

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інформаційних технологій та електроніки
(повне найменування факультету)
Кафедра електронних апаратів
(повна назва кафедри)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до дипломного проекту (роботи)

освітньо-кваліфікаційного рівня магістр
(бакалавр, спеціаліст, магістр)
спеціальності 171 «Електроніка»
(шифр і назва спеціальності)

на тему

**«Електронна система ідентифікації кінетичних рухів
на основі MEMS»**

Виконав: студент групи
ЕЛ-20дм

І. О. Алекперов

Керівник

к.т.н., доц..
О.І. Захожай

Завідувач кафедри

к.т.н., проф.
Ю.Э. Паеранд

Рецензент

д.т.н., проф.
В. М. Смолій

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Інститут, факультет, відділення **інформаційних технологій та електроніки**
Кафедра електронних апаратів

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки **171 «Електроніка»**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕА

«___» _____ 2021 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ
Алекперов Ігор Олегович

1. **Тема проекту:** Електронна система ідентифікації кінетичних рухів на основі MEMS

2. **Керівник проекту:** к.т.н., доцент О.І. Захожай

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 12.02.2021 р. № 38/15.14

3. **Строк подання студентом проекту** 20. 12. 2021 р.

4. **Зміст розрахунково-пояснювальної записки** (перелік питань, які потрібно розробити):

4.1. Вступ

4.2. Літературний огляд

4.3. Нанотранзисторні структури на традиційних матеріалах

4.4. Прилади на резонансно-тунельному ефекті

4.5. Нанoeлектронні структури на нових матеріалах

4.6. Технологічні методи отримання наноелектронних елементів

4.7. Охорона праці

5. **Консультанти розділів проекту**

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	доц. О.І. Захожай		

6. Дата видачі завдання 15.09.2021 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів дипломного Проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вступ	07.08.21	
2	Аналітичний огляд	20.09.21	
3	Теоретична частина	05.10.21	
4	Розробка апаратного забезпечення	15.10.21	
5	Вибір умов охолодження	30.10.21	
6	Розрахунок надійності пристрою	15.11.21	
7	Розробка програмного забезпечення	28.11.21	
8	Оформлення пояснювальної записки	11.12.21	

Студент _____ Алекперов І.О.

Керівник проекту _____ Захожай О.І.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить:

Сторінок – 105, рисунків – 60, таблиць – 24, джерел літератури – 27.

Об'єкт дослідження – У ході досліджень було вирішено створити автономний пристрій керування кроковим двигуном на основі модулю MEMS (Micro-Electro-Mechanical System – мікроелектромеханічна система). У робочому процесі були проведені розрахунки параметрів та розробка конструкції друкарського блоку обладнання, а також розроблено програмне забезпечення.

Мета роботи – дослідження взаємодії людино-машинних інтерфейсів та розробка приладу для ролі посередника.

Конструктивні і техніко-експлуатаційні показники розробки наступні: розміри друкованого вузла 100 × 78.73 × 31.8 мм, середнє напрацювання на відмову 10000 годин.

**MEMS-МОДУЛЬ, МІКРОКОНТРОЛЛЕР, КРОКОВИЙ ДВИГУН,
ПЛАТА ДРУКОВАНА, ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК,
НАДІЙНІСТЬ, РОЗРОБКА.**

					ДПМ 171.1 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дат			
Разраб.	Алекперов				Лит.	Лист	Листов
Провер.	Захожай					4	105
Реценз.	Смолій				ВНУ гр.ЕЛ-20ДМ		
Н. Контр.							
Утверд.	Паеранд						

ЗМІСТ

Вступ.....	6
Розділ 1. Аналітичний огляд.....	8
1.1 Робототехніка та маніпулятори сфера їх застосування.	8
1.2 Електронні пристрої в роботі маніпулятора використання мемс.....	12
1.3 Поняття гіроскопа і акселерометра області застосування.....	16
Розділ 2. Теоретична частина	23
2.1. Об'єкт досліджень.....	23
2.2. Мемс технології	25
2.3. Технології розпізнавання жестів	28
2.4. Двигуни у робототехніці	30
Розділ 3. Основна частина	34
3.1 Розробка апаратного забезпечення.	34
3.1.1 Опис схеми електричної структурної.....	34
3.1.2 Опис та розробка схеми електричної принципової.	37
3.1.3 Визначення вимог по стійкості до механічних і кліматичних впливів.	40
3.1.4 Вибір елементної бази і попередня компоновка конструкції електронного пристрою.	41
3.1.5 Розробка конструкції друкованої плати.....	75
3.1.6 Розробка конструкції друкованого вузла.....	78
3.1.7 Вибір умов охолодження і розрахунок теплового режиму.....	83
3.1.8 Розрахунок надійності пристрою	87
3.1.9 Вихідні дані створення апаратного забезпечення	89
3.2 Розробка програмного забезпечення.....	90
Висновки.....	91
Перелік посилань	92
Додаток А. Програмний код..	95

ВСТУП

Актуальність досліджень. Захоплення та розпізнання руху в даний час є гарячою точкою дослідження у сфері взаємодії людини та комп'ютера. Захоплення руху — це багатопрофільна область застосування, яка включає взаємодію нещодавно розроблених технологій для різних областей, таких як електроніка, комунікації, керування, комп'ютерна графіка, ергономіка та навігація. Більше того, захоплення руху в даний час, зазнало широкого розвитку у виробництві фільмів і телебачення, керування роботами, інтерактивних іграх, спортивних тренуваннях, медична реабілітація та інші галузі.

Основною задачею дослідження стала розробка універсального людино-машинного інтерфейсу зчитування кінематичних переміщень рухів людини та послідовних команд відповідно до виконаного руху. Апаратна реалізація людино-машинного інтерфейсу полягає у розробці пристрою ідентифікації рухів для формування команд виконавчому механізму у відповідності з кінематичними рухами людини.

Рішенням стала система розпізнання кінетичних рухів на рівні компактного переносного девайсу з можливістю автономної роботи від заряду акумуляторної батареї. Ідея такого схемотехнічного рішення полягає у зчитуванні переміщень девайсу у просторі завдяки MEMS акселерометру та гіроскопу. Самим важливим аспектом та перевагою такої розробки є те що людина може знаходитися на відстані від виконавчого механізму. [27]

В основі пристрою зчитування покладено використання MEMS, яка здійснює ідентифікацію рухів людини у відповідні електричні сигнали. Принцип роботи MEMS-маніпулятора проілюстрований на рисунку 1.0.

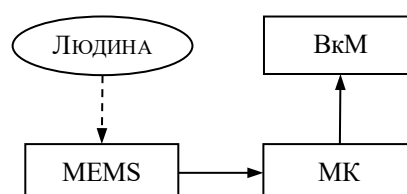


Рис 1.0. Структурна схема системи ідентифікації кінетичних рухів

MEMS датчик перетворює кінематичні рухи людини та перетворює їх на електричний сигнал, що надходить до мікроконтролера МК котрий в свою чергу відправляє відповідні команди на виконавчий механізм ВкМ. Виконавчим механізмом може виступати широкий перелік приладів котрі можливо застосувати у комбінації з ідентифікуючим рухи MEMS датчиком, це будь який прилад що виконує команди відповідно до виконаного руху (н.п. включення, переміщення).

Представлена система має достатньо широке прикладне застосування для побудови будь-яких людино-машинних інтерфейсів з широким застосуванням. Сферами застосування такого можуть бути різноманітними, як медицина так і воєнна промисловість. При цьому слід зазначити що використання бездротового зв'язку між мікроконтролером та MEMS датчиком дозволить збільшити як радіус застосування приладу, так і можливість роботи на відстані. Основними функціональними особливостями системи управління є:

- автономність системи;
- управління двигуном на відстані;
- управління двигуном завдяки кінетичній силі.

Об'єкт досліджень: Електронна система ідентифікації кінетичних рухів на основі MEMS.

Предмет досліджень: Способи побудови систем керування об'єктами, завдяки двигунам керованими кінетичною силою на відстані.

Завдання дослідження: Розробка автономної електронної системи ідентифікації кінетичних рухів на основі MEMS і перетворення на команди.

Методи дослідження: Системний аналіз, розрахунок показників температури та надійності, програмування об'єктно-орієнтоване.

Практичне значення отриманих результатів: Практичне застосування результатів, які ми отримали в ході роботи, дуже різноманітне, від розважальної та медичної сфер до військово-промислової.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Робототехніка та маніпулятори сфера їх застосування.

Автоматизація усіх видів та підвидів виробництва наразі є однією з основних причин розвитку сучасної техніки. Ось з цих причин робототехніка все активніше входить в наше життя, роблячи його набагато більш зручним, комфортним та безпечнішим. Сфери використання роботів розширюються з кожним днем. Це зумовлено впровадженням все нових і нових функцій і поступовим поліпшенням працездатності та довго тривалості виробів. Основна мета впровадження роботизованих систем і автоматичних роботів в виробництво та його процеси - замінити або оптимізувати людську працю в сферах або завданнях, в яких його використання нерентабельне, небезпечне або є джерелом помилок. Виключивши певний людський фактор та інші аспекти, роботодавці знижують відсоток браку і підвищують продуктивність за рахунок збільшення швидкості і точності рутинних операцій [18].

Наприклад для проведення океанологічних досліджень використовують підводних роботів. А їх робота полягає в пошуку і забезпеченні підйому затонулих об'єктів, також в проведенні аварійно-рятувальних та інспекційних робіт, дослідженні океанічного дна і підводного простору, проведенні геологічних робіт на морському дні, монтажних робіт, збір представників підводної флори і фауни і т.д. Даний тип роботів також використовують для обслуговування та ремонту устаткувань підводних нафтових свердловин, георозвідки і видобутку корисних копалин з дна у вигляді розсипів руд і конкрецій.

У військових цілях їх можуть використовувати для створення і обслуговування підводних секретних баз, ракетних баз, підйому з дна затонулих об'єктів військового призначення, порятунку екіпажів затонулих підводних човнів, пошук загублених ядерних бомб, штучних супутників Землі, несправних підводних апаратів тощо [19].

Слід зазначити, що існує великий спектр роботів, призначених для роботи на атомних електростанціях – діючих і тих, що виводяться з експлуатації, а також на підприємствах атомної промисловості, наприклад, на підприємствах, зайнятих виробництвом урану. Це важливий напрямок роботизації, оскільки на таких підприємствах існує підвищена небезпека радіоактивного зараження і використання тут робототехніки в прямому сенсі може рятувати життя і здоров'я людей. В оборонній промисловості робототехнічні системи використовують при роботі з боєприпасами.

Широкі можливості застосування роботів в медицині. Наприклад, створення штучних кінцівок і протезів. Мета створення медичних робо протезів – це відтворення втрачених кінцівок, що володіють як можна більш подібними можливостями, для відновлення функціональності людини з обмеженими здібностями. Вони універсальні, гнучкі і управляються оператором-інвалідом.

Сучасні роботи-маніпулятори допомагають виключити можливі помилки і збої в роботі. Всі виробничі процедури виконуються з максимальною точністю, що виключає ризик можливих збитків. Керівники виробничих об'єднань відзначають безперебійність і високу продуктивність за рахунок використання робототехніки, адже промислові роботи-маніпулятори можуть бути оснащені різними видами маніпуляторів в залежності від оснащення об'єкта і побажань замовника.

Для більш точного визначення що таке маніпулятор слід звернутись до термінологічних словників одже: Маніпулятор (лат. *manipulare* - керувати, керувати за допомогою рук) - здійснюють безпосереднє введення інформації, вказуючи курсором на екрані монітора команду або місце введення даних. Використовуються для полегшення керування комп'ютером (ПК). До маніпуляторів належать мишка, трекбол, графічний планшет, світлове перо, тачпад, сенсорний екран, *Roller Mouse*, *pointing stick*, джойстик та ігрові маніпулятори. Простіше кажучи, маніпулятори – це все те, чим можна переміщати курсор на дисплеї.

Маніпулятор, по своїй структурі, є багат шаровим пристроєм, кожний окремий елемент його містить механічний зв'язок. Перша ланка маніпулятора є основою робота, а остання несе робочий орган, який безпосередньо взаємодіє з об'єктом на якого здійснюється маніпулювання. Система структурних елементів сполучена між собою обертальними і поступальними зв'язками. Залежно від характеру і кількості таких зв'язків елементи які з'єднують складові маніпулятора можуть бути виконані з використанням:

- декартової системи координат;
- циліндричної системи координат;
- сферичної системи координат;
- обертальної системи координат;
- паралельної зв'язку;
- кінематичної схеми SCARA.

Для прикладу розглянемо маніпулятор (рис. 1.1) який складається з вертикальної стійки і дволанкової шарнірної руки. Його ланки оснащені електроприводами, які забезпечують його переміщення і контроль.

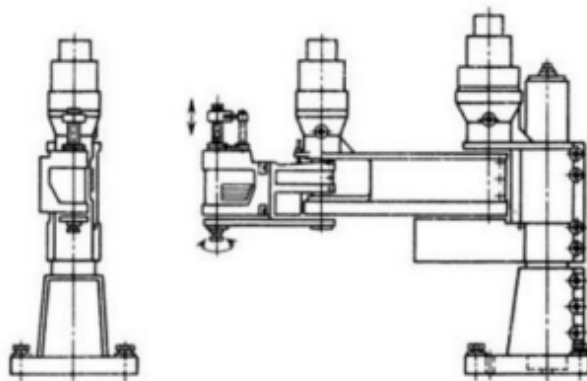


Рис. 1.1. Зображення дволанкового маніпулятора

Маніпулятор може мати обертальні два в горизонтальній площині ступені рухливості і перпендикулярний до них – поступальний (рис. 1.2). Таке сполучення має назву "SCARA" (Selective Compliance Assemble Robot Arm – рука складального робота з виборчою піддатливістю) [20].

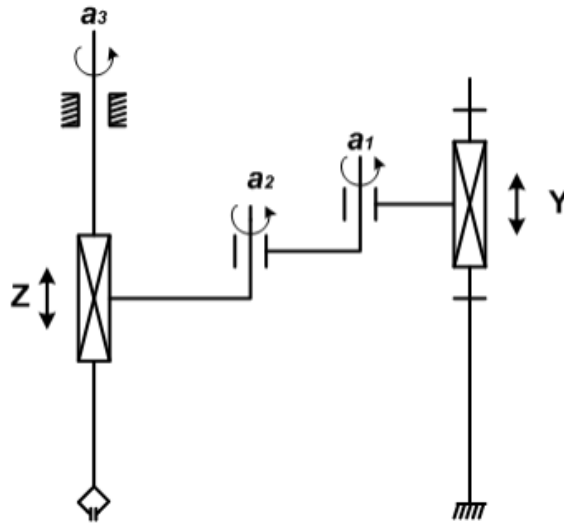


Рис. 1.2. Зображення механічної системи маніпулятора

Їх відмінність зазвичай полягає у обертанні ланок в плечовому і ліктьовому суглобі (під кутами a_1 і a_2), що зумовлене горизонтальною площиною, та використанням вертикальної рухливості для виконання поступальних рухів захватного пристрою в напрямку Z . Також можливе й ручне переміщення по напрямку Y з певною фіксацією встановленого положення. На вільному кінці ланки закріплений пневмоциліндр вертикального ходу захватного пристрою. Захватний пристрій може повертатися на кут $\pm 360^\circ \cdot n$ (програмується число оборотів) навколо вертикальної осі [20].

Програмування промислового робота (ПР) проводиться з пульта, оснащеного телевізійним монітором (рис 1.3). В пам'ять керуючої мікроЕОМ можуть бути одночасно введені п'ять програм з умовою автоматичної зміни.



Рис. 1.3. Пульт для керування маніпулятором

За рахунок високої жорсткості в вертикальному напрямку роботи даного типу можуть переносити вантаж до 30 кг, і при цьому вони дуже зручні для виконання складальних операцій.

1.2 Електронні пристрої в роботі маніпулятора використання МЕМС.

Маніпулятори роботів запускаються в дію при допомозі виконавчих приводів, які застосовують і переробляють електричні сигнали «електронного мозку» – керуючого пристрою – в необхідному положенні ланки. Ось тому серйозним питанням буде вибір типу приводу, адже привід може визначати динамічні характеристики роботи, від його точності, числа точок позиціонування, та вимог до умов експлуатації.

Привід, як відомо, включає в себе, перш за все двигун і відповідний пристрій керування. Крім цього, в склад приводу можуть входити різні механізми для передачі і перетворення руху (редуктори, перетворювачі обертового руху в поступальний і навпаки), гальмо і муфта.

При виборі типу приводу необхідно враховувати наступні фактори:

- навантаження, що діє на робочий орган;
- кінематику маніпулятора, тобто закони руху всіх ланок і робочого органу, що враховують процеси розгону і гальмування;
- необхідну точність позиціонування, відтворення траєкторії і швидкісних характеристик ланок;
- умови навколишнього середовища (забруднення, запиленість, пожежота вибухонебезпечність, агресивність, висока температура і ін.);
- регламент експлуатації робота (бажаний ККД, надійність, термін служби, компоновка та ін.).

Основна область застосування електричних приводів в робототехніці на сьогоднішній день – це роботи середньої вантажопідйомності (десятки кілограм), легкі роботи з позиційним і контурним управлінням та важкі, перш за все рухливі роботи, з циклових і простим позиційним керуванням. Маніпулятори з електромеханічними приводами мають кращу точність і повторюваність рухів, ніж гідравлічні або механічні.

Одже слід дати означення електронному пристрою (від англ. electronic device) це пристрій, виготовлений з використанням електронних компонентів (або радіоелектронних), принцип дії якого забезпечує переважно електрика. Наприклад, бортовий радіоелектронний пристрій системи посадки літального апарату. Як наслідок унікальні властивості, висока якість та надійність пристроїв мікросистемної техніки (МСТ) вже кілька десятиліть привертають увагу фахівців різних напрямів науки та техніки. Прецизійність виконавчих пристроїв, чутливість датчиків та перетворювачів енергії, швидкодія, малі розміри, маса та споживана енергія забезпечуються високим рівнем інтелекту розробників, конструкторів та технологів. Рівень капіталовкладень у виробництво МСТ технічно розвинених країн світу зростає з кожним роком. Розвиток мікросистемної техніки є актуальним завданням для вітчизняного космічного приладобудування.

Мікроелектромеханічні системи (МЕМС) - пристрої мікросистемою техніки, сформовані шляхом локального витравлення підкладки, легування, нанесення на неї матеріалу тощо. Підкладки, як правило, виготовляються із кремнію. Розміри МЕМС лежать у діапазоні від 1 мікрона до кількох міліметрів, залежно від потужності, області застосування, наявності вбудованих схем обробки та кількість елементів (рис. 1.4). У всіх пристроях МЕМС присутні елементи різної фізичної природи, що поєднуються принципом аналогії фізичних та хімічних процесів [4]. При цьому існує можливість вибору таких поєднань компонентів, які забезпечують отримання характеристик пристроїв, що перевищують можливості вихідних складових. Крім того, процес мікромініатюризації цих компонентів супроводжується зміною співвідношень сил, які у них.

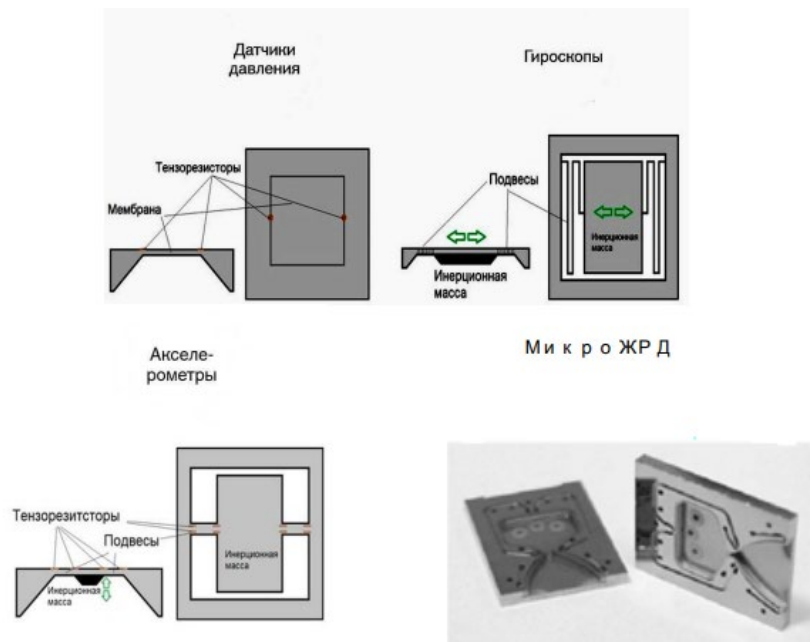


Рис. 1.4. Приклади застосування МЕМС рисунок модифікований з [4].

Освоєними компонентами МСТ є сенсори та актюатори, які виготовляються на кремнієвих підкладках з використанням об'ємних, поверхневих та комбінованих технологічних процесів. У МСТ використовуються різні матеріали: кераміки, полімери (органічні та неорганічні, об'ємні та клітинні), алотропні форми вуглецю, феромагнітні рідини, фотонні

кристали, інтелектуальні матеріали, стекла, різні метали, багат шарові структури металів та ін [5]. Властивості цих матеріалів у плівкових, лінійних та точкових структурах можуть істотно відрізнятися від властивостей у об'ємному стані.

Застосування МЕМС технології дозволяє отримувати мікромеханічні та оптичні вузли значно менших розмірів, ніж це можливо традиційним технологіям. Ідея виготовлення сенсорів та обробних схем в одному пристрої дає чудову можливість створювати готові, достатньо високої складності виробу в єдиному, відносно невеликому корпусі, що є вигідним розробникам кінцевих пристроїв, оскільки дозволяє виконувати проект на основі готових рішень на рівні закінчених функціональних модулів.

Також перевагою МЕМС є електронна частина, та електричні з'єднання з датчиками та механізмами, виконані по інтегральній технології та мають малі розміри, оскільки вони дозволяють покращити такі характеристики, як робочі частоти, співвідношення сигнал/шум тощо. п. Висока повторюваність чутливих елементів, та їх інтегральне виготовлення разом із обробною схемою дозволяє значно підвищити точність вимірів.

Завдяки інтегральній технології надійність МЕМС вище, ніж надійність аналогічної системи, яка зібрана із дискретних компонентів. Також більшою надійністю і довговічністю мають оптичні системи, оскільки вони розташовуються в герметичному корпусі та захищені від впливів зовнішнього середовища. Сонячна енергетика знаходиться на порозі бурхливого розвитку. Поряд із кремнієвими елементами сонячних батарей на монокремнії, полікремнії та аморфно, з'являються все нові перспективні матеріали: двоокис титану, оксид цинку, органічні з'єднання та інші. До матеріалів цього класу пред'являються вимоги ефективного поглинання світлового випромінювання в широкому спектрі частот, ефективного поділу позитивних та негативних зарядів комплексом наноструктур за рахунок поглинання енергії сонця, забезпечення рекомбінації позитивних та негативних зарядів з вивільненням кулонівської

енергії при замиканні зовнішнього ланцюга струмового навантаження, збереження працездатності матеріалу протягом тривалого часу (до 50000 годин).

1.3 Поняття гіроскопа і акселерометра області застосування

Сучасні реалії України вимагають дедалі більшого кількісного контролю втоми працівників. Особливо актуальним є питання оцінки стосовно транспортної галузі, оскільки на дорогах України через втрату уваги та втому водіїв відбувається все більше аварій, жертвами яких є різні категорії населення. Таким чином, потрібна розробка апаратно-програмних засобів щодо оцінки втоми людини [23]. Одним із таких перспективних напрямків є технічні засоби із застосуванням цифрових гіроскопів. Історично військова галузь була основним застосуванням гіроскопічних пристроїв. У той же час, з розвитком біотехнологій та біомедичної інженерії стали з'являтися завдання, в основі яких лежить застосування цього типу сенсорів для визначення положення конкретних частин тіла у просторі з метою оцінки певних фізіологічних параметрів людини та їх нормування. Тому використання гіроскопічного датчика для задач визначення ступеня втоми працівника є актуальним завданням.

Технологія гіроскопа та акселерометра застосовується, здебільшого, для стабілізації об'єкта у просторі, а також обчисленні його координат, прикладом такої області використання можуть бути навігаційні системи, головним завданням яких є визначення положення досліджуваного об'єкта у просторових координатах. Тим часом, можливе використання даної технології в біомедичній техніці, а саме для визначення ступеня втоми працівника кількості скорочень м'язів, наприклад, руки – для реєстрації тремору верхньої кінцівки. Також можливе визначення низькочастотних змін в поставі випробуваного, і, як наслідок, оцінки інтегрального показника втоми працівника мимовільні скорочення та розслаблення м'язів зовні виявляються, як тремтіння. Якщо взяти руку, яка буде паралельна підлозі, і позначити її як базову вісь (нуль), то

вміщений 3-х осьовий гіроскоп на поверхню тіла, при прояві ознак тремтіння (вгору-вниз) реєструватиме дане відхилення.

Тремор є гіперкінезом кінцівок, проявляється він у мимовільних коливальних рухах кінцівок тіла (руки, ноги, нижня щелепа, голова). Захворювання може бути спричинене різними факторами: втома, хвороба Паркінсона, пошкодження мозочка, емоційний зрив, отруєння ртуттю, літієм, алкоголем тощо. Тремор по частоті коливальних рухів поділяється на повільний (3-5 Гц) і швидкий (6-12 Гц), то, наприклад, при реєстрації частоти 6-12 Гц буде видаватися інформація про високу перевтому працівника.

Принцип роботи гіроскопа базується на визначенні кута повороту об'єкта за допомогою вимірів кутових швидкостей. В ньому використовується дія сили Коріоліса, яка відхиляє пластину, що вібрує. Це зміщення щодо нуля реєструється та перетворюється на кутову швидкість. Однак, гіроскопи застосовуються не по окремо, а в комплексі з акселерометрами. Така потреба викликана тим, що при знятті показань з обох датчиків компенсується похибка кожного окремо взятого датчика. Акселерометри, вимірюючи лінійне прискорення, переважно застосовні на довгих дистанціях.

