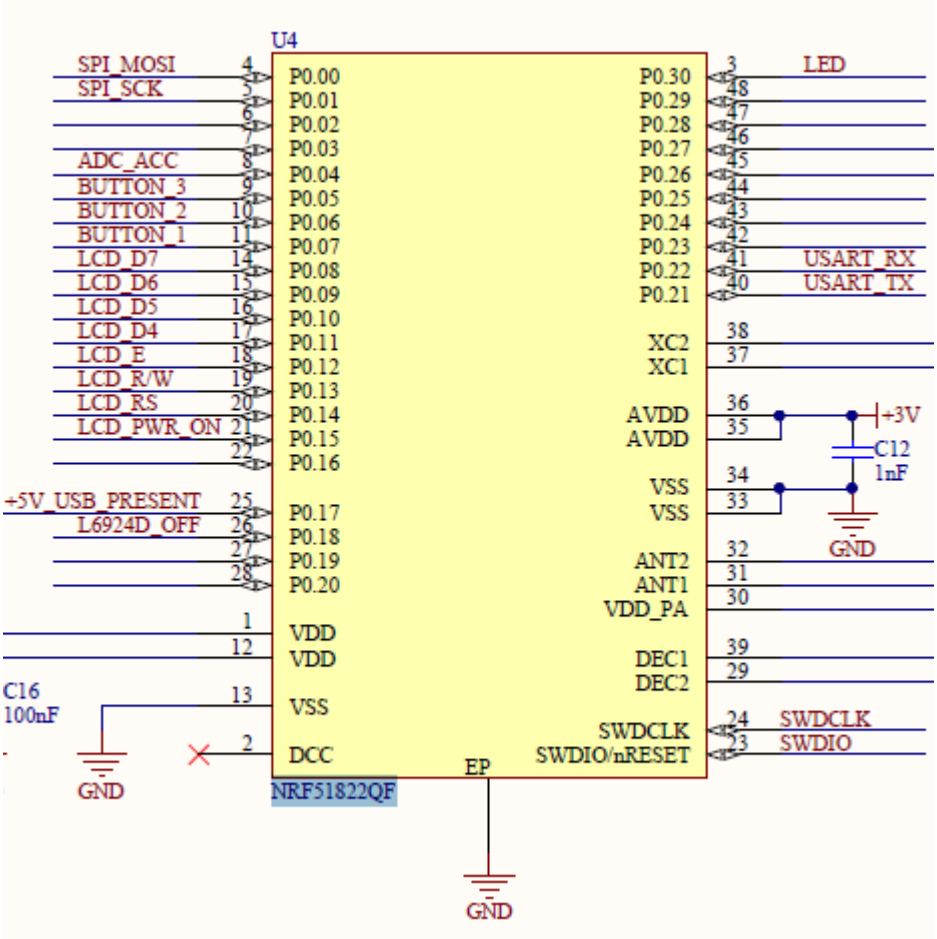


Рис. 3.1

Напруга живлення для пристрою в цілому, а саме 5В, подається через USB вхід (Рис. 3.2)

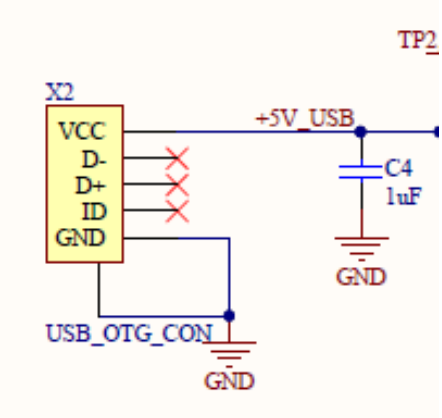


Рис. 3.2

Система живлення організована наступним чином. Напруга з USB шини живить драйвер заряду акумулятора U1. Акумулятор, в свою чергу, живить лінійний стабілізатор U2 та імпульсний стабілізатор U3. Постійно увімкнена мікросхема U2 забезпечує напругою 3В головний мікроконтролер та драйвер цифрового ноніусу. Стабілізатор U3, який активується та вимикається, керуючим сигналом головного мікроконтролера, використовується для живлення рідкокристалічного дисплея.

