

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

(повна назва інституту/факультету)

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

“ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності: 153 мікро- та наносистемна техніка  
(код і назва)

на тему: “Інтерактивний лабораторний комплекс з курсу “Мікроелектронні інформаційні сенсорні системи””

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи ДП-81МП  
(шифр групи)

Погребенний Олександр Андрійович  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник проф., к.т.н., доц. Орлов А.Т.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з нормоконтролю проф., к.т.н., доц. Орлов А.Т.

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н. Діденко Ю.В. \_\_\_\_\_

Рецензент  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань. Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2019 року

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота налічує 80 сторінки, 3 розділи, 32 ілюстрацій, 24 таблиці та 10 джерел.

Об'єктом дослідження є підходи до використання сучасних вимірювальних та інформаційних технологій у промисловості та навчанні. Предметом дослідження є розподілено-вимірювальна система з центральним сервером.

Метою роботи є аналіз підходів до створення автоматичних та інтерактивних систем вимірювання, та, за результатами аналізу, розробка такої системи.

Перший розділ містить теоретичні відомості, які розкривають принципи роботи функціональними частин, деяких протоколів та схем, та висновки щодо їх застосування у розподілено-вимірюючої системі. Другий розділ містить практичну частину з створення системи, дослідження деяких її властивостей, та висновки щодо виконання роботи. Третій розділ містить дослідження ринку, переваг та недоліків перед конкурентами.

Результатом роботи є розподілено-вимірююча система, яка дозволяє абстрагуватись від місця знаходження об'єкту дослідження оптимізувати, автоматизувати багато процесів, вибрати довільний час проведення дослідження, що дуже затребувано у сучасному світі.

РОЗПОДІЛЕНА ВИМІРЮВАЛЬНО-КЕРУЮЧА СИСТЕМА, INTERNET OF THINGS.

## ABSTRACT

This paper consists of 80 pages, 3 sections, 32 illustrations, 24 tables and 10 references.

The object of research is approaches to the use of modern measurement and information technologies in industry and training. The subject of the study is a centralized distributed-measuring system.

The aim of the work is to analyze approaches to the creation of automatic and interactive measurement systems and, according to the results of the analysis, to develop such a system.

The first section contains theoretical information that reveals the principles of operation of functional parts, some protocols and circuits, and conclusions about their application in the distribution and measurement system. The second section contains a practical part on creating a system, exploring some of its properties, and making conclusions about how it works. The third section contains market research, advantages and disadvantages over competitors.

The result is a distributed measurement system that allows you to abstract from the location of the object of study to optimize, automate many processes, to choose an arbitrary time for the study, which is very popular in the modern world.

DISTRIBUTED MEASURING-MAKING SYSTEM, INTERNET OF THINGS,.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ТЕРМІНІВ</b>	7
<b>ВСТУП</b>	8
<b>1.ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ</b>	9
1.1 Розподілена вимірювальна-керуюча система	10
1.2 Комп'ютерна мережа та сокети	11
1.3 Промисловий Internet of Things	16
1.4 Arduino	18
1.5 Інтерфейс I2C	20
1.6 Вибір операційного підсилювача	24
1.7 Схеми джерел струму	29
1.8 ЦАП	34
1.9 Ключі на польових транзисторах	45
Висновки до розділу 1	48
<b>2. РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ ВИМІРЮВАЛЬНО-КЕРУЮЧОЇ СИСТЕМИ</b>	49
2.1 Постановка завдання	49
2.2 Джерело струму	50
2.3 Підключення ЦАП	50
2.4 Рідкокристалічний дисплей	52
2.5 Передача даних	57
Висновки до розділу 2	60
<b>3. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ</b>	61
3.1 Опис ідеї проекту	61
3.2 Технологічний аудит ідеї проекту	62
3.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	63
3.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	68
3.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	71
Висновки до розділу 3	73
<b>ВИСНОВКИ</b>	73
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ</b>	75

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ТЕРМІНІВ

ЦАП - цифро-аналоговий перетворювач

I2C - Inter-Integrated Circuit

## ВСТУП

**Актуальність роботи** зумовлена швидким зростанням інтернет технологій, у освіті, промисловості та медицині. Значна перевага над традиційними методиками виміру розподілених, та віддалених систем вимірювання. Такі системи дозволяють абстрагуватися від місця знаходження цільового об'єкту дослідження та часу проведення дослідження.

**Мета і завдання дослідження** є аналіз підходів до створення автоматичних та інтерактивних систем вимірювання, та, за результатами аналізу, розробка такої системи.

*Об'єктом дослідження* є модель використання інформаційно-комунікаційних технологій у навчальному процесі та промисловості.

*Предметом дослідження* є розподілена інтерактивна вимірювально-керуюча система з центральним сервером.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що буде отримано розподілено-вимірююча система, яка дозволяє абстрагуватись від місця знаходження об'єкту дослідження оптимізувати, автоматизувати багато процесів, вибрати довільний час проведення дослідження, що дуже затребувано у сучасному світі.

.

## 1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Чи інтегративний етап - кінець 80-хх по теперішній час. Використання в викладанні двох найважливіших нововведень - мультимедіа та Інтернет. Переваги такого підходу полягають в наступному: навчання може проходити в різноманітних місцях і навчальних закладах; ті, яких навчають отримують можливість займатися на різних рівнях, надається можливість повторення незалежно від інших учнів для підкріплення різних умінь і навичок.

Інформатизація вітчизняної освіти почалася в 1985 році, після державної реформи освіти 1984 року і введення в її рамках нового навчального предмета «Основи інформатики та обчислювальної техніки». Навесні 1985-го було прийнято постанову «Про заходи щодо забезпечення комп'ютерної грамотності учнів навчальних закладів та широкого впровадження електронно-обчислювальної техніки в навчальний процес».

З появою в процесі утворення такої складової, як інформатизація, стало доцільним переглянути його завдання. Основними з них є:

- забезпечення безперервності і доступності у навчанні;
- підвищення якості підготовки фахівців за рахунок сучасних інформаційних технологій;
- інтеграція різних видів освітньої діяльності (навчальної, дослідницької і т.д.);
- підвищення творчої та інтелектуальної складових навчальної діяльності, за рахунок застосування активних методів навчання ;
- розробка інформаційних технологій дистанційного навчання;
- вдосконалення програмно-методичного забезпечення навчального процесу.
- адаптація інформаційних технологій навчання до особливостей учня;

А також найважливішим завданням інформатизація сфери освіти має стати випередження інформатизації інших галузей людської діяльності, оскільки знання

і навички, отримані в процесі освіти, лежать в основі всіх видів діяльності людини.

### 1.1 Розподілена вимірювально-керуюча система

Коллективне використання вимірювальних і обчислювальних ресурсів при проведенні дорогих експериментів на розподілених автоматизованих дослідних установках в природничо-наукових галузях знань вже давно стало практикою.

Представлена в даній роботі розподілена контрольно-вимірювальна система - це, по-перше, зручна технічна можливість отримати оперативний доступ до вимірювального устаткування, яке розташоване на певній відстані від дослідника (оператора); а, по-друге, можливість колективного використання як інформаційних, так і технічних ресурсів підприємства (протоколи і результати вимірювань, різноманітні вимірювальні модулі з уніфікованим інтерфейсом, функціональні набори контрольних датчиків і первинних перетворювачів).

Структурна схема розподіленої контрольно-вимірювальної системи (далі - вимірювальна система) представлена на рис. 1.



Рисунок 1 - Схема розподіленої вимірювально-керуючої системи

У розглянутій вимірювальній системі кожен з вимірювальних модулів разом з відповідними датчиками і пристроями в загальному випадку розташовується безпосередньо на випробувальному стенді в конкретних місцях вимірювань, що сприяє високій точності і достовірності вимірювальних даних (оскільки короткі кабелі від первинних датчиків до вимірювальних модулів роблять результати

вимірювань менш чутливими до перешкод і, таким чином, більш стабільними і точними).

Внаслідок його приєднання до локальної мережі (в тому числі до єдиної мережі підприємства) з'являється можливість віддаленого, в тому числі колективного, доступу до всіх вимірювальних ресурсів розглядається просторово-розподіленої вимірювальної системи.

У разі необхідності кожен з вимірювальних модулів може бути підключений до локальної мережі за допомогою бездротових каналів зв'язку. Завдяки цьому з'являється можливість установки вимірювальних модулів на рухомих і обертових об'єктах, що розширює сферу застосування даної вимірювальної системи.

Важливе значення представленої вимірювальної системи - наявність єдиної бази даних, що зберігає вимірювальні протоколи випробувань кожного функціонального вузла. Таке рішення дозволяє здійснювати колективний доступ до інформаційних ресурсів випробувального центру підприємства широкому колу зацікавлених осіб, причому в будь-який зручний для них час.

У розглянутій вимірювальної системі є також ряд цікавих рішень, підвищують ефективність і зручність її експлуатації. Наприклад, реалізація в програмному забезпеченні вимірювальної системи так званих шаблонів профілів експерименту, т. е. заздалегідь підготовлених і вже випробуваних наборів вимірювальних модулів разом з налаштованими режимами їх роботи, апаратними діапазонами і т. п., а також відповідними алгоритмами обробки поста вимірювальних даних. Це дозволяє оператору економити час і зусилля в процесі роботи з вимірювальною системою, робити менше помилок, а також використовувати для виконання даних завдань менш кваліфікований персонал.

## 1.2 Комп'ютерна мережа та сокети

Комп'ютерна мережа - це цифрова мережа телекомунікацій, що дозволяє вузлам обмінюватися цифровими даними. У комп'ютерній мережі пристрої

спілкуються один з одним через з'єднання між вузлами. Данні пересилаються через кабельні носії (наприклад, волоконно-оптичний кабель або кабель) або бездротові носії (наприклад, WiFi) між вузлами. Вузлами можуть бути хости, такі як персональний комп'ютер, сервер, мережеве обладнання та телефони.

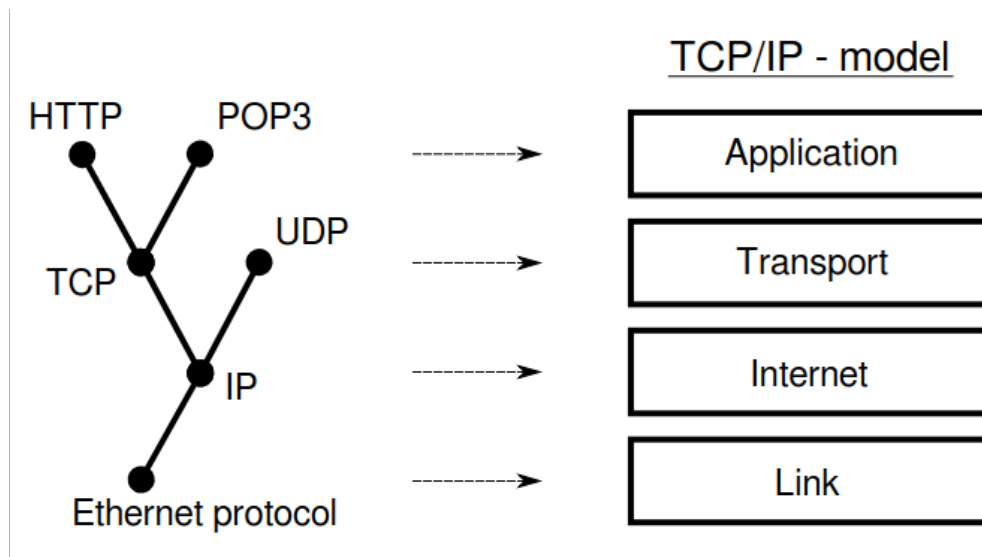


Рисунок 2 - Спрощена модель OSI

Для перших версій, таких як Ethernet v1.0 та Ethernet v2.0, в якості середовища використовувався коаксіальний кабель, потім почали використовувати оптичний кабель та виту пару. Причиною переходу на оптичний кабель були високі втрати енергії на великих довжинах кабелю. Спосіб контролю доступу (для коаксіальних кабельних мереж): множинний доступ Carrier Detect (CSMA / CD) з виявленням зіткнень, частотою кадрів 10 Мбіт / с, розміром кадру від 64 до 1518 байт, описом методу кодування. Режим роботи напівдуплексний, тобто вузол не може одночасно передавати і приймати інформацію. Режим роботи напівдуплексний, тобто вузли не можуть одночасно надсилати та отримувати інформацію. Кількість вузлів в одному сегменті мережі обмежено 1024 робочими станціями (специфікації фізичного рівня можуть встановлювати більш жорсткі обмеження, наприклад, не більше 30 робочих станцій можна підключити до тонкого коаксіального сегмента), але для товстих коаксіальних сегментів з точки зору цього, максимум не більше 100, але через напівдуплексний режим мережа,

створена в єдиному мережевому сегменті, стає неефективною до досягнення межі щодо кількості вузлів.

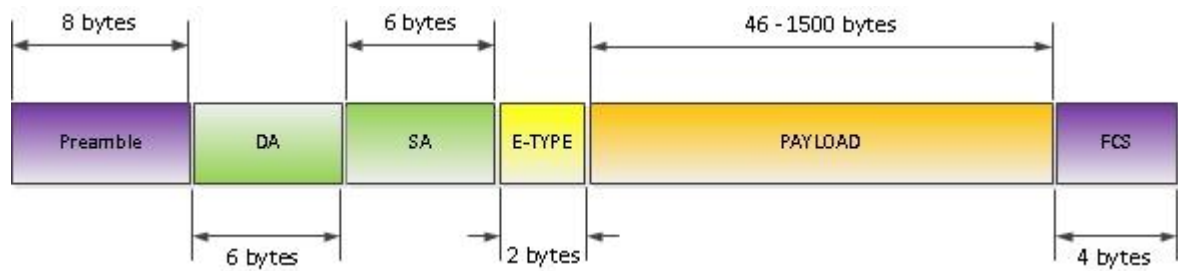


Рисунок 3 - Ethernet кадр

При розробці стандарту Ethernet очікувалося, що в кожному мережевому сегменті (як і вбудований мережевий інтерфейс) повинні зашити унікальні шість байтів (MAC-адреса) під час виробничого процесу. Цей номер використовується для ідентифікації відправника та одержувача кадру та передбачає, що адміністратору не потрібно налаштовувати MAC-адресу, коли в мережі з'являється новий комп'ютер (або інший пристрій, здатний підключитися до мережі). Унікальність MAC-адреси досягається тим, що кожен виробник отримує 16 мільйонів (2<sup>24</sup>) адрес в комітеті з реєстрації IEEE і може запитувати нові діапазони, коли адреси вичерпані. Так ви можете визначити виробника за трьома байтами MAC-адреси. Є таблиці, за допомогою яких можна визначити виробника за MAC-адресою. Зокрема, вони включені до програми arpalert. Wi-Fi також важливий у промисловому світі Інтернету. Wi-Fi - це технологія бездротової локальної мережі, а її обладнання базується на стандарті IEEE 802.11. Для промислового використання технологія Wi-Fi доступна лише для кількох постачальників. Таким чином, Siemens Automation & Drives надає сумісні з IEEE 802.11g-рішення для своїх SIMATIC-контролерів в 2,4 ГГц вільному діапазоні ISM і забезпечує максимальну швидкість передачі 54 Мбіт / с. Ці технології можуть застосовуватися для управління рухомими об'єктами та логістикою складських приміщень та ситуаціями, коли провідний Ethernet з певних причин неможливо прокласти. Пристрої Wi-Fi застосовуються у компаніях через високий захист від шуму, що призвело до їх використання у компаніях з великими металевими

конструкціями. У свою чергу, пристрої Wi-Fi не заважають вузькосмуговим радіосигналам. В даний час технології широко застосовуються у віддаленому або небезпечному виробництві, де пошук операторів принесе більшу небезпеку або значні труднощі. Наприклад, для завдань з телеметрії в нафтогазових компаніях, а також для контролю за переміщенням людей і транспортних засобів у шахтах і шахтах для визначення місця знаходження людей в надзвичайних ситуаціях.

Сокет - назва програмного інтерфейсу, який використовується для обміну даними між процесами. Процеси в обміні можуть виконуватися на комп'ютері та на різних комп'ютерах, підключених через мережу. Сокет - це абстрактний об'єкт, який є кінцевою точкою з'єднання.

Ми повинні розрізнити клієнтські сокети та серверні сокети. Клієнтські сокети більш-менш порівнянні з кінцевими телефонами, в той час як серверні можна прирівняти до комутаторів. Клієнтські програми (наприклад, браузер) використовують лише клієнтські сокети, тоді як серверні програми (наприклад, веб-сервери, на які браузер надсилає запити) використовують як клієнтські сокети, так і серверні.

Інтерфейс сокета вперше з'явився в BSD Unix. Програмний інтерфейс розетки описаний у стандартній POSIX.1 і так чи інакше сумісний з усіма сучасними операційними системами.

Кожен процес може створити прослуховувальний сокет (серверний сокет) і зв'язати його з портом операційної системи (непривілейовані процеси UNIX не можуть використовувати порти менше 1024). Процес прослуховування зазвичай активується під час циклу очікування, тобто коли встановлено нове з'єднання. Це підтримує можливість перевірити з'єднання в цей час, встановити час очікування операції тощо.

Кожен сокет має свою адресу. Операційна система UNIX може підтримувати різні типи адрес, але вимагає INET-адреси та UNIX-адреси. Якщо сокет пов'язаний з UNIX-адресою, він створить спеціальний файл (файл сокета)

через вказаний шлях, через який локальний процес може бути повідомлений при читанні / записі з нього. Сокети INET доступні в мережі та потребують призначення порту.

Зазвичай клієнт явно підключається до слухача, після чого будь-яка операція читання або запису через його дескриптор файлів передасть дані між клієнтом і сервером.

Сокети є основою для будь-якого спілкування в Інтернеті від текстових повідомлень до онлайн-ігор.

На практиці сокет зазвичай вказує на сокет в мережі Інтернет(IP-адреси) (сокет можна назвати Інтернет-сокетами), і, особливо, як протокол управління передачею(TCP) з'єднується один з одним. У цьому випадку передбачається, що сокет асоціюється з конкретною адресою сокета (тобто IP-адресою та номером порту локального вузла), і існує відповідна адреса сокета. На зовнішньому вузлі (інший вузол) з пов'язаним сокетом, який використовується зовнішнім процесом. Асоціація сокета з адресою сокета називається посиленням.

Зауважте, що хоча локальний процес може спілкуватися із зовнішнім процесом, надсилаючи або отримуючи дані в або із зовнішнього сокета, він не може сам отримати доступ до іншого сокета або використовувати зовнішній сокет. Сокети обробляються всередині зовнішніх вузлів. Наприклад, у зв'язку між 10.20.30.40.4444 та 50.60.70.80:8888 (локальна IP-адреса: локальний порт, зовнішня IP-адреса: зовнішній порт), розетки з обох кінців відповідають внутрішньому представленню "протоколу стека" . Цей вузол вони називаються дескрипторами цифрових сокетів, 317 з одного боку і 922 з іншого. Процес у вузлі 10.20.30.40 може зв'язатися з вузлом 50.60.70.80 на порт 8888 (попросити стек протоколу створити сокет для зв'язку з цією адресою), і як тільки він створить сокет і отримає сокет ідентифікатор (317) може спілкуватися через цей сокет за допомогою дескриптора (317). Стек протоколів передає дані на вузол 50.60.70.80 і з вузла 50.60.70.80 на порт 8888. Однак процес у вузлі 10.20.30.40 не може запитувати посилення на основі зовнішнього контролера сокета (наприклад,

"socket 922" або "сокети на вузлах 922" (50.60.70.80 "), оскільки вони знаходяться всередині іншого вузла і не можуть бути використані стеком протоколу у вузлі 10.20.30.40.

У стандартних протоколах TCP та UDP Internet "адреса сокета" - це комбінація IP-адреси та номера порту, подібна до одного кінця телефонного з'єднання, комбінація телефонного номера та певного розширення. Сокет не повинен мати адресу джерела, наприклад, лише для передачі даних, але якщо програма асоціює сокет з адресою джерела, він може використовувати цей сокет для отримання даних, надісланих на цю адресу. Виходячи з цієї адреси, Інтернет-сокет передає пакет вхідних даних у відповідний процес запиту.

### 1.3 Промисловий Internet of Things

Інтернет речей (IoT) - це система взаємопов'язаних обчислювальних пристроїв, механічних і цифрових машин, предметів, тварин або людей, яким надаються унікальні ідентифікатори (UID) та можливість передавати дані по мережі без необхідності людини від людини. або взаємодія людини з комп'ютером.

Визначення Інтернету речей розвинулося завдяки зближенню декількох технологій: аналітики в режимі реального часу, машинного навчання, товарних датчиків та вбудованих систем. Традиційні галузі вбудованих систем, бездротових сенсорних мереж, систем управління, автоматизації (включаючи домашню та будівельну автоматику) та інші - сприяють розбудові мережі Інтернет речей. На споживчому ринку технологія IoT є найбільш синонімом продуктів, що відносяться до поняття "розумного дому", що охоплюють пристрої та прилади (такі як освітлювальні прилади, термостати, системи захисту будинку та камери та інші побутові прилади), які підтримують одну або більш поширені екосистеми, і ними можна керувати через пристрої, пов'язані з цією екосистемою, такі як смартфони та смарт-колонки.

Існує низка серйозних занепокоєнь щодо небезпеки зростання IoT, особливо у сфері конфіденційності та безпеки.

Принцип роботи технології полягає в наступному: спочатку встановлюються датчики, виконавчі механізми, контролери та людино-машинні інтерфейси на ключові частини обладнання, після чого здійснюється збір інформації, яка згодом дозволяє компанії придбати об'єктивні і точні дані про стан підприємства. Оброблені дані доставляються в усі відділи підприємства, що допомагає налагодити взаємодію між співробітниками різних підрозділів і приймати обґрунтовані рішення.

Отримана інформація може бути використана для запобігання позапланових простоїв, поломок устаткування, скорочення позапланового техобслуговування і збоїв в управлінні ланцюгами поставок, тим самим дозволяючи підприємству функціонувати більш ефективно.

При обробці величезного масиву неструктурованих даних їх фільтрація і адекватна інтерпретація є пріоритетним завданням для підприємств. В даному контексті особливого значення набуває коректне подання інформації в зрозумілому користувачеві вигляді, для чого сьогодні на ринку представлені передові аналітичні платформи, призначені для збору, зберігання і аналізу даних про технологічні процеси і події в реальному часі.

Широкий набір застосувань для пристроїв IoT часто поділяється на споживчий, комерційний, промисловий та інфраструктурний.

Промисловий інтернет речей кардинально змінює всю економічну модель взаємодії "постачальник - споживач". Це дозволяє:

- автоматизувати процес моніторингу та управління життєвим циклом устаткування;
- організувати ефективні самооптимізуючі ланцюжки від підприємств - постачальників до підприємств - кінцевих споживачів;
- перейти до моделей «економіки спільного використання» і багато іншого.

У найбільш просунутих випадках індустриальний Інтернет речей дозволяє не тільки підвищити якість технічної підтримки обладнання з використанням

розвинених засобів телеметрії, а й забезпечити перехід до нової бізнес-моделі його експлуатації, коли обладнання оплачується замовником за фактом використання його функцій. Впровадження мережевої взаємодії між машинами, обладнанням, будівлями і інформаційними системами, можливість здійснювати моніторинг і аналіз навколишнього середовища, процесу виробництва та власного стану в режимі реального часу, передавача функції управління і прийняття рішень інтелектуальних систем призводять до зміни «парадигми» технологічного розвитку, званої також «четвертої промисловою революцією».

#### 1.4 Arduino

Arduino - апаратне забезпечення з відкритим кодом. Конструкції посилань на апаратуру поширюються за ліцензією Creative Commons Attribution Share-Alike 2.5 та доступні на веб-сайті Arduino. Макети та виробничі файли для деяких версій обладнання також доступні.

Хоча конструкції апаратних та програмних засобів вільно доступні за ліцензіями, розробники вимагають, щоб ім'я Arduino було ексклюзивним для офіційного продукту і не використовувалось для похідних робіт без дозволу. В офіційному документі про політику щодо використання назви Ардуїно підкреслюється, що проект відкритий для включення роботи в офіційний продукт інших. Кілька комерційно випущених продуктів Arduino уникали назви проекту, використовуючи різні назви, що закінчуються на -duino.

Мікроконтролери Arduino заздалегідь запрограмовані з boot loader, що спрощує завантаження програм на флеш-пам'ять. Програмний код завантажуються програмним кодом через послідовне підключення до іншого комп'ютера. Поточні плати Arduino програмуються за допомогою універсальної послідовної шини (USB), реалізованої за допомогою мікросхем USB-послідовного адаптера, таких як FTDI FT232. При використанні з традиційними інструментами мікроконтролерів замість Arduino IDE використовується стандартне програмування в системному програмуванні (ISP) AVR. Мова програмування

Ардуіно є реалізацією схожою апаратної платформи "Wiring", заснованої на середовищі програмування мультимедіа "Processing". Програма для обладнання Arduino може бути написана будь-якою мовою програмування з компіляторами, які виробляють двійковий машинний код для цільового процесора. Atmel забезпечує середовище розробки для 8-бітних AVR та 32-розрядних мікроконтролерів на базі ARM Cortex-M: AVR Studio (старший) та Atmel Studio (новіший)

Існує безліч схожих на Arduino пристроїв, призначених для програмування різних апаратних засобів: Netmedia's BX-24, Phidgets, Parallax Basic Stamp, MIT's Handyboard і багато інших. Ці пристрої мають схожу функціональність та також виконують функції які дозволяють позбавити користувача від необхідності заглиблюватися в принципи роботи мікроконтролерів, надавши йому простий інструмент для їх програмування. Arduino значно спрощує процес роботи з мікроконтролерами, а також має ряд переваг та функції для викладачів та студентів:

- Кросплатформеність. Програмне забезпечення Arduino може працювати на всіх популярних операційних системах: Windows, Mac OS і Linux. Аналоги ж більше орієнтовані на роботу тільки в Windows.
- Програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом, та завдяки цьому досвідчені програмісти можуть змінювати і доповнювати його. Завдяки тому, що мова Arduino заснована AVR C, просунуті користувачі, можуть легко перейти з мови Arduino на C, розширювати мову за допомогою C ++ бібліотек або вставляти ділянки AVR-C коду безпосередньо в програми Arduino.
- Просте і зручне середовище програмування. Досить гнучке для просунутих користувачів середовище програмування, в той же час просте і зрозуміле для початківців. Також воно може бути зручно для викладачів, бо засноване на середовищі програмування Processing. В цей же час, студенти, які вивчають програмування в середовищі Processing, легко можуть освоїти Arduino.

- Розширюване відкрите апаратне забезпечення. Завдяки тому, що всі схеми модулів Ардуіно опубліковані під ліцензією Creative Commons, досвідчені інженери і розробники можуть створювати свої версії пристроїв на основі існуючих. Пристрої Arduino побудовані на базі мікроконтролерів Atmel ATmega8 і ATmega168. І навіть звичайні користувачі можуть збирати дослідні зразки Ардуіно для кращого розуміння принципів їх роботи і економії коштів.
- Низька вартість. Плати Arduino низьку вартість, якщо порівнювати з схожими платформами, а готові модулі Arduino коштують не дорожче 50 \$. Також існує можливість зібрати плату вручну, що може максимально заощадити кошти.

## 1.5 Інтерфейс I2C

Інтерфейс I2C є широко поширеним і популярним стандартом передачі даних між пристроями. Даний інтерфейс підтримують безліч різних датчиків і мікросхем, найбільш відомі це мікросхеми EEPROM пам'яті серії 24сXX. Для передачі даних за допомогою лише двох ліній, які представляють собою шину даних, причому на одну шину можна підключати кілька різних пристроїв. У цій статті я приведу опис інтерфейсу і реалізацію на програмному рівні.

В інтерфейсі використовуються два дроти, це лінія тактирования SCL, і лінія передачі даних SDA, які разом утворюють шину даних. Пристрої, підключені до шини підрозділяються на ведучого і веденого. Ведучий ініціалізує процес передачі даних і видає тактові імпульси на лінію SCL, ведений приймає команди / дані, а також видає дані за запитом ведучого. Лінії SDA і SCL двонаправлені, пристрої підключаються до шини повинні мати висновки перенастроювати на вхід і вихід. Причому тип виходу повинен бути з відкритим колектором або відкритим стоком, в зв'язку з чим, обидві лінії SDA і SCL через резистори підтягуються до позитивного полюса джерела живлення. На наступній картинці приведена схема підключення інтерфейсу I2C:

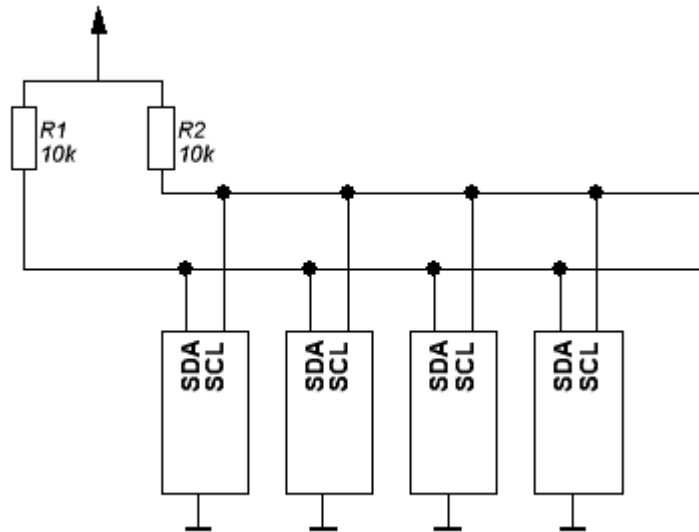


Рисунок 4 - Схема підключення інтерфейсу I2C

У разі використання мікроконтролера, для установки лог. 1 на лінії, досить переналаштувати порт мікроконтролера на вхід, при цьому резистор "підтягне" лінію до високого логічного рівня, подача високого логічного рівня з порту мікроконтролера на лінію не допускається. Для установки лог. 0 на лінії, порт перенастраивається на вихід, в вихідну засувку заздалегідь записується значення 0, при цьому лінія "притискається" до низького логічного рівня.

В інтерфейсі передбачена програмна адресація пристроїв підключених до шини, найбільш поширена довжина адреси в 7 біт, теоретично це дозволяє підключати на шину до 127 пристроїв, але частина адрес по специфікації зарезервовані і не можуть використовуватися розробниками. Кожен пристрій має свою унікальну адресу, який закладений виробником і вказано в технічній документації. Адреса пристрою може бути фіксованим, або з можливістю апаратної настройки, в цьому випадку пристрій має додаткові входи, в залежності від рівня напруги на входах (високий або низький), можна отримати різні адреси. Зазвичай кількість входів варіюється від 1-го до 3-х, які задають значення певних бітів 7-бітного адреси. Апаратна настройка адреси передбачена для можливості підключення декількох однотипних пристроїв на одну шину.

Також інтерфейс передбачає більш рідкісну 10-бітну адресацію, під яку зарезервованій 7-бітову адресу 11110XX (XX-залежать від значення адреси), в цьому випадку спочатку віддається зарезервованій адресу, в якому два останніх біта є старші біти 10-бітного адреси, потім передаються молодші 8 біт адреси. При використанні даної адресації на шину можна підключати більше 1000 пристроїв.

Кожен сеанс передачі даних починається зі спеціального умови, званого "Старт". У початковому стані, коли шина вільна, обидві лінії SDA і SCL підтягнуті до високого логічного рівня, умова "Старт" має на увазі перемикання лінії SDA з високого логічного рівня на низький, в той час коли на лінії SCL встановлений високий рівень.

Аналогічно, сеанс передачі даних завершується спеціальним умовою "Стоп", це перемикання лінії SDA з низького логічного рівня на високий, при високому рівні на лінії SCL. Дані умови генерує провідний (мікроконтролер).

Виходячи з умов "Старт" і "Стоп", під час передачі даних лінія SDA може перемикатися тільки при низькому рівні на лінії SCL, тобто установка нових даних на лінії SDA можлива тільки після спаду рівня на SCL. Протягом імпульсу тактирования (високий рівень на SCL), стан лінії SDA не повинно змінюватися, в цей час виконується зчитування даних на SDA.

Дані по інтерфейсу передаються побайтно, старшим бітом вперед, за кожним переданим байтом (8 біт) слід біт підтвердження, пристрій (головний або підпорядкований) прийняло байт даних, встановлює низький рівень на лінії SDA на наступному тактовом імпульсі SCL, тим самим підтвержуючи отримання байта. В цей час передавальний пристрій має опитувати лінію SDA, чекаючи відповідь про успішне отримання байта. Нижче на зображенні представлена діаграма передачі даних по шині I2C:

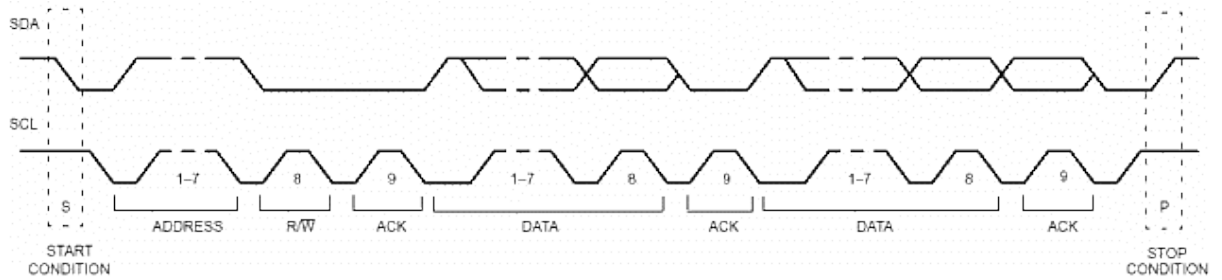


Рисунок 5 - Діаграма передачі даних по I2C

Спочатку передається байт з 7-бітовим адресою веденого, значення 8-го біта (R / W) визначає напрямок передачі даних, нульове значення відповідає запису даних, тобто передача від ведучого до веденого. Якщо біт напрямку дорівнює 1, то виконується читання даних з веденого.

Ведений порівнює передана адреса зі своїм і при збігу відгукується, встановлюючи низький рівень на лінії SDA (біт підтвердження). Ведучий, отримавши підтвердження, починає передавати байти з даними, або приймає їх, в залежності від напрямку передачі.

Після передачі адреси веденого, передається адреса регістра, над яким будуть проводитися операції читання / запису. Кожен пристрій має свій набір внутрішніх регістрів, призначення яких вказано в технічній документації.

Запис одного байта складається з наступної послідовності: умова "Старт" - адреса веденого (біт R / W скинутий) - адреса внутрішнього регістра веденого - дані (1 байт) - умова "Стоп". Запис декількох байтів практично нічим не відрізняється, після відправки першого байта даних, передаються інші байти, сеанс закінчується умовою "Стоп". При цьому дані записуються в регістри послідовно, починаючи з заданого адреси, зазвичай ведений виконує автоматичний інкремент адреси внутрішніх регістрів.

Для читання одного байта даних, необхідно спочатку передати адресу веденого і адреса необхідного регістра, при цьому біт напрямку повинен бути скинутий на запис, після чого повторно передається умова "Старт", потім знову адреса веденого, в цей раз зі встановленим бітом напрямки на читання. Далі виконується прийом байта даних від веденого, для закінчення сеансу передачі

ведучий не видає підтвердження, тобто на лінії SDA залишається високий рівень на час біта підтвердження, далі йде умова "Стоп". Читання кількох байтів виглядає аналогічно, провідний видає підтвердження після кожного прийнятого байта, за винятком останнього байта. Як і в випадку записи, ведений виконує автоматичний інкремент адреси, починаючи з заданого.

Під час сеансу передачі даних ведений може примусово утримувати на лінії SCL низький рівень, наприклад, якщо йому потрібен час на обробку даних. Ведучий "відпускаючи" лінію SCL повинен перевірити перехід від низького логічного рівня до високого, якщо цього не відбулося, то необхідно очікувати переходу. Таким чином, ведучий не має абсолютного права на управління лінією SCL.

Інтерфейс також передбачає режим конкуренції, коли на шині присутні кілька ведучих, я не стану розглядати цей режим, так як він рідко застосовується. Для запобігання конфліктів в таких випадках використовується функція арбітражу і синхронізації лінії тактирования SCL.

## 1.6 Вибір операційного підсилювача

Операційний підсилювач (ОУ; англ. Operational amplifier, OpAmp) - підсилювач постійного струму з диференціальним входом і, як правило, єдиним виходом, який має високий коефіцієнт посилення. ОУ майже завжди використовуються в схемах з глибоким негативним зворотним зв'язком, яка, завдяки високому коефіцієнту посилення ОУ, повністю визначає коефіцієнт посилення / передачі отриманої схеми.

В даний час ОП дуже часто застосовуються, як у вигляді окремих чіпів, так і у вигляді функціональних блоків в складі більш складних інтегральних схем. Через те що ОП має характеристиками, близькі до ідеальних, він має велику популярність та є універсальним блоком на основі якого можна побудувати безліч різних електронних вузлів.

З часів аналогових комп'ютерів, операційні підсилювачі застосовувалися в багатьох лінійних, частота-залежних та нелінійних схемах. Операційні підсилювачі дуже популярні елементи при конструюванні електронних схем, бо параметри схем засновані на них, визначаються тільки зовнішніми компонентами. Також ОП мають невеликий розкид параметрів при їх виробництві та температурну залежність.

Операційні підсилювачі має досить широке коло застосувань, їх можна зустріти в споживчій електроніці, в індустрії і наукових приладах. Стандартні мікросхеми операційних підсилювачів досить дешево коштують на ринку, ціник сягає лише кілька центів. Є і дорогі моделі. До таких відносяться деякі моделі інтегрованих або гібридних операційних підсилювачів які мають спеціальні характеристики, та можуть випускаються дрібними партіями. Такі компоненти зазвичай можуть коштувати більше ніж сотня доларів. Операційні підсилювачі можуть бути елементами більш складних електронних схем але зазвичай випускаються як окремі компоненти.

Операційний підсилювач є різновидом диференціального підсилювача. Іншими різновидами диференціального підсилювача є:

Повністю диференційний підсилювач (це пристрій схожий за принципом дії на операційний підсилювач, але має два виходи);

Інструментальний підсилювач (він зазвичай складається з трьох операційних підсилювачів);

Ізольований підсилювач (це підсилювач схожий на інструментальний, але він витримує такі високі напруги, які можуть вивести з ладу звичайний операційний підсилювач);

Підсилювач з негативним зворотним зв'язком (зазвичай містить один або два операційних підсилювача і резистивну ланцюг зворотного зв'язку).

Виводи для подачі напруги живлення ( $V_S +$  і  $V_S-$ ) можуть позначатися по-різному. Незважаючи на різне позначення, їх функція залишається однією і тією ж - забезпечення додаткової енергії для посилення сигналу. Часто на схемах ці

висновки не зображують, щоб не захарашувати креслення, і їх наявність або вказується окремо, або має бути ясно зі схеми.

Диференціальні входи підсилювача складаються з двох виводів -  $V_+$  і  $V_-$ , ідеальний операційний підсилювач підсилює тільки різницю напруг між двома цими входами, ця різниця називається диференціальним напругою на вході. Напруга на виході операційного підсилювача визначається формулою:

$$V_{out} = A_{ol}(V_+ - V_-)$$

де  $V_-$  - напруга на інвертуючому (інверсному) вході,  $V_+$  - напруга на неінвертуючий (прямому) вході та  $A_{ol}$  - коефіцієнт посилення підсилювача з розімкнутим зворотнім зв'язком.

Величина  $A_{ol}$ , як правило, дуже велика (100 000 або більше для підсилювачів інтегральної мікросхеми), і тому навіть зовсім невелика різниця між  $V_+$  і  $V_-$  приводить вихід підсилювача майже до напруги живлення. Ситуації, в яких вихідна напруга дорівнює або перевищує напругу живлення, називаються насиченням підсилювача. Величина  $A_{ol}$  недостатньо контролюється виробничим процесом, і тому недоцільно використовувати підсилювач із відкритим контуром як автономний диференціальний підсилювач. Без негативного зворотного зв'язку і, можливо, з позитивним зворотним зв'язком для регенерації, підсилювач працює як компаратор. Якщо інвертуючий вхід утримується на землі (0V) безпосередньо або резистором  $R_{in}$ , а вхідна напруга  $V_{in}$ , подана на неінвертуючий вхід, є позитивною, вихід буде максимальним позитивним; якщо  $V_{in}$  негативний, вихід буде максимально негативним. Оскільки від виходу на будь-який вхід немає зворотного зв'язку, це схема з відкритим контуром, яка виступає в якості компаратора.

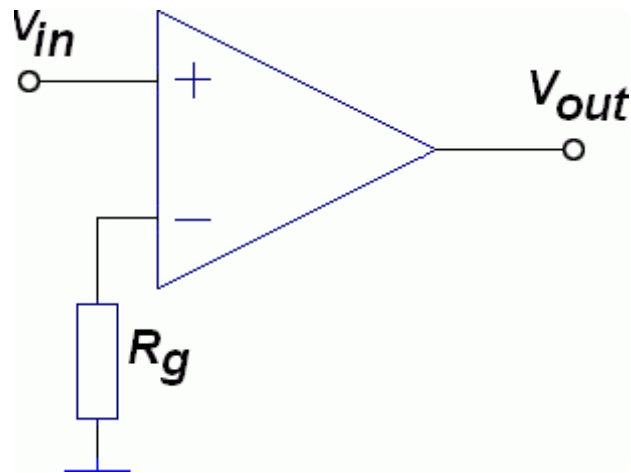


Рисунок 7 - Операційний підсилювач

Якщо потрібна передбачувана робота, використовується негативний зворотний зв'язок, застосовуючи частину вихідної напруги до інвертуючого входу. Зворотній зв'язок із замкнутим циклом значно зменшує коефіцієнт посилення ланцюга. Коли використовується негативний зворотний зв'язок, загальний коефіцієнт посилення та відгуку схеми визначається здебільшого мережею зворотного зв'язку, а не характеристиками підсилювача. Якщо мережа зворотного зв'язку складається з компонентів зі значеннями, малими відносно вхідного опору підсилювача, значення  $A_{ol}$  відгуку відкритого циклу підсилювача не впливає серйозно на продуктивність схеми. Відповідь ланцюга підсилювача з його вхідними, вихідними та ланцюгами зворотного зв'язку на вхід характеризується математично функцією передачі; проектування схеми підсилювача для отримання бажаної функції передачі знаходиться в царині електротехніки. Функції передачі важливі в більшості додатків підсилювачів, наприклад, в аналогових комп'ютерах. Високий вхідний опір на вхідних клеммах та низький вихідний опір на вихідних клеммах (ів) є особливо корисними характеристиками підсилювача.

В ідеальному випадку ОП повинен мати нескінченно малий вихідний та нескінченно великий вхідний опір, нескінченний коефіцієнт посилення по напрузі, нескінченно великий діапазон підсилюються частот, відсутність шумів та нескінченно велику амплітуду вихідного сигналу. Параметри ОП не повинні

залежати від зовнішніх факторів, температури та напруги живлення. При дотриманні цих умов передавальна характеристика ОП, охопленого від'ємним зворотним зв'язком (ВЗЗ), точно відповідає передавальній характеристиці ланцюга ВЗЗ і не залежить від параметрів самого підсилювача.

Реальні ОП мають характеристики, що відрізняються від ідеальних, що є приводом для їх класифікації по областях і особливостям застосування. Реальний ОП - це компроміс різних вимог з досягненням найкращих властивостей по одному або декільком параметрам, якими можуть бути мінімізація напруги зсуву і вхідних струмів, досягнення максимальної смуги підсилюються частот і швидкості наростання вихідної напруги, зменшення споживаного струму і напруги живлення і ін. Параметри ОП можна розділити на кілька груп - вхідні, вихідні, підсилювальні, частотні, енергетичні, шумові та ін.

Поряд з експлуатаційними параметрами, визначальними номінальний температурний режим роботи ОП, параметри вхідних і вихідних ланцюгів і вимоги до джерел живлення, вельми важливими є гранично допустимі (Absolute Maximum Ratings, AMR) значення ряду параметрів, перевищення яких може призвести до виходу мікросхеми з ладу. Нижче приведена склалася в даний час класифікація ОП по поєднанню різних параметрів, що відображає їх переважне використання в тому чи іншому класі пристроїв.

Також випускаються операційні підсилювачі, параметри яких спеціально оптимізовані для застосування в апаратурі певного призначення - медичної, автомобільної, в звукових пристроях і т. Д. Відзначимо, що параметри ОП в значній мірі визначаються їх схемотехнікою і використовуваної напівпровідникової технологією - на біполярних транзисторах (bipolar), польових транзисторах з  $p-n$  - переходом (JFET), комплементарних МОП-структурах (CMOS) і поєднанням на одному кристалі комплементарних пар біполярних і польових транзисторів (BiCMOS).

Пристрої на операційних підсилювачах можна умовно розділити на два класи: лінійні - власне різні підсилювачі, в тому числі і вимірювальні, аналогові обчислювальні схеми, перетворювачі імпедансу, активні фільтри, тощо, і

нелінійні - аналогові компаратори, помножувачі напруги, прецизійні випрямлячі, генератори сигналів і ін.

### 1.7 Схеми джерел струму

Джерело струму - елемент, двухполюсник, сила струму через який не залежить від напруги на його затискачах (полюсах). Джерело струму повинен мати великий внутрішній диференціальне опір, такий щоб при зміні опору навантаження сила струму в навантаженні практично не змінювалася. Таку можливість нам надає біполярний транзистор з боку колектора, польовий транзистор з боку стоку, або операційний підсилювач між інвертованими входом і виходом.

Є кілька основних характеристик, які характеризують джерело струму. Першою і основною з них є величина вихідного струму. По-друге, його вихідний опір, яке визначає, наскільки ток джерела змінюється в залежності від опору навантаження. Третя специфікація - це мінімальне і максимальне напруження на виході джерела, при якому вузол працює належним чином, тобто вихідний транзистор знаходиться в активному режимі. По-четверте, температурна стабільність і здатність протистояти коливань напруги джерела живлення.

Розглянемо схеми найпростіших генераторів (джерел) струму на транзисторах і операційних підсилювачах:

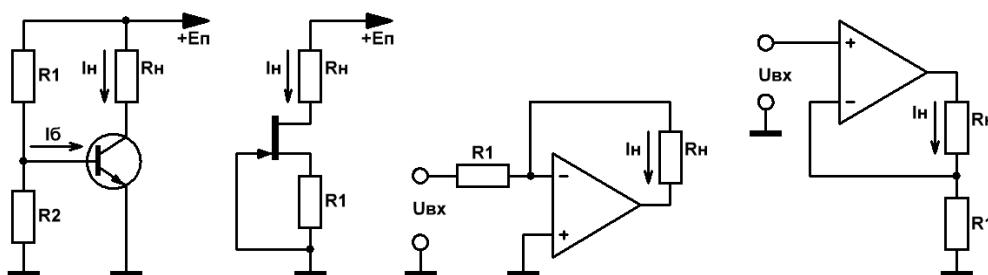


Рисунок 8 - Схеми найпростіших генераторів (джерел) струму на транзисторах і операційних підсилювачах

Схема джерела струму на біполярному транзисторі має велику кількість недоліків - і температурна нестабільність, і залежність струму від коливань напруги джерела живлення і наявність ефекту Ерлі (ефект впливу напруги між колектором і базою на струм колектора). Тут вхідний ділник на резисторах R1, R2 задає струм бази транзистора  $I_b$ , вихідний струм в першому наближенні можна вважати рівним  $I_n = I_c \approx \beta \times I_b$ .

Схема на польовому транзисторі не настільки чутлива до нестабільності джерела живлення, проте має інший істотний недолік - практичну неможливість заздалегідь розрахувати вихідний струм генератора через значущості розкиду параметрів даних типів напівпровідників. Максимальний струм даного типу джерела порівняно з початковим струмом стоку при  $R1 = 0$  (паспортна характеристика), мінімальний обмежений падінням напруги на резисторі R1.

Генератори струму на операційних підсилювачах (інвертуючий зліва, неінвертуючий праворуч) - цілком собі працездатні пристрої, які є близькими аналогами ідеальних джерел струму, і практично позбавлені недоліків, властивих транзисторним схемам. Єдине, але істотне в окремих випадках "але" полягає в тому, що навантаження є «плаваючою», тобто не підключено до землі. Струм через навантаження практично з 100% точністю описується формулою  $I_n = U_{вх} / R1$ .

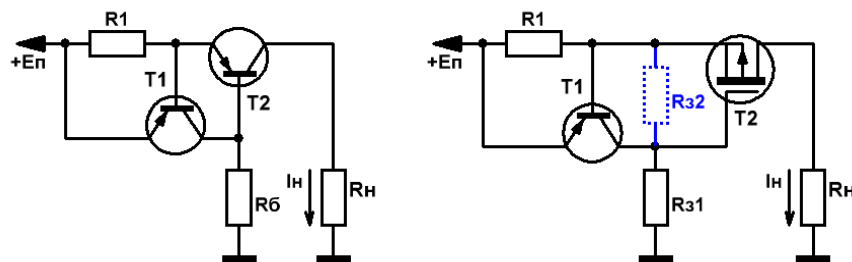


Рисунок 9 - Схеми стабілізаторів струму

Схеми стабілізаторів струму, представлені на Рис.8, будуть корисні в пристроях, що працюють з кінцевими споживачами, які чутливі не тільки до стабільності напруги, скільки до сталості протікає через них струму. Наприклад:

джерела живлення світлодіодів, газорозрядних ламп, зарядні пристрої для акумуляторів і т.д. Всі вони вимагають наявності на виході постійного, або змінюється за певним алгоритмом струму. Принцип роботи наведених схем дуже простий. При збільшенні струму навантаження пропорційно збільшується і падіння напруги на резисторі R1. При досягненні рівня падіння цього напруги  $\approx 0,6\text{В}$ , починає відкриватися транзистор Т1, знижуючи величину  $U_{\text{бе}}$  (або  $U_{\text{зи}}$ ) другого транзистора Т2. Він починає закриватися, відповідно, зменшується і кількість струму, що протікає через навантаження.

Для схеми на біполярному транзисторі номінал резистора Rб слід вибрати з міркувань  $R_{\text{б}} < (E_{\text{п}} - 0,7) \times \beta / I_{\text{н}}$ .

Для польового транзистора, через те що він має високій вхідний опір, величина резистора Rз1 може обрана досить високою (десятки кіло ом). Єдине, за чим треба пильно стежити - максимально допустиме значення напруги затвор-витік транзистора. Якщо воно менше  $E_{\text{п}}$ , слід додати додатковий резистор Rз2 такого номіналу, щоб утворений дільник зробив напругу на затворі в допустимих межах. Вихідний струм розраховується за формулою  $I_{\text{н}} \approx 0,6 / R1$ . У цих схемах немає температурної компенсації, зміна вихідного струму становить величину  $\approx 0,3\%$  на один  $^{\circ}\text{C}$ .

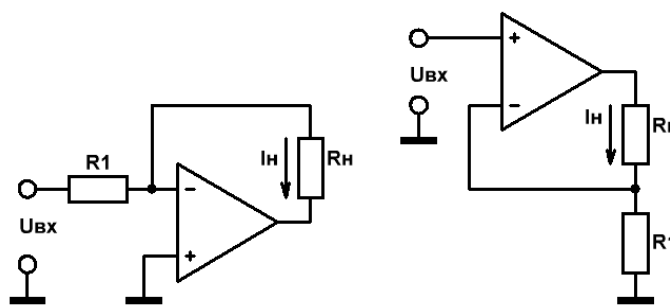


Рисунок 10 - Генератори струму (інвертується зліва, неінвертируючий праворуч)

Генератори струму, зображені на Рис.10 - цілком собі працездатні пристрої, які є близькими аналогами ідеальних джерел струму, і практично позбавлені недоліків, властивих транзисторним схемам.

Струм через навантаження з досить високою точністю описується формулою  $I_H \approx U_{вх} / R_1$ . При включенні в якості  $R_H$  конденсатора, наведені схеми широким фронтом експлуатуються в формувач трикутного і пилообразного напружень.

В окремих випадках істотним недоліком джерел струму, зображених на Рис.1, є «плаваюча», тобто не підключено до землі або живлення навантаження. До того ж, здебільшого, операційний підсилювач не може забезпечити значних величин струмів, що надходять в навантаження.

Розглянемо схеми джерел струму на ОП, які не мають цих недоліків. Як правило, для отримання стійкого позитивного результату, до операційного підсилювача додає додатковий вихідний каскад на біполярному або польовому транзисторі.

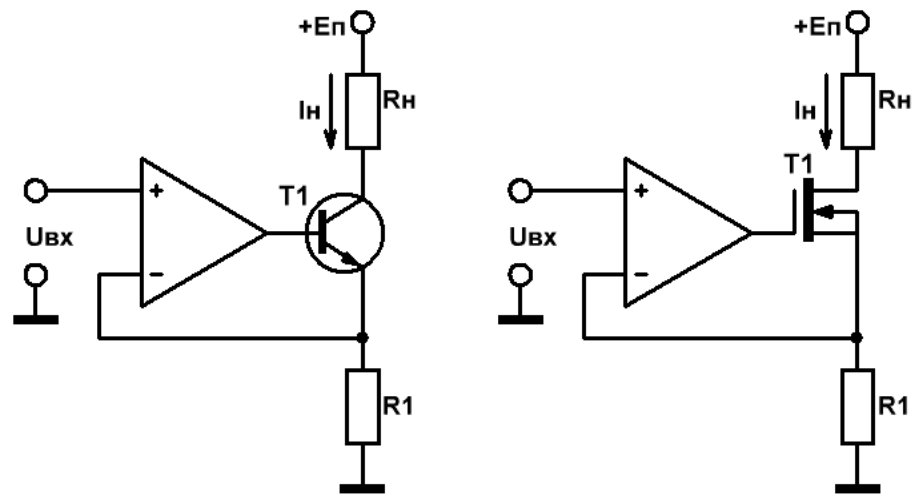


Рисунок 11 - Схеми генераторів струму на ОП з вихідними каскадами на біполярному(зліва) та польовому транзисторі(справа)

На Рис.11 наведено схеми генераторів струму на ОП з вихідними каскадами на біполярному, або польовому транзисторі і навантаженням, яка підключається до шини живлення. Нехтуючи входним струмом ОП і кінцевим коефіцієнтом підсилення транзистора, вихідний струм складе все ту ж величину  $I_H \approx U_{вх} / R_1$ .

Насправді, коефіцієнт підсилення біполярного транзистора має кінцеве значення, а повна формула струму навантаження виглядає наступним чином  $I_n = U_{вх} \times \beta / [R_1 (1 + \beta)]$ . Це обумовлює деяку нестабільність вихідного струму при зміні опору навантаження за рахунок прояву ефекту Ерлі (ефект впливу напруги між колектором і базою на величину коефіцієнта передачі струму транзистора). Прояви цієї нестабільності можна зменшити, якщо в якості біполярного транзистора використовувати складовою транзистор, або застосовуючи польовий транзистор.

Особливість схем джерел струму, показаних на Рис.11, полягає в тому, що навантаження підключається до шини живлення.

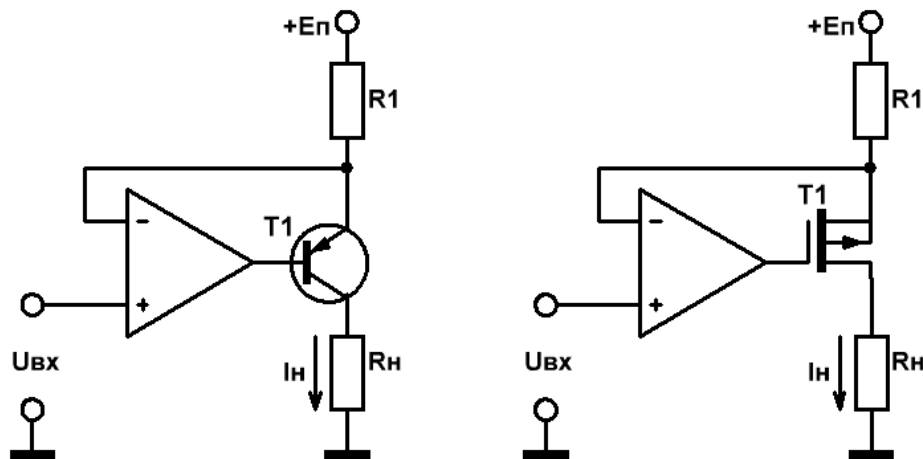


Рисунок 12 - Джерела струму з заземленим навантаженням.

Вихідний струм тут описується вже кілька іншою формулою:  $I_n \approx (E_p - U_{вх}) / R_1$ . Подібна залежність вихідного струму від напруги, що управляє не завжди зручна в практичних розробках, тому для усунення цього недоліку до схеми можна додати додатковий перетворювач рівня.

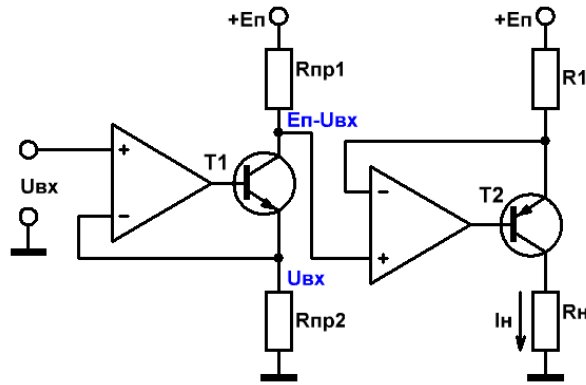


Рисунок 13 - Джерело струму, засноване на схемі Гауленд

Тут перший операційник з транзистором n-p-n структури виступає для перетворення рівня вхідного керуючого напруги  $U_{вх}$  в значення  $E_{п}-U_{вх}$ .  $R_{пр1}$  і  $R_{пр2}$ , як правило, вибираються одного номіналу, величина якого розраховується, виходячи з вхідного опору другого ОП, а також з міркувань прийнятного швидкодії при роботі джерела струму в динамічному режимі (тобто при подачі на вхід імпульсного сигналу управління). Нашим завданням було отримати зручну залежності  $I_{н} \approx U_{вх} / R_1$ , а для підвищення вихідного опору джерела струму замість простого біполярного вихідного транзистора слід включити складовою або польовий транзистор.

## 1.8 ЦАП

В електроніці цифро-аналоговий перетворювач (DAC, D / A, D2A або D-to-A) - це система, яка перетворює цифровий сигнал в аналоговий сигнал. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) виконує зворотну функцію.

Є кілька архітектур ЦАП; придатність ЦАП для конкретного застосування визначається показниками: роздільна здатність, максимальна частота вибірки та інші. Цифрово-аналогове перетворення може погіршити сигнал, тому слід обирати ЦАП, який має незначні похибки з точки зору програми.

ЦАПи зазвичай використовуються в музичних програвачах для перетворення цифрових потоків даних в аналогові аудіосигнали. Вони також

використовуються в телевізорах та мобільних телефонах для перетворення цифрових відеоданих в аналогові відеосигнали, які підключаються до драйверів екрана для відображення монохромних або кольорових зображень. Ці два додатки використовують ЦАП на протилежних кінцях відключення частоти / роздільної здатності. Аудіо ЦАП - це низькочастотний тип високої роздільної здатності, тоді як відео ЦАП - це високочастотний тип низької та середньої роздільної здатності.

Через складність та необхідність точно підібраних компонентів всі, крім найбільш спеціалізованих ЦАП, реалізуються у вигляді інтегральних мікросхем (ІС). Дискретні ЦАПи зазвичай мають надзвичайно швидкісні голодні типи низької роздільної здатності, як це застосовується у військових радіолокаційних системах. Обладнання для випробувань дуже високої швидкості, особливо осцилографи для відбору проб, також може використовувати дискретні ЦАПи.

Принцип роботи ЦАП полягає в тому, що пристрій підсумовує аналогові сигнали (струм або напруга). Ця операція відбувається з коефіцієнтами, які можуть дорівнювати нулю або одиниці в залежності від значення відповідного розряду коду. Сигнал ЦАП, який отримуємо на виході, може мати форму напруги, струму або заряду. Перетворювачі з струмовим виходом використовуються в основному в прецизійних і високочастотних схемах. Далі ми будемо розглядати ЦАП з вихідним напругою, які найбільш поширені. З таблиці 1 видно, що максимальна вихідна напруга на 1 МЗР (молодший значущий розряд вхідного коду) нижче напруги повної шкали (ПШ). Деякі ЦАП дозволяють використовувати всю шкалу.

Таблиця 1. Сигнали чотирирозрядного ЦАП (опорна напруга 5 В)

Вхідний код	Вихідна напруга, В
0000	0,0000
0001	0,3125
0010	0,6250

0011	0,9375
0100	1,2500
0101	1,5625
0110	1,8750
0111	2,1875
1000	2,5000
1001	2,8125
1010	3,1250
1011	3,4375
1100	3,7500
1101	4,0625
1110	4,3750
1111	4,6875

Очевидно, що для цифро-аналогового перетворювача найбільш важливими є такі характеристики сигналу, як час установки (settling time), сплеск сигналу внаслідок перерегулювання при зміні сигналу на виході ЦАП, іменованій далі хибним сигналом (викидом, glitch), спотворення і вільний від перешкод динамічний діапазон сигналу (SFDR).

Час установки ЦАП - це час від початку зміни цифрового коду до моменту, коли сигнал стабілізується в межах деякого діапазону помилки, як це показано на рис. 14. Порівнювати часи установки підсилювачів важко, так як їх діапазони помилки можуть відзначитися від підсилювача до підсилювача, але діапазон помилки ЦАП практично не змінюється і дорівнює  $\pm 1$  або  $\pm \frac{1}{2}$  LSB.

Час установки ЦАП складається з чотирьох різних періодів: час перемикання (протягом якого цифрове перемикання здійснено, але на виході немає змін), час переходу (протягом якого швидкість зміни вихідного сигналу обмежена швидкістю наростання на виході ЦАП), час відновлення (коли ЦАП відновлює значення після швидкого переходу і може бути викид на фронті) і лінійний час установки (коли значення на виході ЦАП наближається до його кінцевої величиною експоненціально або майже експоненціально). Якщо

перехідний час мало в порівнянні з трьома іншими (як це зазвичай буває у випадку з струмовими виходами ЦАП), то час встановлення не буде істотно залежати від перепаду рівня вихідного сигналу. З іншого боку, якщо перехідний час займає істотну частину загального часу, то час установки буде тим більше, чим більше величина перепаду.

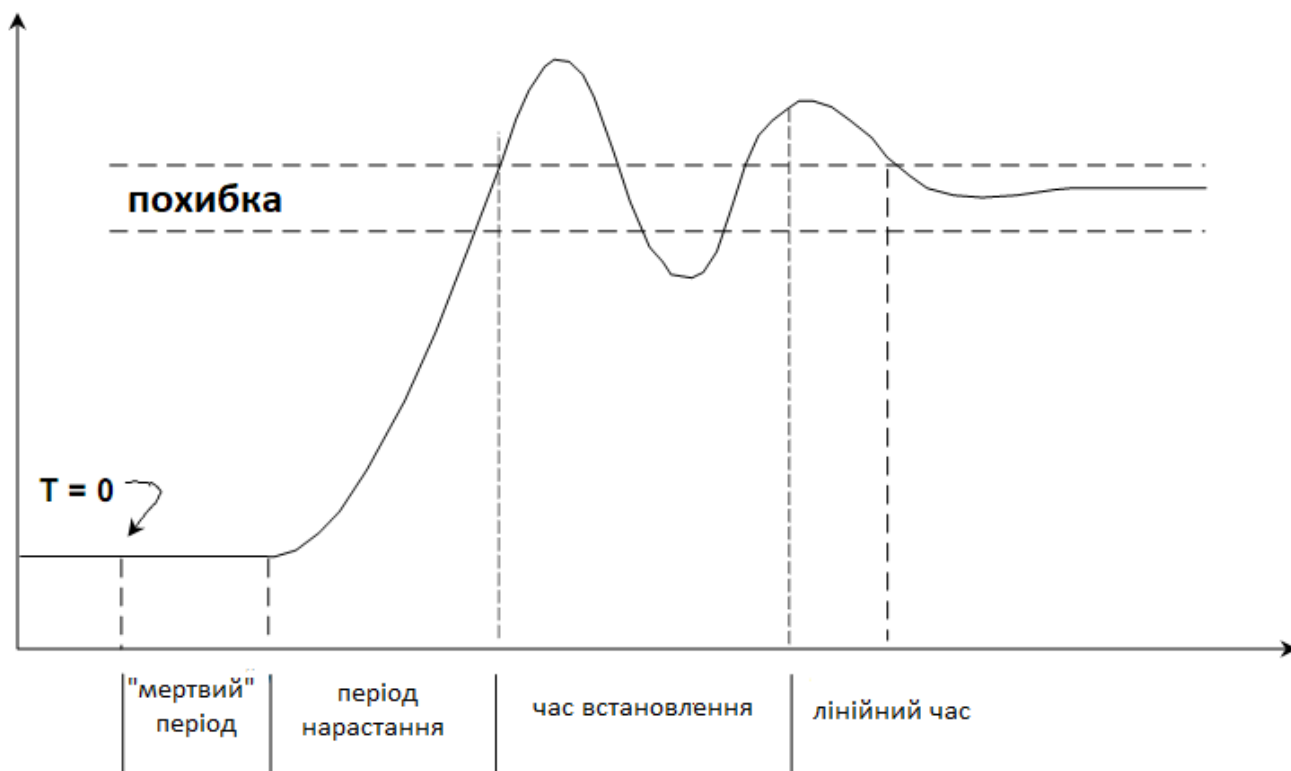


Рисунок 14 – Час встановлення ЦАП

В ідеалі зміни на виході ЦАП від однієї величини до іншої повинні проходити монотонно. На практиці можлива поява викиду фронту (overshoot), негативного викиду перед фронтом (undershoot) або те й інше одночасно (рис. 15). Це неконтрольований стан виходу ЦАП протягом переходу відомо як помилковий сигнал. Він може бути результатом двох явищ: ємнісний зв'язку цифрових переходів з аналоговим виходом і властивостями деяких ключів в ЦАП, що працюють більш швидко, ніж інші, і створюють тимчасові викиди за рівнем.



Рисунок 15 – Перехідна характеристика ЦАП (з паразитними викидами)

Ємнісний зв'язок часто дає приблизно рівні позитивні і негативні викиди (іноді звані дуплетом помилкового сигналу), які далі в більшій чи меншій мірі вдається компенсувати. Помилковий сигнал, що з'являється внаслідок несинхронності перемикавання, в загальному випадку уніполярен, має велику амплітуду і являє собою набагато більшу проблему.

Для оцінки помилкових сигналів вимірюють площу, огинає фронтом такого сигналу.

Пікова площа під кривою помилкового сигналу - це площа під максимальним позитивним або негативним імпульсом помилкового сигналу. Площа імпульсу помилкового сигналу - це область під вольт-секундної кривої, яка може бути розрахована після апроксимації форми сигналу трикутниками і обчислення їх площі за допомогою вирахування негативної площі з позитивною. Величина помилкового сигналу, що породжується переходом між кодами 0111 ... 111 і 1000 ... 000, зазвичай є найбільшою. Помилкові сигнали в інших точках переходу коду (таких як 1/4 і 3/4 повної шкали) зазвичай мають меншу величину. На рис. 13.3 відзначений помилковий сигнал швидкого ЦАП з малим значенням такого сигналу в середині його динамічного діапазону. Пікові і імпульсні площі помилкового сигналу розраховуються з використанням трикутників, як це було описано вище. Час установки вимірюється з моменту, коли сигнал залишає початковий діапазон помилки в 1 LSB, і до моменту, коли він входить і

залишається в межах кінцевого діапазону помилки в 1 LSB. Розмір кроку між областями переходу також дорівнює 1 LSB.

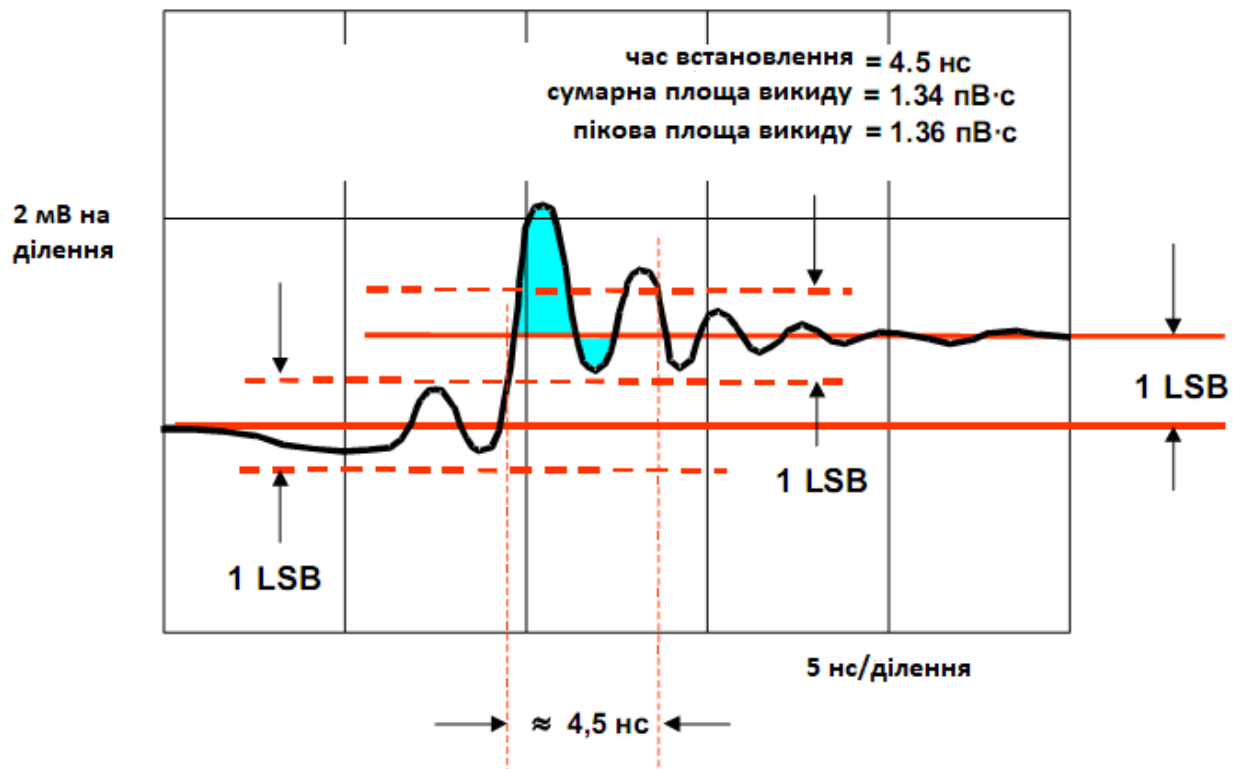


Рисунок 16 – Викиди сигналу ЦАП

Час установки ЦАП важливо в таких додатках, як блок розгортки RGB-сигналу в моніторах, а характеристики в частотній області типу SFDR в загальному випадку більш важливі в телекомунікаціях.

Якщо ми розглянемо спектр сигналу, перетвореного в ЦАП з цифрової форми, то виявимо, що, на додаток до очікуваного спектру (який буде містити одну або більше частот, в залежності від природи відновленого сигналу), в ньому також буде присутній шум і складові спотворень. Спотворення можуть бути визначені в термінах нелінійних спотворень, динамічний діапазон, вільного від перешкод (SFDR), інтермодуляційних спотворень або всіх перерахованих вище разом. Під нелінійними спотвореннями розуміється відношення вищих гармонік до гармоніці основної частоти, на якій відновлений чистий (теоретично) синусоїдальний сигнал. Ці спотворення є найбільш загальною характеристикою спотворень.

Динамічний діапазон, вільний від перешкод (SFDR) - це відношення енергії найбільшою з гармонік (зазвичай - це гармоніка основної частоти, але не обов'язково) до енергії основної частоти.

При відновленні за допомогою ЦАП синусоїдального сигналу, згенерованого в системі прямого цифрового синтезу (DDS), залежні від коду помилкові сигнали формують гармоніки як всередині смуги, так і за її межами. Сигнал проходить через рівень, відповідний середині шкали, двічі за один цикл. Тому помилковий сигнал має другу синусоїдальну гармоніку, як показано на рис. 13.4. Зверніть увагу, що гармоніки більш високого порядку, складові яких потрапляють в основну смугу Найквіста (від 0 до  $f_s / 2$ ), не фільтруються.

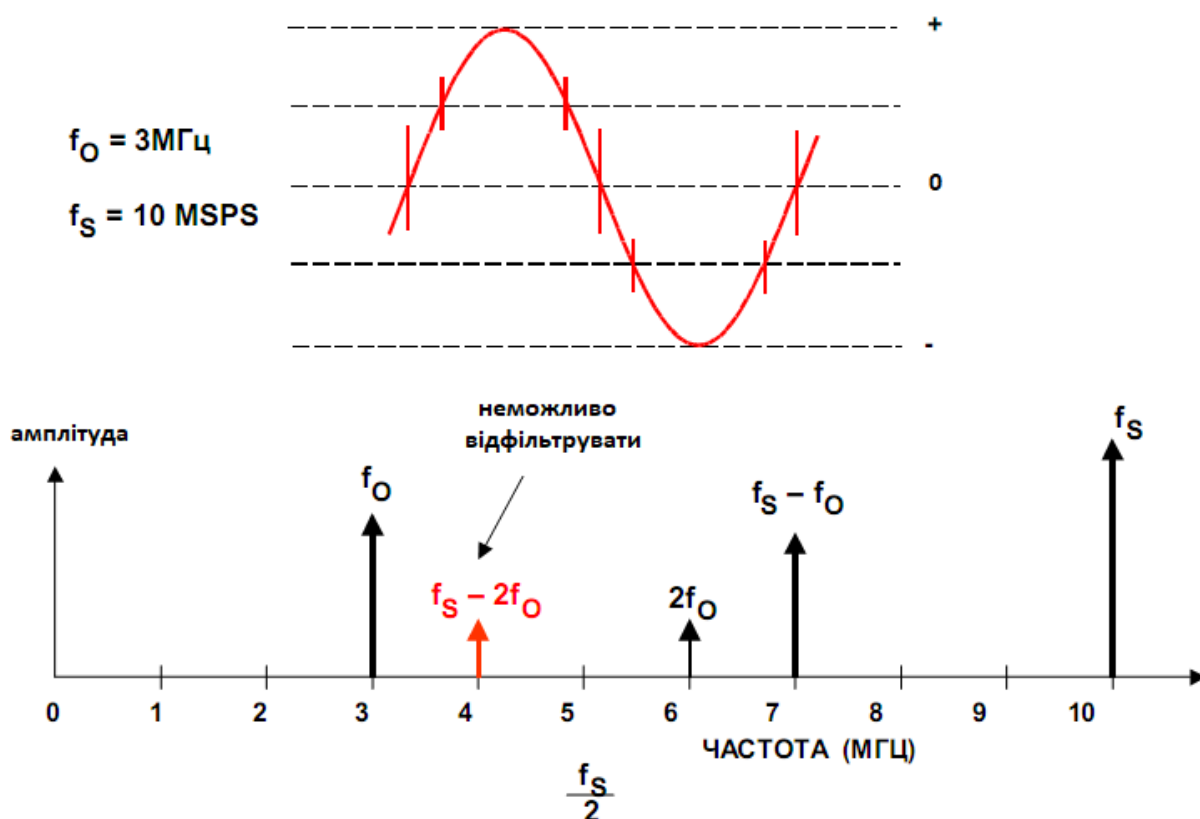


Рисунок 17 - Прояви код-залежних викидів сигналу в спектрі вихідного сигналу

Керуючись однією лише характеристикою площі під кривою помилкового сигналу, важко передбачити нелінійне спотворення або SFDR. Інші фактори, такі як повна лінійність ЦАП, також сприяють виникненню спотворень. Тому,

загальноприйнята перевірка відновної здатності ЦАП в частотній області (з використанням аналізатора спектра) на різних тактових і сигнальних частотах.

Вихідний сигнал ЦАП може бути представлений у вигляді ряду прямокутних імпульсів шириною, рівній зворотній величині тактової частоти, як показано на рис. 18.

Зверніть увагу, що відновлена амплітуда сигналу становить  $-3,92$  дБ на частоті Найквіста  $f_c / 2$ . Для компенсації цього ефекту в більшості випадків достатньо використовувати інверсний фільтр  $\sin(x) / x$ . Значення складових основної частоти також послаблюються функцією  $\sin(x) / x$ .

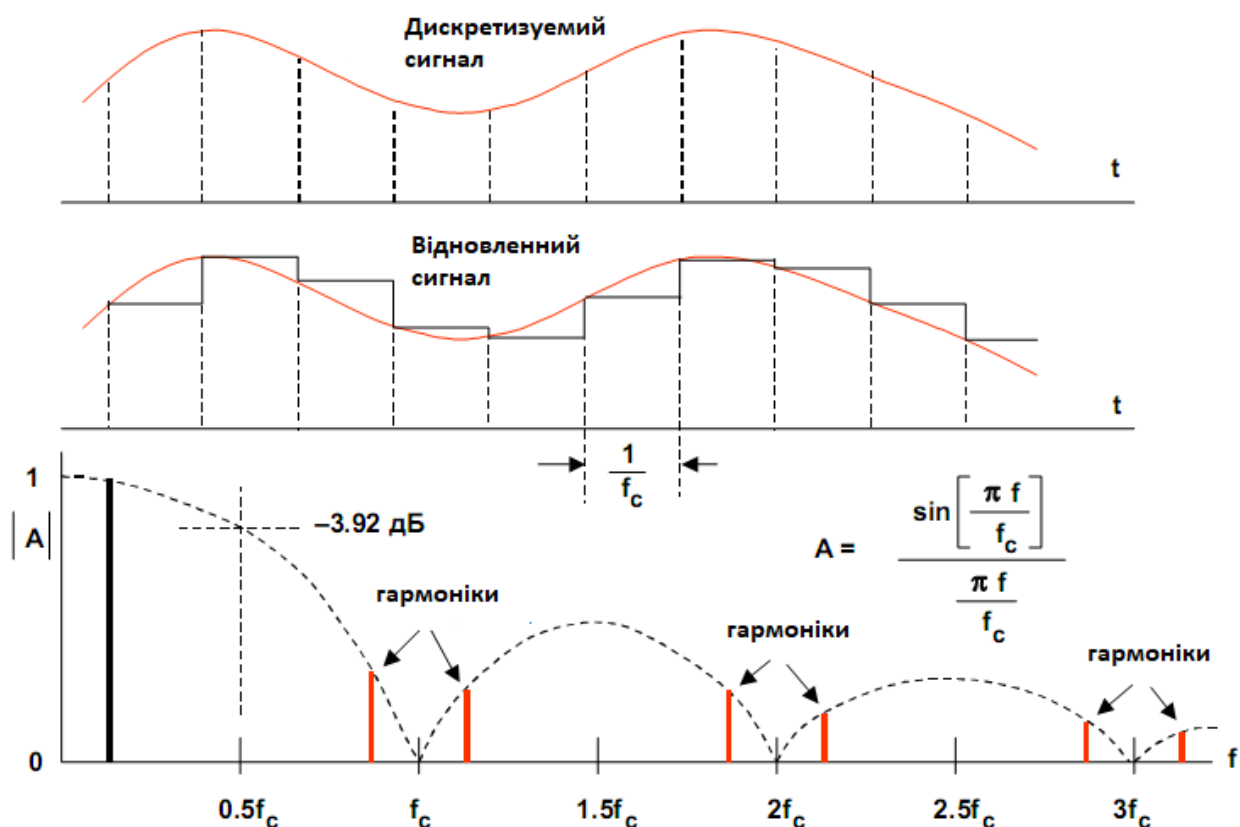


Рисунок 18 - Спектр вихідного сигналу ЦАП з обвідної виду  $\sin x/x$

Більшість структур ЦАП які можна зустріти є багатоланкові схемами сходового типу або двійковими ЦАП. Одна з найпростіших структур - дільник Кельвіна, представлений на рис. 19. N-розрядної версії цього ЦАП просто містить  $2N$  рівних за величиною послідовно з'єднаних резисторів. Вихідний сигнал знімається з відповідного відведення замиканням одного з  $2N$  комутаторів після

декодування N-розрядних даних. Сучасні ЦАП, що використовують цю архітектуру, називаються строковими ЦАП.

Ця архітектура проста, має вихід із змінним значенням напруги  $Z_{OUT}$ , і спочатку забезпечує монотонний сигнал (навіть якщо опір одного з резисторів дорівнює 0,  $OUTPUT_N$  не може перевищувати  $OUTPUT_{N+1}$ ). Архітектура лінійна, якщо всі резистори рівні за значенням, але може бути навмисно зроблена нелінійною, якщо потрібно нелінійний ЦАП. Так як в момент перемикання працюють тільки два комутатора, ця архітектура має малу хибним сигналом (low-glitch).

Її головним недоліком є велика кількість резисторів, необхідних для забезпечення високої роздільної здатності, тому в якості окремого пристрою вона зазвичай не використовується, але, як ми побачимо пізніше, застосовується в ролі компонента більш складних структур ЦАП.

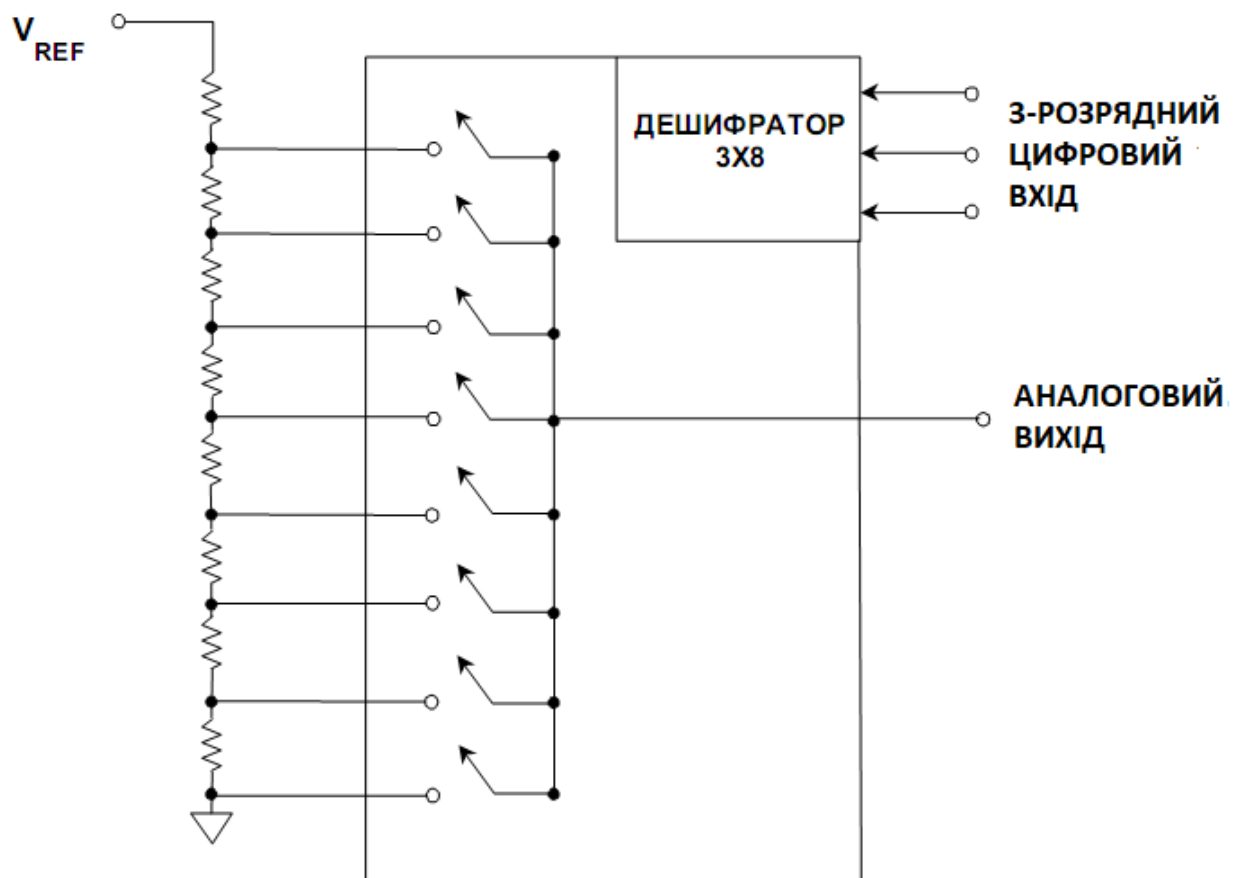


Рисунок 19 - Дільник Кельвіна

Існує аналогічний ЦАП з струмовим виходом, який також складається з  $2N$  резисторів, або джерел струму, але підключених тепер паралельно між входом опорної напруги і віртуальним заземленим виходом (рис. 20).

В даному ЦАП, як тільки будь-якої резистор підключається до ланцюга, будь-які подальші збільшення цифрового коду вже не можуть його відключити. Таким чином, структура є спочатку монотонною, незалежно від похибок резисторів і, подібно до попереднього випадку, може бути зроблена навмисно нелінійною там, де ця нелінійність потрібно. Знову, як і в попередньому випадку, архітектура є рідкістю, так як, якщо спробувати її використовувати для виготовлення повного ЦАП, буде потрібно велика кількість резисторів і комутаторів. Але знову ж таки вона часто використовується в якості компонента в ЦАП більш складної структури.

На відміну від подільника Кельвіна, цей тип ЦАП не має унікального назви, хоча обидва типи згадані як повно-декодуєчі (fully decoded) ЦАП або строкові (string) ЦАП.

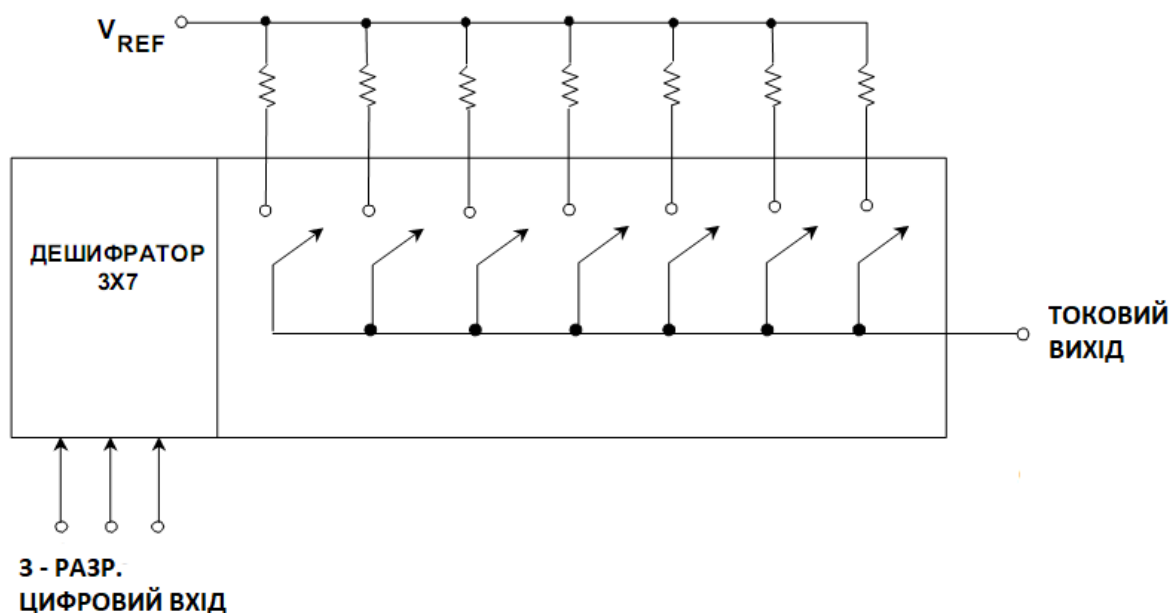


Рисунок 20 - Найпростіший ЦАП з струмовим виходом

Повно-декодуєчі ЦАП часто використовуються як компоненти більш складних ЦАП. Найбільш популярними є сегментні ЦАП, де частина вихідного сигналу повно-декодуєчого ЦАП в подальшому знову надходить на дільник. Дана структура використовується тому, що повно-декодуєчий ЦАП спочатку монотонний, так що, якщо наступний дільник теж є однорідним, в цілому є таким же і результуючий ЦАП.

В сегментних ЦАП з виходом по напрузі (рис. 21) сигнал подається з одного з резисторів подільника Кельвіна на новий дільник Кельвіна (в цьому випадку повна структура відома як "дільник Кельвіна-Варлея") або на ЦАП будь-якої іншої структури.

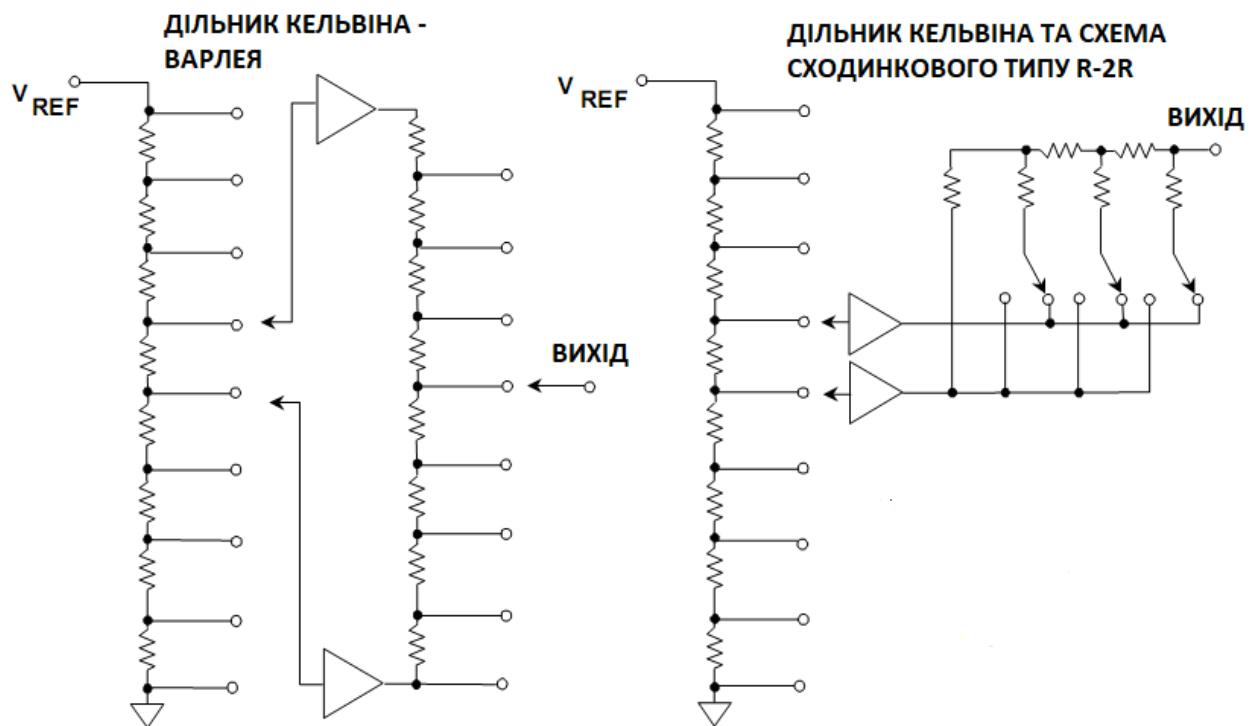


Рисунок 21 - Сегментні ЦАП з виходом напруги

У всіх ЦАП вихідний сигнал являє собою результат комбінації опорного напруги і цифрового коду. У цьому сенсі все ЦАП є перемножуючими, але багато хто з них добре працюють тільки в обмеженому діапазоні  $V_{ref}$ . Справжні перемножуємо ЦАП (MDAC) орієнтовані на роботи в широкому діапазоні  $V_{ref}$ .

Фактично, всі високошвидкісні ЦАП з малими спотвореннями використовують деякий вид режиму струмового комутації без ненасичених. Як сказано вище, прямий двійковий ЦАП з одним струмовим ключем на розряд дає кодозавісіміе помилкові сигнали і, звичайно, не є найбільш оптимальною архітектурою (рис. 22). ЦАП з одним струмовим джерелом на кодовий рівень не має кодозавісімих хибних сигналів, але не практичний в реалізації, коли потрібно досягнення високої роздільної здатності. Проте, ця характеристика може бути поліпшена, якщо декодувати кілька перших старших розрядів (MSB) в код "термометра" при одному струмовому ключі на рівень.

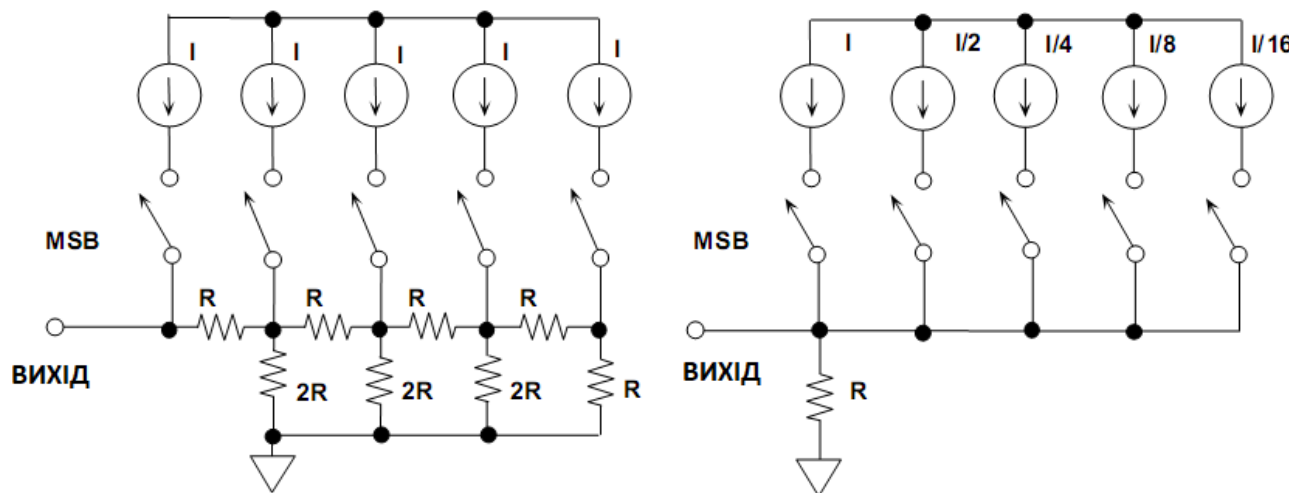


Рисунок 22 - Архітектури 5-розрядних двійкових ЦАП

### 1.9 Ключі на польових транзисторах

Ключі на польових транзисторах дуже популярні у різноманітних схемах, та можуть використовуватися для комутації аналогових та цифрових сигналів. Перевагами ключів на польових транзисторах є:

- мала потужність, яка споживається для управління;
- мала напруга на ключі, коли той знаходиться у відкритому стані;
- хороша електрична розв'язка між ланцюгами комутованого сигналу та управління;

- високий опір в закритому стані що призводить до виникнення малого струму, що протікає через перекритий канал транзистора;
- змога комутації електричних сигналів дуже низького рівня (порядку мкВ).

За показниками продуктивності ключі на польових транзисторах зазвичай поступаються ключам заснованих на біполярних транзисторах. При збільшенні частоти комутації через необхідністю перезарядка його вхідної ємності, спостерігається явище, коли значно зростає вхідний струм польового транзистора. Таким чином, коефіцієнт посилення з ростом частоти падає.

МОП-транзистори з вбудованим каналом та польові транзистори з керуючим р-n переходом практично не використовуються, через те, що різниця полярностей керуючого і вхідної напруги дуже ускладнює схемотехніку електронних ключів.

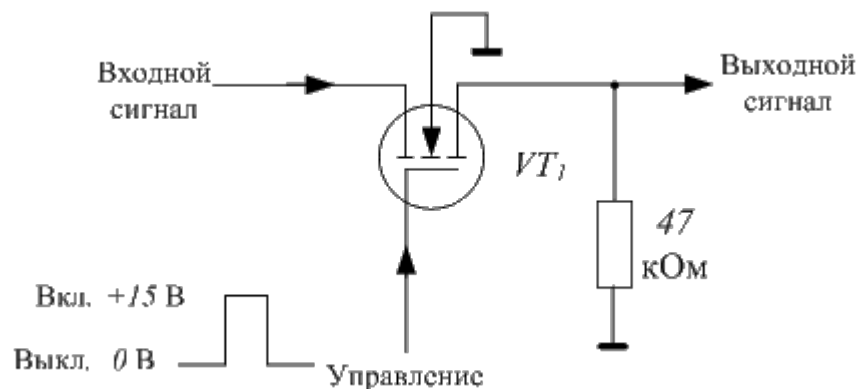


Рисунок 23 - Ключ на n-канальном КМОП транзисторі

У цьому стані опір між стіком та витоком, може бути більше ніж 10000 МОм, і сигнал не зможе пройти крізь ключ. Подача на затвор напруги +15 В призводить канал стік-витік в провідний стан з типовим опором  $R_{вкл}$  від 25 до 100 Ом для ПТ, призначених для використання в якості аналогових ключів. Оскільки рівень сигналу на затворі істотно більш позитивний, ніж це необхідно для підтримки малого  $R_{вкл}$ , то цей рівень можна задавати за допомогою логічних схем (наприклад логічні рівні КМОП, також можна брати вихід ТТЛ, що повинне відповідати повному діапазону живлення) або навіть ОП.

При високому рівні сигналу (більше ніж 10В), напруги на затворі буде занадто малим, щоб утримати польовий транзистор в стані провідності ( $U_{\text{вкл}}$  починає рости). Негативні сигнали викликають включення польового транзистора коли затвор заземлений хоча, в той же час можна спостерігати появу прямого зміщення переходу канал - підкладка. Можна використати таку ж схему, але з затвором, та керованим напругою -15 В і +15 для того щоб була можливість перемикаєти сигнали обох полярностей (в діапазоні від -10 до +10 В). Підкладка повинна бути приєднана до напруги -15 В.

Якщо потрібно перевести комутатор у відкритий стан, потрібно докласти до затвору нормально відкритого МОП-транзистора  $VT_1$  в схемі на рис. 24 позитивне керуючу напругу, рівне, щонайменше  $2U_{\text{вкл}}$ , а до затвору транзистора  $VT_2$  - таке ж напруга, але протилежне за знаком. Якщо величина вхідної напруги  $U_{\text{вх}}$  маленька, то обидва МОП-транзистора будуть відкриті.

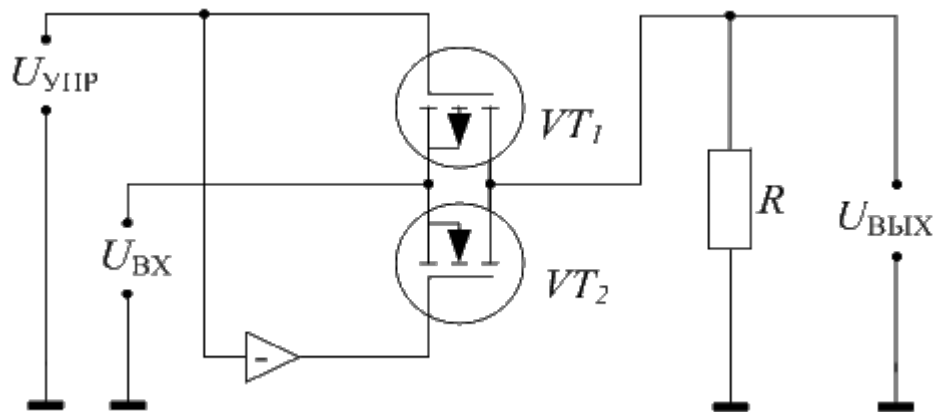


Рисунок 24 - Послідовний ключ на КМОП транзисторах

Якщо вхідна напруга зростає до значного позитивного рівня, величина  $U_{\text{ЗП1}}$  зменшиться, а внутрішній опір транзистора  $VT_1$  збільшиться. Ця обставина, проте, несуттєво, так як одночасно збільшиться величина  $U_{\text{ЗП2}}$  і внутрішній опір транзистора  $VT_2$  зменшиться. При негативних значеннях вхідної напруги транзистори  $VT_1$  і  $VT_2$  міняються ролями. Для того щоб перевести комутатор в стан «вимкнено», необхідно змінити полярність напруги, що управляє.

З КМОП-комутаторів найбільш зручні схеми з вбудованим перетворювачем рівня керуючого сигналу, які сумісні з вихідними сигналами ТТЛ-схем. Вони

випускаються в інтегральному виконанні, причому ІС часто містить кілька комутаторів, керованих загальним напругою. Часто комутатори виконуються за схемою з загальним входом або виходом. За допомогою вбудованого в інтегральну схему розподільника типу «1 з n» можна шляхом подачі двійкового коду на керуючий вхід переводити будь-який обраний комутатор в стан «включено». Такі електронні схеми називаються аналоговими мультиплексорами або аналоговими демультиплексор.

### Висновки до розділу 1

У цьому розділі розглянули теоретичні відомості для створення керованого джерела струму для розподілено-вимірюючої системи. Було детально розглянуто можливості схем джерел струму, принципи роботи цифро-аналогового перетворювачів, протоколу I2C, IoT - систем та мережи Інтернет. Також було розглянуто підходи до обрання операційних підсилювачів, це знадобиться для реалізації схем джерела струму.

## 2. РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ ВИМІРЮВАЛЬНО-КЕРУЮЧОЇ СИСТЕМИ

### 2.1 Постановка завдання

Завданням диплому є проектування джерела постійного струму, з трьома діапазонами вимірювання діапазонами вимірювання, яке може використовуватися, як канал управління в розподілено-вимірювальних системах. Для того, щоб виконати це завдання, нам необхідно:

- розробити прийнятна схему джерела струму з операційним підсилювачем;
- додати цифро-аналоговий перетворювач до входу операційного підсилювача, задля того, щоб керувати струмом на виході джерела за допомогою цифрового сигналу, тобто комп'ютера, або іншого цифрового приладу;
- підключити плату Arduino до цифро-аналогового перетворювача.
- розрахувати конфігурації цієї схеми для трьох діапазонів вимірювань;
- додати можливість переключатись між цими діапазонами за допомогою аналогових ключів, та підключити ключі до Arduino;
- додати можливість змінювати полярність вихідного струму;
- додати рідкокристалічний дисплей, для виводу інформації;
- додати енкодер та кнопки керування, для ручного встановлення вихідного струму.
- запрограмувати Arduino згідно завдання, та підключених пристроїв;
- реалізувати спілкування комп'ютера з Arduino використовуючи СОМ-порт;

Технічні характеристики наведені у схемі нижче.

Таблиця 2. Технічні характеристики приладу

Діапазон	Діапазон струму	Дозвіл межі вимірювання	Макс. вихідна напруга	Вихідний опір
1 mA	$\pm 1.20000$ mA	1 $\mu$ A	$\pm 30$ V	$\geq 100$ M $\Omega$

10 mA	$\pm 12.0000$ mA	10 $\mu$ A	$\pm 30$ V	$\geq 100$ M $\Omega$
100 mA	$\pm 120.000$ mA	100 $\mu$ A	$\pm 30$ V	$\geq 10$ M $\Omega$

## 2.2 Джерело струму

У якості схеми джерела струму, за основу візьмемо наступну схему:

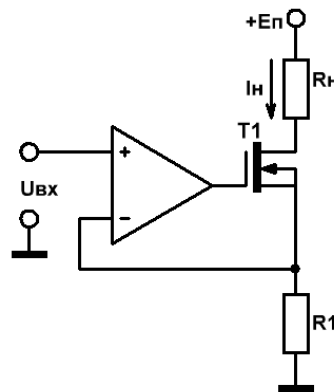


Рисунок 25 - Схема джерела струму

У якості транзисторів використовуються потужні польові транзистори IRF520N, які регулюють необхідний струм у вихідному ланцюзі, та мають доволі низький опір у відкритому стані. Необхідний нам ток пристрою буде визначатися таким виразом:  $I_n = U_{вх} / R_1$ . Змінюючи опір резистора ми можемо підібрати три опори, для наших трьох діапазонів вимірювання.

На *рис*  $U_{вх}$  є виходом аналого-цифрового перетворювача. Ми будемо використовувати перетворювач MCP4725, який може змінювати напругу на виході в межах від  $\sim 0$  В до 5В з розрядністю 12 біт, тобто на  $U_{кр} = 5 \text{ В} / 4096 = 1.22 \text{ мВ}$ . Це дає змогу дуже гнучко змінювати силу вихідного току.

## 2.3 Підключення ЦАП

В якості ЦАП для дипломної роботи, було обрано MCP4725. MCP4725 (Microchip Technology) являє собою одноканальний 12-розрядний,

буферизований цифро-аналоговий перетворювач з вбудованим EEPROM і послідовним інтерфейсом, сумісним з I2C. MCP4725 споживає не більше 0.4 мА від джерела живлення з нульовою навантаженням на виході і подає до навантаження менше 25 мА. Також напруга на виводі VCC використовується як опорний вхід ЦАП, тому джерело живлення на виході VCC повинен бути настільки чистим, наскільки це можливо для гарної ефективності ЦАП. Оскільки це 12-розрядний ЦАП, він буде приймати до 4096 можливих вхідних значень для забезпечення аналогового виходу. Тут вихідне значення 0 дорівнює нулю, а вихідне значення 4095 є повномасштабним виходом, яке визначається опорним напругою, що подається на вихід VCC. EEPROM дозволяє MCP4725 самостійно зберігати значення даних і відновлювати їх при включенні живлення.



Рисунок 26 - Зовнішній вигляд ЦАП MCP4725

Наведемо деякі технічні характеристики:

- Час налаштування: 6μs (тип);
- Потужність: хв. 0.06, тип. 210 мкА, макс. 400 мкА;
- Напруга живлення: 2.7 В - 5.5 В;
- I2C адреси: зовнішній контакт установки адреси A0, два доступних адреси;
- Швидкість перетворення: номінальна (100 Кбіт / с), висока (400 Кбіт / с), максимальна (3.4 Мбіт / с);
- Корпус: SOT-23 з 6 висновками (SOT-23-6);
- Розширений діапазон температур: -40 °С - +125 °С;
- Клас: АЕС-Q100 1 кваліфікації;

- Розміри: 15x15 мм.

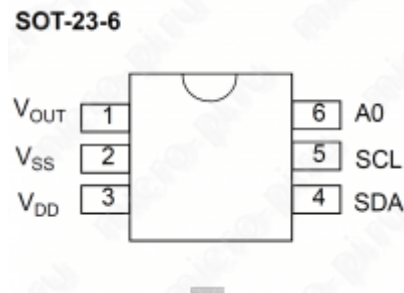


Рисунок 27 - Схематичне зображення ЦАП

На рис. 27 наведено схематичне зображення ЦАП, де  $V_{out}$  /  $OUT$  - Аналоговий вихід напруги,  $V_{ss}$  /  $GND$  - земля,  $V_{dd}$  /  $VCC$  - живлення,  $SDA$  - лінія даних (Serial Data),  $SCL$  - лінія тактування (Serial CLock),  $A0$  /  $ADDR$  - вибір адреси.

Адреса пристрою містить чотири фіксованих біта (код пристрою = 1100) і три біти адреси ( $A2$ ,  $A1$ ,  $A0$ ). Біти  $A2$  і  $A1$  встановлюються під час виготовлення, а біт  $A0$  визначається логічним станом та налаштовується користувачем виходом  $A0$ . Вихід  $A0$  можна підключити до  $VCC$  ( $VCC = 1100\ 00\ 1$  (0x61)) або  $GND$  ( $GND = 1100\ 00\ 0$  (0x60)) або активно управляти цифровими логічними рівнями. Виявлено, що адреса I2C за замовчуванням для модуля, представленого тут, дорівнює 0x60 ( $A0 = 0$ ,  $A1 = 0$ ,  $A2 = 0$ ).

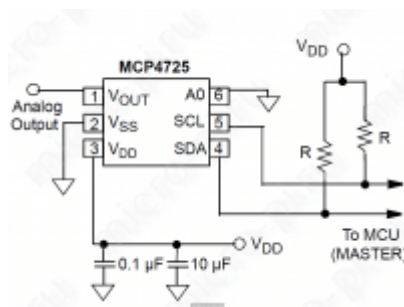


Рисунок 28 - Схематичне зображення підключення ЦАП до шини I2C

## 2.4 Рідкокристалічний дисплей

У деяких схемах у нас може виникнути проблема нестачі портів Arduino через необхідність підключити екран, у якого дуже дуже багато контактів.

Виходом у цій ситуації може стати I2C перехідник, який підключає практично стандартний для Arduino дисплей 1602 до плат Uno, Nano або Mega всього лише за допомогою 4 пінов.

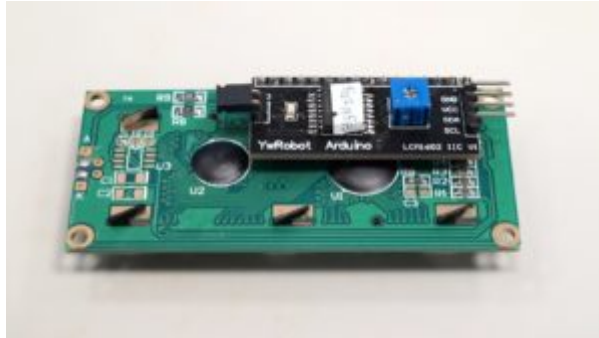


Рисунок 29 - Рідкокристалічний дисплей з I2C перехідником

Хорошим вибором для виведення інформації є рідкокристалічний дисплей (Liquid Crystal Display) LCD 1602, який застосовується в різних проектах. Він має досить невелику ціну, та має різні модифікації з різними кольорами підсвітки, можна легко завантажити готові бібліотеки для скетчів Ардуіно. Дисплей має 16 цифрових виводів, з них мінімум 6, є обов'язковими, і це є найголовнішим недоліком. Через це використання цього LCD екрана вимагає використання I2C, щоб не накладати серйозні обмеження для плат Arduino Uno або Nano. Можливість заощадити контакти, в тому числі за рахунок підключення дисплея через i2c, рятує від необхідності купувати плату Arduino Mega.

Давайте подивимося на виходи LCD1602:



Рисунок 30 - Рідкокристалічний дисплей

Технічні характеристики дисплея:

- Напруга живлення 5В;
- Світлодіодна підсвітка;
- Символьний тип відображення, є можливість завантаження символів;
- Формат 16x2 символів;
- Контролер HD44780;
- Кут огляду 180 градусів.
- Діапазон температур зберігання від -30С до +80 С, а діапазон робочих температур від -20С до + 70С,

Схема підключення монітора безпосередньо до мікроконтролера Ардуіно без I2C виглядає наступним чином.

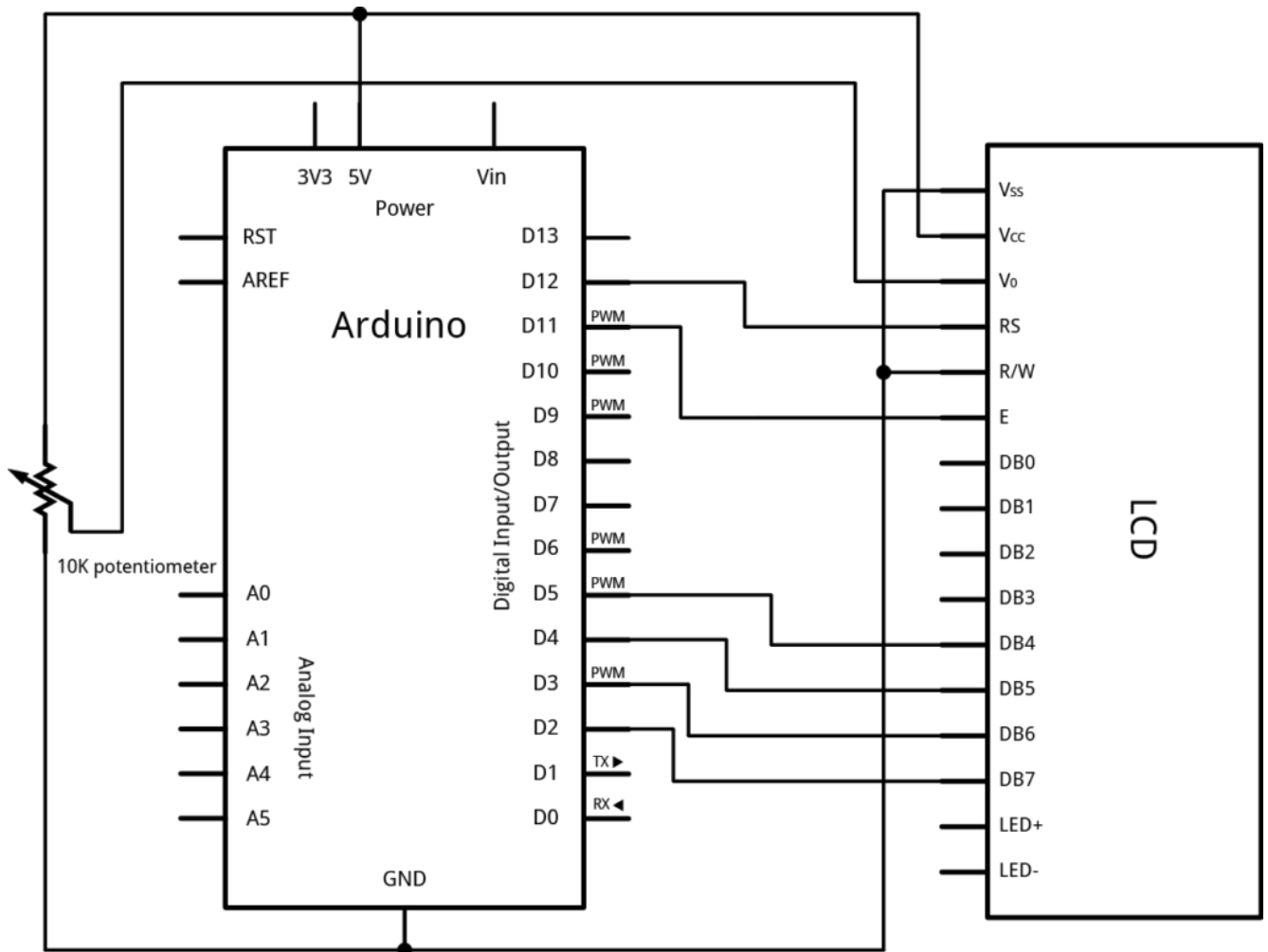


Рисунок 31 - Схема підключення дисплея до Arduino

Через велику кількість підключаються контактів може не вистачити місця для приєднання потрібних елементів. Використання I2C зменшує кількість проводів до 4, а зайнятих пинов до 2.

Найшвидший і зручний спосіб використання i2c дисплея в Ардуіно - це покупка готового екрану з вбудованою підтримкою протоколу. Але таких екранів не дуже багато і коштують вони не дешево. А ось різноманітних стандартних екранів випущено вже величезна кількість. Тому найдоступнішим і популярним сьогодні варіантом є покупка і використання окремого I2C модуля - перехідника, який виглядає ось так:

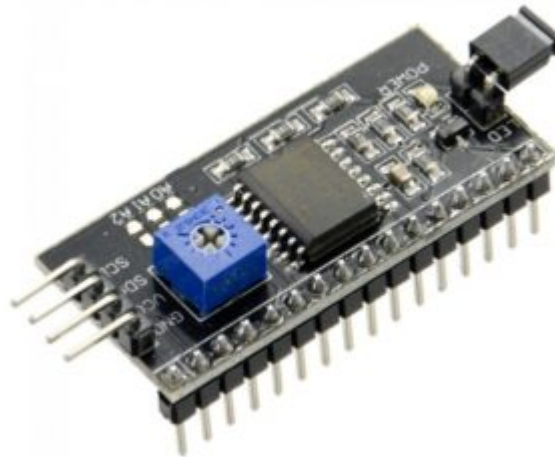


Рисунок 32 - Перехідний для I2C

З одного боку модуля ми бачимо виходи i2c - земля, живлення і 2 для передачі даних. З іншої сторони бачимо роз'єми зовнішнього живлення. І на платі є безліч пінів, за допомогою яких модуль підключається до стандартних виходів екрану.

Для підключення до плати Ардуіно використовуються i2c виходи. Є можливість, підключення до зовнішнього джерела живлення для підсвітки. За допомогою вбудованого резистора ми можемо налаштувати значення контрастності J.

Для взаємодія Arduino з LCD 1602 по шині I2C будуть потрібні дві бібліотеки:

1. Бібліотека Wire.h для роботи з I2C, вже є в стандартній програмі Arduino IDE.
2. Бібліотека LiquidCrystal\_I2C.h, яка включає в себе велику різноманітність команд для управління монітором по шині I2C і дозволяє зробити скетч простіше і коротше. Потрібно додатково встановити бібліотеку Після підключення дисплея потрібно додатково встановити бібліотеку LiquidCrystal\_I2C.h

Опис деяких функцій і методів бібліотеки LiquidCrystal\_I2C:

- `home ()` і `clear ()` - перша функція дозволяє повертає курсор в початок екрана, друга - повертає курсор в початок екрана при цьому очищує монітор від символів.
- `write (ch)` - виводить символ `ch` на екран.
- `cursor ()` і `noCursor ()` - показує / приховує курсор на екрані.
- `display ()` і `noDisplay ()` - дозволяє підключити / відключити дисплей.

## 2.5 Передача даних

Комп'ютерний сервер у всій системі виконує три важливі функції: надсилання команд на канал управління, обробка даних та передача даних на центральний сервер. Доцільно використовувати плату з мікропроцесором, який є RaspberryPi або персональним комп'ютером, бо Arduino з мікроконтролером ATmega32U4 та роз'ємом Ethernet, не можуть виконати вищезгадані функції, бо ці дії потребують значних ресурсів, що значно обмежує функціональність Arduino. Тож розглянемо детальніше надсилання команд на канал управління за допомогою комп'ютера.

Будемо використовувати бібліотеку `pySerial`, для мови програмування `python`. Код який відправляє в порт команду "Start" має наступний вигляд:

```
import pySerial
ser = serial.Serial('/dev/ttyUSB0', 9600)
ser.write(b'hello')
```

Об'єкт `ser` створюється конструктором першим параметром якого є путь до точки монтування послідовного порта, а другим - швидкість передачі даних, яка повинна бути однаковою на Arduino та на комп'ютері.

Так як RaspberryPi використовую операційну систему засновану на UNIX-подібній системі, то працює з пристроями вводу та виводу так само як і в UNIX-системах. Тобто, операційна система монтує порти до "файлів пристроїв", які насправді не є файлами, але файлові у вигляді точок доступу до апаратних

пристроїв. "tty" - аббревіатура для "Teletype". Перші термінали були Teletypes (наприклад, дистанційно керовані друкарські машинки). Для кожного такого послідовного порту є спеціальний файл у каталозі /dev (device). /dev/ttyS0 - це спеціальний файл для послідовного порту, відомий як COM1 у світі DOS / Windows. Щоб відправити текст на термінал, ви можете перенаправити стандартний вивід деякої команди командного рядка до відповідного спеціального файлу. Наприклад, натискаючи команду `echo "hello" > /dev/ttyS1` в командному рядку, слід надіслати слово "hello" на термінал на ttyS1 (COM2), якщо ви маєте право на запис на /dev/ttyS1. Аналогічним чином, набравши `cat test_file > /dev/ttyS0`, буде надіслано вміст файлу test\_file на COM1 (ttyS0).

Таким чином, для того щоб реалізувати спілкування між Arduino та комп'ютером, нам потрібно буде реалізувати якесь правило(протокол), щоб ці пристрої могли один одного зрозуміти. Ще додає складнощів, те що спілкування через послідовний порт відбувається побітово, і це треба враховувати при реалізації протоколу. Але, є проект з відкритим програмним кодом, який реалізує такий протокол. Він називається - Firmata.

Firmata реалізован у якості бібліотеки для Arduino, та має реалізації майже для всіх популярних мов програмування. Ми будемо використовувати мову програмування - python. Будь-яке програмне забезпечення на будь-якому комп'ютері, яке є сумісним з Serial-з'єднанням може обмінюватися даними з мікро контролером, використовуючи Firmata. Firmata дає повний доступ до Arduino прямо з ПО і виключає процеси модифікації і завантаження скетчів Arduino.

Частина яка виконується на Arduino може мати наступні функції:

- `begin ()` - почати використовувати бібліотеку
- `begin (long)` - почати використовувати бібліотеку на відмінній від за замовчуванням швидкості даних.
- `sendAnalog (byte pin, int value)` - послати аналогове повідомлення
- `sendDigitalPorts (byte pin, byte firstPort, byte secondPort)` - послати цифрове повідомлення як окремі байти
- `sendDigitalPortPair (byte pin, int value)` - послати int на цифровий порт

- `sendString (const char * string)` - послати рядок на комп'ютер
- `available ()` - перевірити наявність повідомлень в буфері
- `processInput ()` - прочитати повідомлення, яке перебуває в буфері
- `attach (byte command, callbackFunction myFunction)` - підключити функцію до певного типу повідомлень
- `detach (byte command)` - відключити функцію від певного типу повідомлень

Щоб підключити функцію до типу повідомлень вона повинна відповідати стандартних функцій зворотного виклику:

- `void callbackFunction (byte pin, int value);`
- `void stringCallbackFunction (char *myString);`
- `void sysexCallbackFunction (byte pin, byte byteCount, byte *arrayPointer);`

Представлені різні типи повідомлень, до яких можна підключити нашу функцію:

- `ANALOG_MESSAGE` - аналогове значення піна
- `DIGITAL_MESSAGE` - 8-біт цифрових даних (1 порт)
- `SET_PIN_MODE` - встановити режим піна `INPUT / OUTPUT / PWM / і.т.д.`
- `FIRMATA_STRING` - рядки C-стилю використовують `stringCallbackFunction` як типову функцію

На комп'ютері ми будемо використовувати бібліотеку - `pyFirmata`. Вона активно розвивається та постійно оновлюється, а значить безпечна для використання. Простий скрипт може мати наступний вигляд:

```
from pyfirmata import Arduino, util
board = Arduino('/dev/ttyACM0')
board.digital[13].write(1)
board.digital[13].write(0)
```

Наступний код встановлює підключення за допомогою послідовного порту `/dev/ttyACM0` та запалює і гасить вбудований в Arduino світлодіод, який підключено до 13го піна.

## Висновки до розділу 2

У цьому розділі ми розробили схему джерела постійного струму. До джерела струму під'єднали цифро-аналоговий перетворювач, для можливості змінювати значення сили току на виході джерела струму за допомогою цифрових приладів, у нашому випадку це Arduino. Також під'єднали ЦАП до Arduino за допомогою I2C протоколу. Реалізовано роботу з ЦАП за допомогою Arduino. Також за допомогою I2C під'єднали жк-дисплей для відображення поточних значень джерела струму. Використання I2C для комутації дисплея та Arduino дозволило значно зекономити кількість використаних пінів.

Після цього, розробили методи передачі даних між персональним комп'ютером та Arduino, для можливості керувати джерелом струму за допомогою персонального комп'ютера та через сервер. Для цього використовували протокол Firmata ті бібліотеку для мови програмування Python - pyFirmata.

Також реалізували спілкування з сервером, для створення можливості керувати нашим приладом через хмару.

### 3. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

#### 3.1 Опис ідеї проекту

Таблиця 3. Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Джерело постійного живлення для розподілених систем вимірювання	1. Науковий - для проведення досліджень та навчання	Є можливість наперед розпланувати дослідження, та автоматизувати його.
	2. Промисловий - для автоматизації виробництва	Є можливість автоматизувати процеси де необхідна зміна сили струму, та можливість дистанційного керування.
	3. IoT - для автоматизації будь яких систем де необхідна дистанційна зміна значення сили струму	Можливість комбінувати прилад з іншими для побудування різних IoT-систем.

Таблиця 4. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	NI ELVIS II	NI CompactDAQ	НТЦ-01.01			
1.	Розміри та мобільність	Невеликі розміри, велика мобільність	Невеликі розміри, велика мобільність	Великі розміри, середня мобільність	Великі розміри, низька мобільність			+

2.	Можливість автоматизувати процеси	Присутня	Присутня	Присутня	Відсутня			+
3.	Ціна	Низька	Велика	Велика	Середня			+
4.	Гнучкість діапазонів	Середня	Велика	Велика	Середня		+	
5.	Можливість дистанційного керування	Присутня	Можлива	Можлива	Відсутня		+	

### 3.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 5. Технологічна здійсненність ідеї проекту

<i>№ п/ п</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
	Джерело постійного живлення для розподілених систем вимірювання	Електричні компоненти	Наявні	Доступні
		ЦАП	Наявні	Доступні
		Arduino	Наявні	Доступні
		Сервер	Наявні	Доступні
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Всі компоненти наявні в широкому доступі.				

### 3.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 6. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

<i>№ n/ n</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	12
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	~ 900 мільйонів \$
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	~ 15%

Таблиця 7. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ n/ n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Автоматизація процесів дослідження та навчання	Науковці, педагоги, учні, студенти, любителі.	Поведінку клієнта формують: надійність, низька ціна, швидка доставка, зручність користування, мобільність, гнучкість використання.	Якість кінцевого продукту, низька ціна.
2	Автоматизація процесів виробництва	Підприємці, виробники, робітники підприємств.	Поведінку клієнта формують: надійність, низька ціна, швидка доставка, зручність користування,	Якість кінцевого продукту, низька ціна, швидка доставка та

			мобільність, гнучкість використання.	консультація з експлуатування.
3	Використання з іншими IoT - пристроями	Будь хто	Поведінку клієнта формують: надійність, низька ціна, швидка доставка, зручність користування, широкий спектр інтеграцій, мобільність, гнучкість використання.	Якість кінцевого продукту, низька ціна, консультації з інтеграцій.

Таблиця 8. Фактори загроз

<i>№ п/ п</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Наявність кваліфікованих кадрів	Потрібні люди з певним освітнім навиком	Набір персоналу в науководослідних установах
2	Ресурсна проблема	Проблема виготовлення продукту	Укладання договорів з державними структурами для фінансування та надання можливостей для пошуку нових постачальників
3	Глобальна економічна криза	Проблеми з капіталізацією, зниження продажів	Підвищення цін. Розробка кращого і більш дешевого методу. Пошук нових ринків
4	Відсутність вільного капіталу	Проблеми з новими розробками та розрахунками	Банківські кредити, продаж акцій.
5	Проблеми постачання	Проблеми зі збіркою нових пристроїв	Пошук нових постачальників

Таблиця 9. Фактори можливостей

<i>№ п/ п</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Конкуренція	Розробка нового товару з кращими властивостями, зниження цін	Удосконалення товару
2	Попит	На ринку спостерігається велика зацікавленість в таких інноваціях	Рекламна діяльність, просування товару онлайн та офлайн.
3	Зростання ринку	Зростання об'ємів продажу	Накопичення капіталу для подальшого розширення компанії

Таблиця 10. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Вказати тип конкуренції - олігополія	На ринку присутня невелика кількість фірм, які займаються розробкою розподілених вимірючих систем	Підвищувати якість товару за рахунок використання передових технологій та залучення кваліфікованих кадрів
2. За рівнем конкурентної боротьби - національний	Місцезнаходження фірм не обмежується територіально; офіси розміщено у різних містах та країнах.	Налагоджувати дистрибуцію продукції у різні країни, створювати офіси підтримки клієнтів в різних країнах,

		таргетувати рекламу на різні страни
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Економічна боротьба між різними товаровиробниками, які діють в одній галузі економіки, виробляють і реалізують однакові товари, що задовольняють одну й ту саму потребу, але мають відмінності у виробничих затратах, якості, ціні, тощо.	Дослідження продуктів конкурентів, швидка реакція на покращення товарів конкурентів
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращувати якість товару
5. За характером конкурентних переваг - нецінова	Потрібно вигравати конкуренцію за рахунок якості, кількості функціоналу.	Продавати за ціною конкурента
6. За інтенсивністю - марочна	На ринку присутні бренди с гучним ім'ям	Працювати над впізнаваністю бренда

Таблиця 11. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	NI ELVIS II NI CompactDAQ HTЦ-01.01	-	Кількість та якість постачальників	надійність, низька ціна, швидка доставка, зручність користування,	Замінники існують проте не дуже зручні

				широкий спектр інтеграцій, мобільність, гнучкість використання.	
Висновки:	Інтенсивність висока, бо товар є складним в виготовленні	-	Постачальники мають велику силу, так як конкуренція має національні властивості, і дуже велике значення має швідкість між виробництвом та кінцевим клієнтом	Продукт має бути якісним, та зручним	Обмежень немає

Таблиця 12. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

<i>№ п/п</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>
1	Ціна	Ціна нижча ніж у конкурентів
2	Терміни та масовість виробництва	Вчасні поставки продукту та зниження з часом ціни
3	Достатні робочі характеристики	Більш гнучкий функціонал ніж у конкурентів

Таблиця 13. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «назва проекту»

<i>№</i>	<i>Фактор</i>	<i>Бали</i>	<i>Рейтинг товарів-конкурентів у</i>
----------	---------------	-------------	--------------------------------------

n/ n	конкурентоспроможності	1-20	порівнянні з ... (назва підприємства)						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Ціна	15			+				
2	Терміни та масовість виробництва	16		+					
3	Гнучкий функціонал	18	+						
4	Мобільність пристрою	17	+						

Таблиця 14. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Гарні робочі характеристики, гнучкість використання, мобільність.	Слабкі сторони: незнайомий бренд, менше функціоналу ніж у конкурентів
Можливості: розвивати гнучкість використання, підвищувати якість та впізнаваність бренду	Загрози: поява нових конкурентів; відсутність кваліфікованих кадрів на ринку праці; зниження попиту;

Таблиця 15. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ n/ n	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Розробка більшого функціоналу пристрою та хмари	50%	пів року
2	Розробка інших частин розподіленої виміррювальної системи	70 %	3 місяці

### 3.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 16. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис	Готовність	Орієнтовний	Інтенсивність	Простота
---	------	------------	-------------	---------------	----------

<i>n/</i> <i>n</i>	<i>профілю</i> <i>цільової</i> <i>групи</i> <i>потенційних</i> <i>клієнтів</i>	<i>споживачів</i> <i>сприйняти</i> <i>продукт</i>	<i>попит в</i> <i>межах</i> <i>цільової</i> <i>групи</i> <i>(сегменту)</i>	<i>ь конкуренції</i> <i>в сегменті</i>	<i>входу у</i> <i>сегмент</i>
1	Дослідницькі лобараторії	готові	Високий	Висока	Середня
2	Навчальні заклади	готові	Високий	Висока	Середня
3	Промисловіс ть	готові	Високий	Висока	Середня
4	Очиничні клієнти	готові	Середній	Висока	Середня
Які цільові групи обрано: Дослідницькі лобараторії, навчальні заклади, промисловість					

Таблиця 17. Визначення базової стратегії розвитку

<i>№</i> <i>n/</i> <i>n</i>	<i>Обрана</i> <i>альтернатива</i> <i>розвитку</i> <i>проекту</i>	<i>Стратегія</i> <i>охоплення</i> <i>ринку</i>	<i>Ключові</i> <i>конкурентоспромо</i> <i>жні позиції</i> <i>відповідно до</i> <i>обраної</i> <i>альтернативи</i>	<i>Базова</i> <i>стратегія</i> <i>розвитку*</i>
1	Розробка більшого функціоналу пристрою та хмари	Більше охоплення ринку за рахунок вирішення більшого спектру проблем користувачів	Вирішується більше проблем користувачів	Стратегія лідерства на витратах
2	Розробка інших частин розподіленої	Більше охоплення ринку за	Вирішується більше проблем користувачів	Стратегія лідерства на витратах

	вимірювальної системи	рахунок вирішення більшого спектру проблем користувачів		
--	-----------------------	---	--	--

Таблиця 18. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ п/п</i>	<i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки*</i>
1	Ні	Обидва варіанти	Так. Деякий функціонал	Заняття конкурентної ніші

Таблиця 19. Визначення стратегії позиціонування

<i>№ п/п</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
1	Ціна	Лідерства на витратах	Низька ціна	Оптимальне співвідношення ціна/якість, покращення існуючих характеристик.
2	Якість	Лідерства на витратах	Висока якість	
3	Мобільність	Лідерства на витратах	Висока мобільність	

4	Точність	Лідерства на витратах	Висока точність	
---	----------	-----------------------------	-----------------	--

### 3.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 20. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ п/ п</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1	Низька ціна	Найнижча ціна на ринку	Найнижча ціна на ринку
2	Висока якість	Висока якість	Висока якість
3	Гнучкість використання	Можливість дуже гнучко налаштувати и прилад	Можливість гнучко налаштувати прилад

Таблиця 21. Опис трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
I. Товар за задумом	Джерело постійного живлення для розподілених систем вимірювання		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Швидкість роботи	М	ВР
	2. Діапазон вихідних струмів	М	Тх
	3. Споживана потужність	М	Тл
	Якість: відповідає вимогам стандартів		
Пакування: пристрій, інструкція, кабель для підключення до ПК.			
Марка: "Normix"			
III. Товар із підкріпленням	До продажу: договір, гарантія.		
	Після продажу: доставка, підтримка.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патентні права.			

--

Таблиця 22. Визначення меж встановлення ціни

<i>№ п/ п</i>	<i>Рівень цін на товари- замінники</i>	<i>Рівень цін на товари- аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
1	-	2000\$	3000\$	200 - 250 \$

Таблиця 23. Формування системи збуту

<i>№ п/ п</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Найкраща якість та більша кількість функцій за нижчу ціну	Налагодження контакту з клієнтами, надання достовірної інформації про характеристики, настройка за потреби.	Канал першого рівня	Через посередників

Таблиця 24. Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ п/ п</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користуютьс я цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонуван ня</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
	Вибір найкращого продукту	Прямі - канал комунікації, коли інформація передається безпосередн	Якість, низька кількість браку, низька ціна.	Надання повної інформації про переваги виробу	Хороші характеристики за низької ціни

		бо від інформатора до інформовано ї особи			
--	--	---	--	--	--

### Висновки до розділу 3

Можливість ринкової комерціалізації проекту існує, так як з кожним роком попит на вимірюючі системи тільки збільшується. На ринку вже існують добре відомі гравці, проте якщо зосереджуватись на локальному ринку та зважаючи на деякі риси конкурентоспроможності мого проекту, є перспективи впровадження. При впровадженні потрібно зосередити увагу на пошуку партнерів у малому бізнесі та дослідницьких лабораторіях, рекламі характеристик, що вирізняють товар з поміж конкурентів та особливому дизайні. Тому подальша імплементація проекту є доцільною.

## ВИСНОВКИ

У роботі була детально проаналізовані інструменти, технології, схеми та принципи які для реалізації інтерактивної, розподіленої, автоматичної та віддаленої системи вимірювання. Після аналізу усього що необхідно, була розроблена така система. Під час роботи було досліджено такі платформ як Arduino та Raspberry Pi, та принципи роботи з цими платформами. Ці платформи не дорогі, мають багато різних інтерфейсів, зручні інструменти роботи з ними, а отже дозволяють в короткий час робити прості та складні проекти. Невеликим недоліком, є те, що такі платформи є певним рівнем абстракції на мікроконтролером ATmega32U4 для Arduino, що призводить до падіння продуктивності кінцевого продукту, ніж якби використовувався мікроконтролер без Arduino. Це не критично для нашої системи, але критично для систем, де швидкість мають велике значення. У загальному можна зробити наступні висновки: система дозволяє абстрагуватись від місця знаходження об'єкту дослідження оптимізувати, автоматизувати багато процесів, вибрати довільний час проведення дослідження, що дуже затребувано у сучасному світі. Таким чином, результати роботи відповідає поставленим завданням.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Апатова Н.В. Информационные технологии в школьном образовании / Н.В. Апатова. – М.: ИОШ РАО, 1999. – 228 с.
2. Распределенная информационно-измерительная система для удаленного управления экспериментом в области оптической спектроскопии / С. Е. Гаврилов [и др.] // Научный сервис в сети Интернет : труды Всерос. науч. конф. М. : Изд-во Моск. ун-та, 2002. С. 157–159
3. Kester W. Data Conversion Handbook//Analog Devices, 2004.
4. Sigma-delta ADCs and DACs//Application Note AN-283. — Analog Devices. — 1997. — 16 pp. Gaddy L., 2 2/ 2/ Kawai H. Dynamic Performance Testing of Digital Audio D/A Converters// Application Bulletin AB-104. — Burr-Brown Corporation. — 1998, — 8 pp.
5. Райт Э. Practical TCP/IP and Ethernet Networking / Э. Райт, Д. Реиндерс., 2003. – 320 с.
6. Arduino Education [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.arduino.cc/en/Main/Education>.
7. Industrial Internet of Things - ІоТ Промышленный интернет вещей [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://bit.ly/2JnQwy4>.
8. Дослідження фізичних явищ в електричних ланцюгах із застосуванням інтернет-технологій / Дектерев М. Л., Комаров В. А, реснякова Г. О. та ін.], 2015. – 421 с.
9. М. Р. Домбругов. ПРАКТИКУМ З ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ МАТЕМАТИКИ / М. Р. Домбругов. – Київ. – 212 с.
10. Морозов В. В. Методы обработки результатов физического эксперимента / Морозов В. В, Сobotковский Б. Е, Шейнман И. Л. – Санкт-Петербург. – 63 с.