Застосовуючи їх на більш коротких дистанціях, можна отримати шум. У свою чергу гіроскопи застосовуються на коротких відстанях, тому що, якщо використовувати їх на довгих ділянках, то при інтегруванні суми всіх показань накопичуватиметься похибка, що призведе до неточностей самих показань. Тому гіроскопи використовують з акселерометрами, щоб компенсувати похибки, викликані як методом отримання вимірів, але та зовнішніми факторами (вібрація конструкції). Після зчитування даних з обох датчиків та перетворення їх використовується спеціальний метод математичних розрахунків [6].

Грунтуючись на тому, що гіроскоп у комплексі з акселерометром реєструє найменші (залежно від діапазону чутливості різних модулів) зміни положення об'єкта в координатній сітці, то можна визначити вид тремору, його причину та вплив на працездатність. Наприклад, люди з синильним тремором, який не надає значного впливу на рух людини, можуть допускатися до роботи (рис. 1.5).

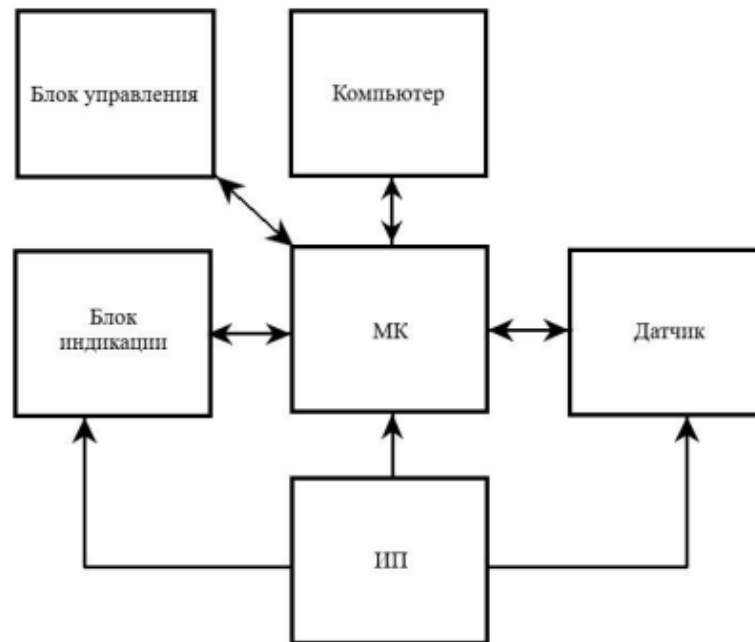


Рис. 1.5. Структурна схема акселерометра модифікований з [1]

Центральним елементом пристрою є мікроконтролер (МК). Для прикладу був взяті мікроконтролер Arduino Uno - це пристрій на основі мікроконтролера ATmega328. З важливих особливостей для роботи цей пристрій має: 14 цифрових входів/виходів (з них 6 можуть використовуватися як ШІМ-виходи), 6 аналогових входів, кварцовий резонатор на 16 МГц, роз'єм USB, роз'єм живлення, роз'єм для внутрішньосхемного програмування (ICSP) та кнопка скидання. Для початку роботи пристрою слід просто подати живлення від джерела живлення (ІП), або підключити його до комп'ютера за допомогою USB-кабелю.

Одже слід дати визначення гіроскопу (від грец. γῦρος «коло» + σκοπέω «дивлюся») — пристрій, здатний реагувати на зміну кутів орієнтації тіла, на якому воно встановлено, щодо інерційної системи відліку. Найпростіший приклад гіроскопа - дзиґа (дзиґа). Термін вперше запроваджено Ж. Фуко у своїй доповіді у 1852 році у Французькій Академії Наук. Доповідь була присвячена методам експериментального виявлення обертання Землі в інерційному просторі. Цим і зумовлено назву «гіроскоп».

А визначення акселерометра (лат. *accelero* — прискорюю та ін.-грец. *μετρέω* «вимірюю») — прилад, що вимірює проекцію прискорення (різниці між істинним прискоренням об'єкта і гравітаційним прискоренням). Як правило, акселерометр є чутливою масою, закріпленою в пружному підвісі. Відхилення маси від її первісного становища за наявності прискорення несе інформацію про величину цього прискорення.

За конструктивним виконанням акселерометри поділяються на однокомпонентні, двокомпонентні, трикомпонентні. Відповідно, вони дозволяють вимірювати проекції прискорення, що здається, на одну, дві і три осі. Деякі акселерометри також мають вбудовані системи збирання та обробки даних. Це дозволяє створювати завершені системи для вимірювання прискорення та вібрації з усіма необхідними елементами.

За останні кілька років широкого поширення по всьому світу набули датчики, засновані на мікроелектромеханічних системах, так званих МЕМС. Популярність даних пристроїв обумовлена низкою причин, основними з яких є простота їх використання відносно низька ціна і малі габарити. МЕМС-датчики, як правило, оснащуються інтегрованою електронікою обробки сигналу і не мають частин, що рухаються. Цим обумовлюється їхня висока надійність і здатність забезпечувати стабільні показання в досить жорстких умовах навколишнього середовища (перепади температур, удари, вологість, вібрація, електромагнітні та високочастотні перешкоди). Сукупність даних переваг спонукає виробників систем для різних сфер застосування (від авіа- та автомобілебудування до побутової техніки) використовувати у своїх розробках ті чи інші МЕМС-сенсори. Нами розглянуті МЕМС-датчики для вимірювання прискорення (акселерометри) та кутової швидкості (гіроскопи). Дані пристрої активно використовуються в системах управління літальними апаратами, для забезпечення безпеки руху автомобілів, у сільськогосподарській техніці, виробках спеціального призначення та ін. В даний час існує багато різних рішень щодо виконання МЕМС-пристроїв. Серед них – одноосьовий МЕМС-гіроскоп з віброуючим кільцем і триосьовий ємнісний МЕМС-акселерометр.

Одноосьовий МЕМС-датчик кутової швидкості (гіроскоп) з вібруючим кремнієвим кільцем. Цей кремнієвий цифровий гіроскоп розроблений з урахуванням вимог до низької вартості виробу та економічного енергоспоживання для систем навігації та наведення нового покоління. Він здатний вимірювати кутову швидкість до $\pm 1,0$ $\epsilon/\text{с}$ і має два режими виведення: аналоговий сигнал напруги, лінійно-пропорційний кутовий швидкості та цифровий за протоколом SPI[®].

Режим виведення – аналоговий або цифровий – вибирається користувачем при підключенні датчика до будь-якої системної плати. Головною відмінністю гіроскопа є застосування технології збалансованого вібруючого кільця як датчика кутової швидкості. Саме вона забезпечує надійну роботу та точне вимірювання швидкості обертання навіть за умов сильної вібрації.

Можливі дві основні конфігурації гіроскопа, одна з них дозволяє датчику вимірювати кутову швидкість осі, перпендикулярної до площини системної плати, інша дає можливість визначати кутову швидкість осі, паралельної площині материнської плати. Поєднання в одному пристрої гіроскопів обох конфігурацій дозволяє отримати інерційну систему, що вимірює кутову швидкість по кількох осях (будь-які поєднання тангажу, крену та нишпорення літального апарату). Розміри датчиків обох конфігурацій та осі вимірювання кутової швидкості наведено на рис.1.6.

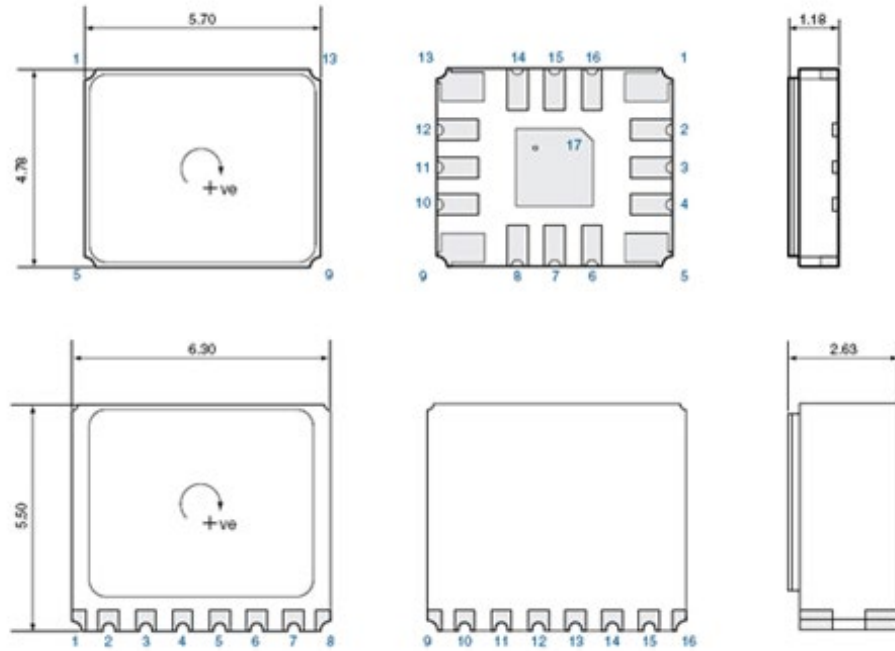


Рис. 1.6. Розмір датчиків

Як правило, подібні гіроскопи випускаються в герметичних керамічних LCC корпусах, які можна встановлювати на системні плати. Датчик складається з п'яти основних компонентів:

- кремнієвий кільцевий MEMC-сенсор (MEMS-ring),
- основа з кремнію (Pedestal),
- інтегральна мікросхема гіроскопа (ASIC),
- корпус (Package Base),
- Кришка (Lid).

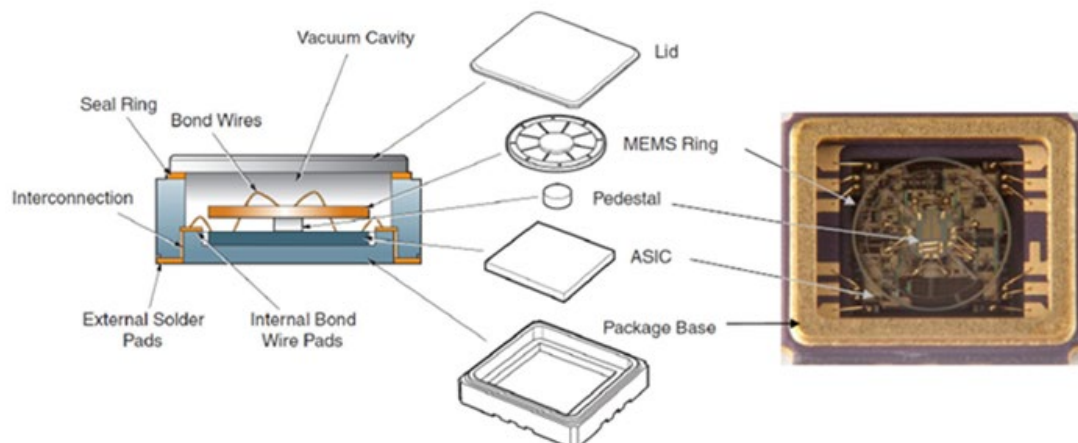


Рис. 1.7. Склад гіроскопу

Кремнієвий кільцевий МЕМС-сенсор, мікросхема та кремнієва основа розміщені у герметичній частині корпусу з вакуумом, частково заповненим азотом. Це дає серйозні переваги перед сенсорами, які постачаються у пластикових корпусах, які мають певні обмеження чутливості залежно від рівня вологості.

Кремнієвий кільцевий МЕМС-сенсор. Діаметр кремнієвого МЕМС-кільця дорівнює 3 мм, товщина – 65 мкм. Його виготовляють методом глибокого іонного реактивного травлення об'ємних кремнієвих структур на 5” пластинах. Кільце підтримується у вільному просторі вісьмома парами симетричних спиць, які виходять із твердого концентратора діаметром 1 мм. у центрі кільця.

Процес об'ємного травлення кремнію та унікальна технологія виготовлення кільця дозволяють отримати хороші геометричні властивості, необхідні для точного балансу та термічної стабільності сенсорного кільця. На відміну від інших гіроскопів тут немає дрібних розбіжностей, які створюють проблеми з інтерференцією та тертям. Зазначені особливості суттєво визначають стабільність датчика при коливаннях температури, вібрації чи ударі. Ще однією перевагою подібної конструкції є її «вроджений» імунітет до помилок, які датчики можуть видавати під впливом прискорення, або «g – чутливість».

Виходячи з огляду літератури перед нами стояло ряд завдань:

- Розроблена комп'ютерна система контролю крокового двигуна на основі MEMS-маніпулятора.
- Розроблення апаратного забезпечення.
- Розроблення програмного забезпечення мікроконтролера.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1. Об'єкт досліджень.

Задачею дослідження данної роботи є розробка автономного, універсального людино-машинного інтерфейсу перетворення кінематичних переміщень людини до відповідної послідовності команд кроковому двигуну на кутове обертання і для цього було розглянуто необхідні параметри. Апаратна реалізація людино-машинного інтерфейсу полягає у розробці пристрою ідентифікації кінетичних рухів на основі MEMS для формування команд у відповідності з кінематичними рухами людини і наступної їх відправки кроковому двигуну.

Ефективним засобом вирішення багатьох завдань комплексної автоматизації є робототехнічні системи та комплекси. Робототехнічна система – це система, що включає роботів, робочі органи роботів, а також машини, устаткування, пристрої та датчики, які підтримують роботів під час роботи [18]. Роль роботів в таких системах може бути: - основна, коли роботи здійснюють головні функції; та допоміжна, коли роботи обслуговують основне або допоміжне устаткування, що виконує ці функції.

Основними компонентами робота є маніпуляційний механізм і автоматична система управління, яка включає мікроЕОМ або комплекс мікропроцесорів, а в ряді випадків включає і сенсорний пристрій [19]. По призначенню і областям застосування роботів, їх можна поділити на три класи:

- 1) маніпуляційні (або роботи-маніпулятори);
- 2) інформаційні;
- 3) крокуючі роботи.

Інформаційні роботи дають змогу автоматично отримувати і передавати інформацію про досліджуваний об'єкт. Найчастіше роботи цього класу призначені для використання в космосі, на орбіті Землі або інших планет, у відкритому космічному просторі, на поверхні різних космічних тіл, а також пов'язані з космічними дослідженнями. До цього класу також входять апарати для

дослідження дна і підводного простору, а також для проведення підводних робіт тощо.

В даний час велика увага приділяється розробці крокуючих роботів, так як такі роботи можуть застосовуватись в медицині. Наприклад, роботиекзоскелетони, які закріплюються безпосередньо на людині-операторові і які фізично розвантажують оператора, забезпечують йому фізичну підтримку, збільшують його фізичні здібності [26]. Найбільш великий клас роботів-маніпуляторів. Маніпуляційним роботом називають технічний пристрій, який забезпечений маніпуляторами і котрий має можливість виконувати різноманітні механічні операції в заданому робочому радіусі.

Комп'ютерна система керування кроковим двигуном — це комплекс програмно-технічних засобів, що використовуються для формування організації контролю доступу до об'єктів різного розміру та складності доступу. Ця концепція дозволяє контролювати доступ до малих (один або кілька контрольних пунктів) і великих розподілених об'єктів (включаючи промислові об'єкти) без обмеження кількості контрольних точок.

В основі пристрою маніпулятора покладено використання мікроелектромеханічної системи (MEMS – Micro-Electro-Mechanical System), яка ідентифікує рухи людини і перетворює їх у відповідні електричні сигнали. Принцип дії ідентифікації кінетичних рухів продемонстровано на рисунку 2.1.

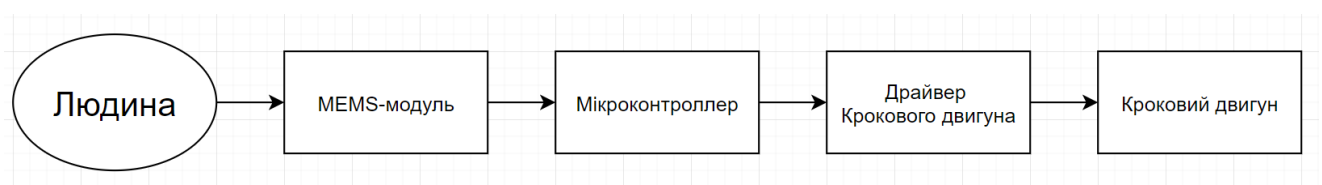


Рис. 2.1. Структурна схема системи ідентифікації та перетворення кінетичних рухів на основі MEMS-маніпулятора

Такий підхід має дуже практичний і має широку область застосувань. Його можна використовувати як для особистого користування, наприклад, у

виробництві іграшок і роботів, так і у комерційних цілях, як прилад контролю у різноманітних механізмах.

Недоліки пристрою:

- обмежений час роботи від батареї;
- при неправильному керуванні з'являється механічний резонанс;
- складнощі при роботі з дуже високими швидкостями;
- споживання електроенергії не зменшується навіть без навантаження.

2.2. MEMS технології.

Термін MEMS відноситься до технології, яка мініатюризує механічні структури та інтегрує їх в електронні схеми. В результаті утворюються більш правильні пристрої, які називаються «системами», оскільки в них механічні частини та електричні компоненти працюють разом і вирішують спільні проблеми.

Отже, MEMS є мікроелектронною та мікромеханічною системою. У порівнянні з електричними рішеннями, механічні компоненти та системи зазвичай вважаються низькотехнологічними, але це не означає, що механічна основа завжди низькотехнологічна. Наприклад, механічні реле набагато старіші за транзисторні компоненти, які виконують ту ж функцію, але реле все ще широко використовуються. Однак у порівнянні з електронним обладнанням більшість механічного обладнання дуже великі. Навіть коли механічні компоненти є простішими та ефективнішими рішеннями, їх часто замінюють електронікою через економію місця на друкованій платі та мінімізацію загального розміру

Однак у порівнянні з електронним обладнанням більшість механічного обладнання дуже великого розміру. Навіть коли механічні компоненти є простішими та ефективнішими рішеннями, їх часто замінюють електронікою через економію місця на друкованій платі та мінімізацію загального розміру. Технологія MEMS представляє концептуально нове рішення цієї дилеми: якщо ви модифікуєте механічні компоненти так, щоб вони не тільки стали

мініатюрними, але й процес їх виготовлення був точно таким же, як і у мікросхеми, ви отримаєте шпалери, які поєднують переваги Компонентна технологія.

Структури MEMS виготовляються шляхом фізичної модифікації кремнію (або інших матеріалів підкладки). Ця структура потім об'єднується з чіпом для упаковки всієї електромеханічної системи, яка представляє пристрій.

MEMS-пристрої можуть складатися з мікромеханічних структур, мікросенсорів, мікроелектронних схем і мікроактуаторів. Всі вони інтегровані на кристалі. Датчики пристроїв можуть виявляти теплові, механічні, магнітні, електромагнітні або хімічні зміни. Ці зміни можуть бути перетворені в певні сигнали за допомогою ланцюгів, а приводи забезпечують фізичні зміни, а не просто вимірюють їх.

Представлена система має достатньо широке прикладне застосування для побудови будь-яких людино-машинних інтерфейсів з широким застосуванням. Сферами застосування такого можуть бути різноманітними, як медицина так і воєнна промисловість. При цьому слід зазначити що використання бездротового зв'язку між мікроконтролером та MEMS датчиком дозволить збільшити як радіус застосування приладу, так і можливість роботи на відстані.

Сьогодні MEMS компоненти зустрічаються в чотирьох товарних групах:

- аудіо компоненти
- датчики
- ключі
- генератори сигналів

Для створеної системи вибрано MEMS в категорії датчиків. Саме в цій категорії є компонент з функцією відстеження просторового положення, модуль з акселерометром і гіроскопом, який мікротиражується. Опис роботи:

1) MEMS-акселерометр вимірює прискорення, вимірюючи зміни ємності. Він має масу, прикріплену до пружини, яка обмежена для руху в одному напрямку та фіксації зовнішньої пластини. Отже, коли прискорення

застосовується в певному напрямку, маса буде рухатися, і ємність між пластиною і масою зміниться. Ця зміна потужності буде виміряна, оброблена і відповідатиме певному значенню прискорення..

2) MEMS гіроскоп використовує ефект Коріоліса для вимірювання кутової швидкості, як показано на малюнку 2.2.

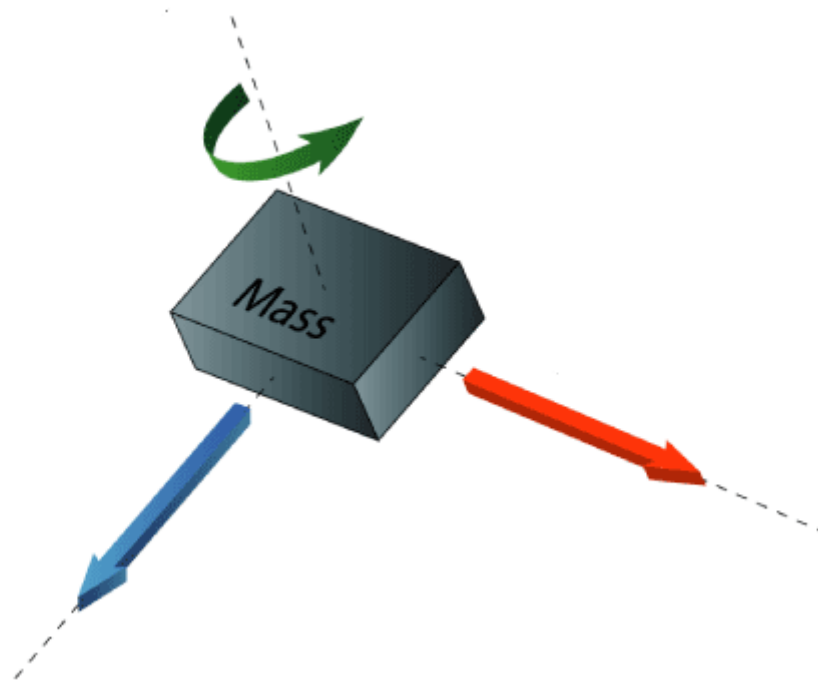


Рис. 2.2. Принцип MEMS Гіроскоп

Коли маса рухається в певному напрямку з певною швидкістю і застосовується кутова зовнішня швидкість, як показано зеленою стрілкою, з'явиться сила, як показано синьо-червоною стрілкою, що змушує масу рухатися вертикально. Настільки схожий на акселерометр, цей рух змінює об'єм, який вимірюється, обробляється і відповідає певній кутовій швидкості. Тобто маса, яка постійно рухається або коливається. При застосуванні зовнішньої кутової швидкості гнучка частина маси буде рухатися і виробляти вертикальне зміщення..

Застосування MEMS зменшує вартість як механічної, так і електронної частин пристрою, оскільки обробна електроніка та MEMS інтегровані в єдиній підкладці, що дозволяє уникнути додаткових з'єднань і, в деяких випадках, застосування узгоджувальних схем.

На сьогоднішній день відомі різні види магнітоспротивів або так звані феромагнітні рідини, які являють собою колоїди з магнітними частинками близько 10 нм, та які вже зараз знайшли практичне застосування. Перспективним напрямом використання феромагнітних рідин, можливо їх застосування у мініатюрних реактивних двигунах, здатних забезпечити можливість переміщення у космосі наносупутників практично будь-якого класу та розмірів, запропоноване дослідниками з Мічиганського технологічного університету. В більшості випадків мініатюрні реактивні двигуни мають ґрати з найтонших голок, товщина яких менша за товщину людського волосся. За рахунок доданих до них електричних полів та інших фізичних ефектів ці голки випускають у простір потоки іонної «рідина», які забезпечують невелику тягу, достатню для руху мініатюрного космічного апарату.

Середній двигун потребує приблизно у двохстах таких голках, які забезпечують йому сумарну тягу, достатню для здійснення переміщень та маневрів у космосі. Але процес виготовлення голок досить складний і дорогий, а голки є надзвичайно крихкими і можуть бути зруйновані впливом різних несприятливих факторів, у тому числі і силою тяги, яку вони самі і створюють. Саме тому така технологія вважається поки неприйнятною і не набула широкого поширення. Вирішенням цієї проблеми може бути магнітна рідина, рідина, в якій розчинені феромагнітні наночастки, завдяки чому вона може текти та приймати певні форми під впливом зовнішні магнітні поля. Під впливом точкового магнітного поля, що індукується постійним або електричним магнітом, така рідина може формувати крихітний «пік», який виступає в ролі голки реактивного двигуна, якою тече іонна "рідина".

2.3. Технології розпізнавання жестів.

Сьогодні виробники мають повністю зрілу технологію оптичного розпізнавання жестів, яка підходить для продуктів масового виробництва. У свою чергу, багато користувачів цікавляться маніпуляторами на основі цієї технології і готові голосувати за них своїми гаманцями, що переконливо

підтверджує індустрія розваг і дослідницькі центри, де присутність людей зводиться до величезного ризику.

Яскравим індикатором зараз є технологія VR (Virtual Reality від англ. Virtual Reality), в якій передача дій створює відчуття присутності зовсім в іншому місці. Однак, коли мова заходить про роль цього типу контролера на ПК, хоча він може замінити повний набір геймпадів, він все ще далекий від справжньої конкуренції між мишками та клавіатурами.

В ідеалі, розпізнавання жестів дозволить людині спілкуватися та співпрацювати з машинами природним шляхом, без будь-яких механічних посередників. Використовуючи датчики руху, технологія розпізнавання жестів дозволяє керувати такими пристроями, як телевізори, комп'ютери та відеоігри, в основному рухаючи руками або пальцями. За допомогою цієї технології ви можете перемикати телеканали, регулювати гучність тощо.

Розпізнавання жестів полегшує людям з обмеженими можливостями використання комп'ютерів і робить спільну роботу в іграх або 3D віртуальних світах більш природною. Використовуючи розпізнавання жестів, ви можете вказати пальцем на екран комп'ютера, і курсор буде рухатися відповідно. Це може зробити такі пристрої, як миші, клавіатури та навіть сенсорні екрани, непотрібними. Розпізнавання жестів, а також розпізнавання обличчя, розпізнавання голосу, стеження за очима та розпізнавання губ є компонентами, які розробники програмного та апаратного забезпечення називають «інтерфейсами, які сприймаються користувачами».

Завданням сприйняття інтерфейсу користувача є підвищення ефективності та зручності використання пристрою, що називається юзабіліті. У персональних комп'ютерах жести найчастіше використовуються для введення команд. Жести рук і тіла можуть бути посилені контролерами з акселерометрами і гіроскопами, які можуть «розуміти» нахил, обертання та прискорення руху. Приклад показано на малюнку 2.2 Людина тримає зчитувач положення в просторі і використовує жести для надсилання команд комп'ютерній системі. Комп'ютерний пристрій також може бути оснащений камерою, що дозволяє програмам пристрою

розпізнавати та інтерпретувати конкретні жести. Наприклад, ви можете зупинити програму, махнувши рукою.