Для зарядки нашого акумулятора ми використали повністю монолітний зарядний пристрій L6924D [3] для літій-іонних / полімерних акумуляторів з одним елементом (рис. 3.3).

Це ідеальне рішення для приладів з обмеженим простором, таких як портативне обладнання.

Він об'єднує всі силові елементи (силовий MOSFET, зворотнє блокування діода і резистор).

При використанні зовнішнього настінного адаптера з регульованою напругою L6924D працює в лінійному режимі і заряджає акумулятор при постійному струмі / постійній напрузі. Пристрій має робочу вхідну напругу в

діапазоні від 2,5 В до 12 В. L6924D дозволяє користувачеві програмувати безліч параметрів, таких як струм попередньої зарядки, струм швидкої зарядки, напруга попередньої зарядки, порогове значення струму закінчення зарядки і таймер зарядки.

Насамперед він потрібний щоб не зменшити часовий ресурс нашого акумулятора, тобто щоб наш акумулятор заряджався правильно і не вийшов зі строю.

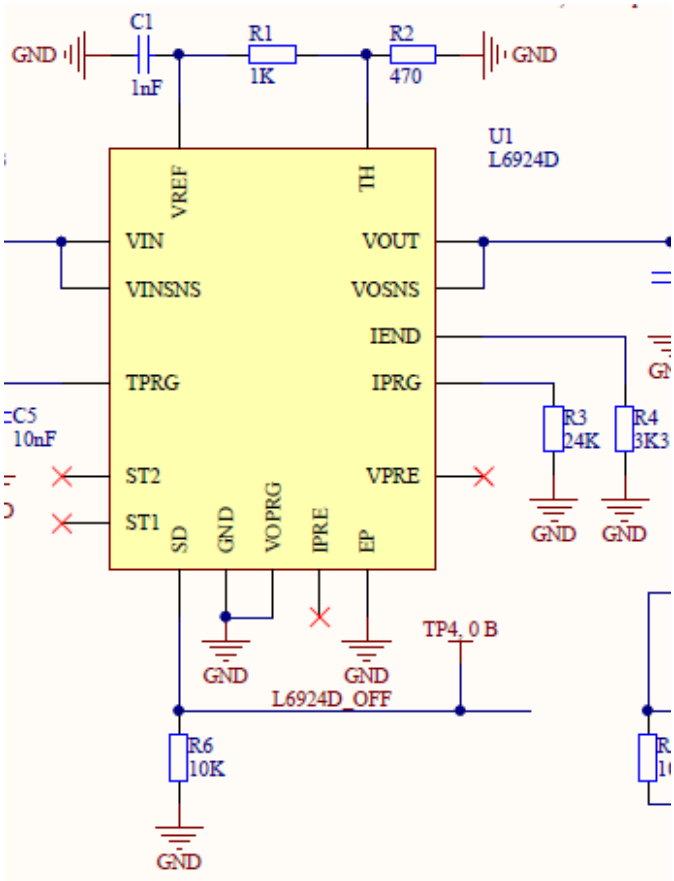


Рис. 3.3

Напруга живлення і контролера не може перевищувати 3,3 В. Тому для обмеження напруги акумулятора, яка становить 4,2 В (коли акумулятор повністю заряджений), у схему уведений лінійний стабілізатор напруги U2 [1] на 3 В (рис. 3.4).

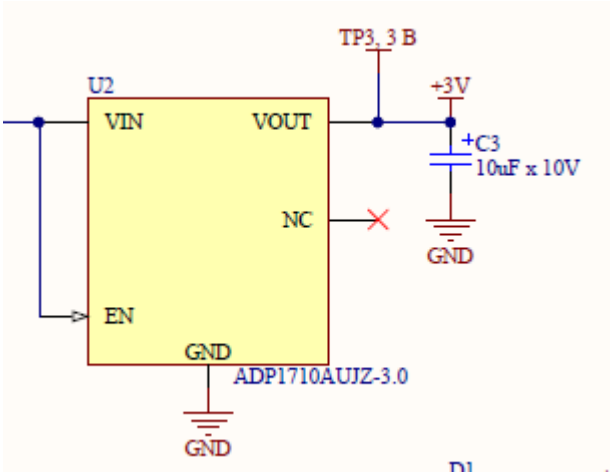


Рис. 3.4

Рідкокристалічний дисплей, який використовується для відображення інтерфейсу користувача, під'єднано до роз'єму X3. Цей дисплей потребує напруги живлення, рівної 5В. Для отримання цього рівня напруги шляхом трансформації непостійної напруги акумулятора у схему уведений імпульсний стабілізатор напруги U3 [4](рис. 3.5).

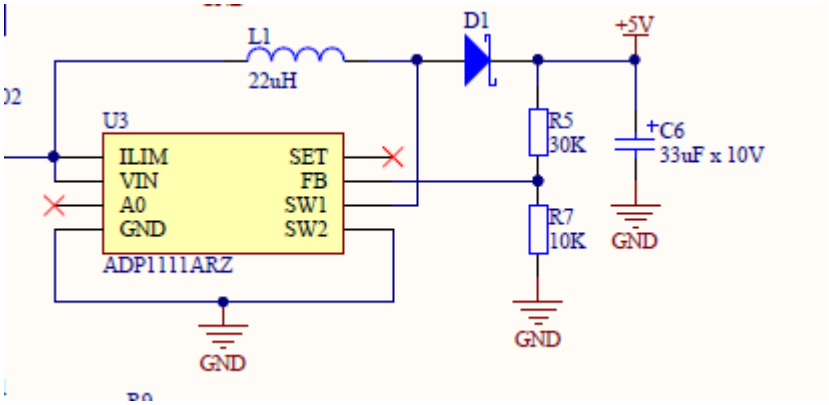


Рис. 3.5

Так як рідкокристалічний дисплей споживає досить велику потужність, його необхідно повністю знеструмлювати у режимі очікування приладу. Для цього головний контролер, задіюючи ключ на базі транзисторів Q1 та Q2 (рис. 3.6), подає або вимикає напругу 5В, що надходить до дисплею з виходу стабілізатора U3.

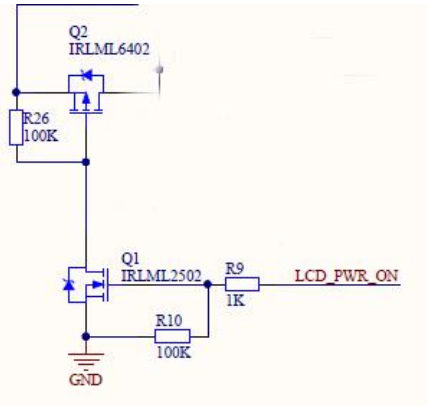


Рис. 3.6

З метою оптимізації споживання заряду та своєчасного реагування на розряд, головний мікроконтролер періодично перевіряє значення напруги на виході акумулятора.

Так, з резистивного дільника (рис. 3.7) напруга подається на внутрішній АЦП мікроконтролера. Дільник потрібен, щоб напруга на вході АЦП не перевищила напругу живлення контролера, яка становить 3 В.

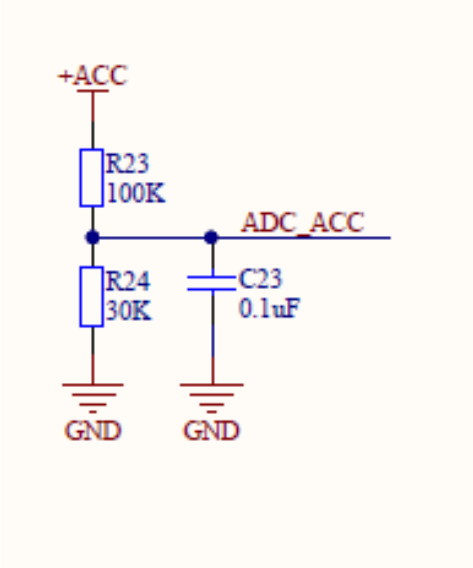


Рис. 3.7

Для програмування нашого контролера ми використовуємо роз’єм X5 (рис. 3.8)