Рис. 2.3. Взаємодія людини та комп'ютерної системи

Тому потрібно сказати, що технологія розпізнавання жестів вже дуже цікава і дуже практична. Хоча до ідеального маніпулятора до цієї технології ще далеко, зараз їх багато, але з точки зору розвитку та практичності вона дуже перспективна. Зараз існує велика кількість маніпуляторів, всі вони призначені для певних цілей.

Ось деякі типи комп'ютерних маніпуляторів: миша, графічний. Найпрактичнішими можна вважати клавіатуру та миш, тому що вони, по-перше, легкі у використанні, а по-друге, є багатоцільовими і мають можливість замінити будь-які маніпулятори з наведених вище.

2.4. Двигуни у робототехніці.

Вибір правильного двигуна має вирішальне значення для ефективності та продуктивності ваших програм управління рухом. Вибирати між серводвигунами та кроковими двигунами може бути важко, оскільки існує

багато критеріїв: вартість, крутний момент, ефективність, швидкість, схема, тощо.

Електричний двигун (електродвигун) – електрична машина, за допомогою якої електрична енергія перетворюється в механічну, для приведення в рух різних механізмів. Електродвигун є основним елементом електроприводу. В даному маніпуляторі встановлені серводвигуни [25]. Серводвигун - це двигун, що обертається з датчиком зворотного зв'язку, який дозволяє точно контролювати кутове положення, швидкість і прискорення виконавчого механізму. До електродвигунів, які призначені для використання в сервомеханізмі, зазвичай висуваються жорсткі вимоги. Ключову роль при виборі двигуна грає його механічна характеристика, а так само параметри, що визначають динамічні характеристики, такі як індуктивність обмоток і момент інерції ротора.

По виду серводвигуни діляться на:

- асинхронні серводвигуни;
- синхронні серводвигуни;
- серводвигуни постійного струму;
- синхронні реактивні серводвигуни.

Найбільш поширеним в промисловості є асинхронний електродвигун. Основними перевагами асинхронного серводвигуна є простота конструкції, надійність, низька собівартість, високий термін служби, високий пусковий момент і перевантажувальна здатність. Відсутність необхідності використовувати окремий вузол для кріплення датчика зворотного зв'язку забезпечує компактні розміри. Малі габарити та вага дозволяють використовувати такий двигун в динамічних системах. Недоліком асинхронного електродвигуна є складність регулювання частоти обертання.

Синхронні двигуни зазвичай використовуються в задачах, де потрібне точне керування швидкістю обертання, або де потрібно максимальне значення таких параметрів як потужність, коефіцієнт корисної дії та ін. Синхронні двигуни здатні задати швидкість обертання електродвигуна з великою точністю, так само

як прискорення і кут повороту. Так само вони можуть швидко досягати номінальної швидкості обертання. Синхронні серводвигуни володіють високою швидкодією, добре поєднуються з імпульсними системами програмного керування та ідеальні для застосування в різних галузях промисловості.

Порівняльний аналіз критеріїв серводвигунів та крокових двигунів дає змогу визначити плюси та мінуси кожного з них. Потім вже можна узгодити можливості мотора з потребами вашої програми.

Відмінності сервоприводів і крокових двигунів для керування рухом

Основна відмінність цих двигунів - загальна кількість полюсів. Крокові двигуни мають багато полюсів, зазвичай від 50 до 100. Серводвигуни мають дуже мало полюсів - від 4 до 12.

Ця різниця в кількості полюсів означає, що кроковий двигун рухається поступово з послідовними імпульсами в замкнутій системі. Серводвигуну потрібен кодер для регулювання імпульсу для регулювання положення. Завдяки великій кількості полюсів крокові двигуни можуть забезпечити точне керування приводом для програм керування рухом. Вони мають високий крутний момент на низьких швидкостях і відносно дешеві та широко доступні.

Незважаючи на обмеження крокових двигунів: на високих швидкостях вони втрачають майже весь крутний момент, іноді до 80%, вони створюють високий рівень вібрації і схильні до проблем з резонансом. Крокові двигуни також виділяють багато тепла, що може бути проблемою в деяких випадках.

Сервомотори в управлінні рухом: плюси і мінуси.

Основна перевага серводвигунів полягає в тому, що вони забезпечують високий крутний момент на високих швидкостях, чого не може зробити кроковий двигун. Їх ефективність роботи досягає 80-90%. Серводвигун може працювати під приводом змінного або постійного струму, і на нього не впливають вібрація або резонанс.

Серводвигуни мають багато переваг, але основним недоліком є те, що вони дорожчі за крокові двигуни. На додаток до вартості кодера і, як правило, коробки передач, вся система може бути дуже дорогою. Крім того, потреба в

кодувальниках і трансмісії робить систему більш механічно складною, що призводить до частішого обслуговування та вищих витрат.

Що стосується методів керування кроковим двигуном, то за останні роки було досягнуто значних успіхів. Широко розроблені режими роботи крокових двигунів: кроковий, напівкроковий і мікрокроковий [12, 14]. Значних успіхів досягнуто також у розробці елементної бази, що використовується для побудови систем керування кроковими двигунами. Сьогодні існує досить широкий вибір спеціалізованих драйверів крокових двигунів, а також мікроконтролерів, які дозволяють реалізувати будь-який необхідний режим керування кроковим двигуном [16, 17]. Однак метод формування команд для керування кроковими двигунами недостатньо розширений, в основному заснований на використанні серії кроків, пов'язаних з певним інтервалом часу (наприклад, використання програми чисельного керування для керування переміщенням робочого інструменту машини).

РОЗДІЛ 3. ОСНОВНА ЧАСТИНА

3.1 Розробка апаратного забезпечення.

В основі досліджень та розробки лягла ідея створення інтерфейсу взаємодії комп'ютерно-людського інтерфейсу. Створюємий прилад має виступити посередником між людиною та комп'ютерною системою, тому він повинен бути незалежним від мережі. У людини яка захоче працювати з приладом не повинно бути складностей, саме тому інтерфейсом введення команд обрано кінетичні рухи людини. Візуально ідею продемонстровано на рисунку 3.0.

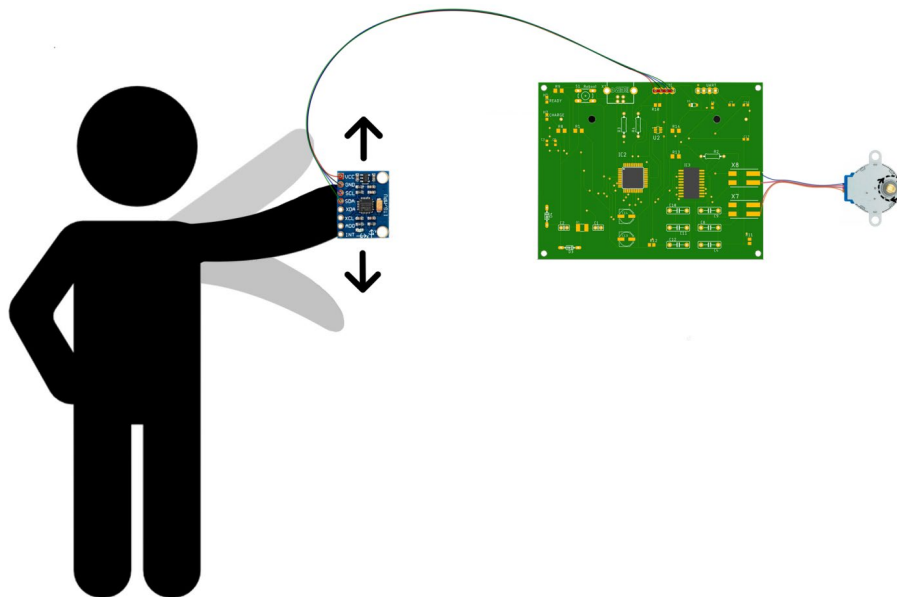


Рис. 3.0. Схематичний принцип дії розроблюємого приладу.

3.1.1 Опис схеми електричної структурної.

В основі системи полягає мікроконтролер, котрий виступає у ролі головного, він обробляє отримані дані та управляє приладами. Системи підключається або через джерело живлення (через USB роз'єм), або застосовується батарея (з можливістю підзарядки) і через регулятор напруги поступає живлення до приладу. Мікроконтролер обробляє отриману інформацію що поступила з MEMS-модулю, обробляє ці дані, та відправляє команду на драйвер котрий керує двигуном. Двигун в свою чергу виконує свою функцію в залежності від отриманих даних. Структурна схема продемонстрована на рисунку 3.1.

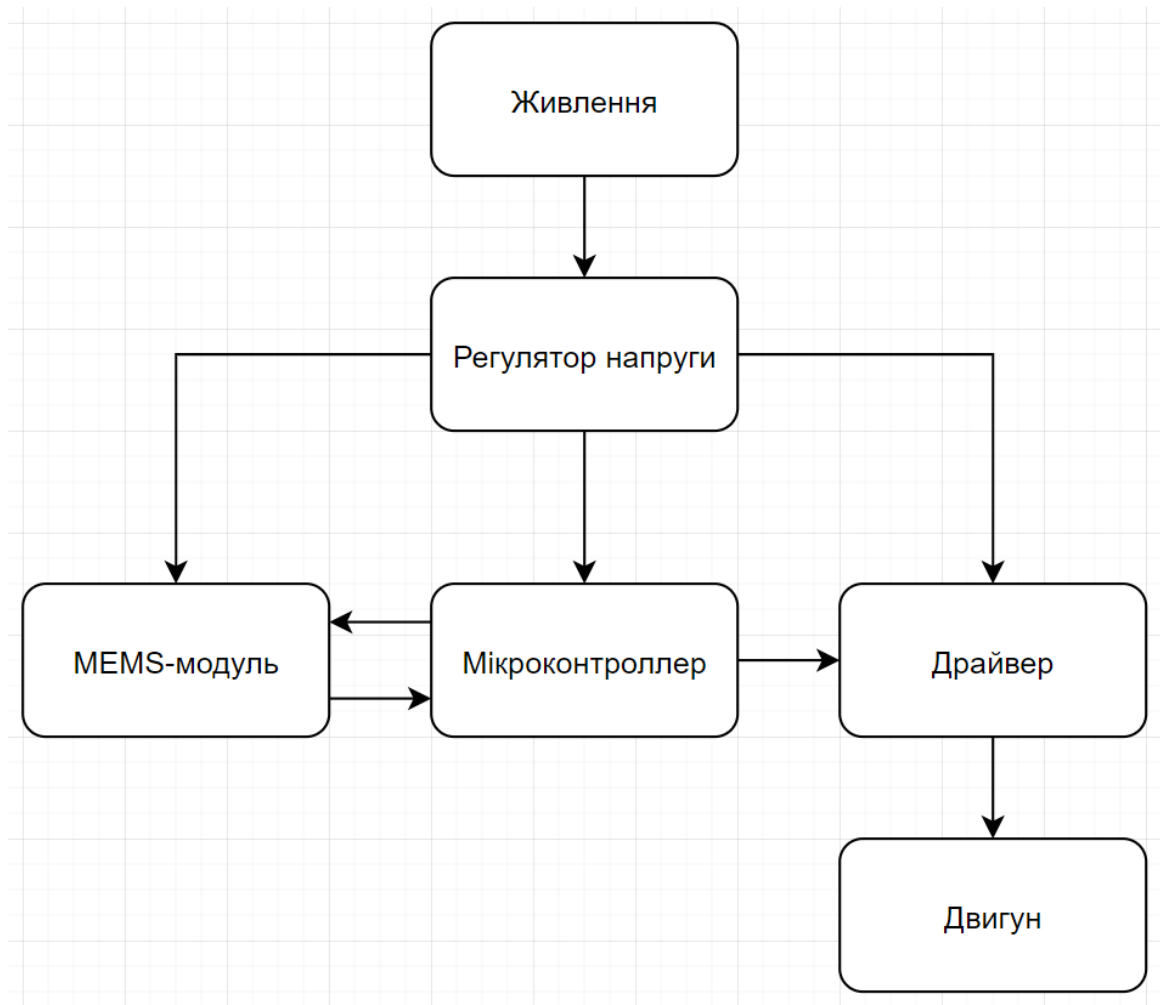


Рис. 3.1. Схема структури пристрою

Для розробки пристрої були використані такі елементи:

- місце розташування для батареї 18650 (BT1);
- двигун – двигун, який перетворює електричну енергію в механічну, тобто кроковий двигун тут ротор не обертається безперервно, а обертається на запрограмований кут;
- діод шоттки (D1, U1) – напівпровідниковий діод із малим падінням напруги при прямому включенні. У діодах Шоттки як бар'єр Шоттки використовується перехід метал-напівпровідник, на відміну від звичайних діодів, де використовується р-n-перехід. Перехід метал-напівпровідник має низку особливих якостей: знижене падіння напруги при прямому включенні, високий струм витoku, дуже невеликий заряд зворотного відновлення. Використовується як захист від зворотного току [12];

- драйвер (IC3) – пристрій, який перетворює керуючі сигнали малої потужності струми, достатні для управління моторами, та дозволяє працювати більш ніж з одним двигуном;
- кварцовий резонатор (Q1) – надійне, стабільне джерело гармонійних коливань, щоб цифровий мікроконтролер міг би спертися на еталонну частоту, і оперувати з нею надалі, у процесі роботи цифрового пристрою, таким чином, кварцовий резонатор – це надійна заміна коливального LC-контур;
- польовий транзистор (Q2, Q3) – принцип дії пристрою заснований на управлінні електричним опором струмопровідного каналу поперечним електричним полем, що створюється напругою, що додається до затвора;
- конденсатори (C1-C17) – пасивний елемент двухполюсник з постійним або змінним значенням ємності і малою провідністю; пристрій для накопичення заряду і енергії електричного поля а також за необхідності він може вмиль віддати весь накопичений заряд [12];
- мікроконтролер (IC1, IC2, IC5) – мікроелектронний програмований пристрій, що призначений для обробки інформації та керування процесами обміну цією інформацією у складі мікропроцесорної системи (комп'ютера);
- регулятор напруги (U2) – пристрій, що підтримує напругу бортової мережі в заданих межах у всіх режимах роботи, електричного навантаження, температури навколишнього середовища, а також він може виконувати додаткові функції – захищати елементи генераторної установки від аварійних режимів та перевантаження, автоматично включати в бортову мережу ланцюг обмотки збудження або систему сигналізації аварійної роботи генераторної установки.;
- резистори (R1-R14) – пасивний елемент електричних ланцюгів, що має певне або змінне значення електричного опору, призначений для лінійного перетворення струму у напругу і напругу за рахунок струму, обмеження струму, поглинання електричної енергії [21];

- світловий LED індикатор (H1-H2) – напівпровідниковий пристрій, що випромінює некогерентне світло, при пропусканні через нього електричного струму (ефект, відомий як електролюмінесценція). Випромінюване світло традиційних світлодіодів лежить у вузькій ділянці спектра, а його колір залежить від хімічного складу використаного у світлодіоді напівпровідника. Сучасні світлодіоди можуть випромінювати світло від інфрачервоної ділянки спектра до близької до ультрафіолету;

- MEMS-модуль – у – у цьому пристрої представлений малогабаритним та простим модулем 3-х аксіального акселерометра та 3-х аксіального гіроскопа керований по протоколу I2C (TWI). Даний датчик відмінно підходить для визначення положення в просторі;

- Порт USB (X1) – порт для підключення пристрою до PC USB-кабелем;
- вилка штирєва (I2C, UART) – простий інтерфейс для підключення зовнішніх приладів;

- з'єднувач JST – дріт для підключення одного приладу до іншого. У данному випадку для з'єднання розроблюємої плати та зовнішній MEMS-модуль.

3.1.2 Опис та розробка схеми електричної принципової.

Живлення елементів. Система працює від напруги 5V, подати їх можливо підключивши живлення через USB-роз'єм або використовувати батарею з напругою 3.7V та струмом 2A, котру можна заряджати по тому ж USB-роз'єму. Живлення подається до мікроконтролера (ATmega16) на контакт VCC та AVCC через регулятор напруги, котрий підвищує за необхідності напругу до рекомендованих 5V. Також отримані 5V відправляються на живлення MEMS-модуля, на його контакт VCC. Для роботи драйверу двигуна також задіяно 5V, вони подані на VS та VSS, а також на контакт EN1 та EN2, котрі відповідають за кількість робочих виходів. Усі контакти GND заземляються.

Мікроконтролер. Для роботи ATmega16 було задіяно ще декілька контактів потрібних для роботи. Контакт RESET, котрий відповідає за скидання

МК, підключено до землі через кнопку, бо RESET має зворотний хід включення і якщо на RESET приде 0, то МК перезапуститься.

Драйвер. Так як L293DD повинен приймати сигнали, то відповідно має бути підключений до МК, тому PD5 – PD2 Atmega16 приєднано до контактів IN1 – IN4 L293D відповідно. Контакти OUT1 – OUT4 були під'єднані до клемних блоків X7 та X8, щоб пізніше можна було до цих самих клемників підключити кроковий двигун.

MEMS-модуль. GY-521 приладом зовнішнього застосування, підключення відбувається через чотирьох контактний штирьовий з'єднувач I²C котрий знаходиться на платі. Через контакт 1 з'єднувача I²C підключено живлення. Через контакти 2 з'єднувача I²C кинуту землю. Через контакт 3 з'єднувача I²C поєднано контакти SCL МК (PC0) та модулю SCL. Через контакт 4 з'єднувача I²C поєднано контакти SDA МК (PC1) та модулю SDA, до того ж лінії SCL та SDA під'єднані до 3.3V через підвищуючі резистори та фільтруючі конденсатори для зменшення шумів на шині передачі даних I²C. Рекомендовані конденсатори 50 pF для придушення шуму на лініях I²C SDA / SCL взято на основі рекомендації до роботи з протоколом I²C.

При сильному перегріванні елементів рекомендується використовувати вентилятор з розмірами 30×30×7 mm, для його підключення на платі є штирьова вілка 4х контактна UART, задіяти перший (5V) та другий (GND) контакти.

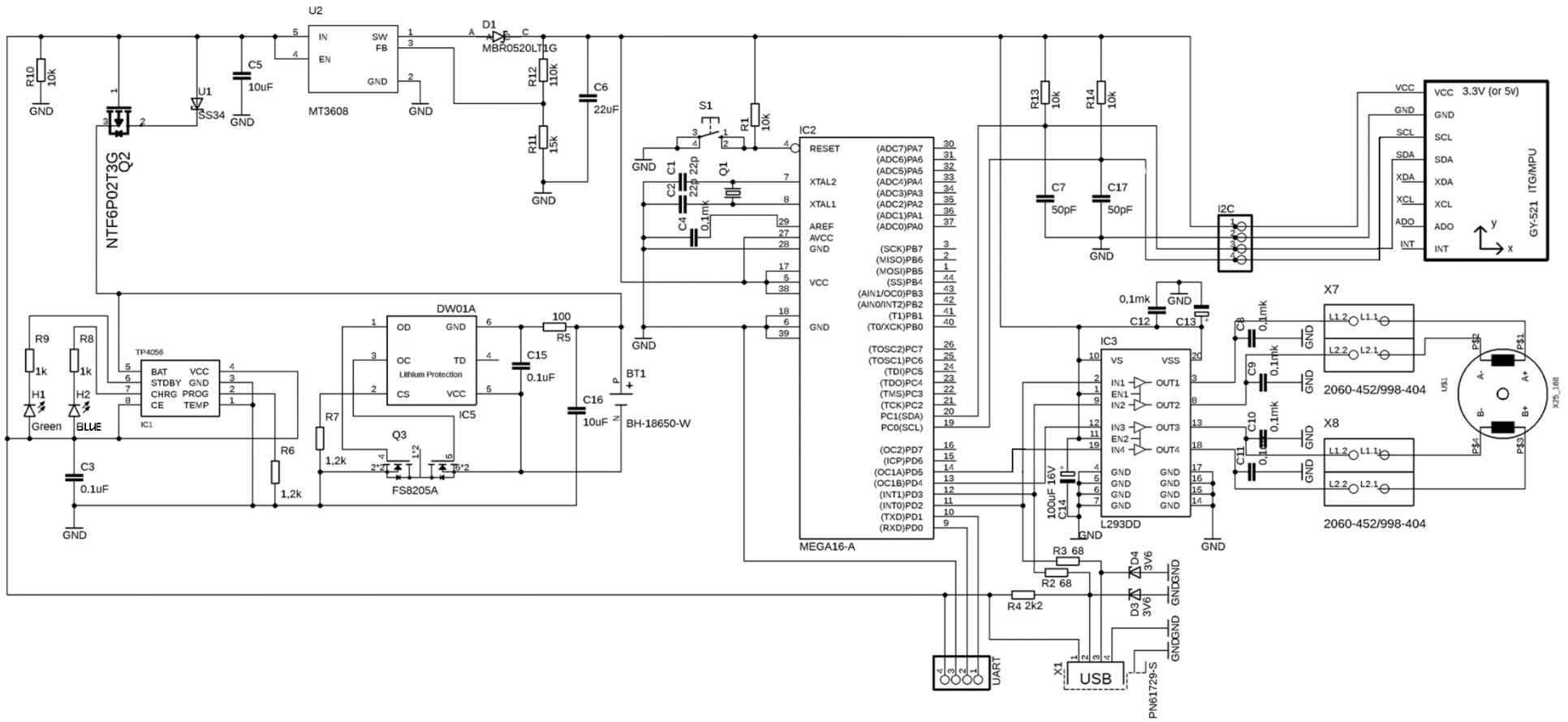


Рис. 3.2. Електрична принципова схема пристрою

3.1.3 Визначення вимог по стійкості до механічних і кліматичних впливів.

Розміщення електричного обладнання встановлює рівень впливу механічних та погодних умов. Тому на стадії проектування необхідно визначити природу і ступінь даних факторів. Дані впливу містять машинні пульсації та удари, температурні впливи, значну і невисоку вологу та вплив.

Згідно з ГОСТ 15150–69 [7] визначають вимоги до механічних та кліматичних впливів.

Передбачається, що пристрій буде використовуватись у європейських країнах. Для європейських країн / регіонів кліматичні показники цього пристрою належать до категорії – У. У категорії "У" очікується, що пристрій призначений для роботи при температурі 20 ° С в умовах помірною клімату з температурним діапазоном від -45 ° С до + 40 ° С і зміною вологостю до 80%.

Оскільки цей пристрій розміщено в приміщенні (об'єм), температура і вологість значно нижчі, ніж на відкритому повітрі, тому цей пристрій було обрано як категорію розміщення – 3 [19], а саме - робота в приміщенні з природною вентиляцією без штучно регульованих кліматичних умов, коли коливання температури та вологості повітря, а також вплив піску та пилу значно менші, ніж зовні. Для цього типу розміщення основні характеристики наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Основні робочі характеристики.

Робоча температура	від -45°С до + 40 °С
Максимальна робоча температура	від -50°С до + 45 °С
Відносна вологість повітря при 15 ° С	75%

3.1.4 Створення елементної бази і попередня компоновка.

За браком даних звертатись до даташитів елементів.

MEMS-модуль GY-521 (зовнішнє використання)

GY-521 (рисунок 3.4) – це модуль зовнішнього використання, модуль містить чипи: гіроскопу, акселерометру і термометру на базі мікросхеми MPU-6050 використовується в аматорській робототехніці для визначення положення в просторі. Модуль GY-521 побудований на базі мікросхеми MPU6050. На платі модуля також розташована необхідна обв'язка MPU6050, включаючи підтягує резистори інтерфейсу I2C. Гіроскоп використовується для вимірювання лінійних прискорень, а акселерометр - кутових швидкостей. Спільне використання акселерометра і гіроскопа дозволяє визначити рух тіла в тривимірному просторі. Є зовнішнім приладом. Основні характеристики перераховані у таблиці 3.2.



Рис. 3.4. MEMS-модуль GY-521

Таблиця 3.2. Основні параметри регулятора напруги

Живлення	3,5 – 6 V
Струм	від 500 мкА до 10 mA
Чіп	MPU-6050
Характеристика чіпу	16bit вбудований АЦП
Висновок даних	16 bit
Інтерфейс	I ² C
Максимальна частота інтерфейсу	400 kHz
Діапазон вимірювань акселерометру	± 2/ ± 4/ ± 8/ ± 16g
Струм акселерометра	350 μA
Діапазон вимірювань гіроскопу(градусів в секунду)	± 250/ 500/ 1000/ 2000 ° /s
Струм гіроскопа	3,6 mA
Відстань між контактами	2,54 мм
Отвір під кріпіння	під гвинт 3 мм
Розміри	2,0 см x 1,6 см x 0,3 см
Шум	0,005 ° / с / √Hz

Контролер заряду Li-Ion акумуляторів TP4056 (IC1)

Мікросхема TP4056 – це повноцінний лінійний CC/CV контролер заряду Li-Ion батарей, що вимагає для своєї роботи мінімальної кількості зовнішніх компонентів. Максимальний струм заряду – 1A, напруга заряду – 4.2 V, є вхід для підключення датчика перегріву АКБ. На рисунку 3.5 зображено TP4056 та його розміри. Основні параметри – в таблиці 3.3.