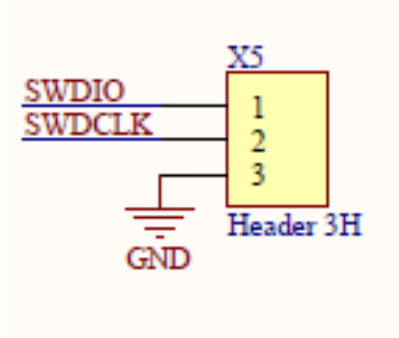


Рис. 3.8

Через роз’єм X4 (рис. 3.9) до плати керування з головним мікроконтролером NRF51822Q приєднується драйвер цифрового ноніусу, який зображено (рис. 3.10):

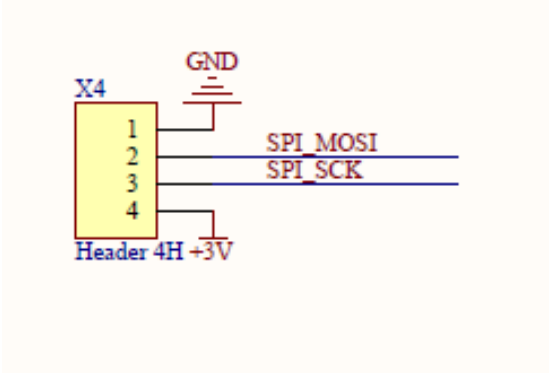


Рис. 3.9

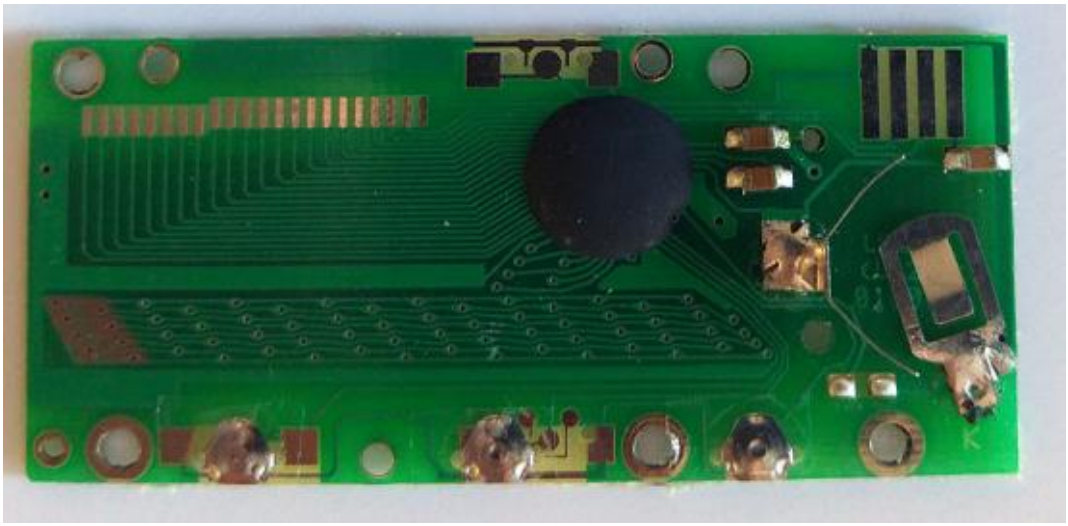


Рис. 3.10

Саме на цій рухомій частині знаходяться пластини і та електроніка яка вже за допомогою методу цифрового ноніусу знімає аналоговий сигнал, оцифровує його і віддає інформацію у цифровому вигляді про переміщення. Ми, в свою чергу, приймаємо його, відображаємо, зберігаємо так, як потрібно нам. Комунікація контролера NRF51822Q та драйвера цифрового ноніуса відбувається за протоколом SPI.