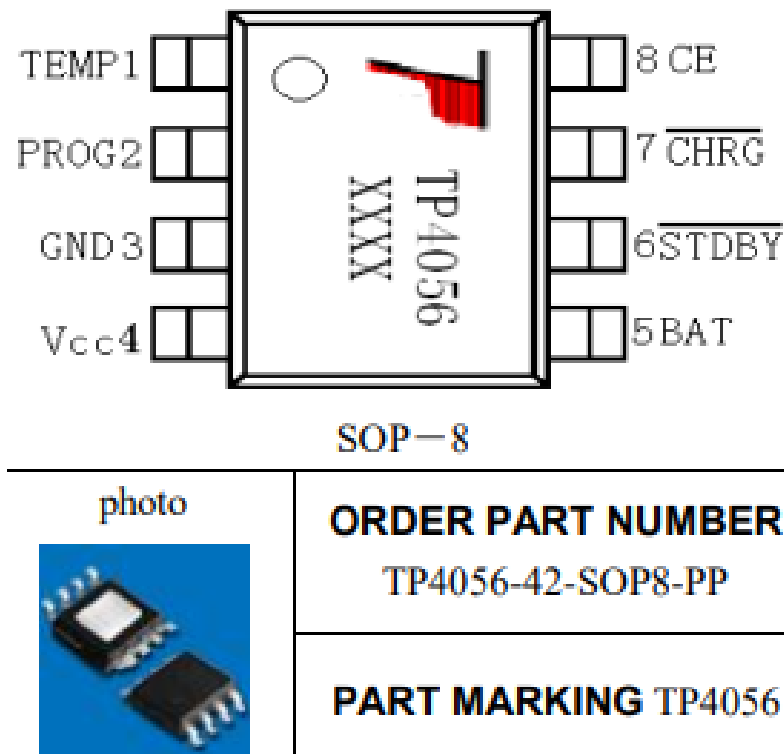


Рис. 3.5. Контролер заряду TP4056

Таблиця 3.3. Основні параметри контролеру заряду TP4056

Вхідна напруга	від 4 до 8 V
Струм заряду	від 50 до 1000 mA
Напруга завершення заряду	4.2 V
Корпус	SOP-8
Діапазон робочих температур	від -40°C до +85°C

Мікроконтролер ATmega16-16AU (IC2)

Мікросхема ATMEGA16-16PU це високотовиробничий AVR-мікроконтролер з технологією rISC Power. Даний 8-розрядний маломощний мікроконтролер працює на основі RISC і об'єднує в себе 16 КБ програмованої флеш-пам'яті, 1 Кб SRAM і EEPROM 512Б. Виріб оснащений А/Д конвертером і зручним інтерфейсом, виконаним на чипі JTAG. Даний пристрій підтримує пропускну здатність 16MIPS при 16МГц і може працювати в діапазоні

напруги живлення 4,5-5,5 вольт. При інструкції в одному такті пристрій може досягати продуктивності в 1MIPS на МГц, дотримуючись балансу енергоспоживання та швидкості обробки.. Розміри мікроконтролера та вид ображено рисунку 3.6. Властивості та параметри мікросхеми преведені у таблиці 3.4.

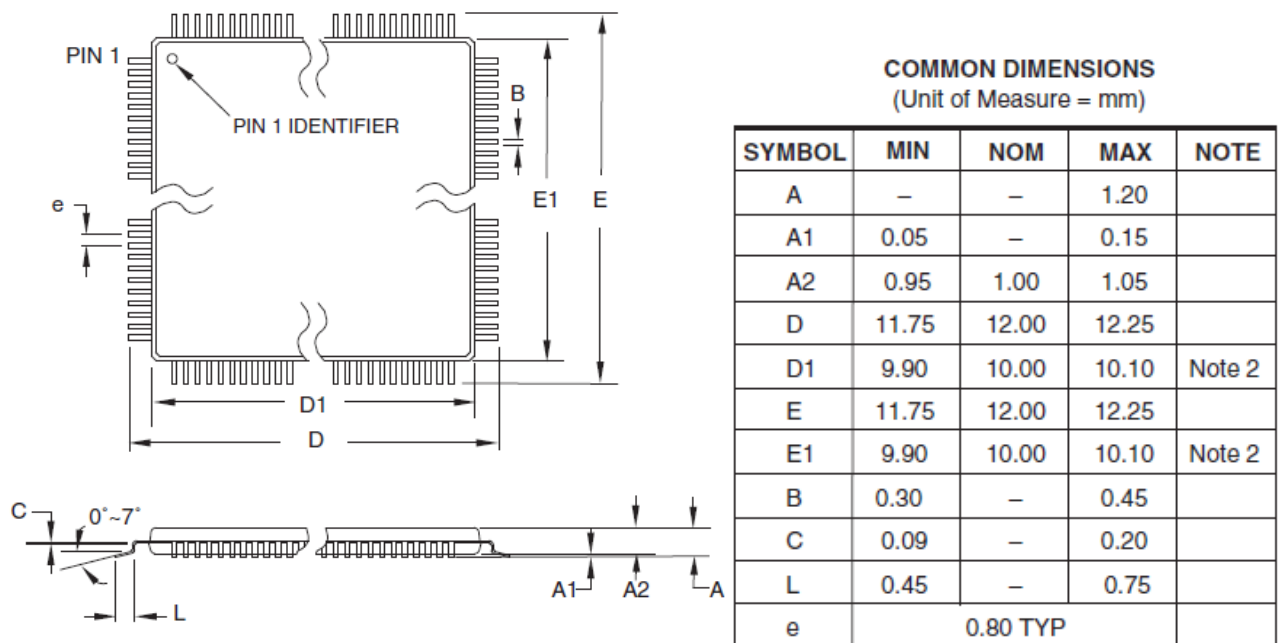


Рис. 3.6. Мікроконтролер АТМega16

Таблиця 3.4. Основні характеристики мікроконтроллера

Тактова частота	16 MHz
Розмір шини даних	8 bit
Розмір програмної пам'яті	16 kByte
Розмір ОЗУ даних	512 Byte
Напруга живлення	5V
Робоча температура	від -40 до 85 °C
Потужність	0.018 W

Драйвер Двигунів L293DD (IC3)

Модуль драйверу, продемонстрований на рисунку 3.7, сильноточний чотириканальний Н-мостовий драйвер. L293 призначена для забезпечення двонаправлених струмів приводу до 1 А при напругах від 4,5 до 36 В. L293DD призначена для забезпечення двонаправлених струмів приводу до 600 мА при напругах від 4,5 до 36 В. Обидва пристрої призначені для управління індуктивними навантаженнями, такими як реле, соленоїди, двигуни постійного струму та біполярні крокові двигуни, а також інших сильноточних/високовольтних навантажень із застосуванням позитивного живлення.. Основні характеристики наведено у таблиці 3.5.

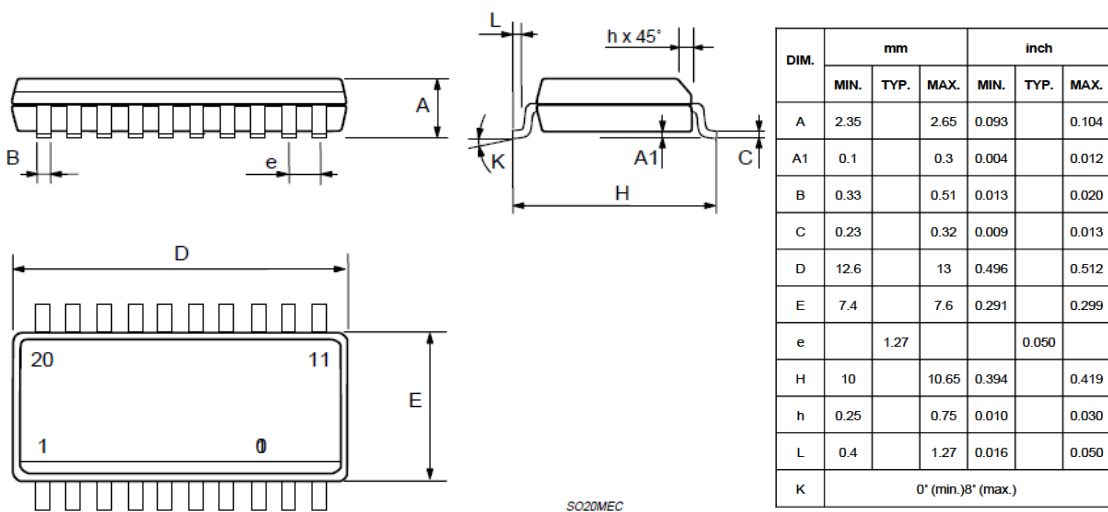


Рис. 3.7. Драйвер двигунів L293DD

Таблиця 3.5. Основні параметри драйверу

Напруга - вхід (макс.)	24 V
Напруга - вихід (мінімум / фіксований)	4.5 V
Напруга - вихід (макс.)	36 V
Діапазон робочих температур	-40°C ~ 150°C
Струм - вихідний	0.6 A
Розсіювання потужності	0.37 V

Контролер захисту акумулятора DW01A (IC5)

Інтегральна мікросхема захисту батареї DW01A призначена для захисту літій-іонної/полімерної батареї від пошкодження або погіршення терміну служби через перезарядку, перерозрядження та/або надмірний струм для одноелементних літій-іонних/полімерних акумуляторних систем. Ультрамаллий корпус і менша необхідність у зовнішніх компонентах роблять його ідеальним для інтеграції в обмежений простір. На рисунку 3.8 можна побачити DW01A. Основні параметри DW01A в таблиці 3.6.

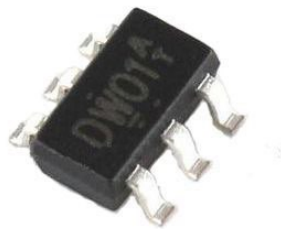


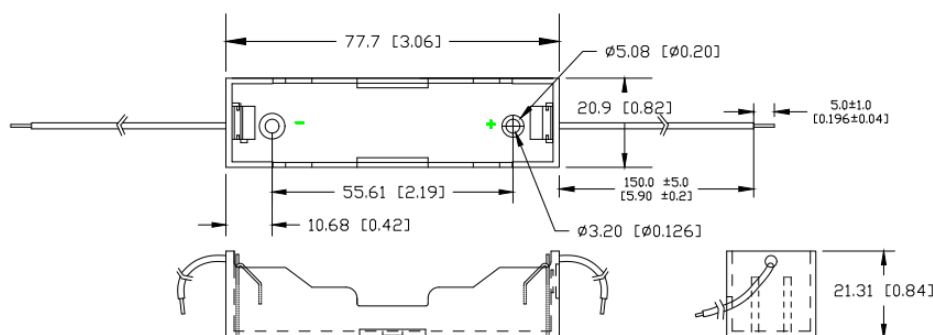
Рис. 3.8. Контролер заряду TP4056

Таблиця 3.6. Основні параметри контролеру заряду TP4056

Напруга закінчення заряду	$4.300 \pm 0.05 \text{ V}$
Скидання визначення напруги закінчення заряду	$4.100 \pm 0.05 \text{ V}$
Мінімальна напруга розряду батареї	$2.40 \pm 0.10 \text{ V}$
Напруга відновлення розряду батареї	$3.00 \pm 0.10 \text{ V}$
Напруга захисту від перевантаження струмом	$150 \pm 30 \text{ mV}$
Напруга визначення короткого замикання	1.35 V
Напруга виявлення зарядного пристрою	0.7 V
Широкий діапазон напруги живлення	$1.8 \sim 9.0 \text{ V}$
Струм живлення	0.1 mA
Робоча температура	від -40°C до $+85^\circ\text{C}$
Корпус	SOT23-6

Тримач акумулятора ВН-18650-В (ВТ1)

Тримач акумулятора ВН-18650-В (відкритого типу) для акумуляторів 18650. На рисунку 3.9 зображено ВН-18650-В та його розміри, з основних параметрів це вмістимість: 1 батарея, та робоча температура: від -40°C до 150°C . ВН-18650-В обрано як вмістилище для акумулятору 18650 Li-ion 3.7 В.



NOTES:

Material: Self-extinguishing Thermoplastic Polyester, color black
 Temperature Range: -40°C to $+180^{\circ}\text{C}$
 Contacts: 302 Stainless Steel Spring Temper, Nickel Plated
 Flammability Rating: UL 94V-0

Tolerance
(Inches)



Memory Protection Devices, Inc
 200 Broad Hollow Road, Farmingdale, New York 11735

Рис. 3.9. Тримач акумулятора ВН-18650-В

Акумулятор Li-ion ICR18650TH / 2600 3.7 В

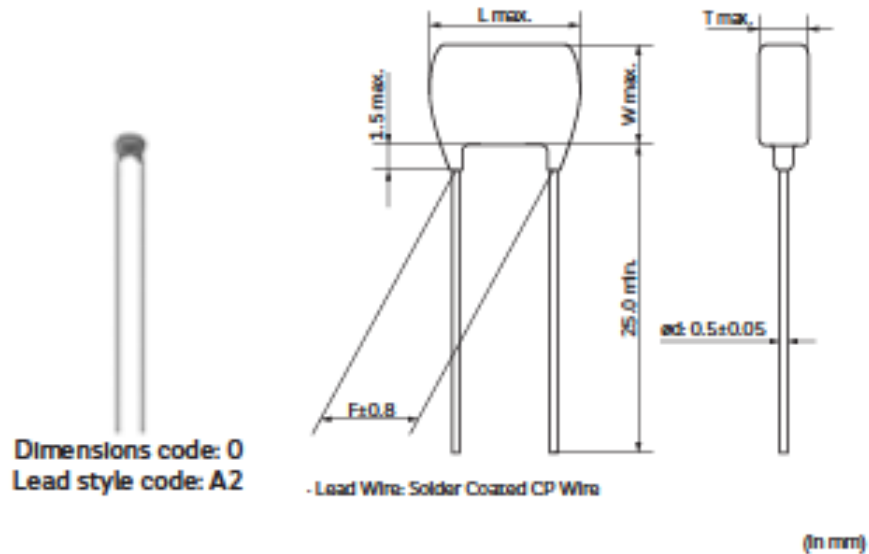
Акумулятор Li-ion ICR18650TH 3.7 В ємністю 2600 mAh, продемонстрований на рисунку 3.10, використовується задля забезпечення працездатності розроблюємого пристрою. Акумулятор має тривалий термін роботи та зберігає свої властивості в екстремальних умовах з кількістю циклів перезарядки понад 500. Робоча температура розряду: $-20 \sim +45^{\circ}\text{C}$. Робоча температура заряджання: $0 \sim +45^{\circ}\text{C}$. Завдяки високій щільності струму елемент живлення забезпечує гарантовану стабільну напругу протягом циклу розрядки, одночасно має низький саморозряд 5 – 7%. Без "ефекту пам'яті", що дає можливість заряджати його без попереднього розрядження.



Рис. 3.10. Акумулятор ICR18650TH

Конденсатор RDE5C1H220J0P1H03B (C1, C2)

Конденсатор керамічний RDE5C1H220J0P1H03B та його розміри на рисунку 3.11, в таблиці 3.7 перераховані основні параметри елемента.



Dimensions

Dimensions and Lead Style Code	Dimensions (mm)					
	L	W	W1	T	F	d
0A2/0DB	3.6	3.5	-	See the individual product specification	2.5	0.5
0K1/0M1	3.6	3.5	6.0		5.0	0.5
1A2/1DB	4.0	3.5	-		2.5	0.5
1K1/1M1	4.0	3.5	5.0		5.0	0.5
2A2/2DB	5.5	4.0	-		2.5	0.5
2K1/2M1	5.5	4.0	6.0		5.0	0.5
3A2/3DB	5.5	5.0	-		2.5	0.5

Рис. 3.11. Конденсатор керамічний 194D

Таблиця 3.7. Основні параметри конденсатору 194D104X9025A2B

Ємність	22pF
Відхилення ємності	±5%
Робоча температура	від -55°C до 125°C
Номінальна напруга	50 V
Розміри	5x2.5x3.5mm

Конденсатор VJ0603Y105KXJCW1BC Vishay (C3)

На рисунку 3.12 зображено конденсатор керамічний VJ0603Y105KXJCW1BC Vishay поверхневого монтажу та його розміри, в таблиці 3.18 перераховані основні параметри елемента.



DIMENSIONS in inches (millimeters)						
SIZE CODE	THICKNESS SYMBOL	SOLDERING METHOD ⁽¹⁾	L	W	T	MB
0603 (1608)	S	R / W	0.063 ± 0.004 (1.60 ± 0.10)	0.030 ± 0.004 (0.80 ± 0.10)	0.030 ± 0.0028 (0.80 ± 0.07)	0.016 ± 0.006 (0.40 ± 0.15)
	X	R / W	0.063 + 0.006 / - 0.004 (1.60 + 0.15 / - 0.10)	0.030 + 0.006 / - 0.004 (0.80 + 0.15 / - 0.10)	0.030 + 0.006 / - 0.004 (0.80 + 0.15 / - 0.10)	
	X'	R / W	0.063 ± 0.008 (1.60 ± 0.20)	0.030 ± 0.008 (0.80 ± 0.20)	0.030 ± 0.008 (0.80 ± 0.20)	

Рис. 3.12. Конденсатор керамічний VJ0603Y105K

Таблиця 3.8. Основні параметри елемента VJ0603Y105K

Ємність	0.1 μF
Відхилення ємності	±10%
Температура навколишнього середовища	від -55°C до 125°C
Номінальна напруга	16 V
Розміри	1.6x0.8x0.8mm

Конденсатор SA405A103JAA (C4, C8-C12)

На місця C4, C8, C9, C10, C11, C12 обрано конденсатор керамічний, з корпусом під пайку АХР. На рисунку 3.13 продемонстровано, а характеристики у таблиці 3.9.

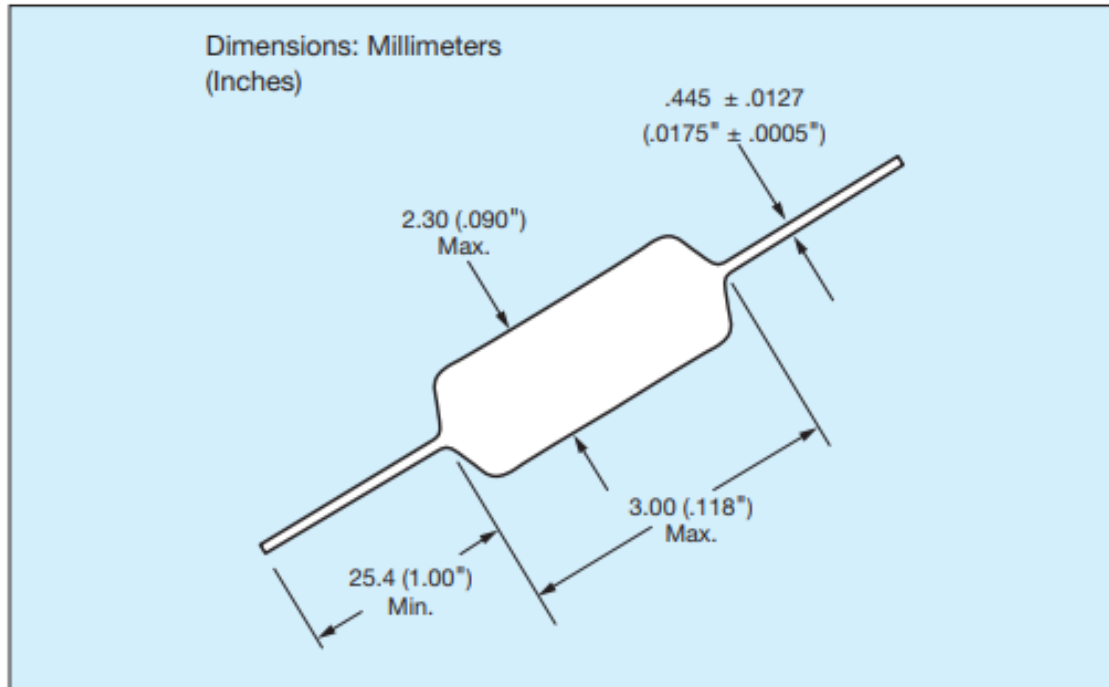


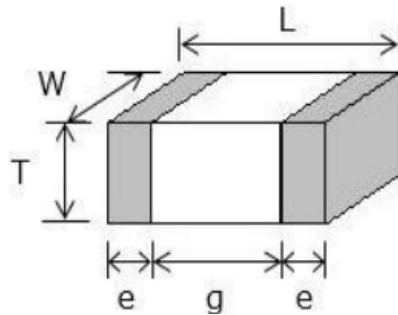
Рис. 3.13. Конденсатор керамічний SA405A103JAA

Таблиця 3.9 — Основні параметри елемента SA405A103JAA

Ємність	0.1uF
Відхилення ємності	±5%
Робоча температура	від -55°C до 125°C
Номінальна напруга	50 V

Конденсатор GRM188R61E106KA73J Murata (C5, C16)

На рисунку 3.14 зображено конденсатор керамічний GRM188R61E106KA73J Murata поверхневого монтажу та його розміри, в таблиці 3.10 перераховані основні параметри елемента.



Size Code : 1608M(0603) (in mm)

① L	① W	② T	e	g
1.6+/-0.2	0.8+/-0.2	0.8+/-0.2	0.2 to 0.55	0.6 min.

Рис. 3.14. Конденсатор керамічний GRM188R61E106KA73J

Таблиця 3.10 — Основні параметри елемента GRM188R61E106KA73J

Ємність	10uF
Відхилення ємності	±10%
Температура навколишнього середовища	від -55°C до 85°C
Номінальна напруга	25 V

Конденсатор 298D226X0010M2T Vishay (C6)

На рисунку 3.15 зображено конденсатор танталовий 298D226X0010M2T Vishay поверхневого монтажу та його розміри, в таблиці 3.11 перераховані основні параметри елемента.



DIMENSIONS in inches [millimeters]						
			Anode Termination	Anode Polarity Bar	Cathode Termination	
CASE CODE	L	W	H (MAX.)	P1	P2 (REF.)	C
M	0.063 ± 0.008 [1.60 ± 0.2]	0.033 ± 0.008 [0.85 ± 0.2]	0.035 [0.9]	0.020 ± 0.004 [0.50 ± 0.1]	0.024 [0.60]	0.024 ± 0.004 [0.60 ± 0.1]

Рис. 3.15. Конденсатор танталовий 298D226X0010M2T

Таблиця 3.11 — Основні параметри елемента 298D226X0010M2T

Ємність	22uF
Відхилення ємності	±20%
Температура навколишнього середовища	від -55°C до 85°C
Номінальна напруга	10 V

Конденсатор CC0603JRNPO9BN500 Yageo (C7, C17)

На рисунку 3.13 зображено конденсатор керамічний GRM188R61E106KA73J Murata поверхневого монтажу та його розміри, в таблиці 3.12 перераховані основні параметри елемента.

DIMENSION

Table I For outlines see fig. 2

TYPE	L ₁ (mm)	W (mm)	T (MM)	L ₂ / L ₃ (mm)		L ₄ (mm)
				min.	max.	min.
0201	0.6 ±0.03	0.3 ±0.03	Refer to table 2 to 5	0.10	0.20	0.20
0402	1.0 ±0.05	0.5 ±0.05		0.15	0.35	0.40
0603	1.6 ±0.10	0.8 ±0.10		0.20	0.60	0.40
0805	2.0 ±0.10 ⁽¹⁾	1.25 ±0.10 ⁽¹⁾		0.25	0.75	0.70
	2.0 ±0.20 ⁽²⁾	1.25 ±0.20 ⁽²⁾				
1206	3.2 ±0.15 ⁽¹⁾	1.6 ±0.15 ⁽¹⁾		0.25	0.75	1.40
	3.2 ±0.30 ⁽²⁾	1.6 ±0.20 ⁽²⁾				
1210	3.2 ±0.20	2.5 ±0.20		0.25	0.75	1.40
1812	4.5 ±0.20	3.2 ±0.20		0.25	0.75	2.20

OUTLINES

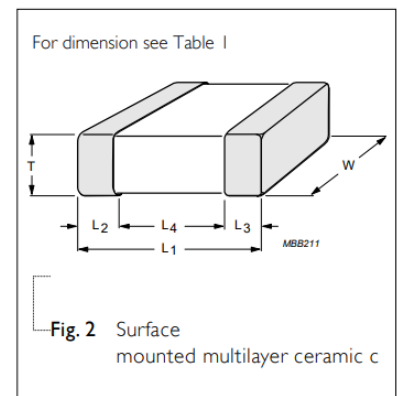


Рис. 3.16. Конденсатор керамічний CC0603JRNPO9BN500

Таблиця 3.12 — Основні параметри елемента CC0603JRNPO9BN500

Ємність	50pF
Відхилення ємності	±5%
Температура навколишнього середовища	від -55°C до 125°C
Номінальна напруга	50 V

Конденсатор електролітичний ЕЕЕ-НС1С101ХР (С13, С14)

Під С13, С14 було обрано конденсатор ЕЕЕ-FT1Е471АР на рисунку 3.17 продемонстровано сам конденсатор та його розміри, в таблиці 3.13 перераховані основні параметри елемента

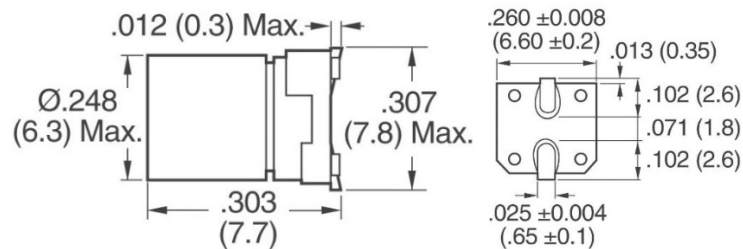


Рис. 3.17. Конденсатор ЕЕЕ-1АА331Р

Таблиця 3.13 — Основні параметри елемента ЕЕЕ-1АА331Р

Ємність	100 μ F
Відхилення ємності	$\pm 20\%$
Температура навколишнього середовища	від -40°C до 105°C
Мінімальне напрацювання	3000 h
Номінальна напруга	16В

Конденсатор 194D104X9025A2B Vishay(C15)

На рисунку 3.18 продемонстровано танталовий конденсатор 194D104X9025A2B фірми Vishay та його розміри, в таблиці 3.14 перераховані основні параметри елемента.

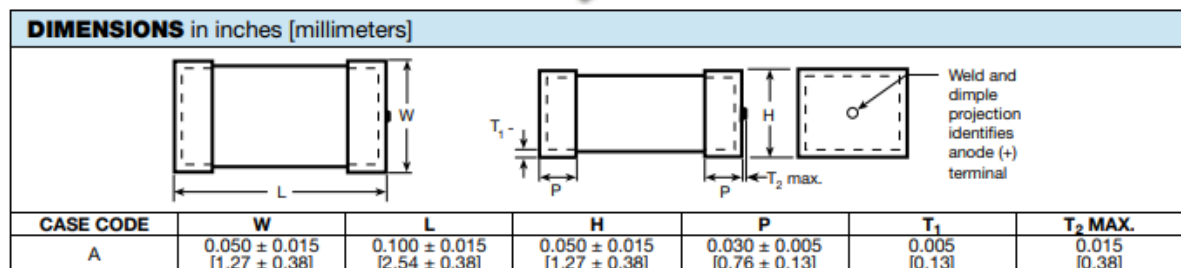


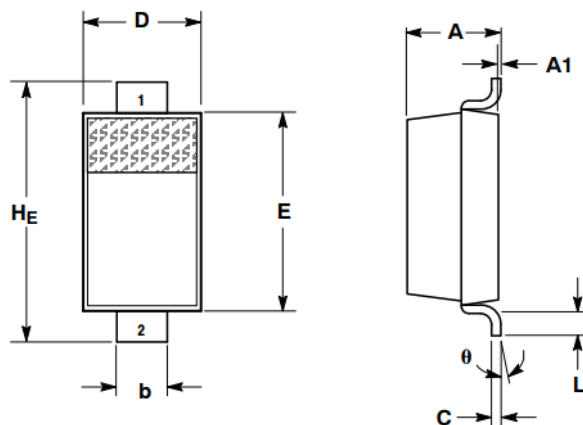
Рис. 3.18. Конденсатор танталовий 194D104X

Таблиця 3.14. Основні параметри елемента 194D104X9025A2B

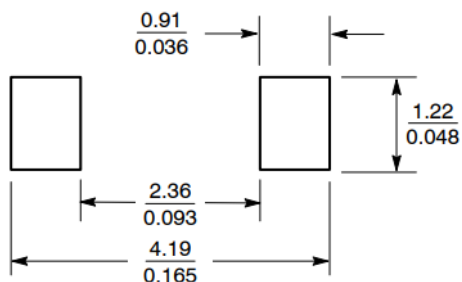
Ємність	0.1uF
Відхилення ємності	±10%
Робоча температура	від -55°C до 85°C
Номінальна напруга	25 V

Діод шоттки – MBR0520LT1G (D1)

Діод MBR0520LT1G (D1) - електронний елемент з змінною провідністю відповідно до напрямку струму [12]. В даному проекті діоди використовуються як захист від зворотного струму поряд з регулятором напруги. Діод MBR0520LT1G представлений на рисунку 3.19. Основні параметри елемента MBR0520LT1G наведені в таблиці 3.15.



SOLDERING FOOTPRINT*

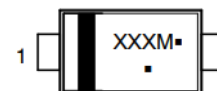


SCALE 10:1 (mm/inches)

- NOTES:
 1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

DIM	MILLIMETERS			INCHES		
	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX
A	0.94	1.17	1.35	0.037	0.046	0.053
A1	0.00	0.05	0.10	0.000	0.002	0.004
b	0.51	0.61	0.71	0.020	0.024	0.028
c	---	---	0.15	---	---	0.006
D	1.40	1.60	1.80	0.055	0.063	0.071
E	2.54	2.69	2.84	0.100	0.106	0.112
HE	3.56	3.68	3.86	0.140	0.145	0.152
L	0.25	---	---	0.010	---	---
theta	0°	---	10°	0°	---	10°

GENERIC MARKING DIAGRAM*



- XXX = Specific Device Code
 M = Date Code
 ▪ = Pb-Free Package

(Note: Microdot may be in either location)

*This information is generic. Please refer to device data sheet for actual part marking. Pb-Free indicator, "G" or microdot "▪", may or may not be present.

STYLE 1:
 PIN 1. CATHODE
 2. ANODE

*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.

Рис. 3.19. Діод MBR0520LT1G

Таблиця 3.15. Основні параметри елементу MBR0520LT1G

Максимальное постоянное обратное напряжение, V_r	20 V
Максимальный (средний) прямой ток на диод, $I_f(AV)$	500 mA
Максимальное прямое напряжение при $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$	385 mV при 500 mA
Максимальный обратный ток при $T_j=25\text{ }^\circ\text{C}$, I_r при V_r	250 μA при 20 V
Робоча температура	від $-65\text{ }^\circ\text{C}$ до $125\text{ }^\circ\text{C}$

Стабілітрон – BZX55C3V6 (D3, D4)

На рисунку 3.20 зображено стабілітрон, в таблиці 3.16 перераховані розмір елементів.

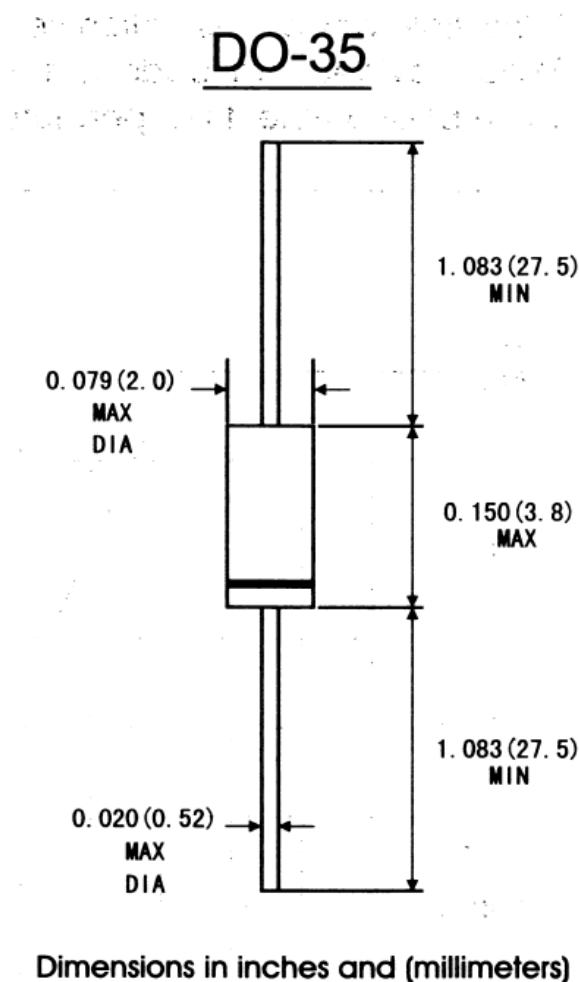


Рис. 3.20. Стабілітрон BZX55C3V6

Таблиця 3.16. Основні параметри стабілітрону VZX55C3V6

Розсіювана потужність	0.5 W
Мінімальна напруга стабілізації	3.4 V
Номінальна напруга стабілізації	3.6 V
Максимальна напруга стабілізації, В	3.8 V
Статичний опір R _{ст.} при струмі I _{ст.} 5 mA	89 Ohm
Температурний коефіцієнт напруги стабілізації α _{уст.}	-0.04 % / C
Максимальний струм стабілізації I _{ст.макс.}	105 mA
Робоча температура, C	від -55°C до 50°C

VCDG1112H-4BY3C-TR Stanley Electric (H1, Green)

На рисунку 3.21 зображено світловий індикатор VCDG1112H-4BY3C-TR Stanley Electric. Коли індикатор засвітиться зеленим кольором це значить, що батарея заряджена, в таблиці 3.17 перераховані розмір елементів.




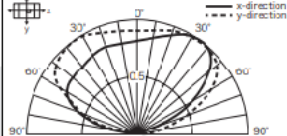
パッケージ Package	品名 Part name	電気的光学的特性/Electro-optical characteristics									
		発光色 Emitted color	色度座標 Chromaticity coordinates ^{*1}		ドミナント発光波長 Dominant wavelength λd	発光光度 Luminous intensity I _v		順電圧 Forward voltage V _F		指向半値角 Half-intensity angle 2θ _{1/2} (θx/θy)	
単位 (Units)			x	y	Typ.	Typ.	Min.	Typ.	Typ.	Max.	
			-		nm	mcd		V		deg.	
 L2.0 x W1.25 x H0.8 2.84mg	VCDB1112H-5AY3B		-	-	470	6.8	10	3.0	3.3	130 / 140	
	VCDG1112H-4BY3C		-	-	530	68	100	3.0	3.3	130 / 140	
品名 Part name	選別電流 Sorting current I _F	絶対最大定格/Absolute maximum ratings					標準梱包 数量 Standard qty./Reel	指向特性 Spatial distribution			
		順電流 Forward current I _F	順電流低減率 Forward current reduction rate ΔI _F		動作温度 Operating temperature Topr	保存温度 Storage temperature Tstg					
単位 (Units)	mA	mA	mA/°C	°C	°C	°C	pcs.	-			
VCDB1112H-5AY3B	5	8	0.50	85	-40~+100	-40~+105	4,000				
VCDG1112H-4BY3C	5	20	0.40	60	-40~+100	-40~+105	4,000				

Рис. 3.21. Індикатор VCDG1112H-4BY3C-TR

Таблиця 3.17. Основні параметри елемента VCDG1112H-4BY3C-TR

Пакет / Кейс	0805 (2012 metric)
Ориентация	Top View
Цвет подсветки	Зелений
Если - прямой ток	5 mA
Vf - прямое напряжение	3 V
Номинальная мощность	84 mW
Интенсивность света	100 mcd
Рабочая Температура	від -40°C до 100°C

VCDB1112H-5AY3B-TR Stanley Electric (H2, Blue)

На рисунку 3.22 зображено світловий індикатор VCDB1112H-5AY3B-TR Stanley Electric. Коли індикатор світиться синім кольором це значить, що батарея заряджається, в таблиці 3.18 перераховані розмір елементів.

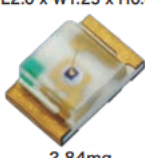


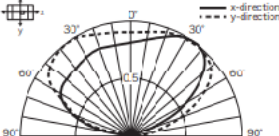
パッケージ Package	品名 Part name	電気的光学的特性 / Electro-optical characteristics								
		発光色 Emitted color	色度座標 Chromaticity coordinates ^{※1}		ドミナント発光波長 Dominant wavelength λ_d	発光光度 Luminous intensity I_v		順電圧 Forward voltage V_F		指向半値角 Half-intensity angle $2\theta_{1/2}$ (θ_x/θ_y)
単位 (Units)			x	y	nm	Min.	Typ.	Typ.	Max.	deg.
 2.84mg	VCDB1112H-5AY3B		-	-	470	6.8	10	3.0	3.3	130 / 140
	VCDG1112H-4BY3C		-	-	530	68	100	3.0	3.3	130 / 140
品名 Part name	選別電流 Sorting current I_F	絶対最大定格 / Absolute maximum ratings					標準梱包 数量 Standard qty./Reel	指向特性 Spatial distribution		
		順電流 Forward current I_F	順電流低減率 Forward current reduction rate ΔI_F		動作温度 Operating temperature Topr	保存温度 Storage temperature Tstg				
単位 (Units)		mA	mA	mA/°C	°C	°C	°C	pcs.	-	
VCDB1112H-5AY3B	5	8	0.50	85	-40~+100	-40~+105	4,000			
VCDG1112H-4BY3C	5	20	0.40	60	-40~+100	-40~+105	4,000			

Рис. 3.22. Індикатор VCDB1112H-5AY3B-TR

Таблиця 3.18. Основні параметри елементу VCDB1112H-5AY3B-TR

Пакет / Кейс	0805 (2012 metric)
Ориєнтація	Top View
Цвіт підсвітки	Blue
Если - прямой ток	5 mA
Vf - прямое напряжение	3 V
Номинальная мощность	27 mW
Интенсивность света	10 mcd
Рабочая Температура	від -40°C до 100°C

Кварцовий резонатор GEYER KX-9BT 16.0 MHz 50/100ppm 16pF (Q1)

У контролерах ATmega16 вже є внутрішній кварцовий генератор працює на частоті 8 МГц, але цієї частоти не достатньо для швидкого обміну даних. Більшість плат Arduino працює на частоті 16 МГц, в зв'язку з цим необхідна установка зовнішнього кварцу.

Кварцовий резонатор продемонстровано на рисунку 3.23, в таблиці 3.19 – основні параметри елементу.

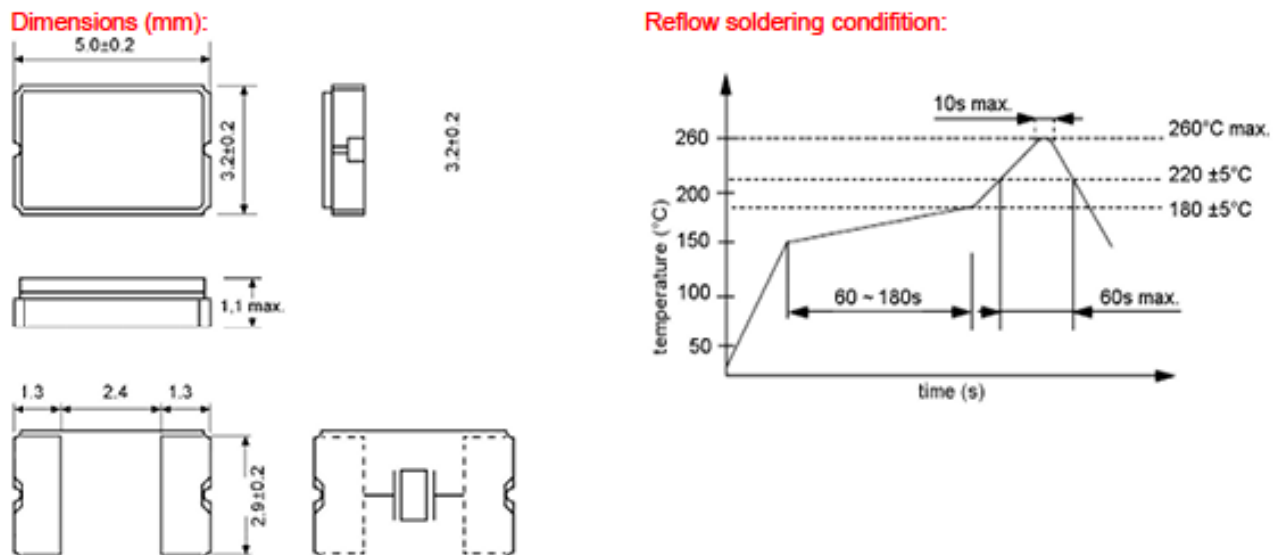


Рис. 3.23. Кварцовий резонатор GEYER KX-9BT

Таблиця 3.19. Основні параметри GEYER KX-9BT

Частота	16Mhz
Стабільність при 25 ° C	50ppm
Стабільність в робочому температурному діапазоні	100ppm
Здатність навантаження ємність	16pF
Робоча температура	від -40°C до 85°C
Розмір	5×3.2×1 мм

МОП-транзистор NTF6P02T3G (Q2)

На рисунку 3.24 зображено транзистор NTF6P02T3G та його розміри, в таблиці 3.20 перераховані основні параметри елемента

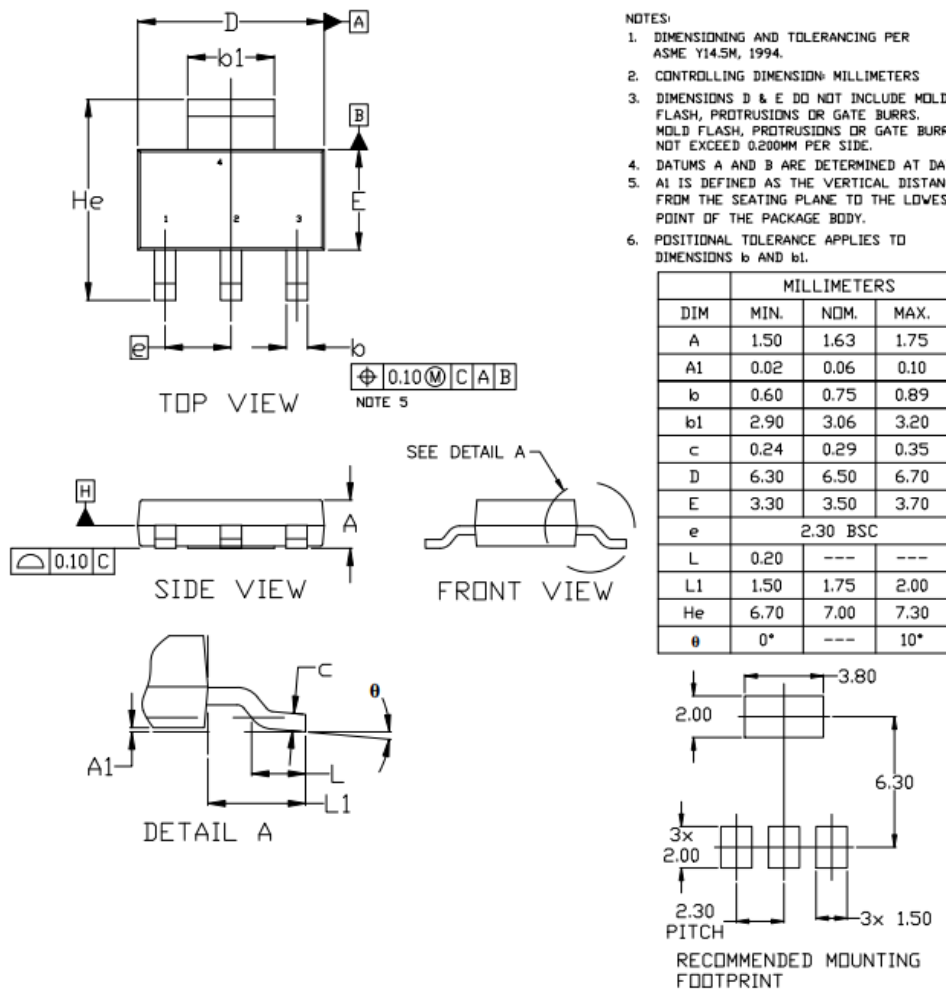


Рис. 3.24. Транзистор NTF6P02T3G

Таблиця 3.20. Основні параметри Транзистор NTF6P02T3G

Напруга від стоку до джерела (V_{dss})	20 V
Струм – безперервний сток (при 25°C)	10A (T_a)
Напруга приводу (макс. R_{ds} увімкнено, мін. R_{ds} увімкнено)	2.5V, 4.5V
R_{ds} On (Max) @ I_d , V_{gs}	50mOhm @ 6A, 4.5V
$V_{gs(th)}$ (макс.) @ I_d	1V @ 250 μ A
Заряд воріт (Q_g) (макс.) @ V_{gs}	20 nC @ 4.5 V
V_{gs} (макс.)	$\pm 8V$
Вхідна ємність (C_{iss}) (макс.) @ V_{ds}	1200 pF @ 16 V
Розсіювання потужності (макс.)	8.3W
Робоча температура	-55°C ~ 150°C

МОП-транзистор FS8205A (Q3)

На рисунку 3.25 зображено транзистор FS8205A та його розміри, в таблиці 3.21 перераховані основні параметри елемента.

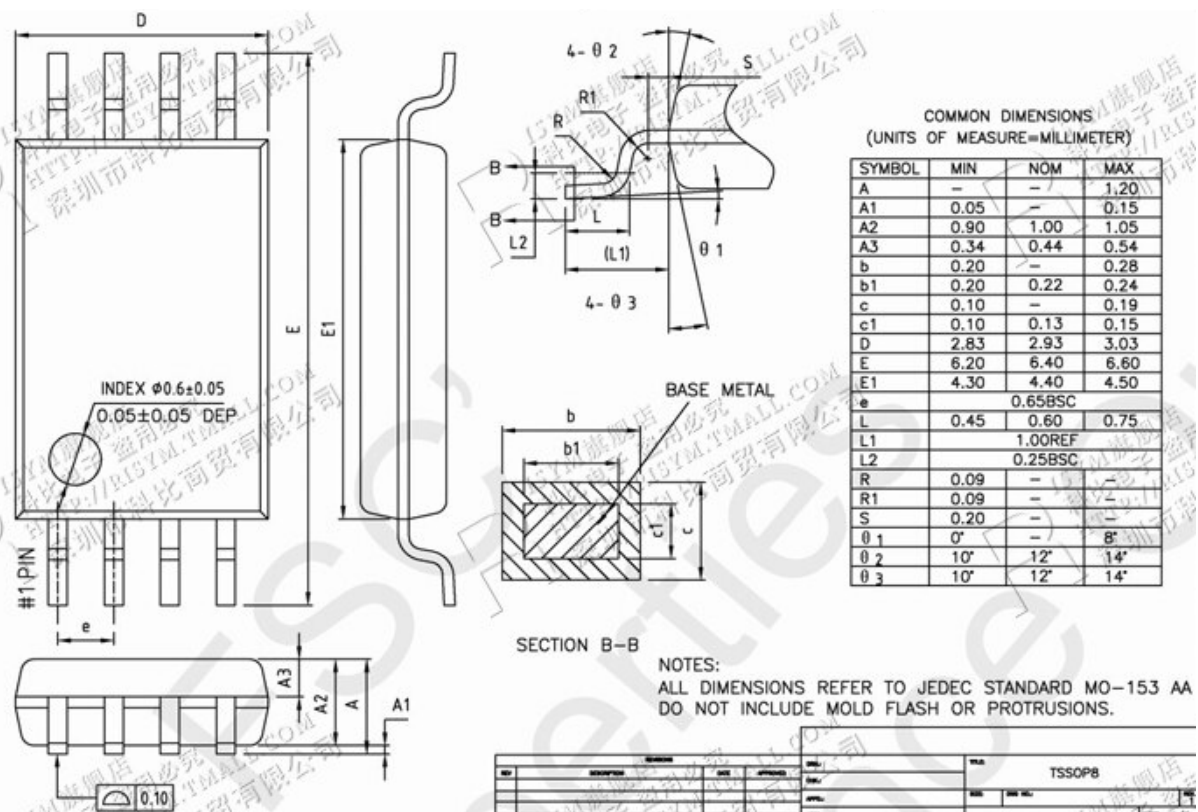


Рис. 3.25. Транзистор FS8205A

Таблиця 3.21. Основні параметри елементу

Максимальна потужність, що розсіюється	1.25 W
Гранично допустима напруга сток-виток	20 V
Гранично допустима напруга затвор-виток	10 V
Максимально допустимий постійний струм стоку	4 A
Максимальна температура каналу С	150 °C
Час наростання	14 ns
Вихідна ємність	115 pf
Опір сток-виток відкритого транзистора	0.025 Ohm
Тип корпусу	TSSOP-8

Резистор SR1206JR-7T10KL Yageo (R1, R13, R14)

На рисунку 3.26 зображено резистор, в таблиці 3.22 перераховані розмір елементів, в таблиці 3.23 – основні параметри елементів.

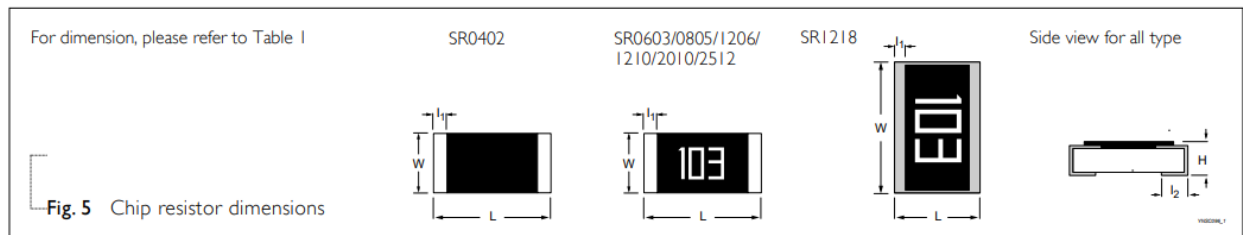


Рис. 3.26. Резистор SR1206JR-7T10KL

Таблиця 3.22. Розміри резистора SR1206JR-7T10KL

L	W	H	l1	l2
3.10±0.10	1.60±0.10	0.55±0.10	0.45±0.20	0.40±0.20

Таблиця 3.23. Основні параметри елементу SR1206JR-7T10KL

Опір	10 kOhm
Відхилення опору	±5%
Температура навколишнього середовища	-55°C ~ 155°C
Потужність	0.75W

Резистори SPP1UL68R0JLF (R2, R3)

На рисунку 3.27 зображено резистор, на ньому ж і розміри, в таблиці 3.9 – основні параметри елементів.

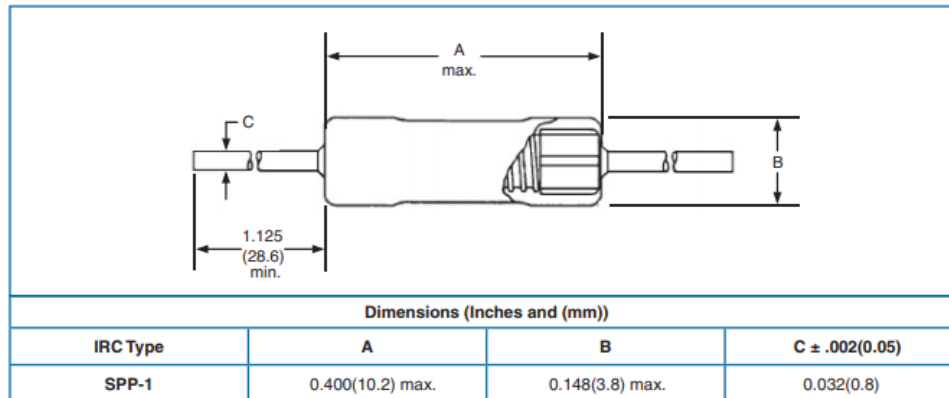


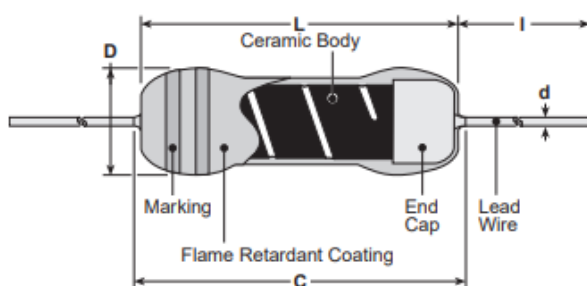
Рис. 3.27. Резистор SPP1UL68R0JLF

Таблиця 3.24. Основні параметри елементу SPP1UL68R0JLF

Опір	68 Ohm
Відхилення опору	±5%
Температура навколишнього середовища	від -55°C до 200°C
Потужність	1 W

Резистор MOS1CT528R222J (R4)

На рисунку 3.28 зображено резистор, в ньому ж зображено розмір елементів, в таблиці 3.25 – основні параметри елементів.



Type	Dimensions inches (mm)				
	L	C (max.)	D	d (nom.) ¹	I ²
MOS1/2 MOSX1/2	.244±.02 (6.2±0.5)	.280 (7.1)	.098±.02 (2.5±0.5)	.024 (0.6)	
MOS1 MOSX1	.354±.039 (9.0±1.0)	.437 (11.1)	.118±.02 (3.0±0.5)	.024/.031 (0.6)/(0.8)	.945 Min. (24.0 Min.)
MOS2 MOSX2	.472±.039 (12.0±1.0)	.591 (15.0)	.157±.02 (4.0±0.5)		
MOS3 MOSX3	.610±.039 (15.5±1.0)	.709 (18.0)	.236±.039 (6.0±1.0)	.031 (0.8)	1.18±.118 (30.0±3.0)
MOS5 MOSX5	.965±.039 (24.5±1.0)	1.10 (28.0)	.354±.039 (9.0±1.0)		1.50±.118 (38.0±3.0)

* Lead length changes depending on taping and forming type.

¹ Ex. MOS1C, 1CT52, 1CT526 = 0.6MM
MOS1C8, 1CT528 = 0.8MM

Рис. 3.28. Резистор RC0402FR-07100KL

Таблиця 3.25. Основні параметри резистору SPP1UL68R0JLF

Опір	2k2 Ohm
Відхилення ємності	±5%
Температура навколишнього середовища	від -55°C до 200°C
Потужність	1 W

Резистор SR1206FR-7T100RL Yageo (R5)

На рисунку 3.29 зображено резистор, в таблиці 3.26 перераховані розмір елементів, в таблиці 3.27 – основні параметри елементів

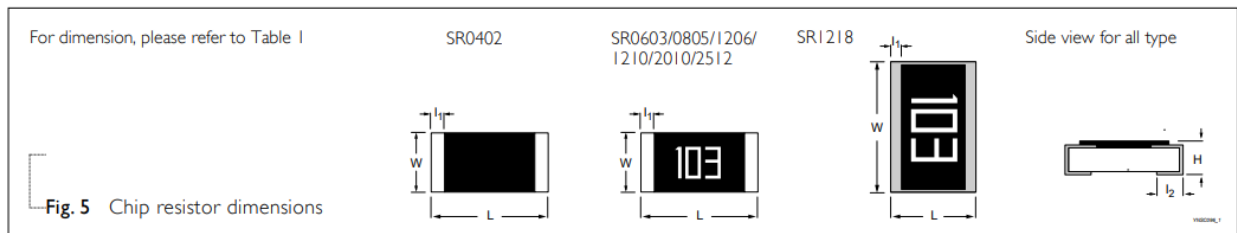


Рис. 3.29. Резистор SR1206FR-7T100RL

Таблиця 3.26. Розміри резистора SR1206FR-7T100RL

L	W	H	l ₁	l ₂
3.10±0.10	1.60±0.10	0.55±0.10	0.45±0.20	0.40±0.20

Таблиця 3.27. Основні параметри елементу SR1206FR-7T100RL

Опір	100 Ohm
Відхилення ємності	±1%
Температура навколишнього середовища	від -55°C до 155°C
Потужність	0.75W

Резистори RCP1206B1K20GEA Vishay (R6, R7)

На рисунку 3.30 зображено резистор, в таблиці 3.28 перераховані розмір елементів, в таблиці 3.29 – основні параметри елементів

DIMENSIONS in inches (millimeters)					
		WIDE BOTTOM TERMINAL (W)		TRADITIONAL TERMINAL (B)	
GLOBAL MODEL	A (LENGTH)	B (WIDTH)	C (HEIGHT)	D (TOP TERM)	E (BOTTOM TERM)

Рис. 3.30. Резистор RCP1206B1K20GEA

Таблиця 3.28. Розміри резистора RCP1206B1K20GEA

A	B	C	D	E
3.10±0.10	1.52±0.10	0.51±0.10	0.38±0.20	0.38±0.20

Таблиця 3.29. Основні параметри елементу RCP1206B1K20GEA

Опір	1k2 Ohm
Відхилення ємності	±2%
Температура навколишнього середовища	від -65°C до 155°C
Потужність	2.4W

Резистори SR1206FR-7T1KL Yageo (R8, R9)

На рисунку 3.31 зображено резистор, в таблиці 3.30 перераховані розмір елементів, в таблиці 3.31 – основні параметри елементів

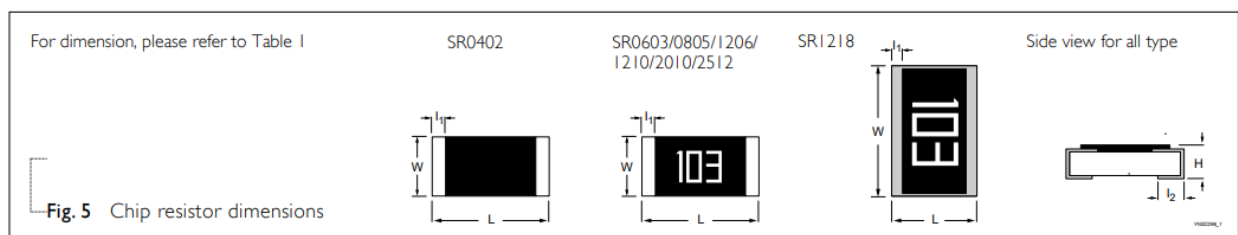


Рис. 3.31. Резистор SR1206FR-7T1KL

Таблиця 3.30. Розміри резистора SR1206FR-7T1KL

L	W	H	I1c	I2
3.10±0.10	1.60±0.10	0.55±0.10	0.45±0.20	0.40±0.20

Таблиця 3.31. Основні параметри елементу SR1206FR-7T1KL

Опір	1 kOhm
Відхилення ємності	±1%
Температура навколишнього середовища	від -55°C до 155°C
Потужність	0.75W

Резистор SR0805FR-4710KL Yageo (R10)

На рисунку 3.32 зображено резистор, в таблиці 3.32 перераховані розмір елементів, в таблиці 3.33 – основні параметри елементів

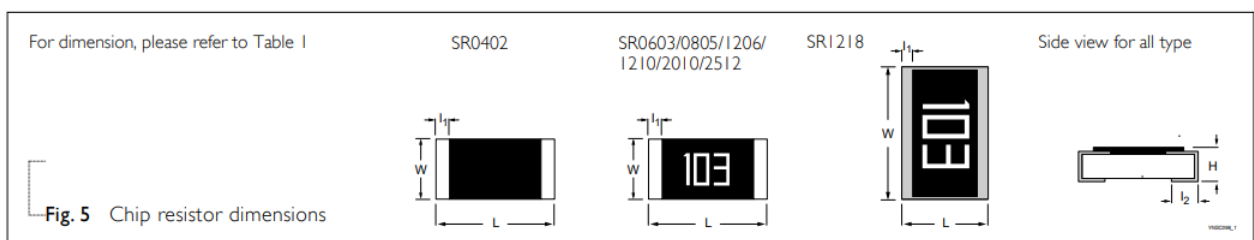


Рис. 3.32. Резистор SR0805FR-4710KL

Таблиця 3.32. Розміри резистора SR0805FR-4710KL

L	W	H	I1c	I2
2±0.10	1.25±0.10	0.5±0.10	0.35±0.20	0.35±0.20

Таблиця 3.33. Основні параметри елементу SR0805FR-4710KL

Опір	10 kOhm
Відхилення ємності	±1%
Температура навколишнього середовища	від -55°C до 155°C
Потужність	0.5W

Резистор CRCW080515K0FKEAHP Vishay (R11)

На рисунку 3.33 зображено резистор, в таблиці 3.34 перераховані розмір елементів, в таблиці 3.35 – основні параметри елементів

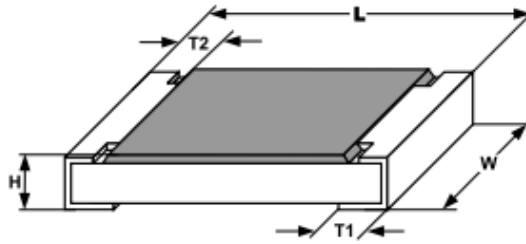


Рис. 3.33. Резистор CRCW080515K0FKEANP

Таблиця 3.34. Розміри резистора CRCW080515K0FKEANP

L	W	H	T1	T2
2 ± 0.10	1.25 ± 0.10	0.5 ± 0.10	0.4 ± 0.20	0.35 ± 0.20

Таблиця 3.35. Основні параметри елемента CRCW080515K0FKEANP

Опір	15 kOhm
Відхилення ємності	$\pm 1\%$
Температура навколишнього середовища	від -65°C до 155°C
Потужність	0.5W

Резистор CRCW0805110KFKEANP Vishay (R12)

На рисунку 3.34 зображено резистор, в таблиці 3.36 перераховані розмір елементів, в таблиці 3.37 – основні параметри елементів

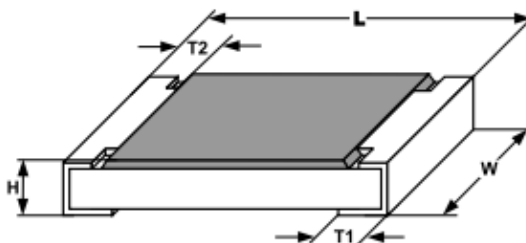


Рис. 3.34. Резистор CRCW0805110KFKEANP

Таблиця 3.36. Розміри резистора CRCW0805110KFKEANP

L	W	H	T1	T2
2 ± 0.10	1.25 ± 0.10	0.5 ± 0.10	0.4 ± 0.20	0.35 ± 0.20

Таблиця 3.37. Основні параметри елементу CRCW0805110KFKEANP

Опір	110 kOhm
Відхилення ємності	±1%
Температура навколишнього середовища	від -55°C до 155°C
Потужність	0.5W

Кнопка В3F-1000 (S1)

Кнопка В3F-1000 – механічний пристрій, призначений для передачі електричних сигналів на різні пристрої шляхом закриття або відкриття двох або більше контактів.

На рисунку 3.35 продемонстровано кнопку В3F-1000 та її розміри, в таблиці 3.38 перераховані основні параметри елемента.

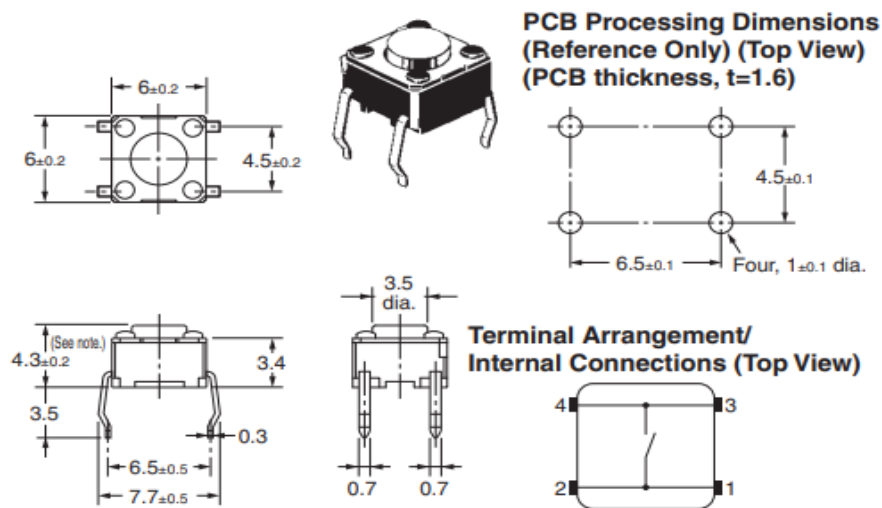


Рис. 3.35. Кнопка В3F-1000

Таблиця 3.38. Основні параметри кнопки

Зносостійкість	1 000 000 циклів
Робоча температура	від -25°C до +70°C
Температура зберігання	від -40°C до +90°C

Діод шоттки – SS34(U1)

Діод SS34 випрямляч із бар'єром Шоттки. Призначен для застосування в швидкодіючих імпульсних пристроях з максимально допустимим середнім прямим струмом 3,0 А. На рисунку 3.36 зображено діод SS34 та його розміри. Основні параметри – в таблиці 3.39.

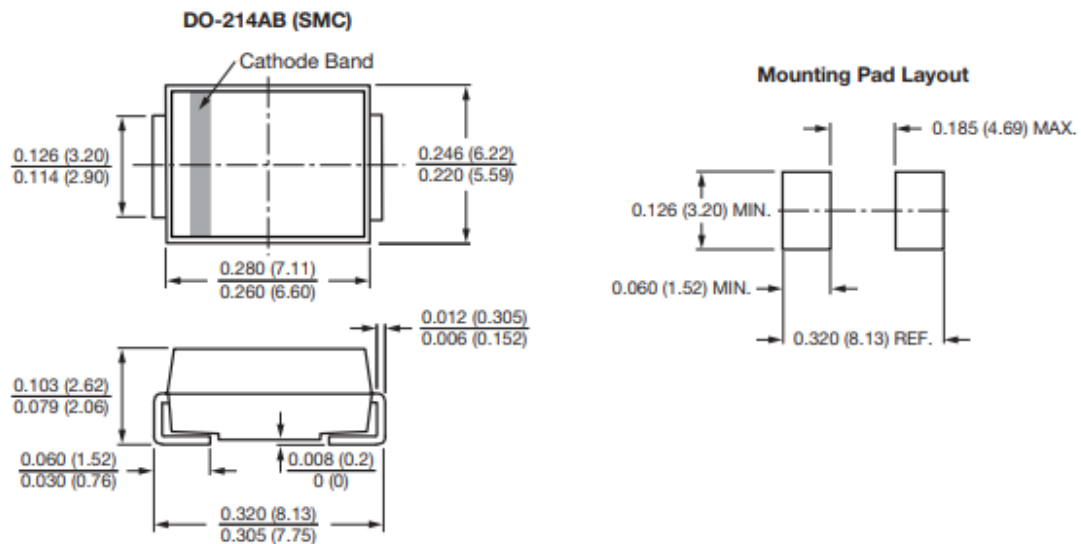


Рис. 3.36. Діод шоттки SS34.

Таблиця 3.39. Основні параметри діоду SS34

Максимальний прямий струм, I _{пр}	3 А
Падіння напруги (пряме включення)	0.2 – 0.5 V
Максимальна зворотна напруга, U _{обр}	40 V
Діапазон робочих температур	від -50°C до +150°C

Підвищуючий перетворювач МТ3608 (U2)

МТ3608 – це 6-контактний SOT23 підвищувач з постійною частотою.

Перетворювач режиму струму, що підвищує, призначений для малих пристроїв з низьким енергоспоживанням. МТ3608 перемикається на 1,2 МГц і дозволяє використовувати крихітні, недорогі конденсатори та котушки

індуктивності заввишки не більше ніж 2 мм. Внутрішній плавний пуск призводить до невеликого пускового струму та продовжує термін служби батареї. На рисунку 3.37 зображено MT3608 та його розміри. Основні параметри – в таблиці 3.40.

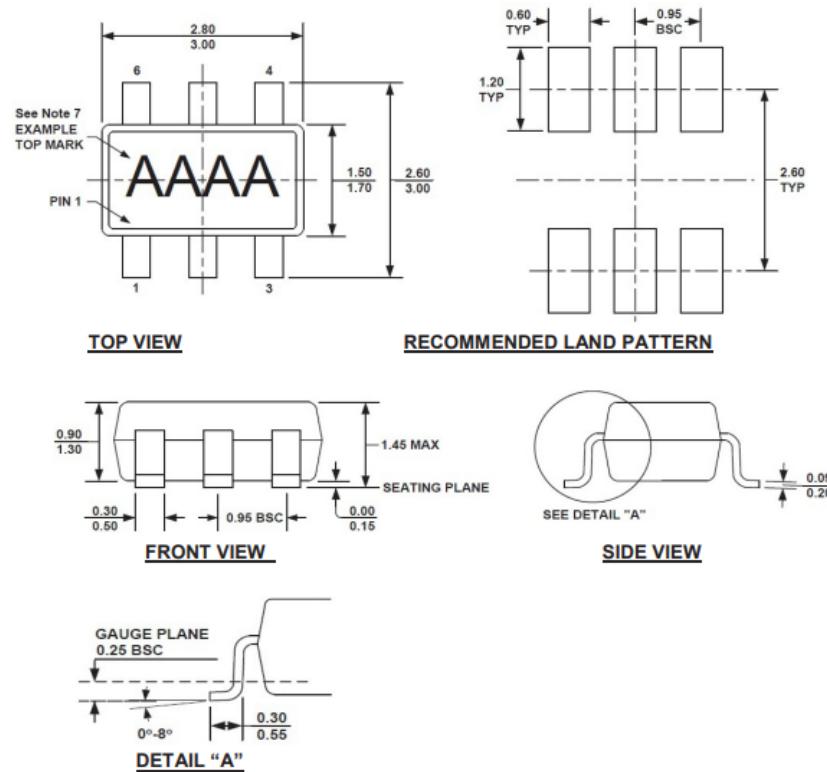


Figure 4. TSOT23-6/SOT23-6 Physical Dimensions

NOTE:

1) ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.

Рис. 3.37. Регулятор напруги MT3608

Таблиця 3.40. Основні характеристики MT3608

Мінімальна вихідна напруга	2 V
Струм (поточний/вихідний)	2 A
Максимальна вхідна напруга	24 V
Максимальна вихідна напруга	28 V
Падіння потужності	0.6 V
Діапазон робочих температур	від -40°C до 85°C

Клемний блок WAGO 2060-452 (X7, X8)

Клемний блок Wago2060-452 – продукт для підключення дротів. Представлений у вигляді пари (або більше) залізних контактів з вузлами кріплення до них дротів у діелектричному корпусі. Клемний блок Wago2060-452 представлений на рисунку 3.38. Основні параметри елемента Wago2060-452 наведені в таблиці 3.41.



Рис. 3.38. Клемний блок Wago2060-452

Таблиця 3.41. Основні параметри Wago2060-452

Мінімальна напруга	0.05 V
Максимальна напруга	320.0 V
Робоча температура	від -60 до +105°C
Шаг	4 мм
Матеріал контакту	Хромонікелева пружинна сталь
Тип кріплення жил дроту	Кнопковий

Роз'єм USB type B 61729-0010BLF Amphenol (X1, USB)

Роз'єм USB 61729-0010BLF Amphenol представлений на рисунку 3.39. Основні параметри елемента 61729-0010BLF Amphenol наведені в таблиці 3.42.

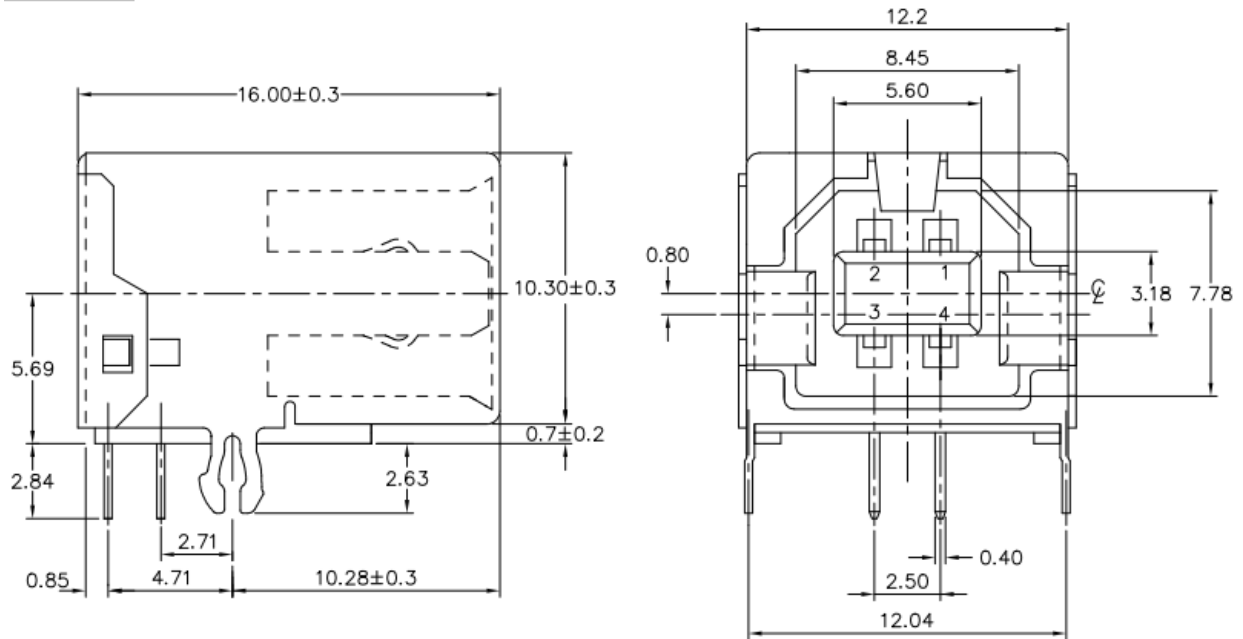


Рис. 3.39. Роз'єм USB 61729-0010BLF

Таблиця 3.42. Основні параметри роз'єму USB 61729-0010BLF

Вид	Female
Стандартний	USB 2.0
Стиль завершення	Through Hole
Кількість контактів	4
Кількість портів	1
Поточний рейтинг	1.5 A
Монтажний кут	Right Angle
Стиль монтажу	Монтажний отвір

Штирьова вилка 4х-контактна PLS-4 DS-1021-1x4 (I2C, UART)

З'єднувач на плату для під'єднання приладів через дрiт. Штирьова вилка продемонстрована на рисунку 3.40. Параметри коннектору у таблиці 3.43.

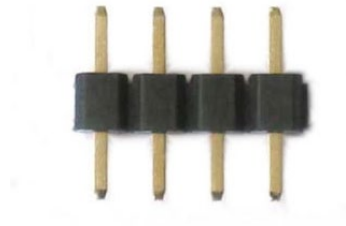


Рис. 3.40. Вилка штирьова

Таблиця 3.43 – Основні параметри штирьової вилки

Типорозмір	1
Функціональне призначення	вилка на плату
Серія	pls
Кількість рядів	1
Кількість контактів в ряду	4
Крок контактів, мм	2,54
Матеріал ізолятора	Полімерний, усиленний стекловолокном
Максимальне напруження не менше, В	500vac, 1 хв

Двигун (кроковий) 28BYJ-48 5V

П'ятивольтовий кроковий двигун 28BYJ-48 5В використовується в робототехніці, DIY-пристроях, поворотних жалюзі кондиціонерів, невеликих вентиляторах і т.п. На відміну від двигунів постійного обертання, один оберт крокового двигуна складається з безлічі мікропереміщень, які і називають кроками. Всі технічні параметри відповідають національному електронному стандарту SJ / T10689-95 Розмір і вид продемонстровано на рисунку 3.44.

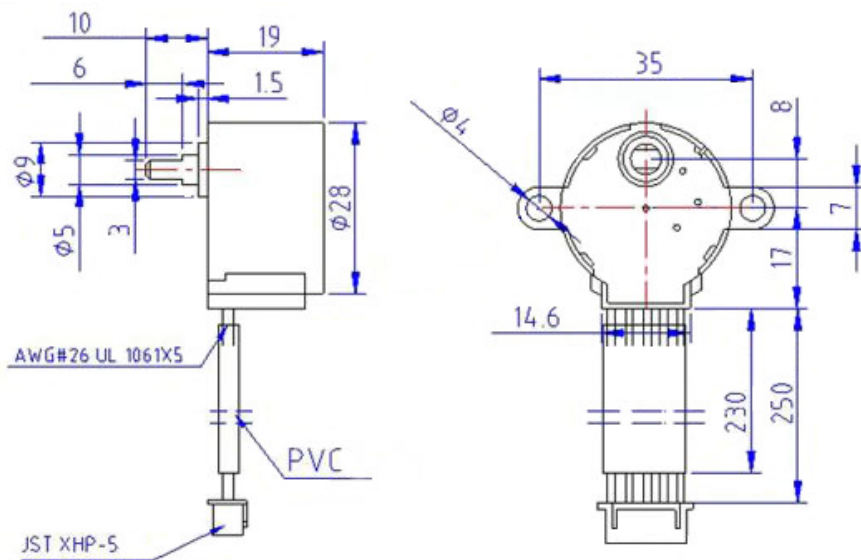


Рис. 3.41. Кроковий двигун 28BYJ-48 5V

Таблиця 3.44 – Характеристики двигуна

Номінальна напруга живлення	5 V
Кількість фаз	4
Кількість позицій на крок	64
Кількість мікрокроків	4096
Крок	5.625 Градусів
Номінальна частота	100 Hz
Номінальний опір обмоток (при 25 Градусах)	50 Ohm
Піковий струм однієї обмотки	близько 320 мА

Продовження таблиці 3.44

Частота холостого ходу (за годинниковою стрілкою)	600 Hz
Частота холостого ходу (проти годинникової стрілки)	1000 Hz
Крутний момент (за годинниковою стрілкою, при частоті 120 Hz)	34,3 Н/м
Опір обертання	600-1200 г/см
Номінальна тяга	343 г / см
Клас електробезпеки	A
Рівень шуму	<40dB

Дріт з'єднувач типу JST Encoder Breakout Cable 4x1

Дріт працює зв'язуючою ланкою між MEMS-модулем GY-521 та платою створюемого пристроя. На рисунку 3.42 його вигляд, у таблиці 3.45 параметри.

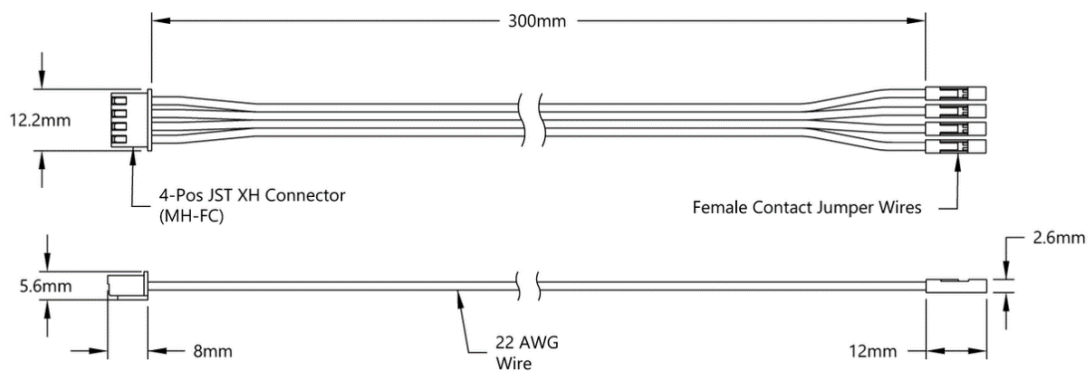


Рис. 3.42. Дріт JST

Таблиця 3.45 – Основні параметри дроту JST

Дріт з серії	22AWG
Матеріал кожуху	ABS Пластик
Матеріал дроту	Багатожильний мідний

3.1.5 Розробка конструкції друкованої плати

При розробці конструкції друкованої плати ход роботи можна розподілити на такі стадії:

- обґрунтування вибору типу друкованої плати;
- попереднє розміщення елементів на платі;
- обґрунтування обраного класу точності;
- розміщення елементів і трасування;
- вибір матеріалу, габаритних розмірів і конфігурації друкованої плати;
- розробка конструкторської документації друкованої плати.

Для створюємого приладу пристрою обрано двосторонню друкована плата.

Відповідно до положення про ГОСТ 23751-86 [11], точність компонентів на друкованій платі розподілена на п'ять рівнів точності.

У розроблюємому проекті обираєно другий рівєнь точності про тій причині, що плати другого рівня точності є надійніші і дешевші, ніж рівні вищого рівня. Для другого класу точності присутні такі конструктивні параметри плат:

- ширина провідника (мінімальна) $t = 0.45$ мм;
- запас пояску $b = 0.2$ мм;
- відстань між провідниками (мінімальна) $S = 0.45$ мм;
- допуск на розташування осей отворів $T_d = 0.15$ мм;
- відхилення діаметра отвору (максимальне) $\Delta d = \pm 0.15$ мм;
- допуск на розташування центрів контактних площадок $T_D = 0.25$ мм.
- відхилення ширини друкованого провідника, граничне $\Delta t = \pm 0.1$ мм;

Матеріалом виготовлення друкованої плати виступає склотекстоліт, облицьований фольгою з оксиду міді (СФ-1-35) [6]. Товщина фольги - 50 мкм, а ширина доріжки - 0.93 мм. Товщина друкованої плати – 1.5 мм. Робочий діапазон температур: від -60 °С до +85 °С. Загальний розмір друкованої плати – 100 мм на 78.73 мм.

Діаметр отвору під висновок вибирають з умови отримання зазору між висновком і стінкою отвори, що забезпечує капілярний проникнення припою в процесі пайки [5].

Мінімальний діаметр контактної колодки D навколо монтажного отвору з відомим діаметром d визначається наступною формулою:

$$D = d + \Delta d_{\text{в.о.}} + 2b_{\text{н}} + \Delta t_{\text{в.про}} + 2\Delta d_{\text{тр}} + (T_d^2 + T_D^2 + \Delta t_{\text{н.о.}}^2)^{0.5}$$

де $\Delta d_{\text{в.о.}}$ - верхнє граничне відхилення діаметра отвору - 0.15 мм;

$b_{\text{н}}$ - гарантійний поясок на зовнішньому шарі - 0.2 мм;

$t_{\text{в.про}}$ та $t_{\text{н.о.}}$ - верхнє і нижнє граничні відхилення ширини провідника - 0.1 мм;

$\Delta d_{\text{тр}}$ - значення підщавлювання діелектрика (для двосторонніх плат = 0.03);

T_d - допуск на розташування осей отворів для відповідного класу точності і розмірів плати - 0.15 мм;

T_D - допуск на розташування контактних площадок для відповідного класу точності і розмірів плати - 0.25 мм.

Діаметри отворів для тримача батареї $d_{\text{отв}} \approx 1.4$ мм

$$D_1 = 1.4 + 0.15 + 0.4 + 0.1 + 0.06 + (\sqrt{0.15^2 + 0.25^2 + 0.1^2}) = 2.4 \text{ мм}$$

Діаметри отворів під USB-роз'єм $d_{\text{отв}} \approx 2.3$ мм та $d_{\text{отв}} \approx 1$ мм

$$D_1 = 2.3 + 0.15 + 0.4 + 0.1 + 0.06 + (\sqrt{0.15^2 + 0.25^2 + 0.1^2}) = 3.3 \text{ мм}$$

$$D_1 = 1 + 0.15 + 0.4 + 0.1 + 0.06 + (\sqrt{0.15^2 + 0.25^2 + 0.1^2}) = 2 \text{ мм}$$

Діаметр $d_{\text{отв}} \approx 0.9$ мм

$$D_1 = 0.9 + 0.15 + 0.4 + 0.1 + 0.06 + (\sqrt{0.15^2 + 0.25^2 + 0.1^2}) = 1.9 \text{ мм}$$

Діаметр $d_{\text{отв}} \approx 1.1$ мм

$$D_1 = 1.1 + 0.15 + 0.4 + 0.1 + 0.06 + (\sqrt{0.15^2 + 0.25^2 + 0.1^2}) = 2.1 \text{ мм}$$











Діаметр перехідних отворів $d_{\text{отв}} \approx 0.6$ мм

$$D_1 = 0.6 + 0.15 + 0.4 + 0.1 + 0.06 + (\sqrt{0.15^2 + 0.25^2 + 0.1^2}) = 0.8 \text{ мм}$$





















Детальні правила впровадження креслення друкованої плати наведено згідно з положення про ГОСТ 2.417-91 [8]. Розміри на схемі друкованої плати представлені сіткою в прямокутній системі координат. Розмір кроку сітки – 1,27 мм. Сітка прикладається до частини поверхні друкованої плати, за основу береться нижній лівий кут друкованої плати [10].

Діаметр отвору, його символ, діаметр контактної колодки, наявність металізації та кількість отворів поєднані в таблиці 3.46. Розміри та кількість контактних площадок перераховані в таблиці 3.47.

Таблиця 3.46. Розміри монтажних отворів

Символ	Діаметр отворів, мм	Наявність металізації в отворі	Кількість отворів	Мінімальний діаметр контактної площадки, мм
	0.9	без металізації	4	1.9
	0.9	без металізації	4	1.9
	0.9	без металізації	6	1.9
	1.1	без металізації	8	2.1
	1	без металізації	4	2
	1	без металізації	12	2
	1.4	без металізації	2	2.4
	2.3	без металізації	2	2.9
	0.6	без металізації	54	1.6
	2.6	без металізації	6	-

Таблиця 3.47. Розміри контактних площадок

Місце розташування	Символ	Кількість	Розмір, мм
C3, C5 – C7, C16, C17		12	1.05x1.08
C13, C14		4	3x1.4
D1		2	0.9x1.22
IC2		44	1.5x0.5
IC3		20	2.2x0.6
H1, H2		4	1.15x1.3
R1, R8, R9, R13, R14		10	1.6x1.8
R10 – R12		6	1.3x1.45
Q1		2	1.6x3.2
U2		6	1.2x0.6
X7, X8		4	3.5x2
		4	6x2
C15		2	1.05x1.08
IC1		8	0.65x1.27
IC5		8	0.5x1.2
R5 – R7		6	1.6x1.8
Q2		3	1.5x2
		1	2x3.8
Q3		8	0.35x1.5
U1		2	1.8x1.7

3.1.6 Розробка конструкції друкованого вузла

Навісні елементи на друкованій платі встановлюються згідно з ДСТУ 2779-94 [13], тобто в отвори друкованої плати. Стандарт [13] передбачає при установці будь-яких елементів на друкованих платах мінімальний розмір від корпусу елемента до центра кола вигину при формуванні висновків - 1 мм. Елементи розташовані з обох сторін плати.

Креслення розроблюємого девайсу продемонстровано на рисунку 3.43 та 3.44, друкована плата на рисунках 3.45 та 3.46.

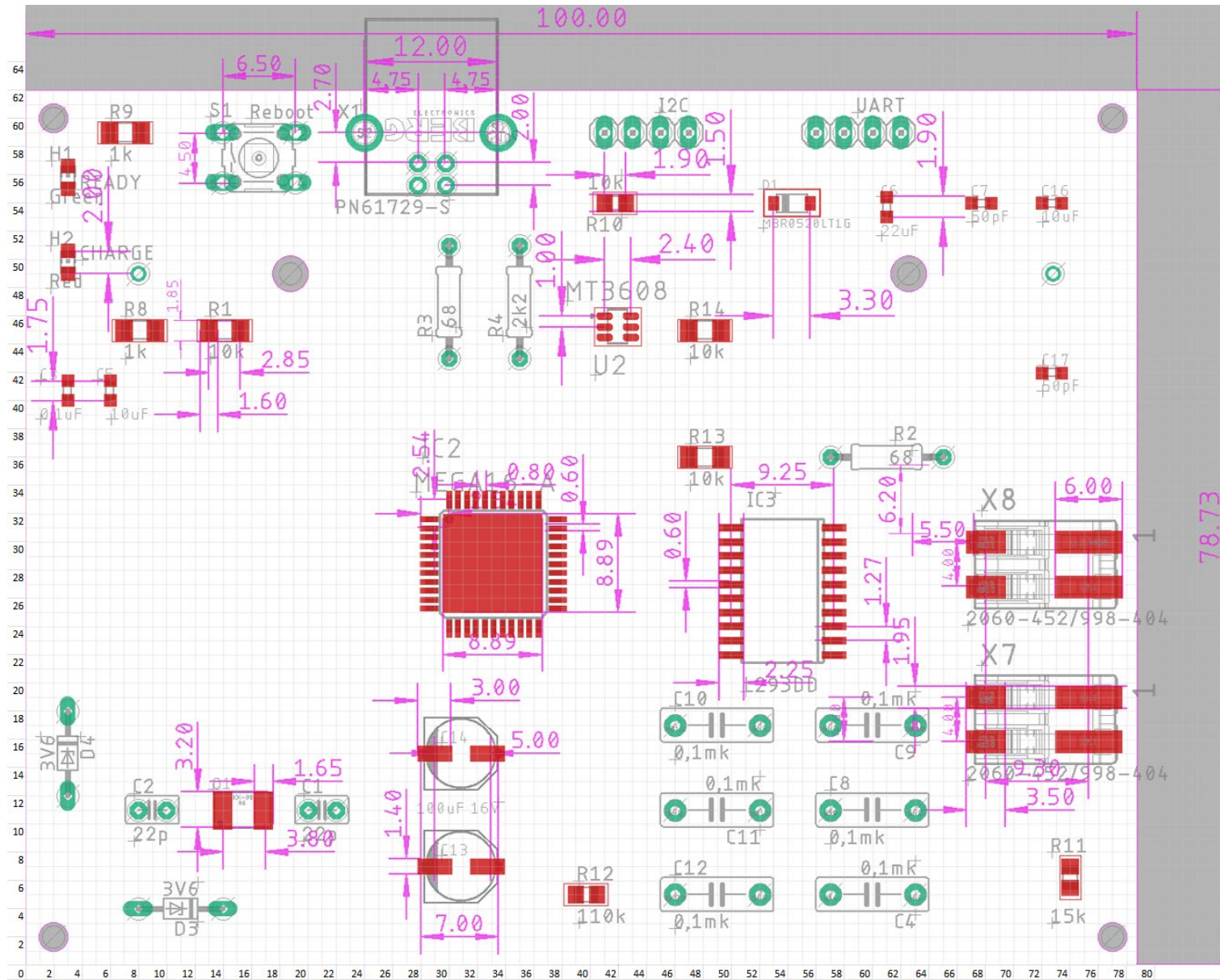


Рис. 3.43. Складальне креслення пристрою (сторона 1)

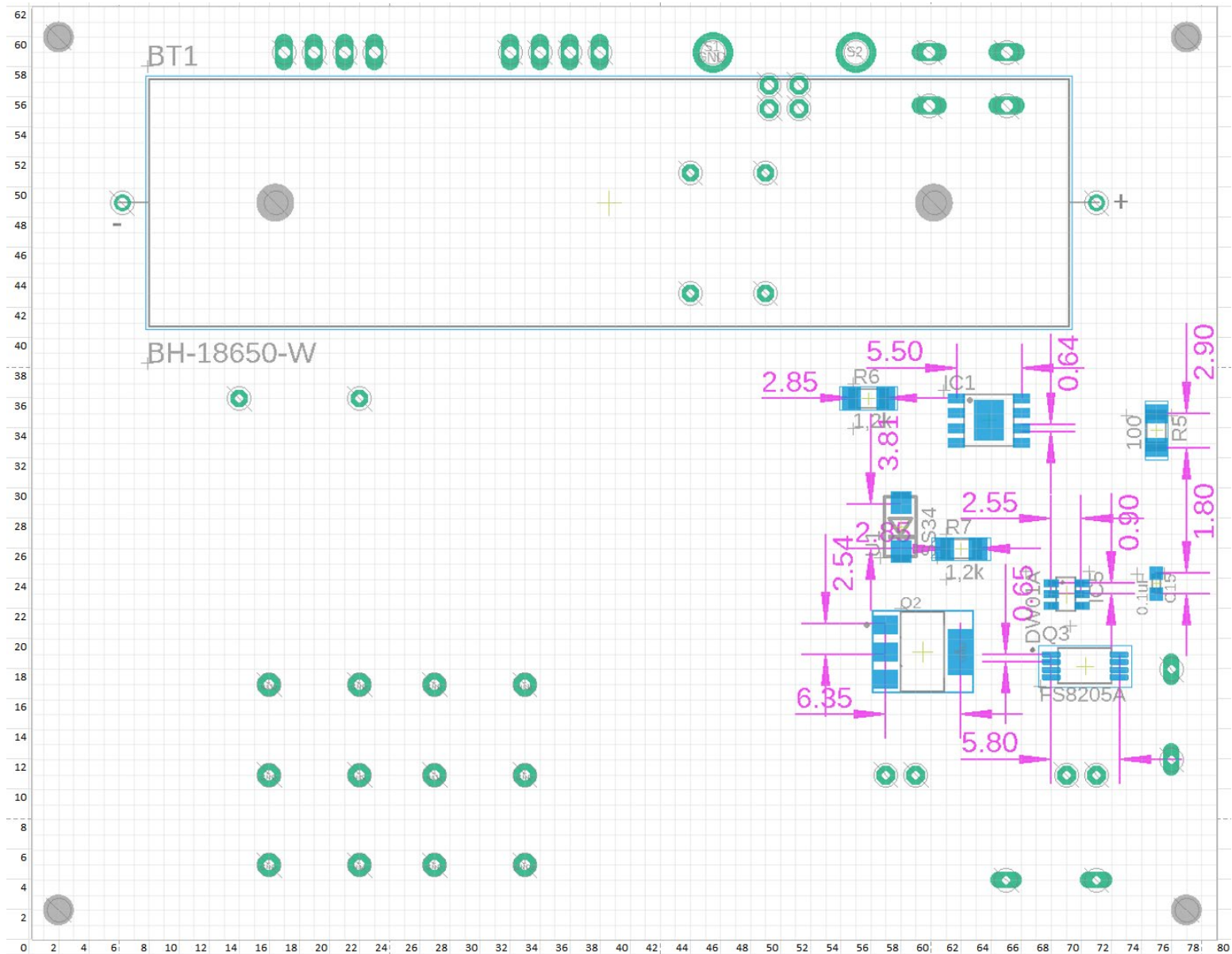


Рис. 3.44. Складальне креслення пристрою (сторона 2)

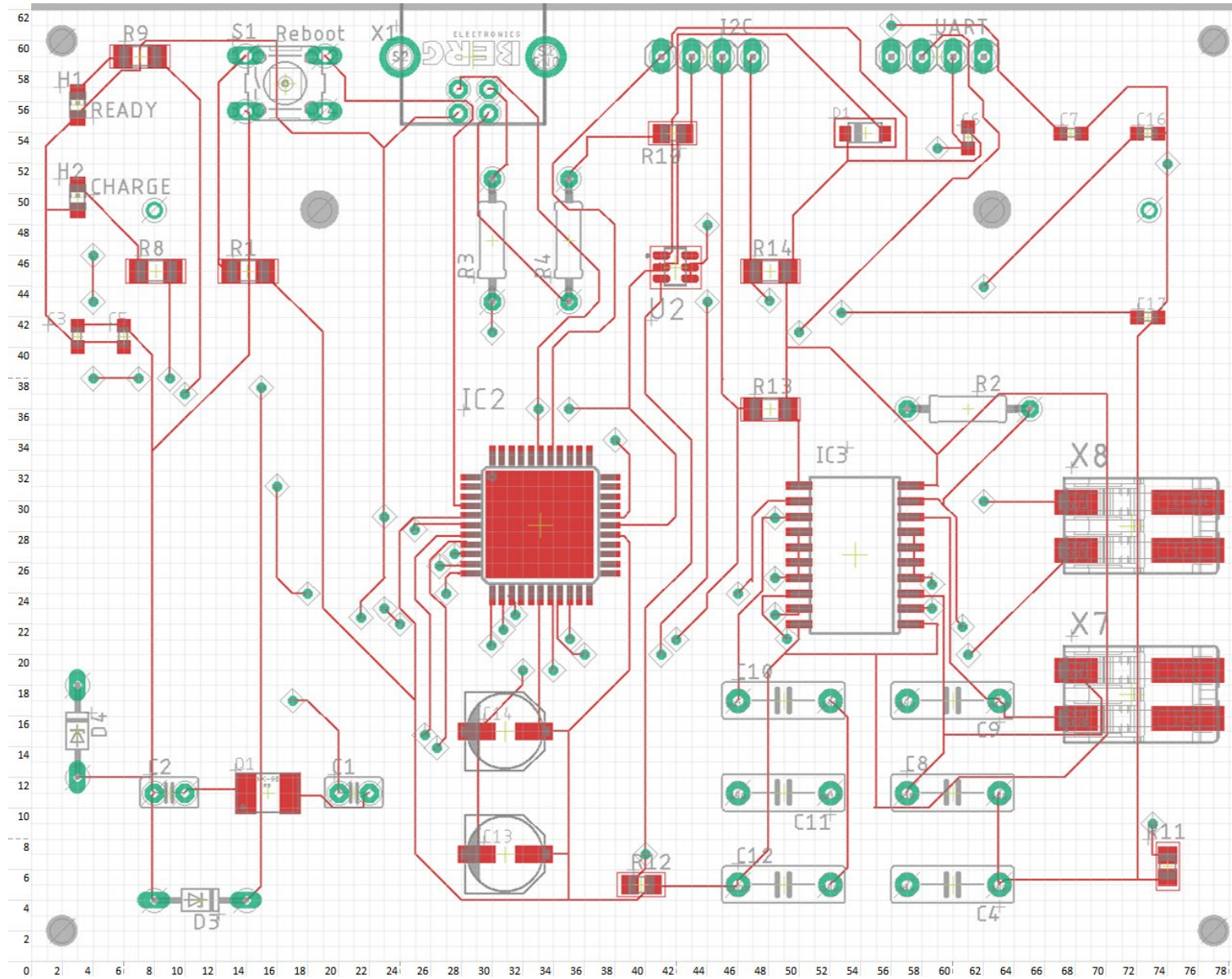


Рис. 3.45. Друкована плата (сторона 1)

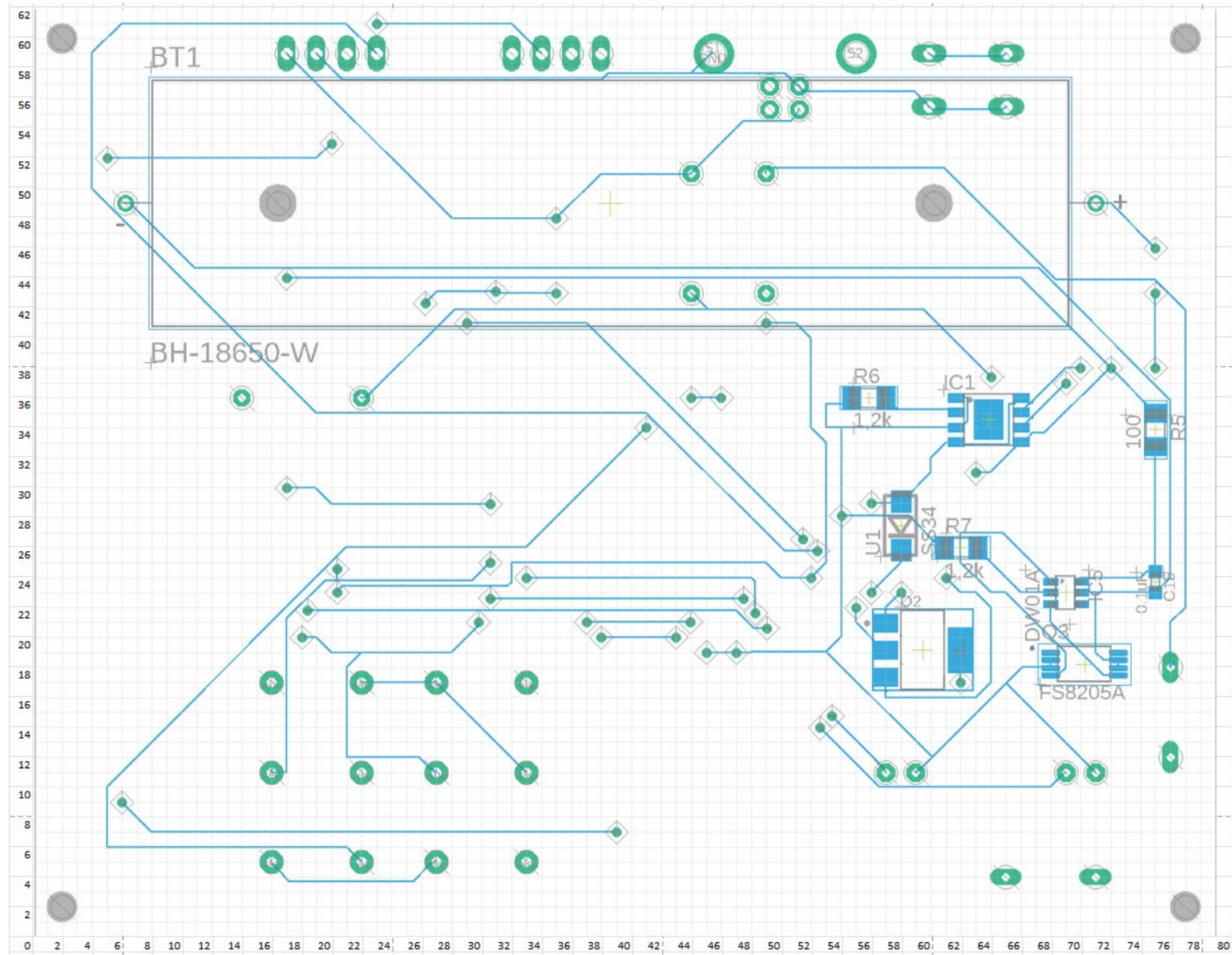


Рис. 3.46. Друкована плата (сторона 2)

3.1.7 Вибір умов охолодження і розрахунок теплового режиму.

Під час роботи, температура пристрою не повинна перевищувати заданих технічними умовами значень.

У конструкції необхідні температурні умови досягаються шляхом застосування відповідних умов охолодження та розумної компоновки в конструкції.

Попередній вибір системи охолодження

Початковий вибір системи охолодження здійснюється за допомогою діаграм, які характеризують відповідне використання різних методів охолодження.

Оцінка заснована на попередніх даних про тепловий потік на одиницю площі:

$$p = \frac{P * k_p}{S_n}$$

де $P = \sum p_i$ – загальна розсіяна потужність електронного обладнання, де p_i - потужність кожного елемента окремо.

k_p – коефіцієнт, що враховує тиск повітря ($k_p = 1$);

$S_n = 2[l_1 l_2 + (l_1 + l_2) l_3 k_3]$ – поверхня теплообміну, обумовлена геометричними розмірами корпусу електронного пристрою, тобто довжиною l_1 , шириною l_2 основи пристрою і його висотою l_3 , а також коефіцієнтом заповнення об'єму $k_3 = \frac{V_{ап}}{V_{об}}$, де $V_{ап}$ - об'єм апаратури, $V_{об}$ - об'єм об'єкта.

Корпус створюваного приладу прямокутний і має розміри: $100 \times 78.73 \times 31.8$ мм ($0.1 \times 0.079 \times 0.032$ м).

$$P_o = 8.22 \text{ (Вт)}$$

$$\begin{aligned}
 V_{\text{ан}} = & 2.35 * 12.5 * 7.4 + 6 * 6 * 4.3 + 5 * 2.5 * 0.7 + 10.2 * 3.8 * 2 + 9 * 3 + 3.8 \\
 & * 2 * 2 + 5 * 3.2 * 1.1 + 5 * 2.5 * 3.5 * 2 + 1.2 * 12.25 * 2 + 3 * 2.30 \\
 & * 5 + (6.6 * 6.3 * 7.7) * 2 + (12.7 * 4.5 * 7.9) * 2 + 11.92 * 18.65 \\
 & * 4.5 + 4 * 5 * 1.75 + 2.9 * 1.6 * 1.1 + (2 * 1.25 * 0.8) * 2 + 3.5 * 6.5 \\
 & * 1.63 + 2.93 * 4.4 * 1.2 + (3.1 * 1.6 * 0.55) * 7 + (2 * 1.25 * 0.5) * 3 \\
 & + 5.6 * 6.6 * 2 + 3 * 1.7 * 1.45 + (1.6 * 0.85 * 0.9) * 7 + 77.7 * 20.9 \\
 & * 21.31 = 38028.6672 \text{ (мм}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

$$V_{\text{об}} = 100 * 78.73 * 20.5 = 82666 \text{ (мм}^2\text{)}$$

$$k_3 = \frac{38028.6672}{250361} = 0,15$$

$$S_n = 2 * (100 * 78.73 + (100 + 78.73) * 31.8 * k_3) = 18019 \text{ (мм}^2\text{)}$$

$$p = \frac{8.22 * 1}{0.1802} = 45.62$$

$$\lg p = 3.8$$

Другим вхідним параметром є величина мінімально припустимого перегріву елементів пристрою $\Delta T_{i \min} = T_{i \min} - T_c$,

де $T_{i \min}$ – припустима температура корпусу найменш теплостійкого елемента;

T_c – температура навколишнього середовища.

$$\Delta T_{i \min} = 85 - 45 = 40$$

На рисунку 3.47 показано належну область застосування різних методів охолодження в системі координат $\Delta T_c, \lg p$ у цих системах координат. Можна зробити висновок, що для охолоджуючого обладнання необхідне достатнє охолодження природного повітря, але тому що пристрій майже виходит з зони природного, було б про всяк випадок поставити якесь примусове охолодження, на кшталт радіатору.

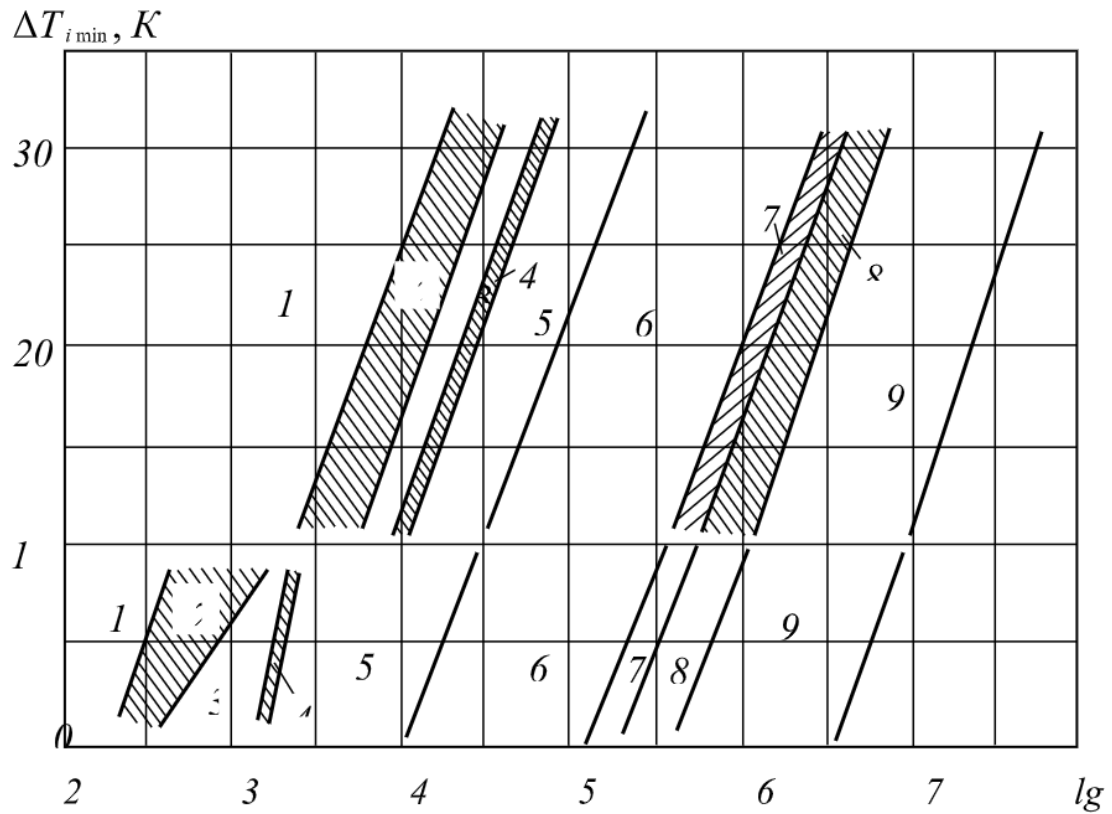


Рис. 3.47. Области доцільного застосування різних способів охолодження

1 – природне повітряне; 2 – природне і примусове повітряне; 3 – примусове повітряне; 4 – примусове повітряне і рідинне; 5 – примусове рідинне; 6 - примусове рідинне і природне випарне; 7 - примусове рідинне, примусове і природне випарне; 8 - природне і примусове випарне; 9 - примусове випарне.

Розрахунок теплового режиму блоку в корпусі

Визначальними параметрами для розрахунку є питомі потужності розсіювання блоку пристрою в цілому p_k і нагрітої зони p_z відповідно:

$$p_k = P_0 / S_k,$$

$$p_z = P_0 / S_z,$$

де P_0 – потужність, що розсіюється пристроєм; S_k - площа поверхні корпусу пристрою; S_z - умовна поверхня нагрітої зони.

У свою чергу площа поверхні корпусу пристрою та умовна поверхня нагрівальної зони визначаються за такою формулою:

$$S_k = 2[l_1 l_2 + (l_1 + l_2)l_3], \quad S_k = 0.028 \text{ м}^2$$

$$S_z = 2[l_1 l_2 + (l_1 + l_2)l_3 k_3], \quad S_z = 0.016 \text{ м}^2$$

$$p_k = 274 \text{ Вт/м}^2$$

$$p_z = 411 \text{ Вт/м}^2$$

Перегрів корпусу електронного пристрою, що працює в нормальних кліматичних умовах щодо навколишнього середовища, визначається за такою формулою:

$$\theta_1 = 0.1472 * p_k - 0.2962 * 10^{-3} * p_k^2 + 0.3127 * 10^{-6} * p_k^3$$

$$\theta_1 = 25,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Перегрів в зоні нагрівання визначається аналогічними залежностями:

$$\theta_2 = 0.1390 * p_z - 0.1223 * 10^{-3} * p_z^2 + 0.0698 * 10^{-6} * p_z^3$$

$$\theta_2 = 41,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

За отриманими даними визначається перегрів повітря в блоці (пристрої)

$$\theta_{\text{пов}} = 0.5 * (\theta_1 + \theta_2) = 33,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

3.1.8 Розрахунок надійності пристрою

Надійність обладнання визначається шляхом обчислення методу раптової несправності роботи відповідно до відомого показника надійності компонента обладнання, і враховуються такі припущення: збій компонента є статистично незалежним, а вихід з ладу будь-якого компонента спричинить збій всього обладнання.

Коефіцієнт відмов обладнання визначається формулою:

$$\lambda_c = k_\lambda \cdot \sum_{i=1}^n a_i \cdot \lambda_{0i},$$

де λ_{0i} – частота відмов цього елемента.

$k_\lambda = k_{\lambda 1} * k_{\lambda 2} * k_{\lambda 3}$ – поправочний коефіцієнт для умов роботи обладнання: $k_{\lambda 1}$ - вплив механічних факторів; $k_{\lambda 2}$ - вплив кліматичних факторів: $k_{\lambda 3}$ - умови роботи при низькому тиску.

a_i – корекційний коефіцієнт, враховуючи вплив температури навколишнього середовища та коефіцієнта навантаження на електричне навантаження пристрою k_H ;

k_H – коефіцієнт навантаження, тобто відношення завантаженості, встановленого за певними параметрами.

Середній час відмови всього обладнання визначатиметься за формулою:

$$T_c = \frac{1}{\lambda_c}$$

Резистори постійні металоплівкові

Інтенсивність відмов $\lambda_0 = 0.4 * 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$

Коефіцієнт навантаження $k_H = 0.5$

Поправочний коефіцієнт $a = 1.07$

Кількість елементів – 14.

Конденсатори оксидні

Інтенсивність відмов $\lambda_0 = 0.8 * 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$

Коефіцієнт навантаження $k_H = 0.7$

Поправочний коефіцієнт $a = 7$

Кількість елементів – 4

Конденсатори керамічні

Інтенсивність відмов $\lambda_0 = 0.7 * 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$

Коефіцієнт навантаження $k_n = 0.7$

Поправочний коефіцієнт $a = 2,8$

Кількість елементів – 13.

Діоди імпульсні

Інтенсивність відмов $\lambda_0 = 1 * 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$

Коефіцієнт навантаження $k_n = 0,5$.

Поправочний коефіцієнт $\alpha = 1,05$.

Кількість елементів – 4.

Мікросхеми інтегральні

Інтенсивність відмов $\lambda_0 = 1.5 * 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$

Кількість елементів – 7.

Елементи кріпильні.

Інтенсивність відмов $\lambda_0 = 0.4 * 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$.

Кількість елементів – 5.

Плата друкована

Інтенсивність відмов $\lambda_0 = 0.1 * 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$.

Кількість елементів – 1.

Пайка сполучна

Інтенсивність відмов $\lambda_0 = 0.04 * 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$.

Кількість елементів – 201.

Інтенсивність відмови пристрою дорівнює:

$$\lambda_c = 1.46 * 1 * 1 * 10^{-6} * (0.4 * 1.07 * 14 + 0.4 * 5 + 0.8 * 7 * 4 + 0.7 * 2.8 * 13 + 1.5 * 7 + 1.05 * 4 + 0.1 + 0.04 * 201) = 0.0001 \frac{1}{\text{год}}$$

$$T_c = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{0.0001} = 10000 \text{ ч} \approx 1.14 \text{ роки.}$$

3.1.9 Вихідні дані створення апаратного забезпечення

У процесі розробки апаратного забезпечення здійснювався проектний розрахунок параметрів та проектування та розробка друкарського блоку мікропроцесорної системи. Розробка друкованих плат і друкованих плат, теплові розрахунки та розрахунки надійності блоків друкованих плат.

Основні конструктивні параметри:

- розміри друкованого вузла $100 \times 78.73 \times 31.8$ мм
- середнє напрацювання на відмову 10000 годин.

3.2 Розробка програмного забезпечення.

Підготовчі роботи

Для роботи з протоколом I2C, модулем GY-521, необхідно установити та підключити необхідні бібліотеки, які знаходяться в інтернеті, у вільному доступі. Та налаштувати контроль MPU6050 та драйверу двигуна та створити змінні. Код можна побачити у частині А.1 додатка А.

Початкові налаштування

У цій частині програми створено команди ініціалізації, перевірки, та очікування готовності усіх компонентів пристрою. А також введення даних для широко-імпульсної модуляції (ШИМ з англ. PWM - Pulse Width Modulation) для працездатності функції таймера. ШИМ – спосіб установки аналогового сигналу цифровим методом, тобто з цифрового виходу, який дає тільки нулі і одиниці для отримання плавно змінюваних значень. Код можна побачити у частині А.2 додатка А.

Основна програма

У основній частині прописано обчислення та команди передачі даних виконуємі мікроконтроллером. Мікроконтроллер виходить посередником між драйвером двигуна та MEMS-модулем. Код можна побачити у частині А.3 додатка А.

Створення функції мотору

Ця функція керує рухами двигуна. Оновлення кожного з кроків вперед або назад залежно від орієнтації двигуна проти потрібного значення. Код можна побачити у частині А.4 додатка А.

ВИСНОВКИ

1. Розроблена автономна електронна система ідентифікації кінетичних рухів на основі MEMS.
2. Були розглянуто завдання, які повинна система ідентифікації кінетичних рухів та їх рішення. Було проведено аналітичний огляд та розподіл двигунів та MEMS-датчиків за їх призначеннями та функціями. А також були розглянуті електричні елементи з яких складається прилад, що створюється.
3. Створено апаратне забезпечення: схема електрична принципова, підібрані комплектуючі, друкована плата, вибрані умови охолодження і розрахований тепловий режим, розрахунок надійності пристрою.
4. Розроблено програмне забезпечення під мікроконтролер.
5. Було розглянуто MEMS-модулі та технологію ідентифікації кінетичних рухів. З'ясовано, що така система може бути реалізована та має місце бути на ринку товарів, завдяки своїй всеохоплюваній властивоті та багатій всенаправленості для модернізації.
6. Отримана система має досить широке застосування в кожній сфері діяльності людини а також для введення людино-машинних інтерфейсів у побут і подальшого управління механічними пристроями. Слід зауважити, що використання трьохканального маніпулятора з системою, з більш ніж одного крокового двигуна, дозволить керувати переміщенням будь-яких об'єктів у просторі за трьома координатами.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Chan Y.J., Huanga J.-W. Multiple-point vibration testing with micro-electromechanical accelerometers and microcontroller unit // *Mechatronics*, Volume 44, June 2017. – P. 84-93.
2. Heydari H. Stepper motor control using the MC68HC11 / H. Heydari, O. Ansary, M. Urban, M. E. Shafeei // *Computers in Education Journal*. – 1996. – vol. 6. – iss. 2. – pp. 56–61.
3. Παραιοαννου Spiros G. Stepping motors – A review / Spiros G. Παραιοαννου // *Computers & Electrical Engineering*. – 1980. – vol. 7. – iss. 4. – pp. 243–266.
4. Варадан, В. Высокочастотные МЭМС и их применение [Текст]: пер. с англ./В.Варадан, К.Виной, К.Джозе. –М.:Техносфера, 2004.-528 с.
5. Гейм, А. Углерод – страна чудес [Текст] / А.Гейм, Ф.Ким // *В мире науки*. -2008. №7. –с.30-37.
6. ГОСТ 10316-78. Гетінакс і склотекстолит фольговані. Технічні умови. - Введ. 01.01.79.
7. ГОСТ 15150-69. Машины, прилади та інші технічні вироби. Виконання для різних районів. Категорії, умови експлуатації, зберігання і транспортування в частині впливу кліматичних факторів зовнішнього середовища. Введ. 01.01.70.
8. ГОСТ 2.417-91. ЕСКД. Плати друковані. Правила виконання креслень. -Введ. 01.07.92.
9. ГОСТ 2.701-84. Схеми. Види і типи. Загальні вимоги до виконання. - Введ. 01.07.85.
10. ГОСТ 2.755-87. Позначення умовні в графічних схемах. Пристрої комутаційні і контактні з'єднання. - Введ. 01.01.88.
11. ГОСТ 23751-86. Плати друковані. Основні параметри конструкції. - Введ. 01.07.87.
12. Довідник по напівпровідникових діодів, транзисторів і інтегральних схем. / Под.ред. М.М. Горюнова. - М.: «Енергія», 1977. - 744 с.

13. ДСТУ 2779-94. Монтаж електричний радіоелектронної апаратури та приладів. Загальні технічні вимоги до формування висновків і до установки виробів електронної техніки на друковані плати. - Введ. 01.01.96.
14. Загірняк М.В. Електричні машини : підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – Київ : Знання, 2009. – 399 с.
15. Каталог FW Bell // Allied Electronics. [Електронний ресурс]. – 2016. Режим доступу: <http://www.alliedelec.com/m/d/ab8457abe0993678032fe3f2ea5c1be6.pdf> (дата звернення: 20.10.2020).
16. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Основи конструювання і технології електронних пристроїв» / Упоряд.: Ю. Е. Паеранд - Алчевськ: ДГМІ, 2003. 38 - с.
17. Ніколайчук В. М. Основи робототехніки : навч. посіб. / В.М. Ніколайчук. – Рівне : НУВГП, 2008. – 76 с.
18. Пістун Є. П. Основи автоматики та автоматизації: навч. посіб. Є. П. Пістун, І. Д. Стасюк; Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Львів : Вид-во Нац. Ун-ту "Львів. політехніка", 2014. – 333 с.
19. Практичний посібник з навчального конструювання РЕА. / Под ред. К. Б. Круковського-Сіневича, Ю. Л. Мазора. - К.: «Вища школа», 1992. - 494с.
20. Проць Я. І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: Навчальний посібник./ Я. І. Проць – Тернопіль : Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2008. – 232 с.
21. Резистори: Довідник. / Под ред. І.І. Четверткова і В.М. Терехова - М.: Радіо та зв'язок, 1991. - 528 с.
22. Селиванова К. Г. Экспериментальное исследование тонкой моторики рук с помощью цифрового графического планшета / К. Г. Селиванова // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Новые решения в современных технологиях. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2013. – № 18 (991). – С. 137-143.

23. Современные МЭМС-гироскопы и акселерометры – URL: https://sovtest-ate.com/news/publications/sovremennye-mems_giroskopy-i-akselerometry/. Доступ: 16.11.2021.

ДОДАТОК А (обов'язковий) ПРОГРАМНИЙ КОД

А.1. Підготовка до роботи.

```

#include "I2Cdev.h"

#include "MPU6050_6Axis_MotionApps20.h"
#include "MPU6050.h"

#if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_WIRE
    #include "Wire.h"
#endif

MPU6050 mpu;

#define OUTPUT_READABLE_YAWPITCHROLL
// Змінні управління/статусу MPU
bool dmpReady = false;
uint8_t mpuIntStatus;
uint8_t devStatus;
uint16_t packetSize;
uint16_t fifoCount;
uint8_t fifoBuffer[64];

// Змінні орієнтації/руху
Quaternion q;      // [w, x, y, z]
VectorInt16 aa;    // [x, y, z]
VectorInt16 aaReal; // [x, y, z]
VectorInt16 aaWorld; // [x, y, z]
VectorFloat gravity; // [x, y, z]
float euler[3];    // [psi, theta, phi]
float ypr[3];     // [yaw, pitch, roll]

```



```
uint8_t teapotPacket[14] = { '$', 0x02, 0,0, 0,0, 0,0, 0,0, 0x00, 0x00, '\r', '\n' };
```

```
// Пін для управління моментом нахилу (pitch motor)
```

```
const int pitchMotor1 =9;
```

```
const int pitchMotor2 =10;
```

```
const int pitchMotor3 =11;
```

```
// Пін для контролю крену двигуна (roll motor)
```

```
const int rollMotor1 =3;
```

```
const int rollMotor2 =5;
```

```
const int rollMotor3 =6;
```

```
// Змінна, щоб ми могли рухати двигун у потрібному напрямку
```

```
int increment = 0;
```

```
// Контроль швидкості оновлення двигуна
```

```
const int motorDelay = 7; // together with pot controls the RPM
```

```
long lastMotorDelayTime = 0;
```

```
// Змінна для ініціалізації орієнтації осей
```

```
const int pitchOrient = 25;
```

```
const int rollOrient = -20;
```

```
const boolean pitch = true;
```

```
const boolean roll = false;
```

```
const int pwmSin[] = {127, 135, 144, 152, 160, 168, 176, 183, 190, 198, 204, 211,  
217,
```

```
222, 228, 233, 237, 241, 244, 247, 250, 252, 253, 254, 254, 254,
```

```

    253, 252, 250, 247, 244, 241, 237, 233, 228, 222, 217, 211, 204,
    198, 190, 183, 176, 168, 160, 152, 144, 135, 127, 119, 110, 102,
    94, 86, 78, 71, 64, 56, 50, 43, 37, 32, 26, 21, 17, 13, 10, 7,
    4, 2, 1, 0, 0, 0, 1, 2, 4, 7, 10, 13, 17, 21, 26, 32, 37, 43,
    50, 56, 64, 71, 78, 86, 94, 102, 110, 119
};
// масив значень працездатності ШІМ для 8-бітної функції таймера;

//Змінні pitch motor
int pitchStepA = 0;
int pitchStepB = 32;
int pitchStepC = 64;

// Змінні roll motor
int rollStepA = 0;
int rollStepB = 32;
int rollStepC = 64;

volatile bool mpuInterrupt = false;
// вказує, чи піднявся PIN переривання MPU
void dmpDataReady() {
    mpuInterrupt = true;
}

```

A.2. Початкові налаштування

```

void setup() {
    #if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_WIRE
        Wire.begin();
        TWBR = 24; // 400kHz I2C clock
    #elif I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_BUILTIN_FASTWIRE

```

```

    Fastwire::setup(400, true);
#endif

Serial.begin(115200);
while (!Serial);

// ініціалізація пристрою
Serial.println(F("Initializing I2C devices..."));
mpu.initialize();

// перевірка з'єднання
Serial.println(F("Testing device connections..."));
Serial.println(mpu.testConnection() ? F("MPU6050 connection successful") :
F("MPU6050 connection failed"));

// Очікування готовності
Serial.println(F("\nSend any character to begin DMP programming and demo:
"));
while (Serial.available() && Serial.read());
while (!Serial.available());
while (Serial.available() && Serial.read());

// завантаження та налаштування DMP
Serial.println(F("Initializing DMP..."));
devStatus = mpu.dmpInitialize();

// подати сюди свої власні компенсації гіроскопа, масштабуючи на
мінімальну чутливість
mpu.setXGyroOffset(220);
mpu.setYGyroOffset(76);

```

```

mpu.setZGyroOffset(-85);
mpu.setZAccelOffset(1788);

// перевірка працездатності (повертає 0, якщо так)
if (devStatus == 0) {
    // увімкніть DMP тепер, якщо перевірка повернула 0
    Serial.println(F("Enabling DMP..."));
    mpu.setDMPEnabled(true);

    // включити виявлення переривань
    Serial.println(F("Enabling interrupt detection (external interrupt 0)..."));
    attachInterrupt(0, dmpDataReady, RISING);
    mpu.IntStatus = mpu.getIntStatus();

    // встановити прапор DMP Ready, щоб основна функція main loop ()
    знала, що його можна використовувати
    Serial.println(F("DMP ready! Waiting for first interrupt..."));
    dmpReady = true;

    packetSize = mpu.dmpGetFIFOpacketSize();
} else {
    // ERROR!
    // 1 = початкове завантаження пам'яті не вдалося
    // 2 = DMP не вдалося оновити конфігурацію
    Serial.print(F("DMP Initialization failed (code "));
    Serial.print(devStatus);
    Serial.println(F(")"));
}

```

```

// Об'ява моторних пінів вихідними
pinMode(pitchMotor1, OUTPUT);
pinMode(pitchMotor2, OUTPUT);
pinMode(pitchMotor3, OUTPUT);
pinMode(rollMotor1, OUTPUT);
pinMode(rollMotor2, OUTPUT);
pinMode(rollMotor3, OUTPUT);
}

```

А.3. Основна програма

```

void loop() {
  if (!dmpReady) return;
  while (!mpuInterrupt && fifoCount < packetSize) {
    // Переміщення крокового мотора
    if((millis() - lastMotorDelayTime) > motorDelay) {
      move(pitchStepA, pitchStepB, pitchStepC,
          pitchMotor1, pitchMotor2, pitchMotor3, pitch);

      move(rollStepA, rollStepB, rollStepC,
          rollMotor1, rollMotor2, rollMotor3, roll);
    }

    if( mpuInterrupt ) {
      break;
    }
  }

  // скинути прапор переривання і отримати байт INT_STATUS

  mpuInterrupt = false;
  mpuIntStatus = mpu.getIntStatus();

```

```
// отримати постійний підрахунок FIFO
fifoCount = mpu.getFIFOCount();

// перевірка на переповнення (цього ніколи не повинно відбуватися)
if ((mpuIntStatus & 0x10) || fifoCount == 1024) {

    // скидання, щоб ми могли продовжувати з чистого листа
    mpu.resetFIFO();
    Serial.println(F("FIFO overflow!"));

// otherwise, check for DMP data ready interrupt (this should happen frequently)

} else if (mpuIntStatus & 0x02) {
    while (fifoCount < packetSize) fifoCount = mpu.getFIFOCount();
    mpu.getFIFOBytes(fifoBuffer, packetSize);
    fifoCount -= packetSize;

#ifdef OUTPUT_READABLE_QUATERNION
    // відображення значень quaternion у легкій матричній формі: w x y z
    mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
    Serial.print("quat\t");
    Serial.print(q.w);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(q.x);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(q.y);
    Serial.print("\t");
    Serial.println(q.z);
#endif
#endif
```

```
#ifndef OUTPUT_READABLE_EULER
// відображення кутів Ейлера в градусах
mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
mpu.dmpGetEuler(euler, &q);
Serial.print("euler\t");
Serial.print(euler[0] * 180/M_PI);
Serial.print("\t");
Serial.print(euler[1] * 180/M_PI);
Serial.print("\t");
Serial.println(euler[2] * 180/M_PI);
#endif
```

```
#ifndef OUTPUT_READABLE_YAWPITCHROLL
// відображення кутів Ейлера в градусах
mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
mpu.dmpGetYawPitchRoll(ypr, &q, &gravity);
Serial.print("ypr\t");
Serial.print(ypr[0] * 180/M_PI);
Serial.print("\t");
Serial.print(ypr[1] * 180/M_PI);
Serial.print("\t");
Serial.println(ypr[2] * 180/M_PI);
#endif
```

```
#ifndef OUTPUT_READABLE_REALACCEL
// відобразити прискорення, відрегульоване для зняття сили тяжіння
mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
mpu.dmpGetAccel(&aa, fifoBuffer);
mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
```

```
    mpu.dmpGetLinearAccel(&aaReal, &aa, &gravity);
    Serial.print("areal\t");
    Serial.print(aaReal.x);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(aaReal.y);
    Serial.print("\t");
    Serial.println(aaReal.z);
#endif

#ifdef OUTPUT_READABLE_WORLDACCEL
    mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
    mpu.dmpGetAccel(&aa, fifoBuffer);
    mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
    mpu.dmpGetLinearAccel(&aaReal, &aa, &gravity);
    mpu.dmpGetLinearAccelInWorld(&aaWorld, &aaReal, &q);
    Serial.print("aworld\t");
    Serial.print(aaWorld.x);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(aaWorld.y);
    Serial.print("\t");
    Serial.println(aaWorld.z);
#endif

#ifdef OUTPUT_TEAPOT
    teapotPacket[2] = fifoBuffer[0];
    teapotPacket[3] = fifoBuffer[1];
    teapotPacket[4] = fifoBuffer[4];
    teapotPacket[5] = fifoBuffer[5];
    teapotPacket[6] = fifoBuffer[8];
    teapotPacket[7] = fifoBuffer[9];
```



```

    teapotPacket[8] = fifoBuffer[12];
    teapotPacket[9] = fifoBuffer[13];
    Serial.write(teapotPacket, 14);
    teapotPacket[11]++;
#endif
}
}

```

A.4. Створення функції мотору

Ця функція керує рухом двигуна. Оновлення кожного з кроків вперед або назад залежно від орієнтації двигуна проти потрібного значення.

```

void move(int &currentStepA, int &currentStepB, int &currentStepC,
          int motorPin1, int motorPin2, int motorPin3, boolean axis) {

```

```

// час затримки минув, здвиг на один крок

```

```

if( axis == true ) {
    if ( (ypr[1] * 180/M_PI) <= pitchOrient ) {
        increment = -1;
    } else {
        increment = 1;
    }
} else if( axis == false) {
    if( (ypr[2] * 180/M_PI) <= rollOrient ) {
        increment = 1;
    } else {
        increment = -1;
    }
}
}

```

```

// Зберігає рухову орієнтацію в межах

```

```
currentStepA = currentStepA + increment;
if(currentStepA > 95) currentStepA = 0;
if(currentStepA < 0) currentStepA = 95;
currentStepB = currentStepB + increment;
if(currentStepB > 95) currentStepB = 0;
if(currentStepB < 0) currentStepB = 95;
currentStepC = currentStepC + increment;
if(currentStepC > 95) currentStepC = 0;
if(currentStepC < 0) currentStepC = 95;

// Оновлення орієнтації двигуна
analogWrite(motorPin1, pwmSin[currentStepA]);
analogWrite(motorPin2, pwmSin[currentStepB]);
analogWrite(motorPin3, pwmSin[currentStepC]);

lastMotorDelayTime = millis();
}
```