Для того щоб забезпечити навігацію по меню а також ввімкнення та вимкнення нашого штангенциркуля ми використали масив із кнопок (рис. 3.11)

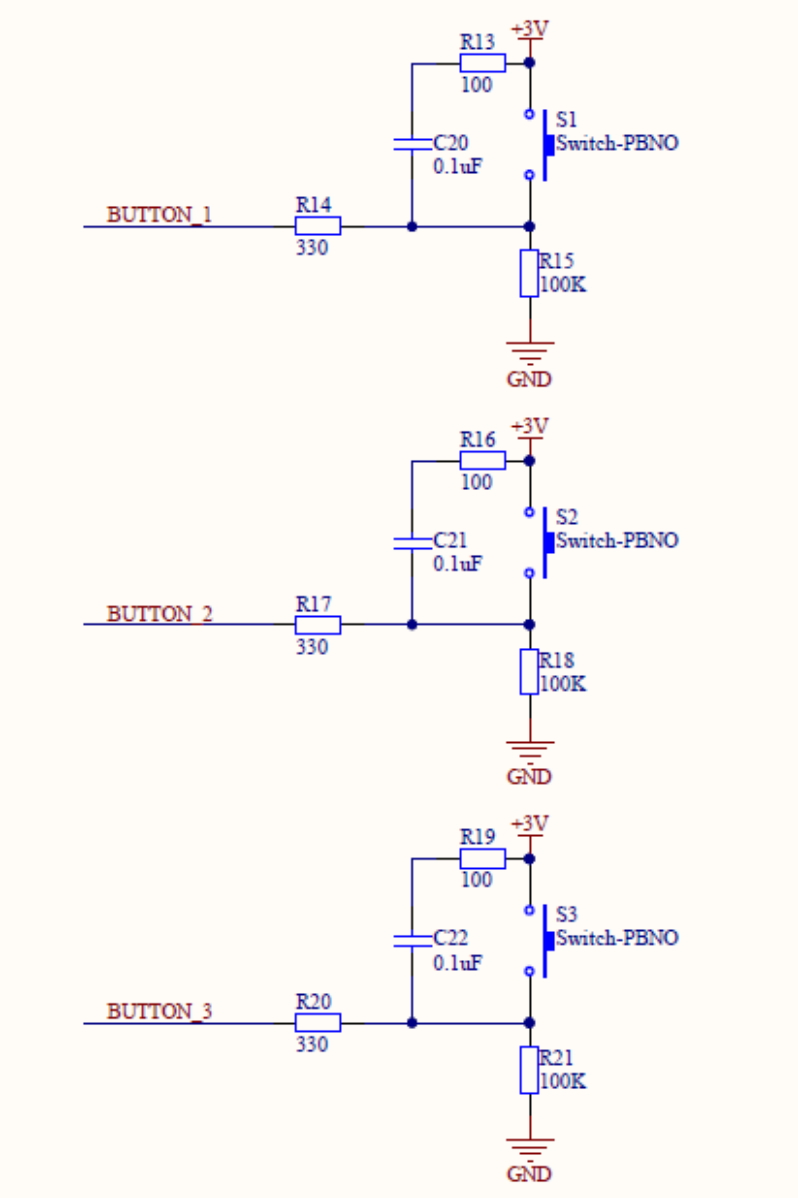


Рис. 3.11

Для коректної роботи нашого контролера NRF51822QF нам знадобиться стандартна обв’язка для нього (рис. 3.12). Для цього нам знадобляться два кварци (Y1, Y2). Кварц Y2 16MHz з якого утворюється тактова частота ядра, а Y1 потрібен для роботи годинників реального часу. Для цього нам потрібна частота 32,768kHz. Кварци із такою частотою використовують для тактування годинників реального часу, так як шляхом ділення на 2^n (де n – ціле число у даному випадку 15), ми отримаємо частоту 1 Гц, що відповідає періоду 1 с. Таким чином внутрішній апаратний лічильник годинника реального часу інкрементується кожної секунди, що і потрібно для будь-якого годинника.

Для того щоб наша антена ble – модуля була передавачем, потрібно правильно її узгодити. Для цього ми використовуємо обв’язку з конденсаторів (C11, C13, C14) та дроселів (L2, L3, L4).

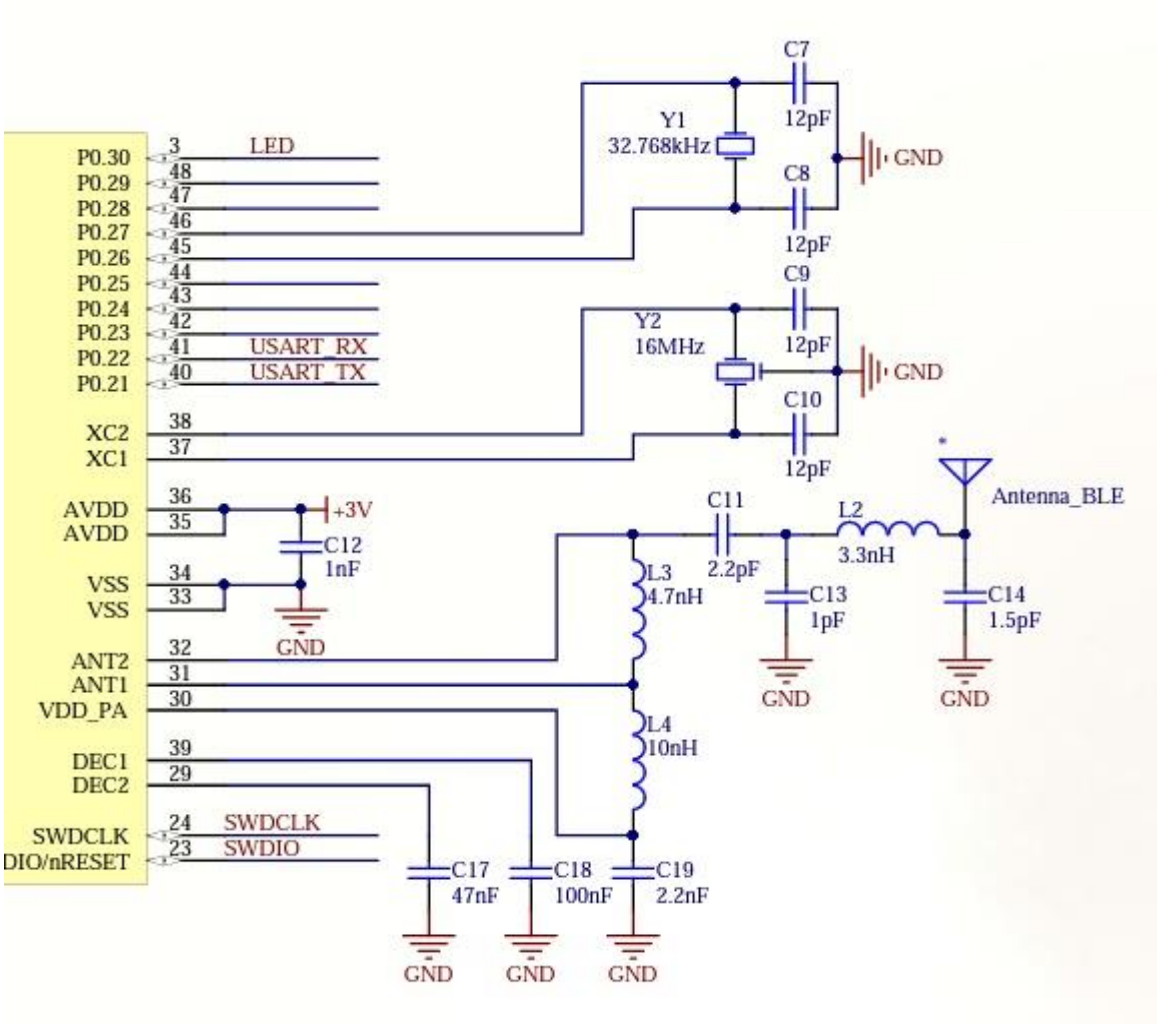


Рис. 3.12

ВИСНОВКИ

- В ході виконання дипломної роботи розроблений програмно-апаратний комплекс для вимірювання величини лінійного зміщення
- На базі розробленої електроніки створено прототип цифрового штангенциркуля з наступною функціональністю:
    - вимірювання лінійних розмірів в інтервалі від 0 до 250 мм з точністю 0,02 мм
    - графічне відображення результатів вимірювання
    - підтримка протоколу BLE 5.0 для дистанційного керування та отримання результатів вимірювання.
- Система пройшла успішну практичну апробацію

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] ADP1710/ADP1711 Техническая документация [Електронний ресурс] https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADP1710_1711.pdf

[2] NRF51822 Техническая документация [Електронний ресурс] http://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF51822_PS_v3.1.pdf

[3] L6924D Техническая документация [Електронний ресурс] https://www.st.com/resource/en/datasheet/l6924d.pdf

[4] ADP1111 Техническая документация [Електронний ресурс] https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADP1111.pdf

[5] В.Б. Топильский. 2006. Схемотехника измерительных устройств. Лаборатория Базовых Знаний, 2006.

[6] А. Дж. Пейтон, В. Волш. Аналоговая электроника на операционных усилителях — М.: БИНОМ, 1994 — 352 с., 74 с.

[7] М.С. Голубцов. А. Кириченкова. Микроконтроллеры AVR: от простого к сложному. Изд. 2-е, испр. и доп. – М. СОЛОН-Пресс, 2004. – 304с.

[8] Ю.А. Шпак. Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров. Пресс.

[9] Ю.Джозеф Ядро Cortex компании ARM. Полное руководство. 2012 г. – 553с.

[10] Е. И. Манаев Основы радиоэлектроники М.: Радио и связь, 1990. - 512 с

[11] Marcel J.M: Analog-to-Digital Conversion, July 24, 2010, Pelgrom

[12] Saeideh Shirinzadeh, Rolf Drechsler: In-Memory Computing: Synthesis and Optimization 1st ed. 2020 Edition

[13] Федорков Б. Г., Телец В. А: Микросхемы ЦАП и АЦП. Функционирование, параметры, применение, 1990

[14] Colin Percy May: Analog Electronics Using Spice: An Interactive Exploration Springer International Publishing, 10 mar. 2020

[15] Dubrova, Elena: Fault-Tolerant Design, 2013

[16] Pederson, Donald O., Mayaram, Kartikeya: Analog Integrated Circuits for Communication, 2008

[17] Agrawal, Dharma Prakash: Embedded Sensor Systems, 2017

[18] Analog to Digital Conversion, Data Acquisition and Control [Електронний ресурс]. URL:http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Volume1/E-Book/C14_ADCdataAcquisition.htm

[19] Wang, K.C.: Embedded and Real-Time Operating Systems, 2017

[20] Блейхут Р: Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов, 1989

[21] Hideto Hidaka: Embedded Flash Memory for Embedded Systems: Technology, Design for Sub-systems, and Innovations, 2018

[22] Posser, Gracieli, Sapatnekar, Sachin S., Reis, Ricardo: Electromigration Inside Logic Cells, 2017

[23] Юрий Магда: Программирование и отладка C/C++ приложений для микроконтроллеров ARM, 2017, ДМК Пресс

[24] Гнатек Ю. Р.: Справочник по цифроаналоговым и аналогоцифровым преобразователям, 1982

[25] Бахтиаров Г. Д., Малинин В. В., Школин В. П: Аналого-цифровые преобразователи. Проектирование электронной аппаратуры на интегральных микросхемах, 1980

[26] T. L. Singal: Analog and digital communication, 2012

[27] Rudy J. van de Plassche: CMOS Integrated Analog-to-Digital and Digital-to-Analog Converters 1994

[28] Behzad Razavi: Principles of Data Conversion System Design 1995

[29] Кестер У: Аналого-цифровое преобразование, 2007, Техносфера

[30] Глинкин Е.И., Глинкин М.Е.: Технология аналого-цифровых преобразователей, 2008

В загальному вигляді схема NRF51822QFAA має вигляд:

