

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний аграрний університет
Кафедра загальнотехнічних дисциплін та охорони праці

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
МЕХАТРОНІКА І МОБІЛЬНА РОБОТЕХНІКА**

Галузь знань: 13 – «Механічна інженерія»

Спеціальність: 133 – «Галузеве машинобудування»

Освітній ступінь: Другий (магістерський)

Факультет: Інженерно-технологічний

Підготувала: к.т.н., доц. Солона Олена Василівна

Опис навчальної дисципліни

Найменування показників	Галузь знань, спеціальність, освітньо-професійна програма, рівень вищої освіти	Характеристика навчальної дисципліни	
		денна форма навчання	заочна форма навчання
Кількість кредитів – 5	13 Механічна інженерія	Обов'язкова	
Частин - 2	133 Галузеве машинобудування	Рік підготовки (курс):	
Загальна кількість годин – 150		2-й	2-й
		Семестр	
		2-й, 3-й	4-й
Тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних – 26 самостійної роботи студента - 124	ОПП Галузеве машинобудування	14 год.	12 год
		Практичні, семінарські	
	Другий (магістерський)	12 год.	8 год
		Самостійна робота	
		124 год.	130 год
		Індивідуальні завдання: год.	
Вид контролю: Іспит			

Лекція № 1

Інформаційна лекція

Кількість годин: 2 години

Тема: ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ ТА РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ У АПК УКРАЇНИ

Мета : Дослідити перспективи використання сучасних мехатронних систем та робототехніки, а також шляхи їх впровадження в агропромисловий комплекс України.

ПЛАН

1. Основні визначення та поняття.
2. Приклади застосування мехатронних та роботизованих систем в сільському господарстві.
3. Навчальні лабораторії з мехатроніки.

Рекомендована література:

1. Солона О.В. *Застосування сучасних мехатронних систем та роботизованих комплексів у АПК України*. Техніка, енергетика, транспорт АПК. Вінниця : ВНАУ, 2020. № 3 (110). С. 71-76.
2. Солона О.В., Купчук І.М. *Теорія механізмів і машин*, навч. посіб. Вінниця, ВНАУ 2019 р.
3. Павленко Т.П., Шавкун В.М., Козлова О.С., Лукашова Н.П. *Сучасні електромехатронні комплекси і системи*: навч. Посібник. Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 116 с.
4. Стаднік М. І. *Оптимізація функціональної структури системи автоматизації однорідних об'єктів*. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2016. № 3. С. 62–65.
5. Чубик Р.В., Горбатюк Р.М., Борзов І.Г. *Пристрій для автоматизації технологічного процесу віброобразивної обробки деталей*. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2016. №1. С. 74–80.

1. Основні визначення та поняття.

Сучасний термін «Мехатроніка», згідно з японських джерел, був введений фірмою Yaskawa Electric в 1969 році.

Мехатроніка – галузь науки і техніки, заснована на синергетичному об'єднанні вузлів точної механіки з електронними, електротехнічними і комп'ютерними компонентами, що забезпечують проектування і виробництво якісно нових модулів, систем, машин і систем з інтелектуальним керуванням їх функціональними рухами.

Oxford Illustrated Encyclopedia пропонує наступне визначення: «Мехатроніка – японський термін для опису технологій, що виникли на стику електротехніки, машинобудування і програмного забезпечення. Включає проектування, виробництво і дослідження функціонування машин, що діють відповідно заданих програмних алгоритмів. Програмою».

Пріоритетним напрямом розвитку науки та технологій на сучасному рівні

є розробка, створення та впровадження мехатронних систем нового покоління.



Якщо звернутися до першоджерел і підручників, то з'ясується, що *поштовхом до появи мехатроніки* слугувала невідповідність між можливостями новітніх механічних виконавчих пристроїв, можливостями комп'ютерів та інформаційних технологій і проблемами, які виникають при їх спільному використанні для вирішення різних практичних завдань.

Зв'язок мехатроніки з іншими предметами



Виявилось, що сформовані актуальні завдання і є технічними можливостями для їх вирішення, але питання створення надійних і недорогих систем зводило нанівець усі плани та терміни виходу на ринок з новими

технічними розробками.

У механотронних машинах здійснюється перенос і перетворення енергії та інформації за допомогою елементів механіки, електроніки, електротехніки, гідроаеромеханіки, які утворюють замкнену систему.

За їх допомогою енергія перетворюється в корисну роботу, а інформація – в ефективні рішення.

2. Прилади застосування мехатронних та роботизованих систем в сільському господарстві.

З розвитком механіки, численних її застосувань, електроніки і біотехнології багато що вже зроблено для істотного полегшення людської праці і збільшення її продуктивності.

З'явилися конвеєрні лінії, сучасні об'єктоорієнтовані сільськогосподарські машини із системами супутникової навігації.

Сільське господарство – це серйозний бізнес кожної країни, тому необхідно своєчасно здійснювати процес впровадження і використання мехатроніки і робототехніки в цій галузі. Сучасна машина поступово витісняє участь людей в певних сферах життя.

Машина здатна сама проводити діагностику, контролювати свій стан та контактувати з людьми. Саме створенням таких механізмів займаються мехатроніки.

Сільськогосподарські роботи призначені для автоматизації трудомістких і монотонних процесів у сільському господарстві.

Агропромисловий робот повинен бути оснащений штучним інтелектом і системою технічного зору, тому перевагу необхідно надавати приладам із автономним або автоматичним керуванням. У майбутньому роботи будуть використовуватися для виконання важкої, монотонної, шкідливої, небезпечної фізичної роботи та для реалізації більшості завдань – від посіву і підгодівлі до внесення хімікатів.

Однією з перспективних розробок, які перебувають на етапі досліджень і випробувань, є універсальний кіберпомічник від фірми-виробника роботів *Small Robot Company* та фахівців із Бристольського університету під назвою Jack. Jack має змінні модулі, може виконувати різні функції: орати землю, сіяти насіння на оптимальну глибину, збирати врожай, навіть траву підстригає. Програмна начинка цієї машини називається Wilma: це – штучний інтелект, який уже непогано орієнтується в землеробстві.

Вихід на ринок цього диво-робітника заплановано на 2021 р. й продаватимуть, і здаватимуть в оренду. Звичайно, що робот замінить певну кількість людей.

Автоматизовані трактори

Трактор Spirit від Autonomous Tractor Corporation - технологію названо eDrive, і вона працює як модернізована система для старих тракторів. Spirit координується за допомогою двох контролерів, що пересуваються полем, орієнтуючись на сигнали від передавачів на краях ділянки. Має 5,2-літровий дизельний двигун Isuzu, який і генерує електрику, а вона вже біжить до електромоторів, а ті, крутять колеса.

Трактор-безпілотник АгроБот від Avroga Robotics - машина має комп'ютер зі штучним інтелектом, може керуватися як самостійно, так і за допомогою оператора. Система пропонується для автоматизації передпосівного обробітку ґрунту, сівби, догляду за посівами, а також збирання врожаю та чищення території.

Agribot створений завдяки науковому тандему Agrirobo, Університету природних наук у Вроцлаві та Вроцлавського технологічного університету. Це – автономна гусенична машина, яка виконує різні роботи на фермах та в саду: самостійно рухається між рослинами, але за стандартизованою шириною, може виконувати дві операції за прохід, має встановлені косарки, секатори, розпилувачі та спецпристрої, що дають змогу збирати фрукти.

Безконтактний трактор Case IH на базі трактора Magnum Case IH (6) - робот дає змогу здійснювати дистанційний контроль за запрограмованими операціями. Просунута бортова система складає карту ефективних маршрутів і самостійно обчислює ширину причіпного обладнання. Можливості : від розпилення та обробітку ґрунту до збирання врожаю. Тут втілено найсучасніші напрацювання в телеметрії, передачі даних і навігації.

DOT (a) - вельми перспективний, спритний такий безпілотний (отже, самостійний) тракторчина, який водночас позиціонується і як автономна польова платформа

Системи автоматичного управління використовуються, тією чи іншою мірою, в усіх основних технологічних процесах виробництва продукції сільського господарства і на різних етапах їх виконання.

Мета створення таких комплексів – домогтися поєднання високої продуктивності і одночасно гнучкості техніко-технологічного середовища за рахунок можливості її реконфігурації, що дозволить забезпечити конкурентоспроможність і високу якість продукції, що випускається на світових ринках.

Сучасні підприємства, що приступають до розробки і випуску мехатронних виробів, повинні вирішити в цьому плані такі основні завдання:

- ✓ Структурна інтеграція підрозділів механічного, електронного та інформаційного профілів (які, як правило функціонували автономно і роз'єднано) в єдині проєктні і виробничі колективи;
- ✓ Підготовка «мехатронно-орієнтованих» інженерів і менеджерів, здатних до системної інтеграції і керівництва роботою вузькопрофільних фахівців різної кваліфікації;
- ✓ Інтеграція інформаційних технологій із різних науково-технічних галузей (механіка, електроніка, комп'ютерне управління); у єдиний інструментарій для комп'ютерної підтримки мехатронних завдань; стандартизація і уніфікація всіх використовуваних елементів і процесів при проєктуванні і виробництві мехатронних систем.

Розвиток сільськогосподарської техніки і технічного обладнання у цьому напрямку всебічно сприятиме забезпеченню продовольчої безпеки країни, створенню інтегрованих систем інтенсифікації продуктивності в усіх

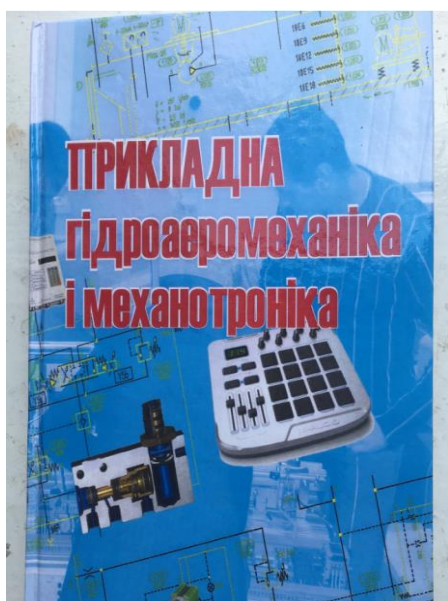
сферах діяльності сільського господарства і переробки його продукції.

Таким чином, створення та впровадження гнучких мехатронних систем та роботизованих комплексів у сучасне сільськогосподарське виробництво є пріоритетним напрямком науково-технічного прогресу.

3. Навчальні лабораторії з мехатроніки.



На сьогоднішній день у практичному курсі з «Теорії механізмів і машин» введено нову практичну роботу по мехатроніці. В подальшому планується відкриття лабораторії з мехатроніки у Вінницькому національному аграрному університеті.



Стрімкий розвиток мехатроніки як нового науково-технічного напрямку обумовлений швидко зростаючим інтересом і високою активністю фахівців у науково-дослідній, освітній і виробничій сферах.

На цей час розвиток виробничої та побутової техносфери й подальшого впровадження систем мехатронної автоматизації та роботизації у різні фізико-технічні процеси всіх сфер діяльності суспільства сприяють створенню інтелектуальних фізико-технічних виробів, систем і процесів, що володіють якісно новими функціями, властивостями та можливостями.

Можливості економіки й машинобудування дозволяють сьогодні масштабніше впроваджувати в АПК автоматизацію і роботизацію.

Таким чином, створення та впровадження гнучких мехатронних систем

та роботизованих комплексів у сучасне сільськогосподарське виробництво є пріоритетним напрямком науково-технічного прогресу. Розвиток сільськогосподарської техніки і технічного обладнання у цьому напрямку всебічно сприятиме забезпеченню продовольчої безпеки країни, створенню інтегрованих систем інтенсифікації продуктивності в усіх сферах діяльності сільського господарства і переробки його продукції. Проведений аналіз сучасних тенденцій об'єктивно і переконливо свідчать про швидко зростаючий інтерес до мехатроніки і високої активності фахівців в науково-дослідній, освітній і виробничій сферах, що визначає перспективу розвитку мехатроніки у ХХІ столітті як одного з ключових напрямів сучасної науки і техніки.

ПИТАННЯ ДО САМОКОНТРОЛЮ

- 1.Що таке мехатроніка?
- 2.Що стало поштовхом появи мехатроніки?
- 3.Зв'язок мехатроніки з іншими предметами.
- 4.Призначення сільськогосподарських роботів.
- 5.Наведіть приклади автоматизованих тракторів.
- 6.Мета створення систем автоматичного управління?

Лекція №
Інформаційна лекція
Кількість годин: 2

Тема: Датчики

Мета: Ознайомитись із основними визначеннями та поняттями пристроїв мехатронних систем.

ПЛАН

1. Датчики. Класифікація датчиків
2. Основні характеристики датчиків
3. Види датчиків та принципи їх роботи
4. Аналогова та цифрова (дискретна) форма представлення даних
5. „Інтелектуальні” датчики

Рекомендована література:

1. Gunko I., Hraniak V., Yaropud V., Kupchuk I., Rutkevych V. 2021. Optical sensor of harmful air impurity concentration. *Przeгляд Elektrotechniczny*. Vol. 97, №7. P. 76-79.
2. Hrushetskyi S., Yaropud V., Kupchuk I., Semenyshena R. The heap parts movement on the shareboard surface of the potato harvesting machine. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*. 2021. Vol. 14 (63), № 1. P. 127-140.
3. Kovbasa V., Solona O., Deikun V., Kupchuk I. Functions derivation of stresses in the soil and resistance forces to the motion of a plough share for cavity creation. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2021. 83(3). P. 305–318.
4. Kupchuk I., Tokarchuk O., Hontar V., Zamrii M. The kinematic analysis of a vibration crusher for feed grain. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1 (100). С. 32-38.
5. Kuznietsova I., Bandura V., Paziuk V., Tokarchuk O., Kupchuk I. Application of the differential scanning calorimetry method in the study of the tomato fruits drying process. *Agraarteadus*. 2020. Vol. 31, №2. P. 173–180.
6. Sisinni E., Saifullah A., Han S., Jennehag U., Gidlund M. Industrial Internet of Things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Trans. Ind. Informat.*, 2018. vol. 14, №. 11, P. 4724_4734.
7. Solona O., Derevenko I., Kupchuk I. Determination of plasticity for pre-deformed billet. *Solid State Phenomena*. 2019. Vol. 291. P. 110–120.
8. Solona O., Kovbasa V., Kupchuk I. Analytical study of soil strain rate with a ploughshare for uncovering slit. *Agraarteadus*. 2020. Vol. 31, №2. P. 212–218.
9. Solona O.V., Kovbasa V.P., Kupchuk I.M. The contact interaction dynamics of the working tool of the mole plowshare with the soil during forming process a channel for an anti-filtration screen. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. №2 (97). С. 81-89.

10. Yanovych V., Kupchuk. I. Development of movement mathematical model for executive bodies of gyroscope-type mill. *SWorld journal: Technical sciences*. 2017. Issue 13. С. 174-184.

11. Гончарук І. В., Купчук І. М., Солоня О. В., Мельник О. С. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Smart IR-Control Robotic Chassis v 1.0» («Robot Smart Control v 1.0») : Свідоцтво № 103284 від 18.03.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 64, 2021.

12. Граняк В.Ф., Купчук І.М., Гонтар В.Г. Метод та засіб прямого автоматизованого вимірювального контролю ізоляції обмоток електричних машин. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. №2 (109). С. 129-137.

13. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Зубар І. В., Онищук Ю. В. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Fuel consumption calculation v.1.0» : Свідоцтво № 103401 від 24.03.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 64, 2021.

14. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Твердохліб І. В., Телекало Н. В., Колесник Т.В., Дідик А. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Optimization of agricultural transportation v. 1.0» («Agro-transportation optimization v. 1.0») : Свідоцтво №107370 від 16.08.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 66, 2021.

15. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Холодюк О. В., Левчук К. І., Гонтарук Я. В., Дідик А. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Harvesting Cereals Optimization v. 1.1.5» («Harvesting cereals v. 1.1.5») : Свідоцтво № 102287 від 03.02.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 63, 2021.(27950)

16. Купчук І.М. Компромісна оптимізація режимних параметрів процесу подрібнення зернової сировини при виробництві етилового спирту. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. №4 (87). С. 91-100.

17. Купчук І.М., Браніцький Ю.Ю. Розробка програмного алгоритму розрахунку кінематичних параметрів робочих органів віяльно-калібрувальної машини. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. №2(97). С. 80-87.

1. Датчики. Класифікація датчиків

Датчик (сенсор) – пристрій, який призначений для перетворення інформації, що поступає на його вхід у вигляді деякої фізичної величини, в іншу функціональну величину, для подальшого використання в елементах мехатронних систем.

За точністю датчики повинні відповідати класам: 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,5;

2,5; 4,0. Датчики класифікуються за різними ознаками, але перед усім за видом величини, що вимірюється, та принципом дії (табл. 1.1) [13].

Таблиця 1.1. Типи датчиків та величини, які вони можуть вимірювати

Величина, що вимірюється	Тип датчика											
	потенціометр.	тензометричн.	індуктивні	терморезисторні	ємкісні	фоторезисторні	електронні	індукційні	п'єзоелектричні	термоелектричні	датчики Холла	фотоелектричні
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Переміщення	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+
Рівень	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Швидкість	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	+
Прискорення	-	+	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-
Сила	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+	-
Тиск	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
Момент	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	+
Вологість	-	-	-	+	+	-	-	-	-	+	-	-
Температура	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+	-	+
Витрата речовини	+	+	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-
Вібрація	+	+	+	-	+	-	-	+	+	-	+	-

+ застосовується; - не застосовується.

Датчики перетворюють неелектричну величину в електричну або електричну в електричну, або неелектричну в неелектричну. Датчики за принципом дії поділяються на:

- *параметричні* (реагують на фізичний параметр) – до них відносять: контактні, реостатні, потенціометричні, тензодатчики, терморезистори, ємкісні, індуктивні, електронні, фоторезисторні та ін. Вимагають застосування додаткового джерела живлення;
- *генераторні* (виробляють фізичний сигнал) - до них відносять: термоелектричні (термопари), індукційні, п'єзоелектричні, вентильні

фотоелементи та ін. Їм не потрібне додаткове джерело живлення.

2. Основні характеристики датчиків.

До основних характеристик датчиків належать перераховані нижче.

1. Статична характеристика – залежність вихідної величини від вхідної $y=f(x)$.
2. Чутливість (коефіцієнт перетворення) – відношення вихідної величини до вхідної величини $k = y/x$.
3. Межа чутливості – мінімальна величина на вході датчика, що викликає зміну його вихідної величини (залежить від внутрішніх та зовнішніх факторів – тертя, люфту, гістерезисну, перешкод).
4. Похибка: абсолютна – різниця між дійсним значенням вихідної величини та розрахунковим значенням ($\Delta y = y' - y$); відносна - $\delta = \Delta y \cdot 100\%/y$.
5. Динамічна характеристика це залежність вихідної величини від вхідної в перехідний період.
6. Вихідна потужність.
7. Вихідний опір.

3. Види датчиків та принципи їх роботи

Електроконтактні датчики

Вони будуються на основі перетворювачів, які перетворюють механічне переміщення в замкнутий або розімкнутий стан контактів, які керують електричним колом (рис. 1.1). Існує велика кількість конструкцій цих датчиків різного призначення. Досить широке застосування знайшов двоконтактний датчик [14].

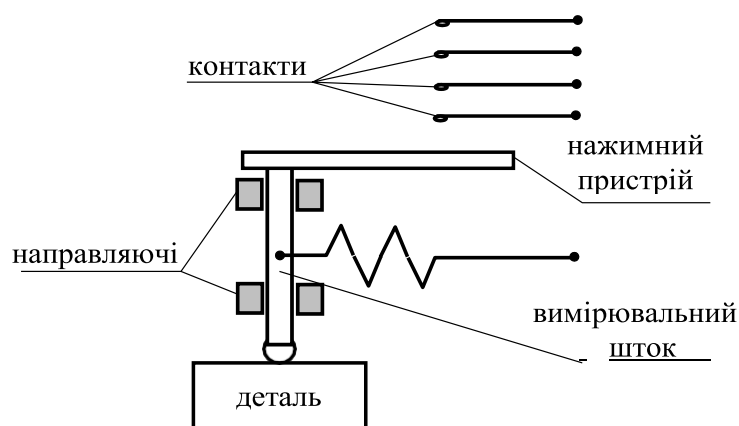




Рис. 1.1. Принцип дії та схема вмикання електроконтактного датчика

Потенціометричні датчики

Використовуються для перетворення лінійного (x) або кутового (φ) переміщення (вхідна величина) в електричний сигнал постійного або змінного струму (вихідна величина) (рис. 3.2). Конструктивно складаються з каркасу, обмотки та движка.

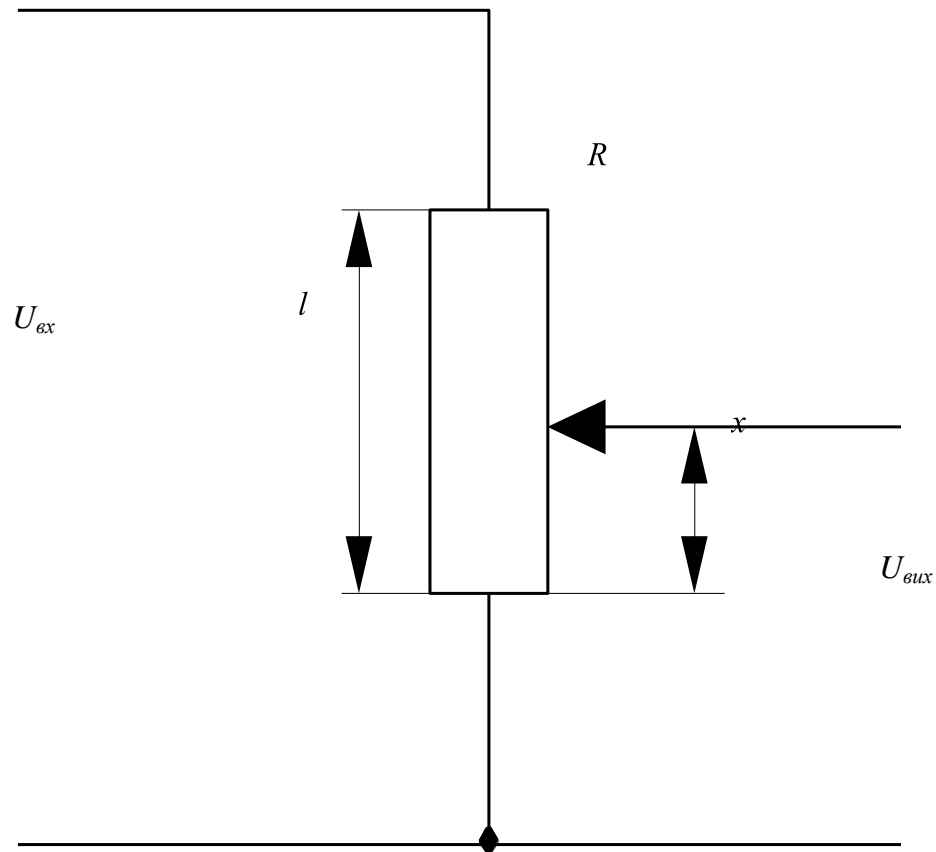


Рис. 1.2. Принцип дії та схема вмикання потенціометричного датчика

Вихідний сигнал датчика визначається такою формулою:

$$U_{\text{в\ddot{e}д}} = U_{\text{в\ddot{e}д}} \frac{R_x}{R_l} = U_{\text{в\ddot{e}д}} \frac{x}{l} = kx, \quad (1.1)$$

де $U_{\text{в\ddot{e}д}}$ - вхідна напруга (напруга живлення) датчика, R_x - вихідний опір датчика при положенні движка x , R_l - вхідний опір датчика, k - постійний коефіцієнт.

Тензометричні датчики

Використовують для вимірювання переміщень – деформації деталей. Принцип дії базується на явищі тензоефекту – зміни величини активного опору провідникового або напівпровідникового матеріалу під дією прикладених до них механічних напружень (рис. 1.3).

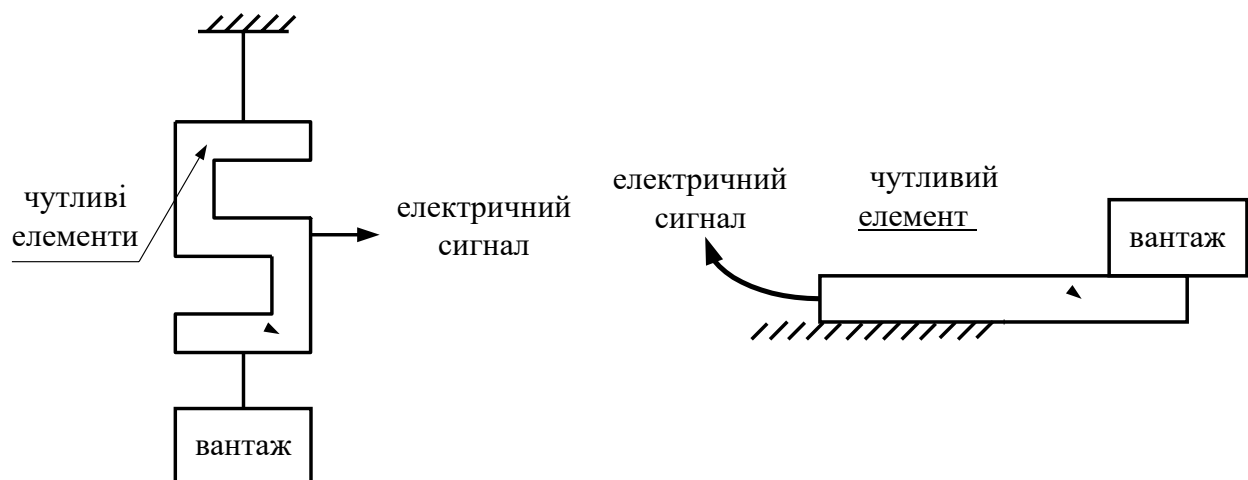


Рис. 1.3. Принцип дії тензометричного датчика

Основна їх характеристика – коефіцієнт тензочутливості – відношення зміни опору до зміни деформації:

$$k = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{l}{\Delta l}, \quad (1.2)$$

де Δl та ΔR - абсолютна деформація датчика (лінійна) та викликана нею абсолютна зміна його вихідного опору, R - вхідний опір датчика, l - розмір датчика у недеформованому стані. Мостова схема вмикання тензометричного датчика приведена на рис. 1.4 [15].

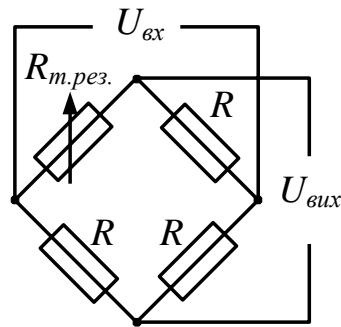


Рис. 1.4. Схема вмикання тензометричного датчика

П'єзоелектричні датчики

Дія заснована на явищі п'єзоефекту, суть якого полягає в тому, що під дією прикладених зусиль на гранях деяких кристалів (кварц, титан, турмалін) з'являється електричний заряд (прямий п'єзоефект) (рис. 1.5). При внесенні п'єзоелементу в електричне поле він деформується (обернений п'єзоефект).

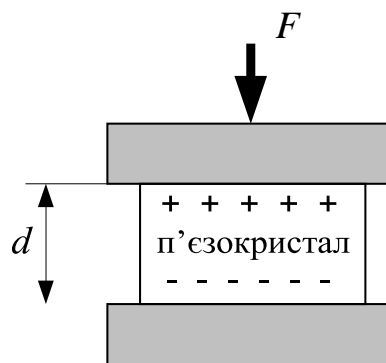


Рис. 1.5. Принцип дії п'єзоелектричного датчика

Вихідний сигнал датчика:

$$U = \frac{Qd}{\epsilon f}, \quad (1.3)$$

де Q_x – кількість зарядів на п'єзовісі (вісь вздовж якої діє сила); f - площа грані кристала перпендикулярної до п'єзовісі; ϵ - діелектрична проникливість матеріалу кристала; d – товщина пластини кристала.

Якщо сила F діє постійно, то проходить стікання зарядів і вихідна напруга змінюється. Тому п'єзоелементи застосовуються в основному для вимірювання зусиль, що змінюються з частотою $> 15\text{кГц}$. П'єзоелементи використовуються з підсилювачами.

Датчик Холла

Такий датчик застосовується для вимірювання напруженості магнітного поля. Практично ж промислові датчики такого роду реалізують на базі напівпровідників. Принцип дії: якщо пластинка напівпровідника помістити у магнітне поле з напруженістю H , а по пластині тече струм величиною I при цьому лінії напруженості електричного поля знаходяться під прямим кутом з напрямком протікання струму, то на бокових гранях цієї пластини виникає напруга (рис. 1.6).

Вихідний сигнал датчика:

$$U_{\text{а\text{е}д}} = K_H I H, \quad (1.4)$$

де K_H – постійна величина, яка залежить від матеріалу пластини; I – сила струму, який протікає по пластині; H – напруженість магнітного поля.

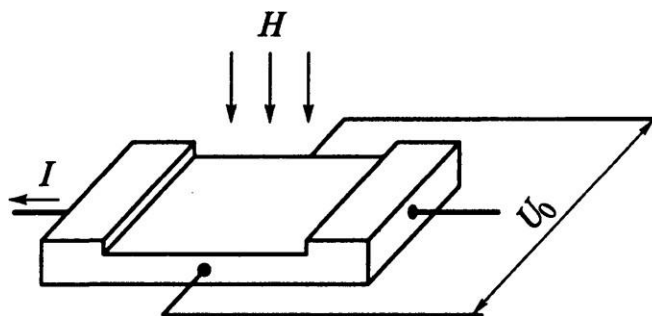


Рис. 1.6. Принцип дії датчика Холла

За допомогою датчиків Холла можна вимірювати кутові і лінійні переміщення (на зірочку ставиться магніт), електричні струми тощо.

Ємнісні датчики

Зміна входної величини викликає зміну ємності конденсатора. Ємність плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon F}{d}, \quad (1.5)$$

де ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму (повітря); ϵ – діелектрична проникність середовища між пластинами; F – площа пластин; d – величина зазору. Варіанти виконання ємнісних датчиків показані на рис. 1.7.

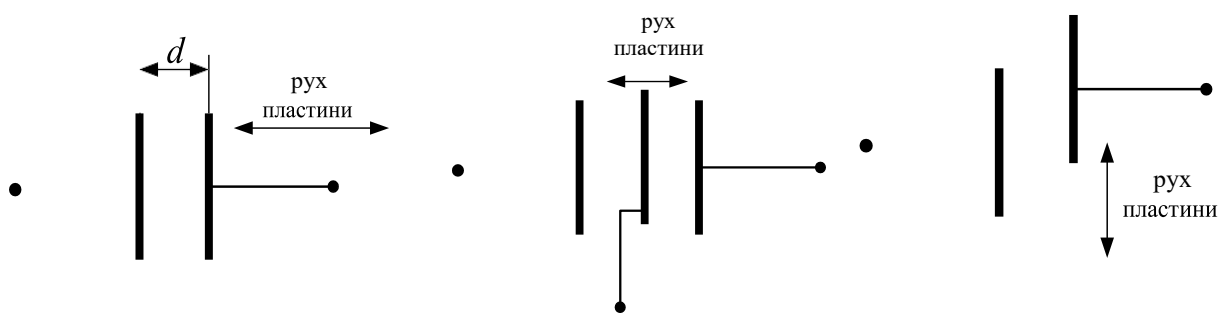


Рис. 1.7. Варіанти виконання ємнісних датчиків

Часто такі типи датчиків використовують для вимірювання прискорення (акселерометри), вібрації, нахилу основи, на якій вони знаходяться.

Ємнісні датчики також використовуються й для виміру вологості. У цьому випадку датчик являє собою конденсатор, що складається з діелектричної плівки, на обидві сторони якої шляхом напилювання наносяться електроди із золота. Ємність такого датчика виявляється приблизно прямо пропорційною вологості навколишнього середовища.

Оптичні датчики

Оптоелектроніка сполучає в собі оптичні й електронні методи вимірів. На основі оптоелектронних перетворювачів створені датчики тиску, сили, переміщення, швидкості, акустичних параметрів, напруженості електричного й магнітного полів. Для параметричних оптичних датчиків необхідно використовувати джерело світлового випромінювання. Найпоширенішими джерелами світлового випромінювання, які використовуються в мехатронних системах, є світлодіоди.

Приймачі випромінювання можна поділити на дві групи: інтегральні й селективні. До *інтегрального* відносяться приймачі випромінювання, що базуються на перетворенні енергії випромінювання в сигнал незалежно від довжини хвилі цього випромінювання. До *селективного* відносяться фотоелектричні перетворювачі, що реагують на певну довжину хвилі випромінювання.

Фоторезистори являють собою напівпровідникову пластинку з контактами, що при освітленні зменшує свій опір. Фотодіоди й фототранзистори відносяться до напівпровідникових приймачів випромінювання. Фототранзистор являє собою той же фотодіод, який має підсилювач струму.

Принцип роботи оптичного датчика та його вихідний сигнал показано на рис. 1.8.

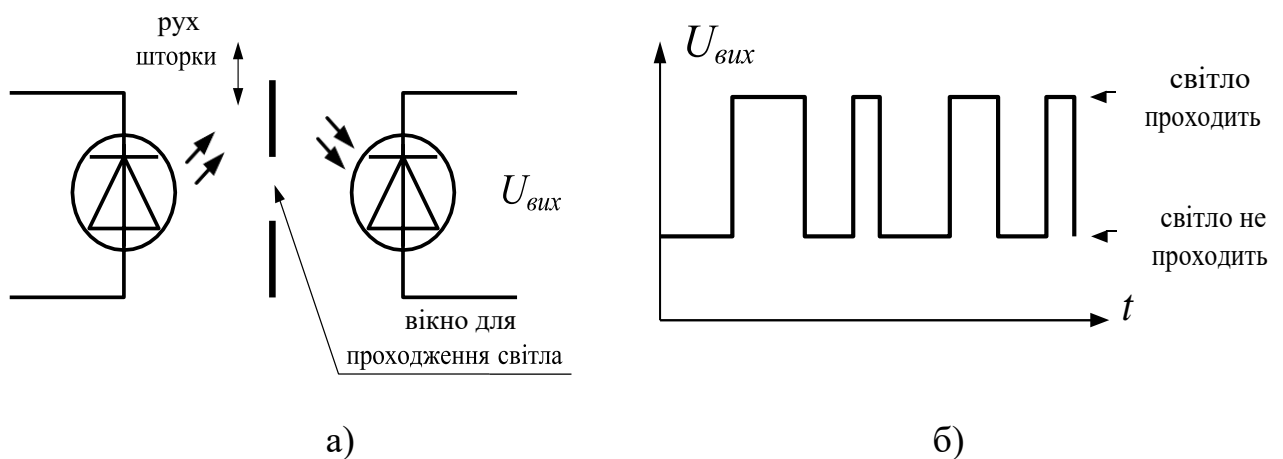


Рис. 1.8. Принцип дії оптичного датчика (а) та його вихідний сигнал (б)

Одним з найпоширеніших пристроїв у мехатронних системах є енкодер – сенсор, який призначений для вимірювання кутових та лінійних переміщень, швидкостей та прискорень. Принцип роботи оптичного енкодера заснований на перетинанні променя оптопари (світлодіод та фототранзистор) з розміченим диском, установленим на валу (рис. 1.9). Залежно від частоти розмітки диска визначається точність виміру переміщення.

Існує кілька різновидів енкодерів, найбільш використовуваних з яких інкрементний (імпульсний), де відбувається послідовний рахунок міток переміщення й абсолютний, коли для кожного положення вала існує індивідуальний бінарний (двійковий) код. Інкрементний енкодер призначений для формування імпульсів, які зчитуються вторинним пристроєм, що дозволяє визначити напрямок руху або кутового зсуву механізму. Звичайно інкрементні енкодери виготовляють із трьома імпульсними виходами. Два з них визначають швидкість і напрямок руху (канали А і В). Послідовності імпульсів цих виходів зсунуті один відносно одного, що реалізовано просторовим зміщенням оптичного диска й розташуванням оптичних пар „випромінювач-приймач”. Третя послідовність імпульсів служить для визначення позиції (канал Z). Цей канал формує імпульс нульової оцінки на один оберт, що дозволяє корегувати помилки в межах кожного оберту. Підрахунком імпульсів за один оберт від нульової точки можна визначати поточне абсолютне положення вала енкодера.

На відміну від інкрементного енкодера, лічильник імпульсів не потрібний, тому що кут повороту завжди відомий. Абсолютний енкодер формує сигнал як під час обертання, так й у режимі спокою. Диск абсолютного енкодера відрізняється від диска покрокового енкодера, тому що має кілька концентричних доріжок. Кожною доріжкою формується унікальний двійковий код для конкретної позиції вала (сектора) (рис. 1.9).

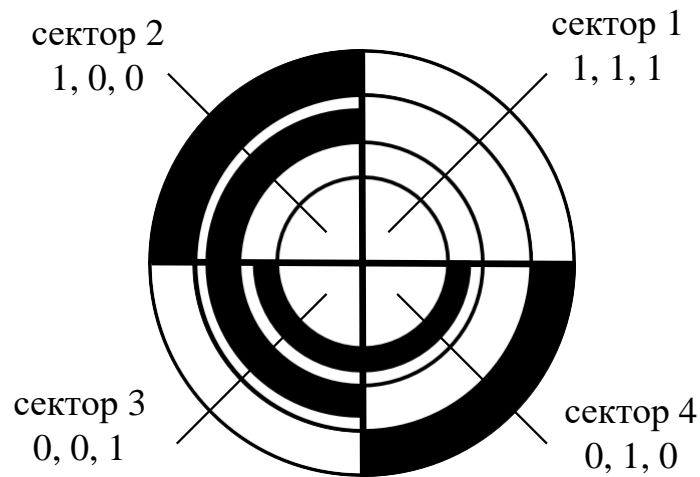


Рис. 1.9. Диск абсолютного енкодера

Абсолютний енкодер не втрачає значення сигналу при втраті живлення й не вимагає повернення в початкову позицію. Сигнал абсолютного енкодера не може бути пошкоджений перешкодами і для нього не потрібна точна установка вала. Крім того, навіть якщо кодований сигнал не може бути прочитаний енкодером якщо, наприклад, вал обертається занадто швидко, правильний кут обертання буде зареєстрований, коли швидкість обертання зменшиться. Абсолютний енкодер стійкий до вібрацій.

Електромагнітні датчики

Принцип дії заснований на зміні індуктивності (L) магнітної системи під дією вхідної величини (переміщення, деформація, рівень, тиск). За видом перетворення електромагнітні датчики поділяються на: індуктивні; трансформаторні; магнітопружні; індукційні.

Індуктивні датчики – перетворюють зміну керованої величини в зміну індуктивного опору обмотки. Вихідний сигнал датчика:

$$U_{\dot{a}\ddot{o}} \approx K_{\delta} \delta, \quad (1.6)$$

де $U_{\dot{a}\ddot{o}}$ - вхідна напруга; K_{δ} - постійний коефіцієнт; $U_{\dot{a}\ddot{o}}$ - вихідна напруга.

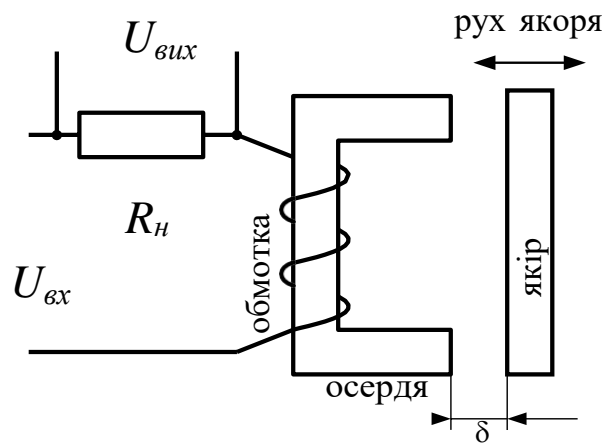


Рис. 1.10. Принцип дії індуктивного датчика

Датчики з аналоговим виходом широко застосовуються в області виміру й контролю: вимір відстані переміщення металевих предметів; контроль товщини, ширини листового або стрічкового матеріалу; вимір кута повороту кулачків і шестерень; контроль і вимір биття валів обертання; у системах контролю й регулювання натягу транспортних стрічок, тросів; селективний відбір виробів різних розмірів і з різних металів (рис. 1.11).

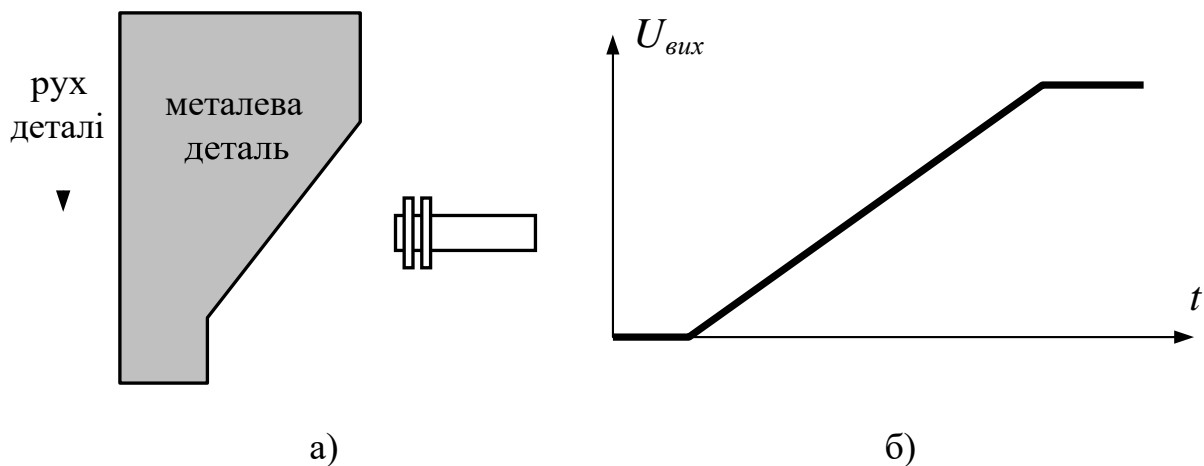


Рис. 1.11. Робота індуктивного датчика (а) та сигнал із його виходу (б)

Трансформаторні датчики

В основі роботи лежить залежність зміни взаємної індуктивності обмоток (первинної та вторинної) при переміщенні однієї відносно іншої або при переміщенні якоря датчика (рис. 1.12).

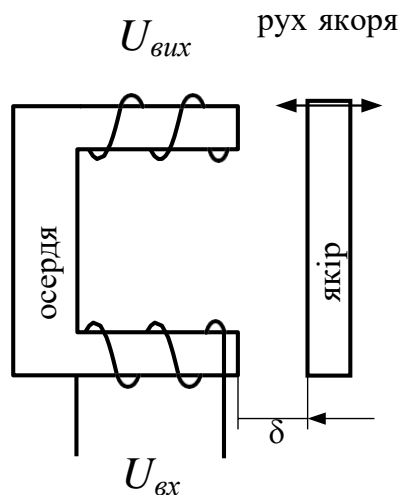


Рис. 1.12. Трансформаторний датчик

Для виміру кутових переміщень виконують у вигляді електромашин – обертові трансформатори (сельсини – у яких первинна обмотка розташовується на статорі, а вторинна – на роторі).

Магнітопружні датчики

Використовують зміну магнітної проникливості феромагнітних тіл, які підлягають дії сил або температур. Чутливість $k = \frac{\Delta\mu}{\mu} \frac{\mu}{\Delta l / l}$ (зміна магнітної проникливості від зміни лінійних розмірів). Недоліком даних датчиків є залежність властивостей від температури та не лінійність характеристики магнітної проникливості від прикладеної сили.

Індукційні датчики

Їх дія заснована на явищі електромагнітної індукції – наведення е.р.с. в електроконтурі, в якому змінюється магнітний потік. До них відносять тахогенератори постійного та змінного струму.

Ультразвукові датчики

Ультразвукові датчики можна встановлювати горизонтально, вертикально або під кутом до об'єкта. Принцип дії заснований на передачі ультразвукових імпульсів і визначенні часу їх відбивання і надходження назад до датчика. У якості чутливого елементу датчика виступає

п'єзоелектричний кристал. Він же генерує ультразвук. Час між випромінюванням ультразвукового імпульсу та прийманням відбитого імпульсу є основою для розрахунку відстані до об'єкта (рис. 1.13). Повний контроль за процесом виміру здійснюється з мікропроцесором.

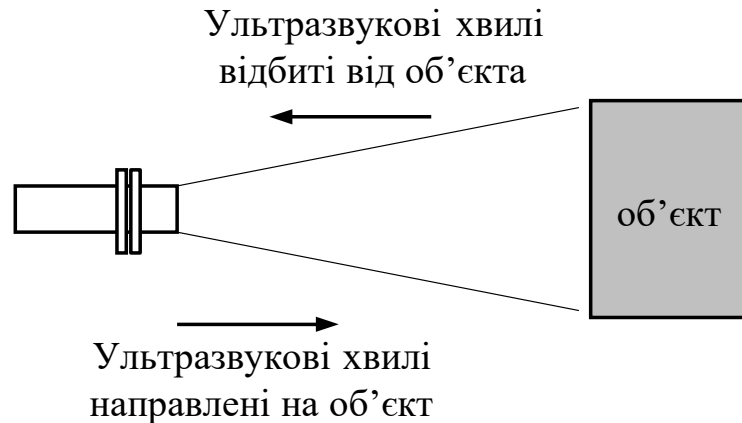


Рис. 1.13. Принцип дії ультразвукового датчика

Датчики температури

Бувають з механічним вихідним сигналом (*тепломеханічні*) та з електричним вихідним сигналом (*теплоелектричні*).

Тепломеханічні (термобіметалеві). Використовуються як елементи мехатронних систем, які перетворюють зміну фактичного значення температури, що вимірюється, в переміщення. Термобіметалевий датчик являє собою вузьку пластину з біметалу (зварені між собою дві пластинки металу з різними коефіцієнтами розширення), один кінець якої закріплений нерухомо. Термобіметалеві датчики використовуються для вимірювання температури в діапазоні $-60 +450$ °C. Похибка 1...5%.

Теплоелектричні датчики (металеві та напівпровідникові терморезистори, термопари, напівпровідникові діоди та тріоди). Перетворюють фактичне значення температури в зміну електричного опору, напруги, струму.

Металеві терморезистори виготовляють з чистих металів (платина, мідь, нікель, залізо, вольфрам). Похибка вимірювання металевих терморезисторів складає менше 0,5...1%.

Напівпровідникові терморезистори. Діапазон температур 203...523 °К
Чутливість – в 5...30 раз вища металевих терморезисторів. Недолік – нелінійна характеристика, погана взаємозамінність (розкид номінальних параметрів).

Термопару – спай з двох різнорідних металів або напівпровідників. При $t_1 > t_2$ виникає термоелектрорушійна сила. Діапазон температур 373...3000 °К. Чутливість 0,01...0,07 мВ на 1 °С. Похибка до 5%. Недоліки: не терплять проміжних з'єднань (необхідно застосовувати схеми термокомпенсації), мають невисоку чутливість.

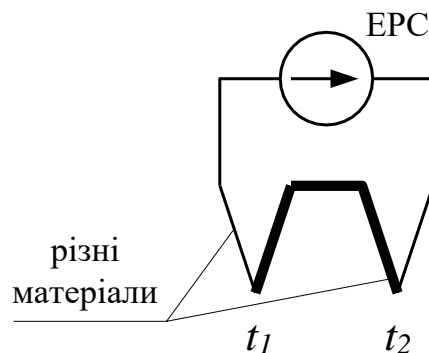


Рис. 1.14. Принцип дії термопару

Датчики вологості

Гігрозистори (гігрисистори) – резистори виготовлені з матеріалів (хлорлітій, калій-натрій, напівпровідників), опір яких різко падає при збільшенні вологості. При підвищенні вологості з 35...40% до 95...100% опір зменшується від 10^7 до 10^2 Ом. Похибка не перевищує 2%.

4. Аналогова та цифрова (дискретна) форма представлення даних

Зупинимось докладно на двох загальноприйнятих в сучасній вимірювальній техніці формах подання вимірюваних величин: аналоговій та цифровій [14].

Термін „аналоговий” схожий за змістом терміну „подібний”. Він означає, що одна фізична величина (наприклад, вимірювана) виражається за

допомогою іншої величини. Якщо перша величина приймає безперервний ряд значень у якомусь діапазоні, то при аналоговому представленні даних друга величина приймає безперервний ряд значень у відповідному діапазоні. Це означає, що вихідна величина є моделлю, аналогом вхідної величини.

Поряд з аналоговою застосовується й інша форма подання вимірювальної інформації – дискретна. Тут вимірюваний сигнал може приймати лише деяке кінцеве число значень, причому ці значення можуть встановлюватись як у будь-який момент часу (неперервний час), так і у певні моменти часу (дискретний час). Отже можна говорити про дискретизацію часу та дискретизацію величини сигналу (рис. 1.15).

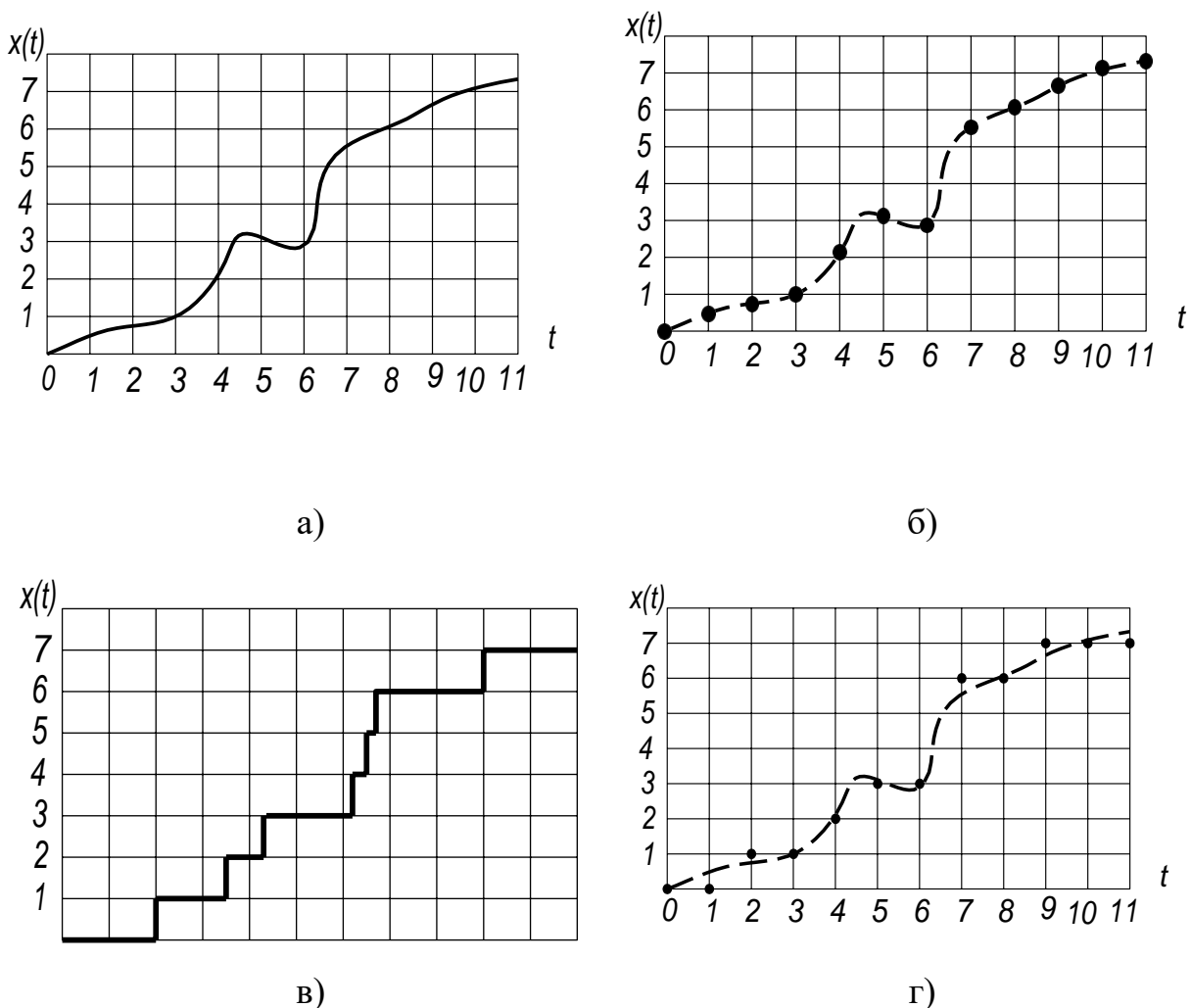


Рис. 1.15. Форми сигналів: а) аналоговий сигнал $x(t)$ в функції неперервного часу t ; б) аналоговий сигнал $x(t)$ в функції дискретного часу t ; в) дискретний сигнал $x(t)$ в функції неперервного часу t ; г) дискретний сигнал $x(t)$ в функції дискретного часу t

Для перетворення аналогової форми сигналу у цифрову використовують аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП), навпаки: з цифрової у аналогову цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП).

5. „Інтелектуальні” датчики

У цей час продається безліч датчиків з вбудованим мікропроцесором. Такі датчики прийнято називати „інтелектуальними” [16]. Обробка вимірів безпосередньо в самому датчику дозволяє поліпшити його характеристики. Загальна схема таких датчиків показана на рис. 1.16.

Виходи інтелектуальних датчиків можуть бути аналоговими й цифровими. Аналогові системи використовують рівні сили струму 4-20 мА, коли нульове значення сигналу передається рівнем 4 мА, щоб можна було відрізнити обрив кабелю від нульового значення сигналу. Стандартний робочий діапазон: 1-5 В або, для кращої заводостійкості на довгих відстанях: 4-20 мА. Надалі масштаби впровадження мікропроцесорної обробки сигналів в датчиках будуть зростати внаслідок високої ефективності й конкурентоздатності таких систем.

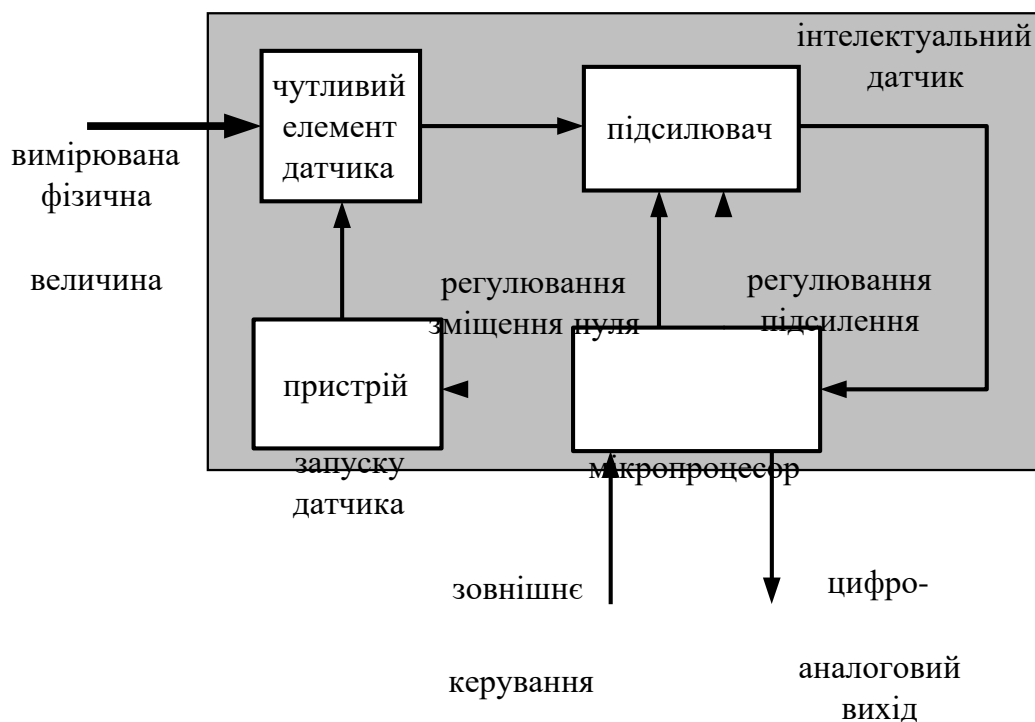


Рис. 1.16. Архітектура „інтелектуальних” датчиків

Інтелектуальні датчики, звичайно, мають велику кількість варіантів виконання, розрахованих на різні властивості вимірюваної величини та навколишнього середовища:

- ▶ варіанти корпусу сенсора під різні тиски, температури, впливи й перешкоди;
- ▶ варіанти матеріалів арматури, що контактують із вимірюваним середовищем, під звичайне, хімічно агресивне, абразивне й інші середовища;
- ▶ варіанти виконання сенсора під звичайне, гігієнічне, вибухонебезпечне середовище;
- ▶ варіанти з'єднання сенсора з конструкцією об'єкта виміру (фланцеве, різьбове тощо).
- ▶ варіанти живлення приладу за наявності блоку живлення в ньому або живленню його від стороннього джерела через польову мережу;
- ▶ варіанти вихідних сигналів перетворювача по числу, по параметрах, по комунікаційних можливостях зв'язку з різними польовими мережами.

Дуже важливо, що більшість виробників комплектують датчики з комбінації різних варіантів сенсорів одного методу виміру з різними варіантами перетворювачів (електронного обладнання інтелектуального датчика), розрахованих на роботу з даною серією сенсорів. Завдяки цьому вдається найбільш точно й повно задовольняти окремим конкретним вимогам до приладів. Слід мати на увазі, що подібна технічно раціональна гнучкість побудови датчиків, у той же час, не дозволяє, у ряді випадків, дати оцінку вартості приладу без детального аналізу обраних варіантів складових його блоків.

Інтелектуальні датчики є багатофункціональними приладами, для яких тільки традиційно зберігається найменування „датчик”, а за виконуваними функціями вони все більше наближаються до симбіозу датчика й контролера. Тенденція їх розвитку, пов'язана із усіма можливостями вбудованих у них

мікропроцесорів, полягає в передачі їм від контролерів все більшого числа найпростіших типових функцій контролю й керування. Крім того, сучасні інтелектуальні датчики ширше використовують можливості свого мікропроцесорного перетворювача для вдосконалювання процесу вимірювання: підвищення точності, збільшення надійності, вибору діапазону виміру, виключення помилкових вихідних даних, розширення функцій дистанційного керування роботою сенсора.

Інформаційні функції. Датчики можуть зберігати дані, що визначають властивості, характеристики, параметри даного конкретного приладу: його тип, заводський номер, технічні показники, можливі діапазони виміру, установлену шкалу, задані параметри налаштування, версію програмного забезпечення, архів наступної перевірки датчика тощо. Ці дані, за запитом користувача, можна зчитати. Крім того, датчики можуть мати архів поточних вимірюваних значень та значень, які обчислюються ними за заданий інтервал часу.

Функції конфігурування. Дистанційне формування або модифікація користувачем основних налаштувальних параметрів датчика: установка нуля приладу, вибір заданого діапазону виміру, фільтрація поточних значень, вибір найменування одиниць виміру, у яких датчик повинен видавати інформацію тощо.

Функції форматування. Автоматичний аналіз змін вимірюваної величини й поточного стану середовища виміру: визначення виходів значень вимірюваної величини за задані межі, видача різних повідомлень про зміни значень вимірюваної величини, перевірка знаходження в припустимих діапазонах параметрів вимірюваного середовища. Усі ці функції дистанційно настроюються користувачем.

Функції самодіагностики. У процесі роботи датчики виконують аналіз своєї роботи: при виникненні різних збоїв, порушень і несправностей фіксують їхнє місце виникнення й причину, визначають вихід похибки приладу за паспортну норму, аналізують роботу бази даних датчика, розглядають правильність врахування факторів, які корегують вихідні покази датчика.

Функції перетворення. Датчик перетворює електричний сигнал на виході

чутливого елемента (звичайно, низьковольтний аналоговий, частотний або імпульсний сигнал) у значення заданої одиниці виміру, при цьому він виконує корекцію вихідного значення по супутніх поточних показниках стану вимірюваного середовища (наприклад, по її температурі або тиску), випадку, якщо показання датчика залежать і від них. У приладі проводяться необхідні перетворення вимірювальної інформації: посилення сигналів сенсора, стандартизація діапазонів вихідних аналогових сигналів, лінеаризація й фільтрація вимірюваних значень, розрахунки вихідних значень по заданих алгоритмах, аналого-цифрове перетворення значень вимірюваної величини.

Лекція №

Інформаційна лекція

Кількість годин: 2

Тема: Привод мехатронних систем

Мета: Ознайомитись із основними визначеннями та поняттями приводів мехатронних систем.

ПЛАН

1. Вимоги до приводів.
2. Гідравлічні і пневматичні приводи.
3. Електропривод. Основні поняття та класифікація.
4. Електропривод постійного струму.
5. Електропривід змінного струму.

Рекомендована література:

1. Gunko I., Hraniak V., Yaropud V., Kupchuk I., Rutkevych V. 2021. Optical sensor of harmful air impurity concentration. *Przegląd Elektrotechniczny*. Vol. 97, №7. P. 76-79.
2. Hrushetskyi S., Yaropud V., Kupchuk I., Semenyshena R. The heap parts movement on the shareboard surface of the potato harvesting machine. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*. 2021. Vol. 14 (63), № 1. P. 127-140.
3. Kovbasa V., Solona O., Deikun V., Kupchuk I. Functions derivation of stresses in the soil and resistance forces to the motion of a plough share for cavity creation. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2021. 83(3). P. 305–318.
4. Kupchuk I., Tokarchuk O., Hontar V., Zamrii M. The kinematic analysis of a vibration crusher for feed grain. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1 (100). С. 32-38.
5. Kuznietsova I., Bandura V., Paziuk V., Tokarchuk O., Kupchuk I. Application of the differential scanning calorimetry method in the study of the tomato fruits drying process. *Agraarteadus*. 2020. Vol. 31, №2. P. 173–180.
6. Sisinni E., Saifullah A., Han S., Jennehag U., Gidlund M. Industrial Internet of Things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Trans. Ind. Informat.*, 2018. vol. 14, №. 11, P. 4724_4734.

7. Solona O., Derevenko I., Kupchuk I. Determination of plasticity for pre-deformed billet. *Solid State Phenomena*. 2019. Vol. 291. P. 110–120.
8. Solona O., Kovbasa V., Kupchuk I. Analytical study of soil strain rate with a ploughshare for uncovering slit. *Agraarteadus*. 2020. Vol. 31, №2. P. 212–218.
9. Solona O.V., Kovbasa V.P., Kupchuk I.M. The contact interaction dynamics of the working tool of the mole plowshare with the soil during forming process a channel for an anti-filtration screen. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. №2 (97). С. 81-89.
10. Yanovych V., Kupchuk. I. Development of movement mathematical model for executive bodies of gyroscope-type mill. *SWorld journal: Technical sciences*. 2017. Issue 13. С. 174-184.
11. Гончарук І. В., Купчук І. М., Солона О. В., Мельник О. С. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Smart IR-Control Robotic Chassis v 1.0» («Robot Smart Control v 1.0») : Свідоцтво № 103284 від 18.03.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 64, 2021.
12. Граняк В.Ф., Купчук І.М., Гонтар В.Г. Метод та засіб прямого автоматизованого вимірювального контролю ізоляції обмоток електричних машин. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. №2 (109). С. 129-137.
13. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Зубар І. В., Онищук Ю. В. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Fuel consumption calculation v.1.0» : Свідоцтво № 103401 від 24.03.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 64, 2021.
14. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Твердохліб І. В., Телекало Н. В., Колесник Т.В., Дідик А. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Optimization of agricultural transportation v. 1.0» («Agro-transportation optimization v. 1.0») : Свідоцтво №107370 від 16.08.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 66, 2021.
15. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Холодюк О. В., Левчук К. І., Гонтарук Я. В., Дідик А. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Harvesting Cereals Optimization v. 1.1.5» («Harvesting cereals v. 1.1.5») : Свідоцтво № 102287 від 03.02.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 63, 2021.(27950)
16. Купчук І.М. Компромісна оптимізація режимних параметрів процесу подрібнення зернової сировини при виробництві етилового спирту. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. №4 (87). С. 91-100.

17. Купчук І.М., Браніцький Ю.Ю. Розробка програмного алгоритму розрахунку кінематичних параметрів робочих органів віяльно-калібрувальної машини. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. №2(97). С. 80-87.

1.Вимоги до приводів

Сучасні мехатронні системи повинні мати приводи, до яких пред'являються високі й досить суперечливі вимоги. Структура приводів повинна забезпечувати можливість автономного й координованого (погодженого) регулювання переміщень, швидкостей, сил (моментів) за умови забезпечення високої точності позиціонування при відсутності перерегулювання, високого коефіцієнта форсування по моменту, максимальної швидкодії, плавності переміщення робочого органу мехатронної системи при змінних навантаженнях і моментах інерції, надійної фіксації в точках позиціонування, відсутності перехідних режимів при перемиканні структури привода, а також мінімальність маси й габаритів електромеханічних модулів при високій надійності всіх елементів.

Особливі умови експлуатації мехатронних систем накладають істотні обмеження на вибір типу двигуна привода. Застосування крокового електропривода малоефективне при потужностях, що перевищують сотні Ват. Електроприводи на базі лінійних двигунів, поряд з очевидними перевагами забезпечення лінійного переміщення виконавчих пристроїв без механічних передач, не забезпечують необхідної точності й швидкодії.

2.Гідравлічні і пневматичні приводи

Основним елементом виконавчих органів, робота котрих заснована на використанні рідини, що знаходиться під тиском, чи стиснутого повітря, є силовий гідро (пневмо) циліндр. У циліндрі під дією напору повітря (рідини), яке надходить від джерела, у котрому воно утримується під тиском, відбувається переміщення поршня (рис. 1.17) [7].

Олива (робоча рідина), стиснене повітря

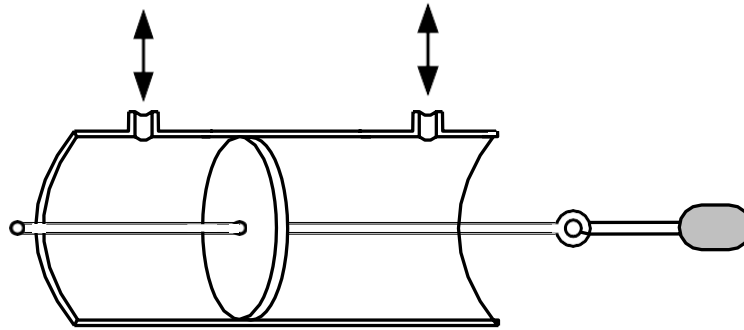


Рис. 1.17. Силевий гідро (пневмо) циліндр

Не дивлячись на свої розміри, гідравлічні й пневматичні приводи дозволяють розвинути значні зусилля. Однак вони вимагають створення спеціальних джерел, з котрих повинна надходити рідина високого тиску чи стиснутий газ. При використанні гідроприводу можуть виникнути проблеми, пов'язані з захистом оточуючого середовища від забруднень, витіканні гідравлічної рідини. При використанні пневмоприводу такої проблеми невиникає. Однак, при стискуванні повітря виникають труднощі, пов'язані з керуванням.

Застосування пневматичних приводів у мехатронних системах пояснюється їхньою дешевиною, простотою й відповідно надійністю. Правда, ці приводи погано керовані. Пневматичні приводи застосовують тільки в роботах невеликої вантажопідйомності - до 10 кг, рідше 20 кг. Гідравлічні приводи більш складні й дороги в порівнянні із пневматичними й електричними. Однак при потужності 500-1000 Вт і вище вони мають найкращі массогабаритні характеристиками й тому є основним типом привода для важких і надважких мехатронних систем. Гідравлічні приводи добре керуються, тому вони знайшли також застосування в мехатронних системах середньої вантажопідйомності, для яких потрібні високоякісні динамічні характеристики.

3.Електропривод. Основні поняття та класифікація

Електроприводом називають електромеханічну систему, що складається з

електродвигунного, перетворювального, механічного передавального і керуючого пристроїв і призначена для приведення в рух виконавчого органу робочої машини та керування цим рухом [17].



Рис. 1.18. Структура електроприводу у складі мехатронних систем

До переваг електроприводу можна віднести те, що для нього джерелом енергії слугує мережа постійного або змінного струму. Відсутня необхідність у використанні трубопроводів, а також проблема забруднення навколишнього середовища.

Електродвигуни можна класифікувати таким чином (рис. 1.19).



Рис. 1.19. Класифікація електродвигунів

3. Електропривод постійного струму

3.1. Колекторний електропривод

Основним елементом електропривода мехатронної системи зазвичай є електродвигун постійного струму, на виході котрого крутний момент пропорційний силі струму на вході двигуна. У такому електродвигуні подача струму до ротора здійснюється через щітки, котрі доволі легко можна пошкодити і тому вони вимагають необхідної уваги при обслуговуванні [18].

Принцип дії двигуна постійного струму ілюструє рис. 1.20, він полягає у взаємодії магнітних полів полюсів статора і провідників ротора, по яких протікає струм. Якщо струм у провіднику йде від нас (на рис. 1.20 провідник по якому струм йде від нас позначений колом із хрестиком), то, за правилом гвинта, магнітні силові лінії навколо провідника спрямовані за годинниковою стрілкою. У результаті додавання магнітних полів полюсів і провідника підсилиться магнітне поле праворуч від провідника ротора й послабиться ліворуч від нього. До провідника буде прикладена сила, яка виштовхує його у бік ослабленого магнітного поля, тобто вліво. Аналогічні процеси відбуваються з провідником, який знаходиться над південним полюсом статора (цей провідник показано колом із точкою – струм по ньому йде до нас).

На рис. 1.21 показано схему вмикання електричного двигуна постійного струму із незалежним збудженням. Електромагнітний момент, що виникає у двигуні виражається формулою:

$$M = K' \Phi \cdot I_{\text{ротора}} = K'' I_{\text{збудження}} \cdot I_{\text{ротора}}, \quad (1.7)$$

де K' – коефіцієнт, що залежить від конструкції ротора двигуна; Φ – магнітний потік двигуна; $I_{\text{ротора}}$ – струм обмотки ротора; $I_{\text{збудження}}$ – струм кола збудження двигуна; K'' – коефіцієнт, що залежить від конструкції ротора та статора двигуна.

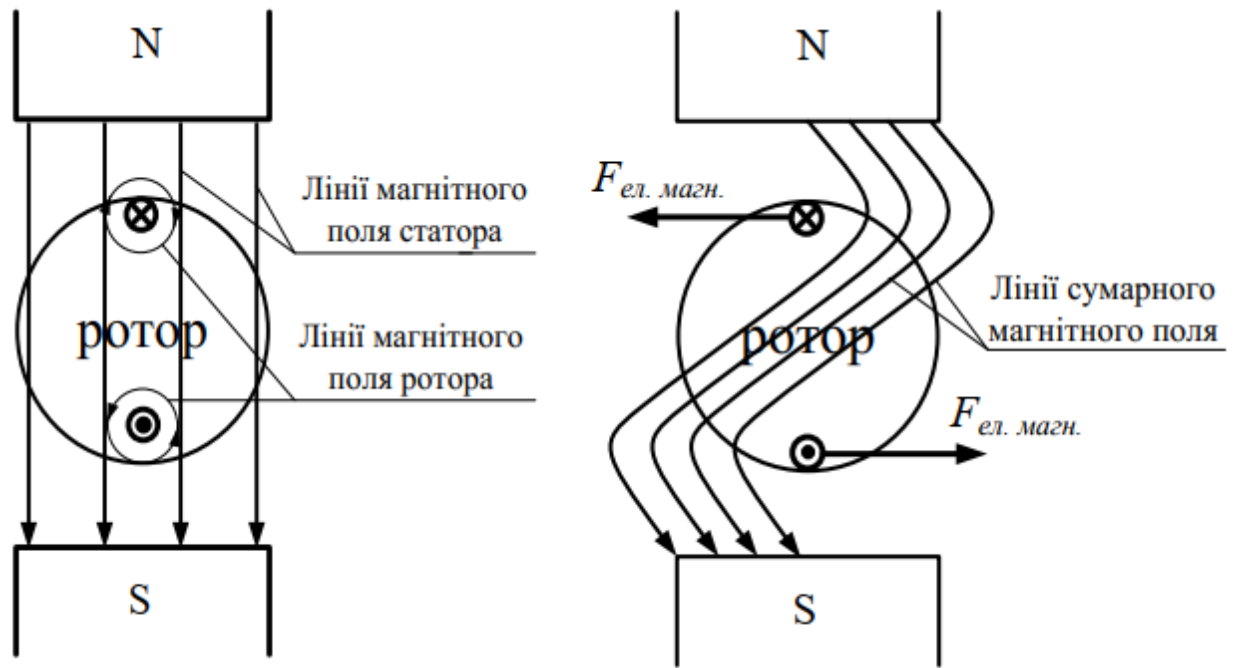


Рис. 1.20. Принцип виникнення електромагнітного моменту у двигуні постійного струму

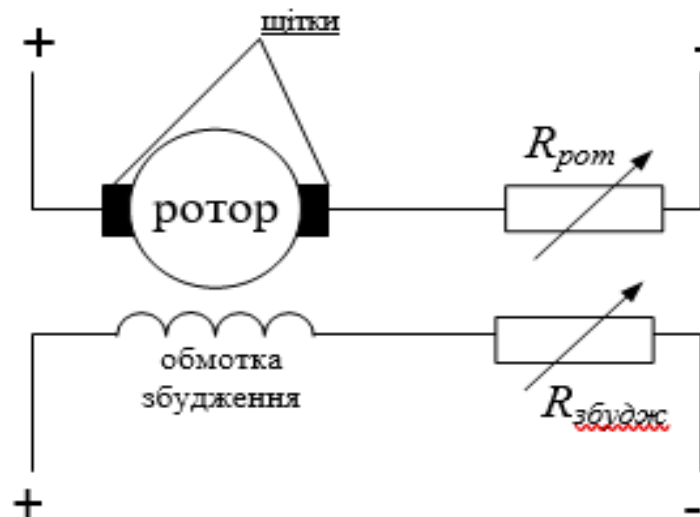
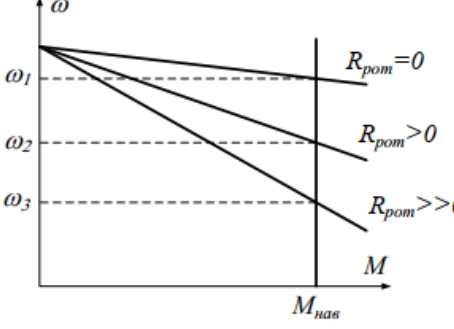


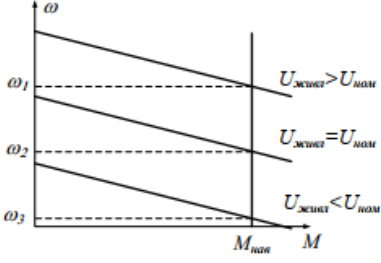
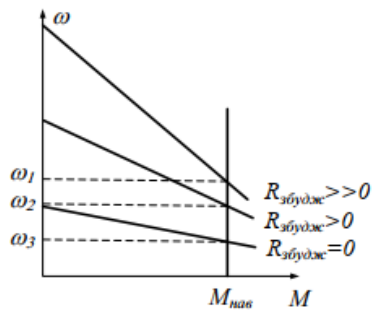
Рис. 1.21. Електрична схема вмикання двигуна постійного струму незалежного збудження

Розглянемо методи регулювання двигуна постійного струму (табл. 1.2). Регулювати двигун постійного струму можна зміною: 1) напруги живлення; 2) опору роторного кола; 3) опору кола збудження.

Таблиця 1.2. Способи регулювання двигуна постійного струму послідовного збудження

Спосіб	Графіки механічних характеристик	Коментар
1	2	3
1. Зміна опору роторного кола	 <p>Графік механічних характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження. Показано залежність частоти обертання ω від моменту M для трьох різних значень опору роторного кола: $R_{рот} = 0$, $R_{рот} > 0$ та $R_{рот} \gg 0$. Частота ω зменшується зі збільшенням моменту M та збільшенням опору роторного кола. Вертикальна лінія позначена $M_{наз}$.</p>	Зі збільшенням опору роторного кола швидкість двигуна падає.

Продовж. табл. 1.2

1	2	3
2. Зміна напруги живлення		Зі збільшенням напруги живлення двигуна його швидкість збільшується, і навпаки, зі зменшенням напруги живлення його швидкість зменшується.
3. Зміна струму у колі збудження		Зі збільшенням опору кола збудження швидкість двигуна збільшується. При обриві кола збудження швидкість зростає до нескінченності і двигун іде „врознос”.

При регулюванні двигуна постійного струму останній має гарні показники: діапазон регулювання швидкості до 1:100000, перевантажувальна здатність по моменту до 8...10. Разом з тим, електроприводи постійного струму мають один істотний недолік – наявність щіткового колектора. Великий обсяг планово-запобіжних робіт з обслуговування і контролю двигунів навіть у приміщеннях з нормальним середовищем, а особливо у зволжених, запилених і тим більше при наявності жорстких випромінювань приводить до зниження економічного ефекту при мехатронізації виробництва через істотне зростання витрат на ремонт і заміну електродвигунів постійного струму.

3.2. Кроковий електропривод.

Недоліки двигуна постійного струму полягають перша за все у наявності колектора. Тому активно ведуться розробки безколекторних, наприклад, крокових двигунів. Принцип дії такого двигуна ілюструє рис. 1.22.

Двополюсний ротор із видовженими виступами поміщений у чотириполюсний статор. Одна пара полюсів виконана з постійних магнітів, на іншій – намотана обмотка керування. Поки струму в обмотках керування немає, ротор орієнтується уздовж постійних магнітів і утримується з певним зусиллям, яке визначається магнітним потоком полюсів [19].

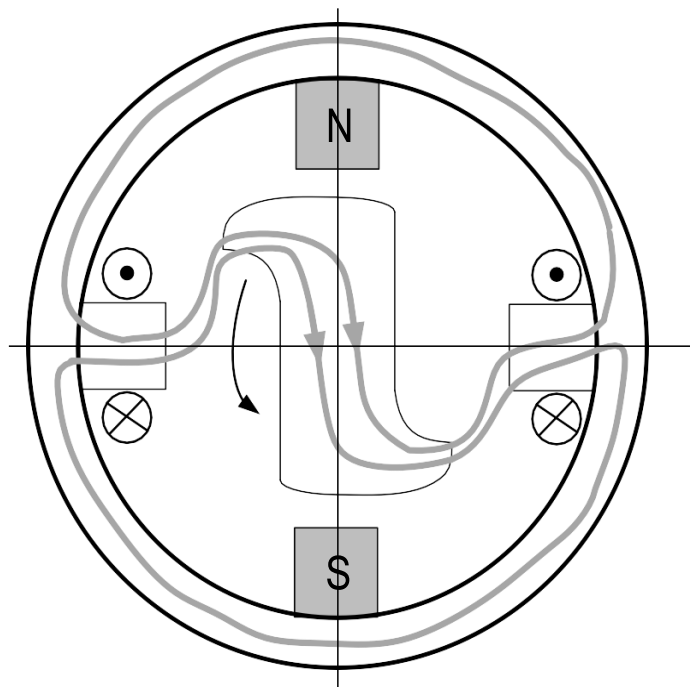


Рис. 1.22. Принцип дії крокового двигуна

При подачі постійної напруги на обмотку керування виникає магнітний потік приблизно вдвічі більший, ніж потік постійних магнітів. Під дією електромагнітного зусилля, створюваного цим потоком, ротор повертається, долаючи момент навантаження і момент, що розвивається постійними магнітами, прагнучи зайняти положення співвісне з полюсами керуючої обмотки. Поворот відбувається у бік видовжених виступів, тому що магнітний опір між статором і ротором у цьому напрямку менший, ніж у зворотному. Наступний керуючий імпульс відключає напругу з обмотки керування й ротор повертається під дією потоку постійних магнітів

у бік виступів. Перевагою крокових двигунів з постійними магнітами є простота конструкції й схеми керування. Для фіксації ротора при знеструмленій обмотці керування не потрібне споживання енергії, кут повороту зберігає своє значення й при відсутності живлення. Двигуни цього типу відпрацьовують імпульси із частотою до 200-300 Гц. Їхні недолік – низький ККД.

Характер руху ротора крокового двигуна визначається частотою й характером зміни керуючих імпульсів. Залежно від цього розрізняють наступні режими роботи крокових двигунів: статичний, квазістатичний, перехідний. Статичний режим – це режим, при якому по обмотках статора протікає постійний струм, що створює нерухоме в просторі магнітне поле, а ротор не обертається. Під дією навантаження ротор лише відхиляється від положення рівноваги на деякий кут. Такий режим використовується для фіксації робочого органу мехатронної системи у деякому положенні (наприклад, фіксація руки робота, яка триває вантаж).

Квазістатичний режим – це режим відпрацьовування одиничних кроків, при якому перехідні процеси від попереднього такту комутації повністю загасли й швидкість ротора на початку наступного кроку дорівнює нулю. Він використовується в механізмах, у яких потрібна фіксація ротора після кожного кроку. Гранична частота керуючих імпульсів, при якій ще витримується квазістатичний режим, визначається часом протікання електромагнітних і особливо електромеханічних перехідних процесів, тобто часом коливань ротора. Підвищити граничну частоту руху ротора квазістатичного режиму можна шляхом збільшення числа обмоток статора або числа тактів комутації. У всіх цих випадках зменшується кут переміщення й кінетична енергія ротора, що зменшує його коливання у кінці кроку.

Перехідний режим - це основний експлуатаційний режим роботи крокового двигуна. Він містить у собі пуск, реверс, гальмування, перехід з однієї керуючої частоти на іншу. Фізичні процеси в перехідних режимах визначаються як параметрами двигуна і його навантаженням, так і початковими умовами, при яких починається перехідний процес. Основна вимога до крокового двигуна в перехідних

режимах полягає у відсутності втрати кроку, тобто збереження синхронізму при будь-якому характері зміни керуючих імпульсів. Пуск крокового двигуна здійснюється з нерухомого положення ротора шляхом стрибкоподібного збільшення частоти керуючих імпульсів (від нуля до робочої). При цьому ротор спочатку відстає від поля, потім, прискорюючись, досягає частоти обертання поля, випереджає його й внаслідок від'ємного синхронізуючого моменту знову сповільнює свій рух. Внаслідок демпфування коливань швидкості обертання ротора вони швидко загасають і потім настає усталений режим.

Максимальна частота керуючих імпульсів, при якій можливий пуск без втрати кроку, росте зі збільшенням максимального синхронізуючого моменту, зменшенням кроку, зниженням постійної часу обмоток, навантаження й моменту інерції. Для сучасних крокових двигунів вона дорівнює 100-1000 Гц. Гальмування крокового двигуна здійснюється стрибкоподібним зниженням частоти керуючих імпульсів від робочого значення до нуля. Реверс крокового двигуна проводиться шляхом зміни послідовності комутації струмів в обмотках, що приводить до зміни напрямку обертання магнітного поля на протилежний. Гранична частота керуючих імпульсів, при якій реалізується реверс без втрати кроку, завжди менше частоти при якій здійснюється пуск і становить 20-50% від цієї частоти.

5. Електропривод змінного струму

У сучасному автоматизованому виробництві широке застосування знаходять мехатронні системи на базі регульованих електроприводів змінного струму. Асинхронні двигуни (АД) мають ряд переваг перед двигунами постійного струму: більш високу надійність, простоту експлуатації, кращі масогабаритні показники, низьку вартість тощо.

Кутова швидкість АД виражається такою формулою:

$$\omega = \frac{2\pi f}{p} (1-s), \quad (1.8)$$

Де f - частота джерела живлення АД, Гц; p - число пар полюсів, s – ковзання двигуна.

Таким чином, швидкість обертання асинхронного двигуна можна регулювати зміною параметрів: частотою струму, числом пар полюсів, опором роторного і статорного кола та величиною напруги на статорі.

5.1.Частотне скалярне керування асинхронним двигуном

Частотне керування асинхронного двигуна має найкращі показники регулювання швидкості порівняно з іншими способами. Єдиним стримуючим фактором тут є висока, поки що, вартість перетворювача частоти. Цей спосіб забезпечує плавне регулювання швидкості у широкому діапазоні (вниз і вверх від номінальної швидкості), а одержані механічні характеристики мають високу жорсткість. Частотний спосіб має важливу властивість - сталість ковзання при регулюванні швидкості. За цієї обставини втрати потужності незначні, тобто цей спосіб є економічним. Типи робочих машин і відповідні їм механічні характеристики АД, що формує ПЧ, приведені у табл.

Таблиця 1.3. Робочі машини та механічні характеристики АД

Тип робочої машини мехатронної системи	Механічна характеристика	Коментар
підйомники, конвеєри, крани, маніпулятори		<p>Момент опору робочих машин не залежить від швидкості. Закон зміни напруги живлення АД при зміні частоти</p> $U = fB^*$
вентилятори, насоси, гребні гвинти		<p>Момент опору робочих машин <u>квадратично</u> зростає зі збільшенням швидкості. Закон зміни напруги живлення АД при зміні частоти</p> $U = f^2 B^*$
металообробні верстати		<p>Момент опору робочих машин зменшується при збільшенні швидкості. Закон зміни напруги живлення АД при зміні частоти</p> $U = \sqrt{f} B^*$

* B - постійний коефіцієнт

Зміна частоти напруги живлення призводить до зміни швидкості АД і робочої машини. При цьому момент опору робочої машини також змінюється. Для того, щоб унеможливити перевантаження двигуна необхідно варіювати амплітуду його напруги.

У табл. 1.3 приведені формули, за якими необхідно змінювати напругу живлення АД при зміні частоти його живлення для того, щоб перевантажувальна здатність двигуна була збережена [20].

5.2. Частотне векторне керування асинхронним двигуном.

Сучасні системи векторного регулювання дозволяють просто й ефективно керувати такими складними об'єктами як асинхронний двигун із короткозамкненим ротором (АДКЗ). Це дозволяє істотно розширити область застосування асинхронного приводу і витіснити з автоматизованих керованих приводів двигуни постійного струму. Можливість використання векторних алгоритмів регулювання АД пов'язано в першу чергу з розвитком силової електроніки, яка дозволяє створювати надійні й відносно дешеві перетворювачі, а також з розвитком швидкодіючої мікроелектроніки.

Першим етапом процесу розвитку векторного керування АД була розробка універсальної векторно-матричної математичної моделі, що одержала назву узагальненої електричної машини [21]. Цей процес почався у кінці 20-х років і завершився наприкінці 40-х років ХХ століття. Модель узагальненої електричної машини дозволяє описувати електромагнітні процеси в ідеалізованому електродвигуні за допомогою апарату лінійної алгебри. Практичне використання моделі було відкладено на кілька десятиліть, оскільки при „ручних” розрахунках вона не давала переваг, але вимагала істотних обчислювальних робіт. Її успішно використовували для теоретичного аналізу перехідних процесів в електричних машинах.

Як відомо, повна керованість електропривода досягається тоді, коли забезпечується керування електромагнітним моментом двигуна. У електричних двигунах крутний момент утворюється в результаті взаємодії магнітних полів статора й ротора. Обидві величини повинні бути незалежні одна від іншої. Тоді одну з них можна підтримувати постійною, а за допомогою іншої здійснювати регулювання. У двигунах постійного струму існують окремі електричні кола для керування магнітним

потокі і моментом. Нагадаємо що електромагнітний момент машини постійного струму визначається за формулою (1.7). У АДКЗ є тільки один канал, у якому об'єднані обидві складові струму. Отже у завдання системи регулювання входить функція їхнього поділу. Це завдання вирішується при використанні рівнянь узагальненої електричної машини у векторній формі. У результаті вибору пари векторів величин, які утворюють електромагнітний момент, і системи координат, у якій вони представлені, можна одержати рівняння моменту у вигляді функції незалежних проєкцій цих величин на координатні осі [22-24]. Тоді керування моментом зводиться до керування проєкціями векторів. Звідси й назва способу.

В 1971 році Ф. Блашке (*F. Blaschke*) сформулював принцип керування, запатентований фірмою *Siemens* і названий трансвекторним керуванням (*TRANSVEKTOR®-Regelung*) [25]. Математичною основою його є рівняння електромагнітних процесів в АД у векторній формі. Рівняння справедливі для системи координат орієнтованої по напрямку магнітного поля. В англійській літературі цей принцип називається *field-oriented control (FOC)*, тобто „керування з орієнтацією по полю”. Він успішно використовується у наш часі повністю асоціюється з поняттям векторного керування, хоча в останній час із розвитком пристроїв обробки інформації з'явився інший спосіб, у якому також використовується векторне подання величин, але алгоритм керування відрізняється від трансвекторного. Цей спосіб називається прямим керуванням моментом (*DTC direct torque control*).

Для побудови систем векторного керування АД можуть бути використані будь-які пари векторів, за допомогою яких можна представити електромагнітний момент АД. Однак, від вибору векторів значною мірою залежить ступінь складності системи. Бажано, щоб величини, які представлені векторами в рівнянні моменту, можна було безпосередньо виміряти й впливати на них при керуванні моментом. У АДКЗ є тільки дві такі величини – це напруга й струм статора, і тільки одна з них, а саме струм статора, може входити в рівняння моменту. Тоді іншою величиною може бути тільки струм ротора або яке-небудь потокозчеплення у двигуні. Струм ротора принципово

неможливо виміряти, а пристрої його ідентифікації за іншими вимірюваними параметрами складні й ненадійні. Тому для вибору залишаються три потокозчеплення: статора, ротора й основне, тобто магнітний потік у зазорі АД. Потокозчеплення статора й робочий потік АД можна безпосередньо виміряти й використати цей сигнал у системі керування, що часто й робиться при створенні приводів. У масових виробках розробники намагаються використати сигнали, доступні без установки датчиків (струм і напруга статора). За миттєвим значенням цих величин можна обчислити, наприклад, потокозчеплення статора. Однак, при виборі потокозчеплення статора або основного потокозчеплення передаточні функції системи керування виходять досить складними й мало підходящими для практичного використання.

Простіший вигляд мають рівняння електромагнітних процесів в АД у випадку подання їх через вектор потокозчеплення ротора Ψ_2 . У системі координат орієнованій по потокозчепленню ротора (ця система координат названа dq -системою, вона обертається у просторі зі швидкістю ротора) рівняння електромагнітного моменту буде мати вигляд:

$$M = C \Psi_2 I_{1q}, \quad (1.9)$$

де C – деякий коефіцієнт; Ψ_2 - потокозчеплення ротора; I_{1q} - проекція вектора струму статора на вісь q , яка перпендикулярна потокозчепленню ротора Ψ_2 (рис. 1.23).

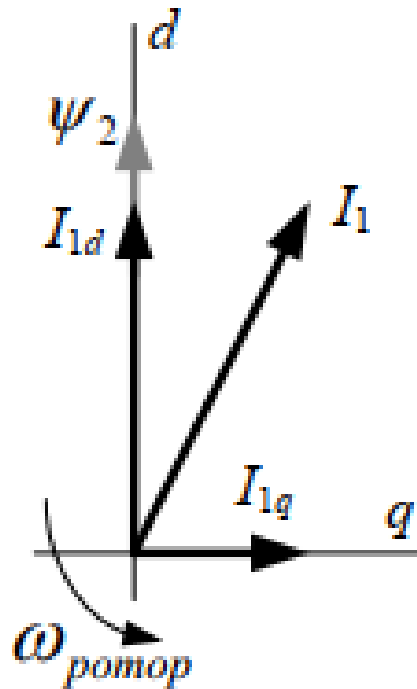


Рис. 1.23. Вектори, які визначають електромагнітний момент АД у системі координат dq

Рівняння (1.9) аналогічне рівнянню (1.7): ψ_2 виконує роль основного магнітного потоку, а I_{1q} - струму якоря двигуна постійного струму.

Таким чином, принцип векторного керування полягає у роздільному керуванні магнітним потоком і моментом АД за допомогою незалежних складових струму статора, які відповідають проекціям вектора струму на осі системи координат dq , орієнтованої за напрямком вектора магнітного потоку ротора.

Отже, якщо задати значення поздовжньої складової струму, що відповідає необхідному магнітному потоку, а поперечної – необхідному моменту на валу, то тим самим буде визначено вектор струму статора в системі координат dq . Після цього здійснюється перетворення системи координат dq у нерухому і розкладання вектора струму на фазні проекції, у результаті чого утворюються синусоїдальні сигнали, що відповідають фазним струмам, які потрібно сформувати в обмотках статора, щоб одержати заданий електромагнітний момент [26].

Перетворення систем координат (з нерухомої у рухому da) неможливо без інформації про просторове положення опорного вектора Ψ_2 у кожен момент часу. Цю інформацію можна одержати безпосереднім виміром магнітного потоку статора або робочого потоку за допомогою датчиків, а потім обчислити Ψ_2 . Однак при цьому необхідно включати у конструкцію приводу ненадійні датчики Хола. Уникнути небажаних (і не завжди можливих) змін конструкції АД можна використовуючи виміри інших параметрів:

- 1) струмів статора АД;
- 2) напруг на затискачах статора АД;
- 3) кутової швидкості ротора АД;
- 4) кутового положення ротора АД.

Для векторного керування АД необхідно вимірювати принаймні дві з перелічених величин.

Більш простим і дешевими є електропривод, розімкнутий по швидкості, який не містить датчика кутової швидкості (використовується інтернаціональний термін „безсенсорне керування”). Тут виміру підлягають лише струми й напруги статора АД. Швидкість ротора обчислюється в перетворювачі частоти (ПЧ) за математичною моделлю АД, що враховує усереднені типові або реально виміряні параметри АД. Модель АД представляє собою систему диференціальних рівнянь, які розв’язуються у реальному часі. Невідомими функціями часу в цій системі можуть бути вектори струмів або потокозчеплень ротора, статора і швидкість ротора. При вимірюванні параметрів і розв’язуванні диференціальних рівнянь у системі керування ПЧ накопичуються похибки, що приводить до неточного визначення орієнтації поля. Для стійкої роботи застосовується безперервна корекція розв’язків системи на основі різниць виміряних і обчислених значень струмів статора.

Через складність точного відображення параметрів АД (наприклад, внаслідок зміни температурних умов роботи АД) регульовальні властивості таких векторних

безсенсорних електроприводів у зоні нульових швидкостей різко погіршуються, тобто має місце обмеження діапазону регулювання. Для роботи в необмеженому діапазоні швидкостей використовуються замкнуті по швидкості електроприводи, які мають електромеханічний або цифровий датчик швидкості (енкодер), встановлений на валу АД. У цьому випадку модель АД значно спрощується й служить тільки для визначення орієнтації потокозчеплення ротора. Ця інформація використовується для перетворень координат.

Векторне керування АД, особливо без датчика швидкості, вимагає великого обсягу й високої швидкості обчислень, що може бути реалізовано потужним контролером, наприклад, цифровим сигнальним DSP-контролером[27].

Раціональні області застосування асинхронних електроприводів з векторним керуванням:

- спеціальні верстати, промислові роботи в тому числі із задачами позиціонування робочого органу;
- привод з частими пусками, зупинками, реверсами, наприклад, у сфері підйомно-транспортного обладнання (транспортні механізми, ліфти тощо);
- електричний транспорт.

Реалізація зміни частоти для керування швидкістю двигуна виконується за допомогою перетворювача частоти.

5.3.Будова та принцип дії частотного перетворювача.

Силова частина ПЧ складається з вхідного випрямляча, ланки постійного струму, інвертора та системи керування [28] (рис. 1.24). Вхідний випрямляч виконаний за схемою Ларіонова. Випрямляч приєднаний до ланки постійного струму, яка складається з термісторів R_{t1} і R_{t2} та електролітичних конденсаторів великої ємності $C1$ і $C2$. Термістори, з від'ємним температурним коефіцієнтом, призначені для обмеження зарядного струму при вмиканні перетворювача. В холодному стані термістори мають великий опір. Після вмикання перетворювача в мережу струм, що

протікає через термістори, розігріває їх, внаслідок чого вони різко зменшують свій опір.

Таким чином, термістори обмежують зарядний струм конденсаторів, а в процесі роботи практично не впливають на величину напруги конденсаторів. Конденсатори $C1$ і $C2$ згладжують напругу ланки постійного струму, фільтрують споживаний з мережі струм, забезпечують повернення реактивної енергії двигуна при вимиканні інвертора та при перехідних процесах і забезпечують повернення енергії при частотному гальмуванні двигуна M . Резистори $R2$ і $R3$, увімкнені паралельно кожному конденсатору, зрівнюють їх заряд. До виходу ланки постійного струму приєднано трифазний інвертор напруги, який складається з трьох півмостів на транзисторах $VT2$ - $VT7$, зворотних діодів $VD2$ – $VD7$ та гальмівного ключа на транзисторі $VT1$ зі зворотним діодом $VD1$. До гальмівного ключа при необхідності приєднують гальмівний резистор, моду буде розсіювати енергію в режимі частотного гальмування двигуна. Зворотні діоди $VD2$ – $VD7$ служать для передачі енергії від двигуна до джерела живлення (у ланку постійного струму). Основною особливістю інвертора представленого на рис.

1.24 є те, що напруга при навантаженні визначається лише черговістю комутації транзисторів інвертора. Досягається це введенням шунтуючих діодів $VD2$ – $VD7$ для проведення індуктивного струму навантаження. В результаті цього інвертор має жорстку зовнішню характеристику, тобто при зміні навантаження напруга інвертора практично не змінюється (такий інвертор називається інвертором напруги). Інвертори можуть комутуватись від електромережі змінного струму і автономно за допомогою спеціальних блоків, що мають конденсатори й котушки індуктивності. В частотно-регульованих приводах, як правило, використовуються автономні інвертори.

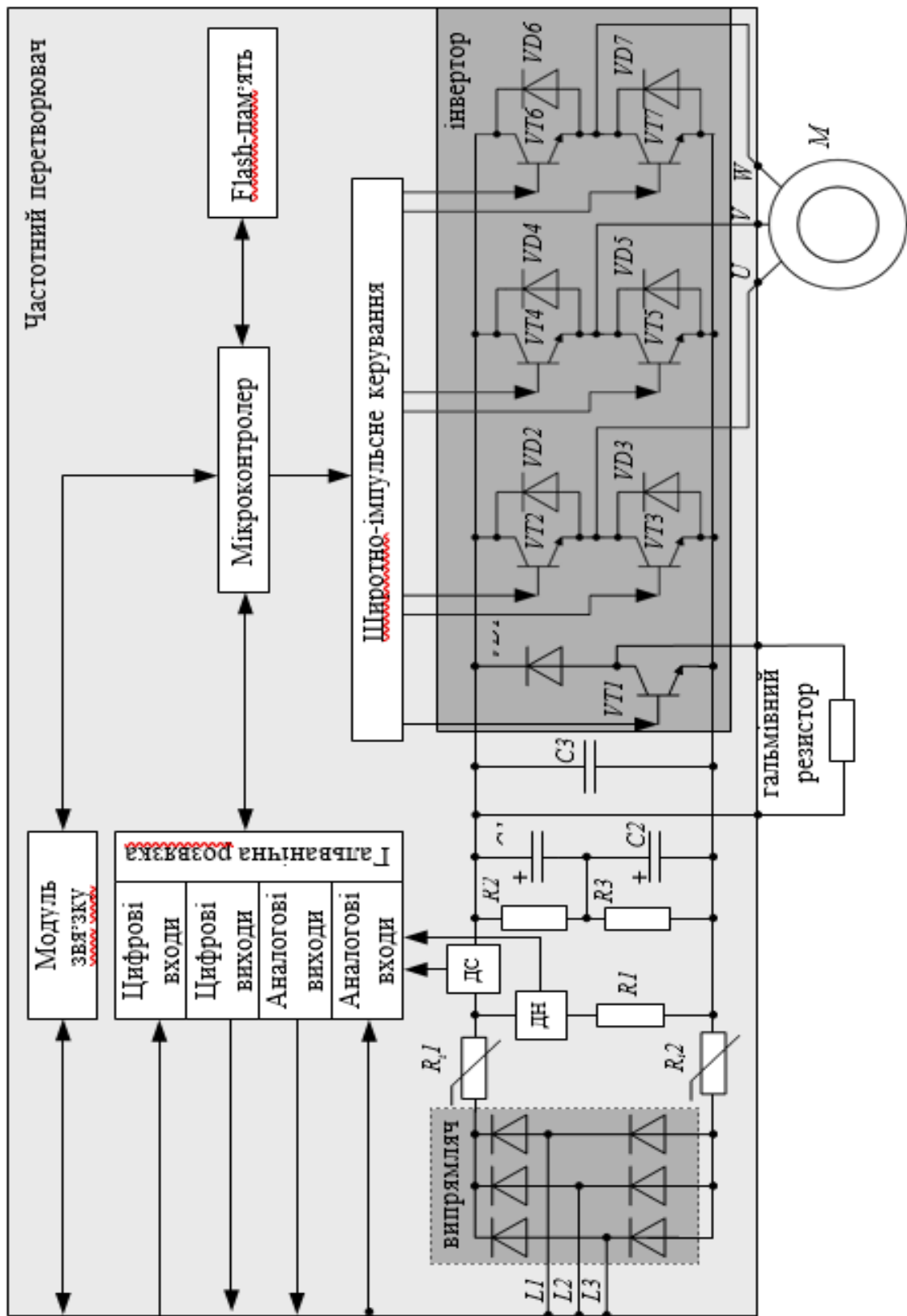


Рис 1.24. Схема ПЧ

Через велику частоту комутацій ключів інвертора (близько 16 кГц) між

додатною та від'ємною шиною ланки постійного струму виникають великі перенапруги з частотою вільних коливань в кілька мегагерц. Для захисту силового модулю від пробою до його затискачів приєднано так званий снабберний конденсатор малої ємності $C3$. Ємність цього конденсатора в десятки разів менша ємності електролітичних конденсаторів, що дозволяє ефективно боротися з перенапругами. Керування інвертором здійснюється від мікропроцесора шляхом широтно-імпульсної модуляції напруги. Транзистори інвертора працюють у ключовому режимі. Якщо коефіцієнт заповнення імпульсу в періоді змінювати за синусоїдним законом, то так же буде змінюватися і середнє значення напруги фази в періоді. На входи мікропроцесора подаються аналогові або цифрові сигнали від зовнішніх керуючих пристроїв, датчиків напруги (ДН) і струму (ДС) тощо.

Одними з найбільш поширених пристроїв сучасної силової електроніки є автономні інвертори напруги (АІН). У складі ПЧ вони перетворюють постійну напругу у змінну регульованої частоти і амплітуди. Вони також є основними блоками пристроїв безперебійного живлення. Оскільки вихідна напруга АІН складається з прямокутних імпульсів, то формування необхідної частоти і величини напруги здійснюється за рахунок модуляції вихідних імпульсів. В даний час найбільше поширення отримала широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), що виражається у впливі на тривалість імпульсів і моменти їх появи.

Опис процесів, що відбуваються за період вихідної напруги при багаторазовій комутації швидкодіючих силових ключів, послідовність роботи таких ключів при формуванні напруги на виході ПЧ, прикладеної до статора АД буде дано у цьому пункті.

Розглянемо процеси, що відбуваються при роботі трифазного АІН, зібраного по мостовій схемі і підключеного до симетричного активно-індуктивного $R-L$ навантаження, яким моделюється АД (рис. 1.25).

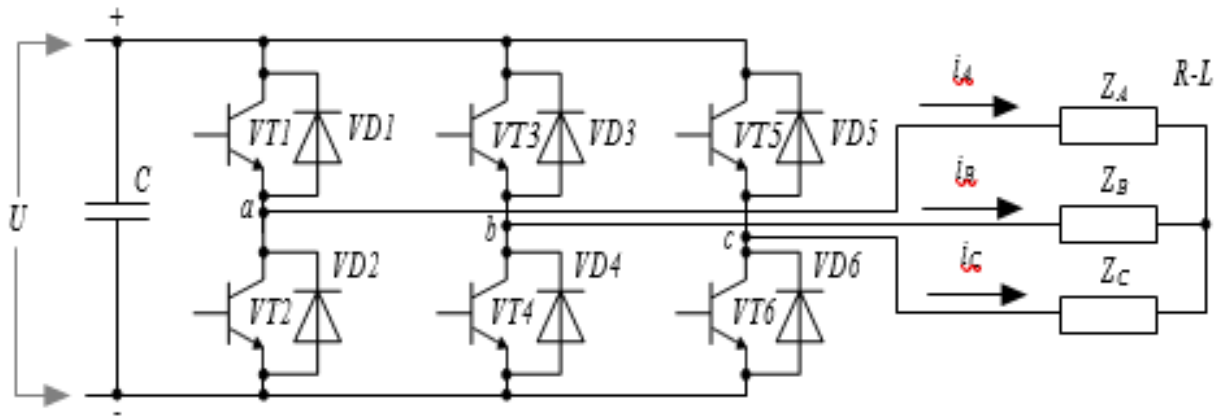


Рис.1.25. Схема трифазного АІН з активно-індуктивним навантаженням

У кожному плечі моста інвертора зустрічно-паралельно включені біполярний транзистор з ізольованим затвором IGBT ($VT1-VT6$) та швидкодіючі зворотні діоди ($VD1-VD6$). Додатні напрямки фазних струмів i_A, i_B та i_C в $R-L$ навантаженні вказані стрілками. До шини з додатною полярністю напруги U (U - напруга на конденсаторі C ланки постійного струму) приєднані колектори трьох транзисторів і катоди трьох зворотних діодів; ці вентиля зазвичай називають верхніми, на рис. 1.25 їм присвоєні непарні (1, 3 і 5) номери. До шини з від'ємною полярністю напруги під'єднані емітери (аноди) трьох нижніх, позначених парними (2, 4 і 6) номерами транзисторів (зворотних діодів).

Припустимо, що вентиля інвертора є ідеальними ключами, тобто володіють нульовим часом перемикання і, завдяки цьому, дозволяють здійснити багаторазову комутацію за період вихідної напруги інвертора, що формується за методом ШІМ. Крім того, для полегшення аналізу роботи АІН припускають, що ключі мають нульовий опір у замкненому стані і нескінченний опір – у розімкненому. Таким чином, схему представлену на рис. 1.25 можна подати у іншому (більш простому) вигляді (рис. 1.26).

На рис. 1.26 транзисторно-діодний модуль включений у одне плече моста інвертора позначено як звичайний ключ, який має двосторонню провідність. Усі ключі позначені цифрами: верхні – непарними, нижні – парними.

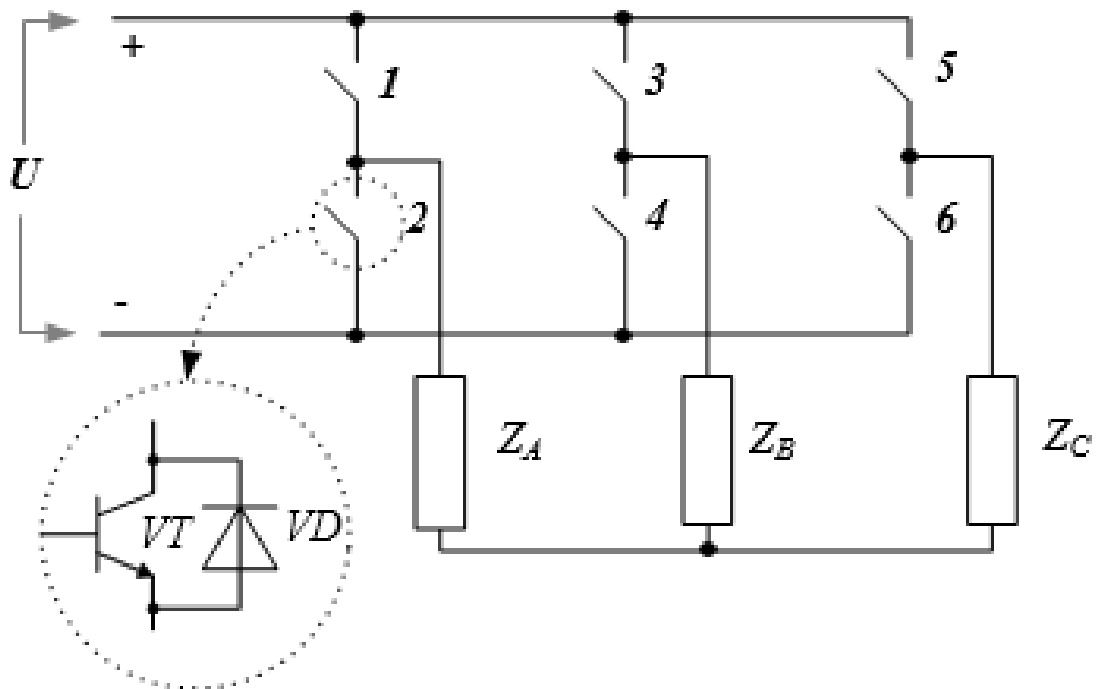


Рис.1.26. Спрощена схема трифазного АІН з активно-індуктивним навантаженням

У реальних схемах АІН пряма провідність кожного із силових керованих ключів (у напрямку від додатного до від'ємного полюса джерела живлення інвертора) забезпечується керованим напівпровідниковим приладом (тиристором або транзистором), а зворотна провідність - зворотним, як правило, некерованим вентилем. Таким чином, якщо керований елемент силового ключа перебуває у включеному стані, то відповідне плече моста має двосторонню провідність струму. Якщо ж керований елемент (ключ) перебуває у виключеному стані, то відповідне плече моста має лише зворотну провідність (струм може протікати лише від АД до ланки постійної напруги).

Інвертування, тобто перетворення постійної напруги джерела живлення в трифазну змінну напругу необхідної частоти на вихідних затискачах А, В, С інвертора здійснюється комутацією ключів у плечах моста з певною частотою й у певній послідовності. Форма вихідної напруги інвертора визначається насамперед обраним законом перемикування ключів - законом комутації.

Розглянемо основні особливості робочих процесів у трифазному інверторі напруги при роботі його на АД у сталих режимах. На рис. 1.27 представлена діаграма станів трифазного мостового інвертора, яка показує порядок перемикання його ключів відповідно до закону комутації. Інтервали часу, протягом яких існує симетрична двостороння провідність (тобто провідність від АД до ланки постійної напруги та у зворотному напрямку, причому провідності ключа у обох напрямках однакові) відповідних плечей моста, виділені на діаграмі станів жирними горизонтальними лініями. Індекс горизонталі відповідає позначенню силового керованого ключа. Відповідно до показаної на діаграмі послідовності перемикання кожний із ключів перебуває у включеному стані протягом напівперіоду вихідної частоти (π). Під термінами „тривалість включеного стану” і „інтервал провідності ключа” мається на увазі саме інтервал часу, протягом якого існує симетрична двостороння провідність ключа й відповідного плеча моста. З діаграми рис.

1.27 видно, що протягом періоду робочої частоти ($0 \dots 2\pi$) інвертор перебуває в шести станах (I - VI), які послідовно змінюють один одного. Кожен з таких станів характеризується певною комбінацією включених і виключених ключів, отже для кожного стану характерна „своя” комбінація підключення навантаження до ланки постійної напруги АІН.

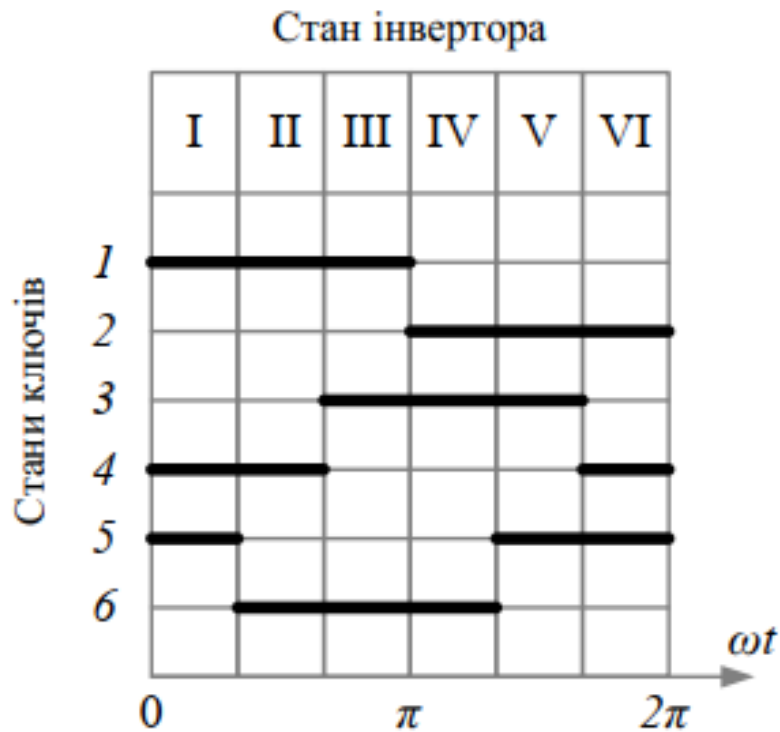


Рис. 1.27. Діаграма станів і графіки лінійних напруг трифазного АІН

У кожному зі станів інвертора будь-яка пара ліній живлення навантаження (наприклад, А і В) підключена або до різнополярних шин джерела живлення (до „+” та „-”), або до однієї із шин джерела й замкнута накоротко через ключі інвертора. У першому випадку лінійна напруга на виході ідеалізованого інвертора дорівнює напрузі джерела живлення U (це напруга у ланці постійного струму), а в другому - нулю.

Відповідні графіки лінійних напруг на виході інвертора показані на рис. 1.28. Якщо обмотки АД з'єднані за схемою „трикутник”, то лінійні напруги одночасно є фазними. Графіки лінійних напруг ідеалізованого інвертора при такому законі комутації ключів являють собою знакозмінні імпульсні функції, амплітуда яких дорівнює величині напруги джерела живлення, а частота дорівнює частоті комутації ключів. Як видно з рис. 1.28, графік лінійної напруги автономного інвертора є несинусоїдальним. Він може бути представлений у вигляді суми окремих складових (гармонік), причому такий розклад функції напруги у ряд Фур'є не буде містити гармонік кратних двом та трьом.

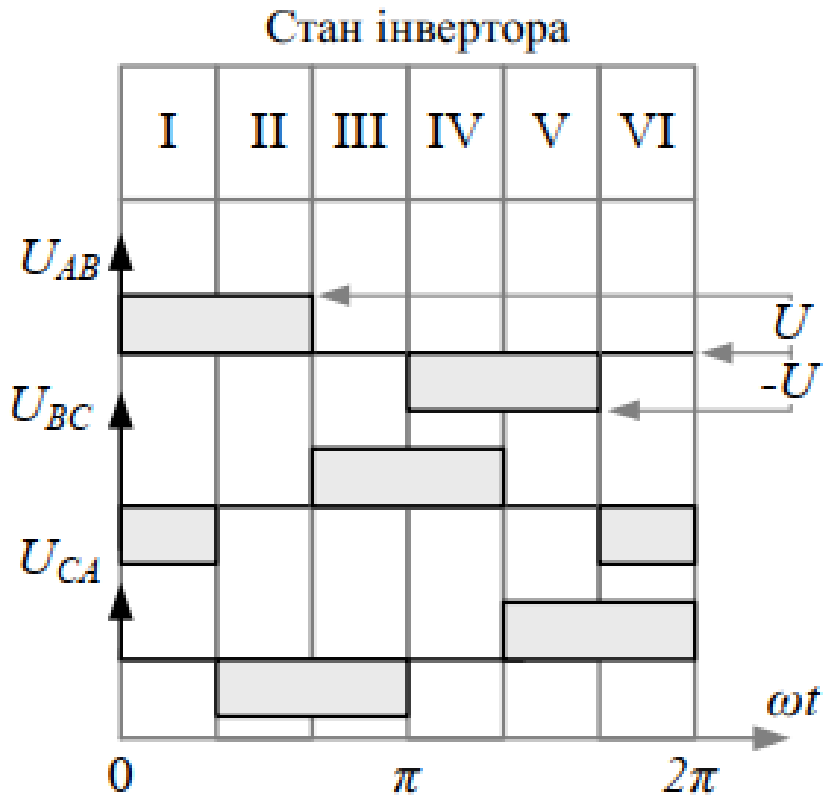


Рис. 1.28. Графіки лінійних (фазних) напруг на виході ПЧ при з'єднанні обмоток АД за схемою „трикутник”

Амплітуда лінійної напруги основної гармоніки буде трохи більша ніж напруга U (у ланці постійної напруги):

$$U_{л.осн.мах} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} U \approx 1,1U, \quad (1.10)$$

де $U_{л.осн.мах}$ амплітуда основної гармоніки лінійної напруги на виході ПЧ; U - напруга ланки постійного струму ПЧ. Діюче значення лінійної напруги основної гармоніки:

$$U_{л.осн} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U \approx 0,78U. \quad (1.11)$$

Амплітуди вищих гармонік напруги зворотно пропорційні їх номерам, тобто чим вища гармоніка, тим меншу амплітуду вона має. Діюче значення вихідної лінійної

напруги ПЧ:

$$U_2 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U \approx 0,81U. \quad (1.12)$$

Доля основної гармоніки у діючому значенні вихідної напруги ПЧ:

$$\frac{U_2}{U_{2.осн.}} = \frac{3}{\pi} \approx 0,955. \quad (1.13)$$

У випадку з'єднання обмотки АД в „зірку” графіки фазних напруг можуть бути знайдені з аналізу схем живлення фаз навантаження, наведених для кожного зі станів інвертора на рис. 1.29. Тут показані тільки ті ключі, які перебувають у провідному стані. Напруга ланки постійного струму розподіляється між фазами навантаження (у випадку їхньої симетрії) у такий спосіб: одна третина величини напруги спадає на паралельному з'єднанні фаз навантаження (АД) і дві третини - на послідовно включену фазу. Пояснимо такий розподіл напруг на фазах АД. Електрично АД представляє собою трифазне симетричне навантаження – його обмотки мають однакові повні опори ($Z_A = Z_B = Z_C = Z$). Еквівалентний опір з'єднання обмоток, наприклад, для стану інвертора I такий:

$$Z_{екв} = \frac{Z_A Z_B}{Z_A + Z_B} + Z_C = \frac{ZZ}{Z + Z} + Z = \frac{Z^2}{2Z} + Z = \frac{Z}{2} + Z = \frac{3Z}{2}. \quad (1.14)$$

Струм, який протікає по такому еквівалентному опорі визначається так:

$$i = \frac{2U}{3Z}. \quad (1.15)$$

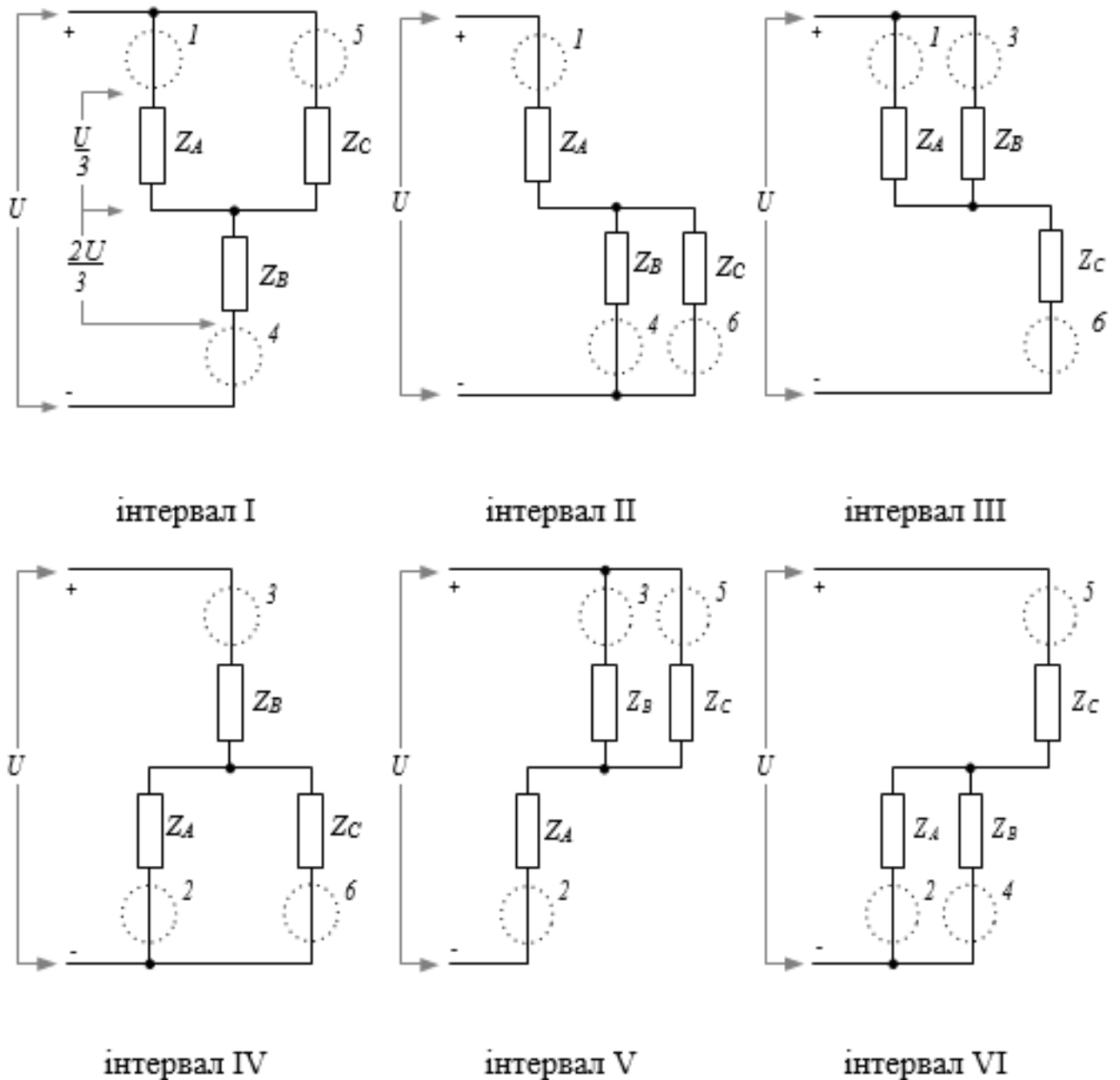


Рис. 1.29. Схеми живлення обмоток АД при їх з'єднанні за схемою „зірка”

Тепер визначимо спад напруги на опорі Z_B , який включений послідовно:

Отже дві третини напруги спадає на послідовно включеній фазі АД (на фазі В), решта напруги (одна третина) – на паралельному з'єднанні фаз А і С двигуна, тобто до кожної паралельно включеної фази прикладається одна третина напруги ланки постійного струму ПЧ.

На рис. 1.30 представлені графіки фазних напруг на виході ПЧ, які відповідають прийнятому закону комутації ключів 1-6.

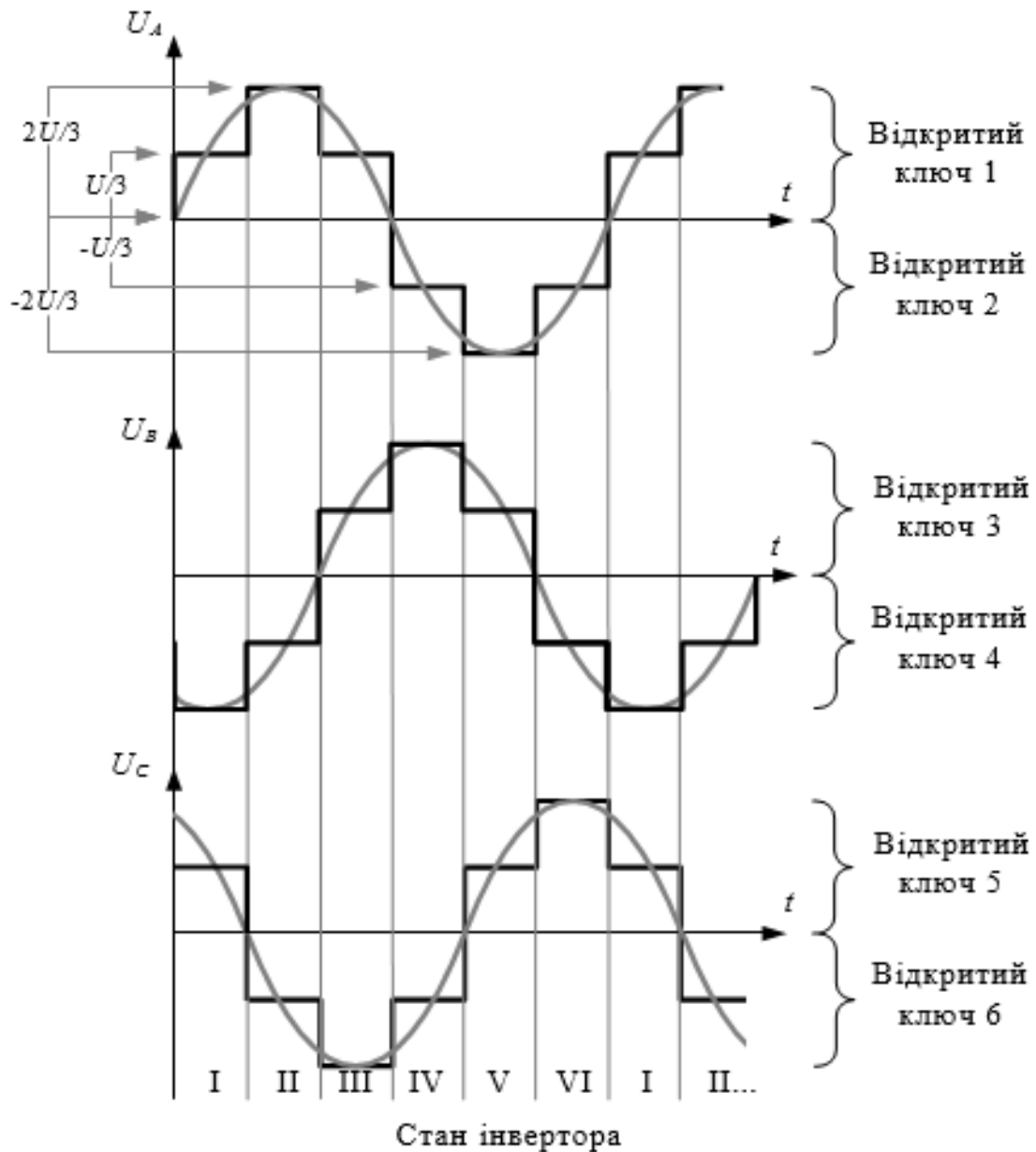


Рис. 1.30. Графіки фазних напруг на виході ПЧ при з'єднанні обмоток АД за схемою „зірка”

Несинусоїдальні графіки фазних напруг можуть бути представлені у вигляді суми окремих гармонічних складових за виключенням гармонік кратних двом та трьом. На рис. 1.30 лінією сірого кольору показана основна гармоніка фазної напруги. Визначити амплітудне та діюче значення основної гармоніки можна використавши відомі формули (1.10), (1.11). Для цього їх необхідно поділити на $\sqrt{3}$. Амплітудні та діючі значення вищих гармонік також необхідно поділити на $\sqrt{3}$.

Отже, доля основної гармоніки у діючому значенні напруги на виході ПЧ при перемиканні обмоток з „трикутника” на „зірку” не зміниться, тобто вираз (1.13) справедливий для будь-якої схеми з’єднання обмоток АД [21].

5.4. Основні функції частотного перетворювача.

Питання про необхідність тих або інших функцій ПЧ сьогодні вкрай актуальне оскільки щороку на ринку з’являються нові вироби з більшими можливостями. Складно зрозуміти, який набір функцій зможе задовольнити потреби того або іншого технологічного процесу. Розглянемо основні функції ПЧ, пропоновані виробниками даної техніки. Існують певні відмінності між вбудованими й додатковими функціями ПЧ. Відомо, що частина функцій, як правило, входить у стандартне виконання ПЧ. Вартість цих функцій закладена в ціну виробу. У даному пункті розглянемо базові функції ПЧ. Зазначимо, що додаткові опції і пристрої ПЧ, наявність яких визначається з врахування конкретних технологічних процесів, дуже широкі. До базових функцій ПЧ відноситься [29]:

- реалізація різних методів керування електродвигуном (векторне та скалярне). Скалярне керування найпоширеніше й максимально задовольняє вимогам таких механізмів, як насоси, вентилятори, компресори, а також таких, для яких важливо підтримувати швидкість обертання або який-небудь технологічний параметр. Метод досить простий, але має невеликий діапазон регулювання швидкості. Метод DTC (із прямим керуванням моментом, без установки додаткових датчиків) ефективно використовується при відносно невисоких вимогах до точності підтримки швидкості з діапазоном регулювання швидкості $D=700:1$, тобто для таких механізмів, як поршневі компресори, насоси, піднімальні механізми, конвеєри, дробарки, пилки, міксери тощо;

- ПІД-регулятор. Вбудований регулятор використовується для керування зовнішнім процесом за допомогою сигналу зворотного зв’язку. Сигнал задання може надходити через аналоговий вхід, з панелі керування за допомогою задання або через

послідовний інтерфейс. При цьому вимірюється відхилення величини, яка потребує стабілізації(наприклад, тиск, швидкість, температура тощо), від заданого значення генерується керуючий сигнал. Наявність даного регулятора всередині ПЧ дозволяє спростити систему керування й відмовитися від використання зовнішніх регуляторів (контролерів). Наявність ПІД- регулятора необхідно для таких механізмів, як насоси, верстати, транспортери тощо, тобто там, де потрібна точна підтримкаконтрольованої величини;

- аналогові та цифрові входи і виходи. Аналогові виходи дозволяють більш наочно представити значення якого-небудь параметра. Наприклад, їх часто використовують для відображення на стрілочному вольтметрі частоти обертання двигуна. Аналогові входи дозволяютьподавати сигнали від датчиків прямо в ПЧ, без використання яких- небудь додаткових пристроїв. Як правило, використовуються уніфіковані типи сигналів (0-5 В, 0-10 В, 4-20 мА). Дискретні входи дозволяють керувати ПЧ із кнопок, установлених на лицьовій панелі шафи або з поста керування. Як правило, ці входи використовуються для подачі команд типу „ПУСК”, ”СТОП”, ”РЕВЕРС” або для ступінчастого перемикаання швидкостей двигуна (рис. 1.31).

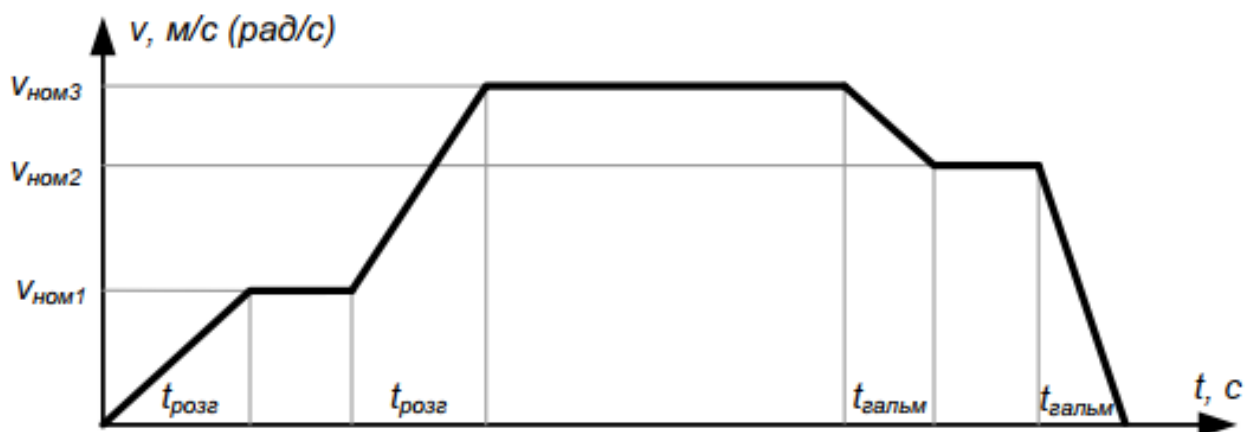


Рис. 1.31. Керування швидкістю двигуна за допомогою дискретних входів

Натискаючи кнопки „ПУСК”, „НОМІНАЛЬНА ШВИДКІСТЬ 1”, „НОМІНАЛЬНА ШВИДКІСТЬ 2”, „НОМІНАЛЬНА ШВИДКІСТЬ 3”, „СТОП”

оператор технологічного процесу може змінювати швидкість обертання АД та зупиняти двигун дистанційно. До дискретних виходів також можна підключати індикаторні лампочки „Аварія”, „Обертання вперед”, „Обертання назад” тощо;

- інтерфейси зв'язку. У більшості сучасних ПЧ передбачена можливість підключення в промислову мережу. Звичайно використовуються протоколи RS-485 (RS-232), Modbus, Profibus, Interbus, CANOpen, DeviceNet. З'єднання перетворювачів у мережу дозволяє побудувати більш складну систему автоматичного керування технологічними процесами з використанням контролерів і промислових комп'ютерів;

- моніторинг навантаження (захист двигуна від механічного перевантаження/недовантаження) дозволяє використовувати ПЧ як пристрій для контролю навантаження і захисту двигуна від механічних перевантажень і недовантажень, наприклад, від заклинювання полотна конвеєра, шнекового транспортера, обриву паса вентилятора, „сухої” роботи насоса тощо. З появою неномінального навантаження двигуна ПЧ може зупинити двигун і здійснити затримку перед повторним включенням або подати аварійний сигнал. Використання цієї функції дозволяє уникнути дорогої установки додаткових датчиків (оскільки для останніх потрібна установка безпосередньо в технологічний процес). Ця функція особливо необхідна для насосів, кранів, змішувачів, гвинтових конвеєрів, стрічкових конвеєрів, міксерів, дробарок тощо;

- взаємодія із системою автоматизації верхнього рівня. Здійснюється за принципом „ведучий - ведений” (Master - Slave), причому ПЧ виступає в ролі веденого пристрою. Програмне забезпечення реалізує необхідний протокол обміну, забезпечує прийом і виконання команд керування, а також видачу необхідної інформації про поточний режим роботи, стан датчиків і параметрів ПЧ. У випадку двопроцесорної системи забезпечується можливість спільної роботи основного контролера ПЧ і контролера пульта керування;

- діагностика апаратури і самодіагностика. Діагностика полягає у визначенні працездатності різних модулів, що входять до складу ПЧ (як силових, так і керуючих)

і підключеного електродвигуна. Крім того, проводиться контроль цілісності програми й даних, які збуригаються в енергонезалежній пам'яті;

- реалізація захисних функцій. Сучасні ПЧ реалізують максимальний струмовий захист, захист від перегріву двигуна і перетворювача, від перевантаження, надмірних відхилень напруги живлення, обриву фази, міжфазного короткого замикання, замикання фази на землю й помилок зв'язку. Коректний вихід зі стану аварії можливий, тільки якщо ліквідовані причини її виникнення. Для окремих видів аварій (наприклад, провалу напруги в мережі, аварії зв'язку) система в стані самостійно відстежити можливість продовження роботи. Відновлення працездатності системи після інших аварій вимагає втручання обслуговуючого персоналу;

- збереження інформації про режими та тривалість роботи, періодичність включення ПЧ, ведення журналу збоїв і аварій, що відбулися. Це дозволяє проаналізувати ефективність використання ПЧ й полегшує пошук причин збоїв у роботі обладнання;

- плавний пуск і зупинка двигуна з вибором форми кривої зміни швидкості (звичайно використовують лінійну, S- і U-подібну характеристики зміни швидкості) і роздільним налаштуванням часу розгону і гальмування (у межах від 0,1 с до 9999 с з дискретністю 0,1 с) з автоматичною корекцією прискорення у випадку перевищення допустимого моменту (ця опція дозволяє задавати мінімальну тривалість розгону та гальмування без необхідності перевірки умови перевищення максимального струму ПЧ. На рис. 1.32 показані різні варіанти графіків функції зміни швидкості двигуна.

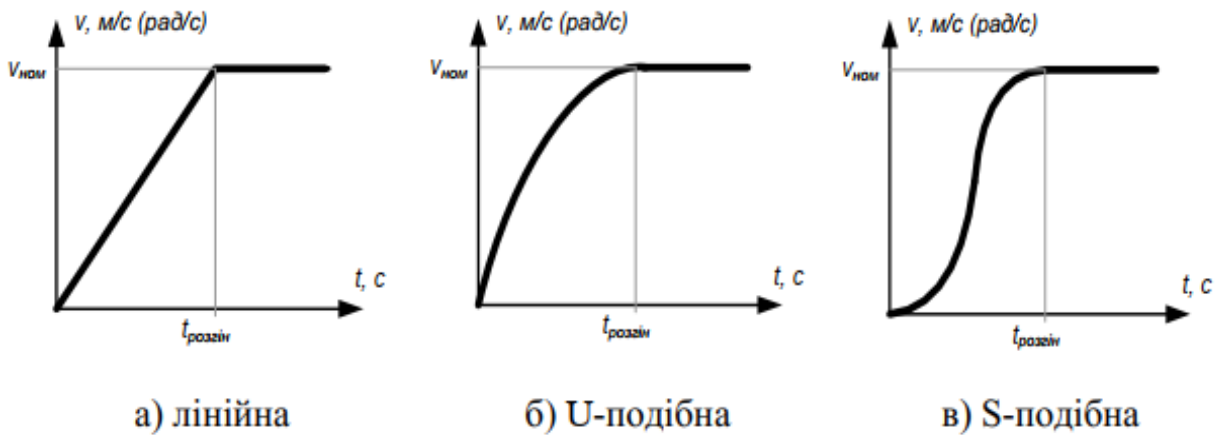


Рис. 1.32. Діаграми зміни швидкості двигуна при різних характеристиках розгону

У випадку якщо таке перевищення має місце ПЧ самостійно збільшує тривалість розгону/гальмування АД);

- режим „підхоплення” електродвигуна, використовуваний при включенні ПЧ на обертовий двигун (наприклад, після короткочасного провалу напруги мережі живлення). Ця функція дозволяє зменшити стрибки струму і напруги при пуску двигуна у момент „підхоплення”. Зменшується також початковий (пусковий) момент АД. Реалізація цієї функції полягає у тому, що у момент запуску ПЧ „підбирає” частоту з якою обертається АД;

- режим гальмування (на вибігу, частотне гальмування, гальмування постійним струмом). Найпростіший тип гальмування двигуна – на вибігу – відбувається від дії моментів опору у приводі та робочій машині. При цьому ПЧ не керує двигуном. Частотне гальмування АД полягає у поступовому зменшенні частоти напруги живлення АД (рекуперативне гальмування). Гальмування постійним струмом (динамічне гальмування) часто використовується для „догальмовування” двигуна на низькій швидкості;

- пропуск частот, при яких робота електропривода небажана, наприклад, через ризик виникнення механічних резонансів. Це особливо важливо для приводів відцентрових насосів і вентиляторів, в яких явище резонансу виникає особливо часто.

Графік зміни частоти ПЧ представлений на рис. 1.33 ілюструє пропускання „вікон” при розгоні двигуна. Таких „вікон” може бути декілька, їх ширина, як правило, становить 5 Гц;

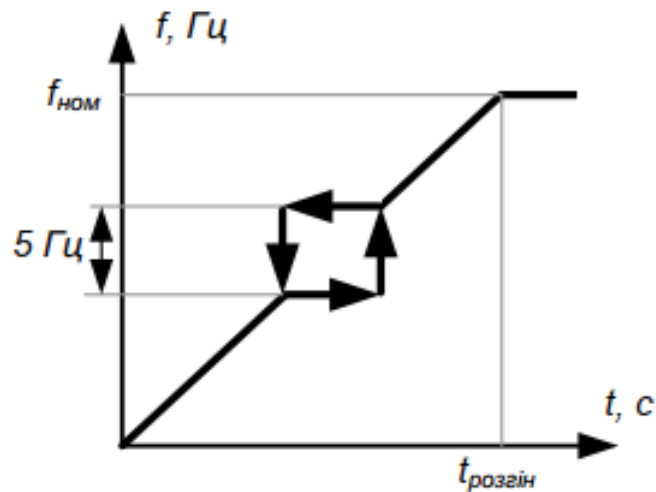


Рис. 1.33. Зміна частоти на виході ПЧ з пропуском „вікна” шириною 5 Гц.

- фіксовані набори параметрів. Велика кількість параметрів дає користувачеві можливість більш гнучко налаштувати ПЧ під необхідні завдання. Цю функцію зручно використовувати, коли потрібно поміняти режим роботи двигуна. Це здійснюється шляхом вибору в меню набору параметрів, які відповідають потрібному режиму роботи.

Тобто один ПЧ може працювати з декількома електродвигунами різної потужності, що функціонують з різними робочими машинами;

- підтримка високого пускового моменту на низьких частотах за рахунок додаткового збільшення напруги;
- автоматичне визначення параметрів підключеного електродвигуна (індуктивність, опір обмоток тощо);
- наявність інтуїтивно-зрозумілого меню, мова меню. Багато виробників найчастіше пропонують уніфіковане англomовне меню. Така додаткова доробка, як введення інших мов у меню (української, російської), дає користувачам можливість

швидше розібратися з усіма налаштуваннями й параметрами, а також краще сприймати показання поточних параметрів на дисплеї.

Окрім основних (базових) функцій ПЧ мають інші функціональні можливості: керування декількома електродвигунами; здійснення роботи ПЧ за розкладом тощо. Насамкінець зазначимо, що більшість функцій ПЧ „скриті” від користувача, оскільки це функції „тонкого” налаштування ПЧ. Для їх активізації необхідно задіяти певну функцію ПЧ, яка дозволяє їх змінювати.

Лекція №

Інформаційна лекція

Кількість годин: 2

Тема: Модулі руху в мехатронних системах

Мета: Ознайомитись із основними визначеннями та поняттями модулів руху в мехатронних системах.

ПЛАН

1. Модулі руху в мехатронних системах.
2. Електромеханічні модулі руху.
3. Мехатронні модулі руху.
4. Інтелектуальні модулі руху.
5. Комп'ютер у мехатронних системах.

Рекомендована література:

1. Gunko I., Hraniak V., Yaropud V., Kupchuk I., Rutkevych V. 2021. Optical sensor of harmful air impurity concentration. *Przegląd Elektrotechniczny*. Vol. 97, №7. P. 76-79.
2. Hrushetskyi S., Yaropud V., Kupchuk I., Semenyshena R. The heap parts movement on the shareboard surface of the potato harvesting machine. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*. 2021. Vol. 14 (63), № 1. P. 127-140.
3. Kovbasa V., Solona O., Deikun V., Kupchuk I. Functions derivation of stresses in the soil and resistance forces to the motion of a plough share for cavity creation. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2021. 83(3). P. 305–318.
4. Kupchuk I., Tokarchuk O., Hontar V., Zamrii M. The kinematic analysis of a vibration crusher for feed grain. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1 (100). С. 32-38.
5. Kuznietsova I., Bandura V., Paziuk V., Tokarchuk O., Kupchuk I. Application of the differential scanning calorimetry method in the study of the tomato fruits drying process. *Agraarteadus*. 2020. Vol. 31, №2. P. 173–180.
6. Sisinni E., Saifullah A., Han S., Jennehag U., Gidlund M. Industrial Internet of Things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Trans. Ind. Informat.*, 2018. vol. 14, №. 11, P. 4724_4734.

7. Solona O., Derevenko I., Kupchuk I. Determination of plasticity for pre-deformed billet. *Solid State Phenomena*. 2019. Vol. 291. P. 110–120.
8. Solona O., Kovbasa V., Kupchuk I. Analytical study of soil strain rate with a ploughshare for uncovering slit. *Agraarteadus*. 2020. Vol. 31, №2. P. 212–218.
9. Solona O.V., Kovbasa V.P., Kupchuk I.M. The contact interaction dynamics of the working tool of the mole plowshare with the soil during forming process a channel for an anti-filtration screen. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. №2 (97). С. 81-89.
10. Yanovych V., Kupchuk. I. Development of movement mathematical model for executive bodies of gyroscope-type mill. *SWorld journal: Technical sciences*. 2017. Issue 13. С. 174-184.
11. Гончарук І. В., Купчук І. М., Солона О. В., Мельник О. С. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Smart IR-Control Robotic Chassis v 1.0» («Robot Smart Control v 1.0») : Свідоцтво № 103284 від 18.03.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 64, 2021.
12. Граняк В.Ф., Купчук І.М., Гонтар В.Г. Метод та засіб прямого автоматизованого вимірювального контролю ізоляції обмоток електричних машин. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. №2 (109). С. 129-137.
13. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Зубар І. В., Онищук Ю. В. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Fuel consumption calculation v.1.0» : Свідоцтво № 103401 від 24.03.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 64, 2021.
14. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Твердохліб І. В., Телекало Н. В., Колесник Т.В., Дідик А. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Optimization of agricultural transportation v. 1.0» («Agro-transportation optimization v. 1.0») : Свідоцтво №107370 від 16.08.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 66, 2021.
15. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Холодюк О. В., Левчук К. І., Гонтарук Я. В., Дідик А. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Harvesting Cereals Optimization v. 1.1.5» («Harvesting cereals v. 1.1.5») : Свідоцтво № 102287 від 03.02.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 63, 2021.(27950)
16. Купчук І.М. Компромісна оптимізація режимних параметрів процесу подрібнення зернової сировини при виробництві етилового спирту. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. №4 (87). С. 91-100.

17. Купчук І.М., Браніцький Ю.Ю. Розробка програмного алгоритму розрахунку кінематичних параметрів робочих органів віяльно-калібрувальної машини. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. №2(97). С. 80-87.

1. Модулі руху в мехатронних системах

Створення мехатронних модулів руху з високими характеристиками є однією з найважливіших завдань автоматизованого машинобудування. З таких модулів, як з функціональних блоків, можна створити складні мехатронні системи.

Введемо основні визначення й поняття [30].

Модуль руху (МР) – конструктивно й функціонально самостійний виріб, що включає в себе механічну (гідравлічну, пневматичну) і електротехнічну частини, який можна використовувати індивідуально й у різних комбінаціях з іншими модулями. Головною відмінністю МР від загальнопромислового приводу є використання вала двигуна в якості одного з елементів механічного перетворювача руху. Прикладами МР є мотор-редуктор, мотор-колесо, мотор-барабан, електрошпіндель.

Мехатронний модуль руху (ММР) – конструктивно й функціонально самостійний виріб, що включає в себе механічну (гідравлічну, пневматичну), електротехнічну, електронну й інформаційну частини, який можна використовувати індивідуально й у різних комбінаціях з іншими модулями. На відміну від модулів руху (МР) у мехатронних модулях руху (ММД) присутнє також електронне й інформаційне обладнання.

Інтелектуальний мехатронний модуль (ІММ) – конструктивно й функціонально самостійний виріб із синергетичною інтеграцією механічної (гідравлічної, пневматичної), електротехнічної й комп'ютерної (мікропроцесорної) частин, який можна використовувати індивідуально й у різних комбінаціях з іншими модулями. Таким чином, у порівнянні із ММР, у конструкцію ІММ додатково включені мікропроцесорне обчислювальне обладнання й силові електронні перетворювачі, а також елементи, що забезпечують інтелектуальне керування.

2.Електромеханічні модулі руху

В 1927 р. фірмою „Бауер” була розроблена принципово нова конструкція – мотор-редуктор, що об’єднала в один компактний конструкційний модуль електродвигун і механічний перетворювач руху (редуктор). З тих пір з’явилася величезна гама різних мотор-редукторів для різних умов застосування, які дозволяють знайти оптимальне вирішення завдання у кожному конкретному випадку. Конструктивне об’єднання електродвигуна й перетворювача руху в єдиний компактний електропривод – мотор-редуктор – має ряд переваг у порівнянні із застарілою системою з’єднання електродвигуна й перетворювача руху через муфту: значне скорочення габаритних розмірів, істотне зменшення кількості приєднувальних деталей, зменшення витрат на установку, налагодження й запуск. Таким чином, мотор-редуктор є в цей час одним з найпоширеніших видів електропривода.

3.Мехатронні модулі руху

Вбудовані в модулі руху (МР) мініатюрні датчики й електронні блоки для обробки їх сигналів перетворюють МР у мехатронні модулі руху (ММР) [30]. Для створення сучасних технологічних машин, призначених для автоматизованого машинобудування, необхідні різноманітні мехатронні модулі руху, що задовольняють ряду вимог: висока точність реалізації рухів, надійність, довговічність, можливість роботи при наявності різних видів збурень і в широкому діапазоні температур навколишнього середовища, а також значно менші масогабаритні показники у порівнянні звичайним електроприводом. Вимоги до приводних зусиль, точності й швидкості виконавчих рухів пов’язані з особливостями технологічної операції, яка обладнується мехатронними модулями руху, а вимога мінімізації його розмірів – необхідністю вбудовування його в технологічну машину. Спроба синтезу мехатронного модуля руху з наявних компонентів, що серійно випускаються, може привести до технічно й економічно неефективного вирішення завдання. Тому більш раціональним є проектування спеціалізованого мехатронного модуля руху, що

найбільш повно відповідає його службовому призначенню. Складність і суперечливість вимог, поставлених до модулів руху, обумовлює доцільність мехатронного підходу до їхнього проектування. Зокрема, принцип синергетичної інтеграції елементів системи приводить до забезпечення бажаного рівня якості модуля за рахунок конструктивного й функціонального взаємопроникнення його компонентів, багато з яких є спеціалізованими й створюються в ході паралельного системного проектування з врахуванням їх наступного ефективного об'єднання. Якщо переважною є вимога забезпечення компактності мехатронного модуля руху, то вона може бути реалізована шляхом використання безконтактних електричних машин і їх інтеграції з перетворювачами руху й інформаційно-вимірювальними елементами. При цьому перетворювачі руху й датчики не є окремим обладнанням, а стають невід'ємними елементами двигуна. Синергетичний ефект досягається також за рахунок виконання деякими компонентами мехатронного модуля руху декількох функцій одночасно. Таке вирішення завдання дозволяє виключити багато механічних інтерфейсів, спростити й здешевити конструкцію, усунути необхідність механічного „узгодження” датчика й двигуна. Мехатронні модулі руху є функціональними „цеглинками”, з яких можна компонувати складні мехатронні системи. Приклади мехатронних модулів руху: мехатронні модулі руху на основі електродвигунів кутового й лінійного руху й різних перетворювачів руху (гвинтових, черв'ячних, планетарних, хвильових тощо), безредукторні мехатронні модулі руху, безредукторні поворотні столи.

4.Інтелектуальні модулі руху

Як відзначалося вище, головною особливістю сучасного етапу розвитку мехатроніки є створення принципово нового покоління модулів –інтелектуальних мехатронних модулів (ІММ) [30]. Розглянемо основні переваги, які дає застосування інтелектуальних мехатронних модулів:

- ▶ здатність ІММ виконувати складні рухи самостійно, без „звертання” до

верхнього рівня керування, що підвищує автономність модулів, гнучкість і живучість мехатронних систем, які працюють у змінних і невизначених умовах зовнішнього середовища;

- ▶ спрощення комунікацій між модулями й центральною системою керування (наприклад, перехід до безпроводних комунікацій), що дозволяє досягти підвищеної перешкодозахищеності мехатронної системи і її здатності до швидкої реконфігурації;

- ▶ підвищення надійності й безпеки мехатронних систем завдяки комп'ютерній діагностиці несправностей і автоматичному захисту в аварійних і позаштатних режимах роботи;

- ▶ створення на основі ІММ розподілених систем керування із застосуванням мережевих методів, апаратно-програмних платформ на базі персональних комп'ютерів і відповідного програмного забезпечення;

- ▶ використання сучасних методів теорії керування (програмних, адаптивних, інтелектуальних, оптимальних) безпосередньо навиконавчому рівні, що суттєво підвищує якість процесів керування;

- ▶ інтелектуалізація силових перетворювачів, що входять до складу ІММ, для реалізації безпосередньо в мехатронному модулі інтелектуальних функцій керування рухом, захисту модуля в аварійних режимах і діагностики несправностей;

- ▶ інтелектуалізація сенсорів для мехатронних модулів дозволяє досягти більш високої точності вимірів, програмним шляхом забезпечивши в самому сенсорному модулі фільтрацію шумів, калібрування, лінеаризацію характеристик „вхід-вихід”, компенсацію гістерезису й дрейфу нуля.

Основним фактором, що стримує використання інтелектуальних мехатронних модулів у серійних виробках, є їхня висока ціна, хоча в останні роки вона постійно знижується. Це обумовлене рядом технологічних факторів:

- ▶ бурхливим розвитком інформаційних технологій, орієнтованих на завдання керування рухом;

- ▶ появою напівпровідникових приладів нового покоління (силових

польових транзисторів, біполярних транзисторів з ізольованим затвором);

▶ переходом на нову елементну базу в системах керування рухом (цифрові сигнальні DSP-процесори і блоки FPGA: Field Programmable Gate Arrays);

▶ розробкою гібридних технологій мехатроніки, що дозволяють вбудовувати електронне й обчислювальне обладнання в механічні вузли.

Інтелектуальний мехатронний модуль складається з наступних основних елементів:

1) електродвигуна (хоча можливе використання приводів і інших типів, наприклад, гідравлічних);

2) механічного перетворювача;

3) датчиків зворотного зв'язку й сенсорного обладнання;

4) керуючого контролера;

5) силового перетворювача;

6) обладнання зв'язку.

У сучасних ІММ використовують різні типи електродвигунів: кутового й лінійного руху, змінного й постійного струму, колекторні й вентильні, безперервного руху й крокові.

У якості механічних перетворювачів руху застосовують зубчасті, гвинтові та інші передачі. У конструкціях деяких ІММ, побудованих на базі високомоментних двигунів, перетворювачі руху відсутні. В інтелектуальних мехатронних модулях використовують різні датчики положення й швидкості (енкодери, обертові трансформатори, тахогенератори), датчики струму, моменту, температури, вібрації тощо, які передають інформацію в обладнання комп'ютерного керування про фактичний стан підсистем модуля.

Вбудовані керуючі контролери, реалізовані на сучасній елементній базі, дозволяють одержати компактні й надійні мехатронні вироби, що володіють інтелектуальними функціями, і будувати на їхній основі багатокоординатні мехатронні системи з децентралізованим керуванням. Це дозволяє створити якісно

нові системи керування, що володіють принципово кращими характеристиками по швидкодії, точності й функціональній гнучкості, аніж вже відомі. Принципово важливо, щоб усі перераховані елементи були конструктивно об'єднані розроблювачем у єдиному корпусі.

При цьому обладнання зв'язку стають внутрішніми блоками, недоступними для користувача. В цілому можна виділити три напрямки інтелектуалізації мехатронних модулів руху:

- ▶ розвиток інтегрованих інтерфейсів, що зв'язують керуючий контролер з комп'ютером верхнього рівня в єдиний апаратно-програмний керуючий комплекс;
- ▶ створення інтелектуальних силових модулів керування шляхом інтеграції керуючих контролерів і силових перетворювачів;
- ▶ розробка інтелектуальних сенсорів мехатронних модулів, які додатково до звичайних вимірювальних функцій здійснюють комп'ютерну обробку й перетворення сигналів по гнучких програмах.

5. Комп'ютер у мехатронних системах

Незважаючи на існуючі традиції застосування ПЛК для вирішення проблем у мехатроніці, багато завдань набагато ефективніше вирішуються за допомогою персональних комп'ютерів. Комп'ютер може бути використаний також як пульт оператора (диспетчера) або виконувати одночасно функції контролера й пульта оператора.

У завданнях мехатроніки широкозастосовують як офісні, так і промислові комп'ютери [31].

Наприклад, промислові комп'ютери суттєво відрізняються від офісних за конструктивними ознаками, однак використовують ті ж процесори та архітектуру. Основні відмінності є такі:

- ▶ роз'єми для з'ємних плат устанавлюються на пасивній об'єднаній панелі, а не на материнській платі;

- ▶ для з'ємних плат використовуються надійний штирьовий роз'єм;
- ▶ для зміни плат не потрібно розкривати корпус;
- ▶ використовуються спеціалізовані промислові комп'ютерні шини

CompactPCI, COMExpress, VME та інші;

- ▶ замість жорсткого диска може бути використана флеш-пам'ять;
- ▶ наявність сторожового таймера;
- ▶ застосування вентиляторів зі змінним фільтром або відсутність

вентиляторів;

- ▶ міцна несуча конструкція з надійним кріпленням плат пружними планками із гвинтовими затискачами;

- ▶ застосування блоків живлення підвищеної надійності, із захистом від коротких замикань по виходу й з розширеним діапазоном мережних напруг (від 100 до 250 В);

- ▶ резервування блоків живлення;

- ▶ наявність енергонезалежної оперативної пам'яті (з акумуляторним живленням), яка зберігає дані при збоях або зникненні живлення;

Лекція №
Інформаційна лекція
Кількість годин: 2

**Тема: ПЕРВИННІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ
АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ТА ЇХ КЛАСИФІКАЦІЯ**

Мета: Ознайомитись із основними визначеннями та поняттями первинних вимірювальних перетворювачів автоматизованих систем та їх класифікацією.

ПЛАН

1. Особливості вимірювання неелектричних величин.
2. Узагальнена структурна схема.
3. Параметричні вимірювальні перетворювачі.
4. Принцип дії перетворювачів кутових переміщень.

Швидкий розвиток автоматизованих систем контролю різних технологічних процесів, машин і механізмів, впровадження гнучких автоматизованих виробництв поставили невідкладне завдання - забезпечити такі системи вимірювальними перетворювачами неелектричних величин.

1. Особливості вимірювання неелектричних величин.

До сенсорів, що діють у найнесприятливіших умовах контрольованого середовища і об'єкта, висуваються різні, часто суперечливі вимоги: довгочасна стабільність, висока надійність, мала похибка вимірювання, стійкість проти дії впливних величин факторів, високі статична і динамічна чутливості, незначне енергоспоживання, інформаційна, конструктивна і технологічна сумісності із мікропроцесорними системами, невисока вартість в умовах серійного виробництва.

Розширення промислових процесів, що проходять в екстремальних умовах (високі і наднизькі температури, потужні електромагнітні поля, високий рівень радіації тощо), висувають перед сенсорами вимогу збереження високих метрологічних характеристик у межах жорстких умов експлуатації.

У той же час в сучасній промисловості, науці, енергетиці, на транспорті та в інших галузях народного господарства, має місце надзвичайно швидке зростання кількості фізичних величин, які необхідно вимірювати (контролювати). На сучасному етапі необхідно (як свідчать роботи зі складання кадастру величин і параметрів, що підлягають вимірюванню) вміти вимірювати чи контролювати понад 2000 величин, а існуючі методи і засоби дають можливість вимірювати лише 400-500 величин. При цьому кількість неелектричних величин, які необхідно вимірювати,

значно перевищує кількість вимірюваних електричних і магнітних величин.

Сучасні засоби вимірювання і системи складаються з певної кількості окремих вимірювальних перетворювачів. Існує безліч різновидів ЗВ, а кількість типів вимірювальних перетворювачів дещо обмежена. Ця тенденція зберігається і буде розвиватися в майбутньому. Однак процентне співвідношення при розподілі вимірювань різних фізичних величин буде змінюватися.

Таким чином, широкий спектр вимірюваних неелектричних величин, недостатнє вивчення методів їх вимірювання, метрологічна незабезпеченість визначають особливості вимірювання таких величин.

При вимірюванні неелектричних величин широко застосовуються електричні методи вимірювання, тобто виконується «електрифікація» таких вимірювань – перетворення неелектричної величини в електричну.

Це зумовлює наявність вимірювального перетворювача в структурі засобу вимірювання неелектричних величин, що здійснює попереднє перетворення досліджуваної неелектричної величини у функціонально пов'язану з нею електричну величину.

Переважне використання електричних методів вимірювання неелектричних величин зумовлюється можливістю вимірювання на значній відстані від об'єкта дослідження, зручністю передачі й обробки електричних сигналів, можливістю реєстрації величин, що змінюються як повільно, так і швидко, достатнім вивченням методів і засобів вимірювання електричних величин.

2. Узагальнена структурна схема.

У загальному випадку прилади для вимірювання неелектричних величин конструктивно найчастіше складаються з двох самостійних вузлів:

- сенсора;
- і вторинного вимірювального приладу,

які можуть розміщуватися на значній відстані один від одного і з'єднуватися лініями зв'язку.

Розглянемо узагальнену структурну схему засобу вимірювання неелектричних величин на прикладі засобу вимірювання тиску (рис.6.1, а).

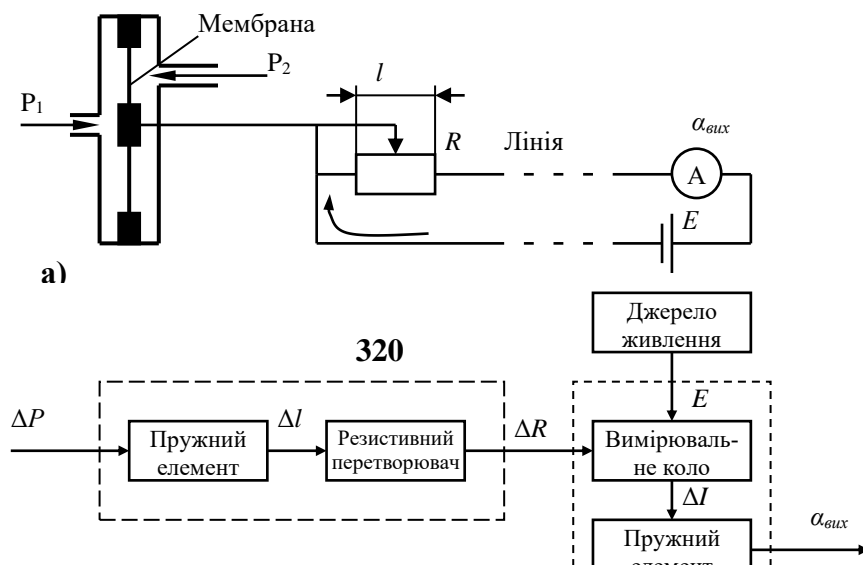


Рисунок 6.1

Деформація пружного елемента (мембрани) використовується для переміщення повзуна потенціометра. Резистивний потенціометр перетворює лінійне переміщення l у відповідну зміну опору ΔR , яка змінює струм на ΔI у лінії зв'язку, що фіксується амперметром (рис.6.1, б). Послідовність вимірювальних перетворювань у приладі можна подати у вигляді:

$$\Delta R \rightarrow \Delta I \rightarrow \Delta R \rightarrow \Delta I \rightarrow \Delta \alpha_{\text{вих}} .$$

Наведена послідовність перетворень дозволяє наочніше виділити основні елементи ЗВ неелектричних величин.

Основною статичною характеристикою первинних перетворювачів неелектричних величин є градуовальна. Для більшості перетворювачів неелектричних величин функція перетворення суттєво нелінійна. Тому при їх використанні з електричними вимірювальними приладами, які мають лінійну статичну характеристику, виникає необхідність лінеаризації функції перетворення сенсора.

Для компенсації впливу дестабілізуювальних факторів надзвичайно ефективно використання диференціальних схем. У цих перетворювачах використовуються два чутливих елементи, в одному з яких під дією вимірюваної величини вихідна величина збільшується, а в іншому - зменшується. Результувальний вихідний сигнал формується як різниця вихідних сигналів чутливих елементів. При цьому внаслідок впливу зовнішніх факторів зміни вихідних сигналів взаємно компенсуються.

При використанні сенсорів у вимірювально-інформаційних системах застосовують уніфікацію їх вихідних сигналів. Найбільш поширені уніфіковані сигнали у вигляді:

- постійного струму 0...5, 0...20, 4...20 мА;
- напруги 0...100 мВ, 0...10 В, ± 5 В;
- частоти 4...8 кГц.

Залежно від типу первинного вимірювального перетворювача і вигляду його вихідного інформативного параметра використовуються ті чи інші технічні засоби електровимірювальних приладів. У більшості випа-

дків апаратна частина вторинних приладів для вимірювання неелектричних величин істотно не відрізняється від приладів для вимірювання електричних величин. Суттєвою відмінністю є тільки алгоритм роботи приладу, який визначається алгоритмом виконання вимірювальної процедури тієї чи іншої фізичної величини.

Оскільки вихідними інформативними параметрами перетворювачів є напруга, струм, опір, ємність або індуктивність, то вторинними вимірювальними приладами є прилади для вимірювання відповідних електричних величин. При цьому, як правило, вторинні прилади проградуировані з урахуванням функції перетворення сенсора в одиницях вимірюваної неелектричної величини. В цих ЗВ передбачена корекція неінформативних параметрів, що впливають як на вимірювальний перетворювач, так і на лінію зв'язку.

Оскільки основним елементом ЗВ неелектричних величин є різні вимірювальні перетворювачі, розглянемо більш детально принципи їх побудови. Залежно від енергетичних властивостей вихідного сигналу і способу його дальшого використання первинні вимірювальні перетворювачі поділяються на дві великі групи: параметричні і генераторні.

3. Параметричні вимірювальні перетворювачі.

У параметричних вимірювальних перетворювачах неелектрична величина перетворюється у приріст параметра електричного кола (R , L , C , M), тому особливістю роботи таких перетворювачів є потреба в додатковому джерелі енергії.

Коротко розглянемо основні типи параметричних вимірювальних перетворювачів.

Резистивні перетворювачі

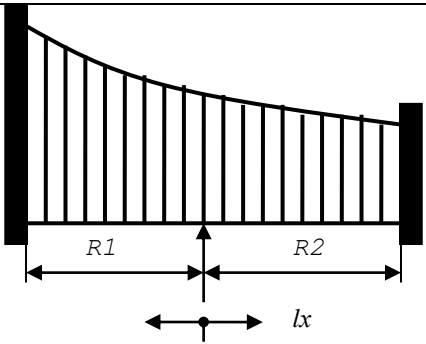
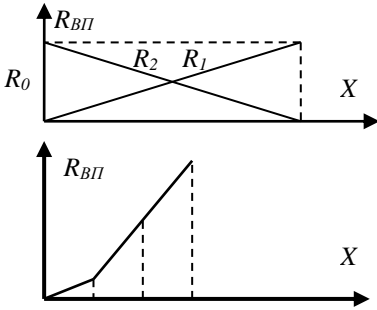
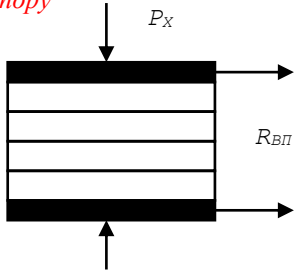
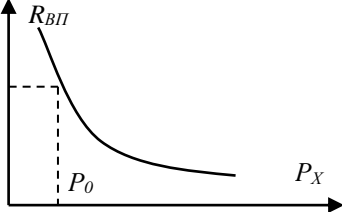
Параметричні перетворювачі, в яких вихідною величиною є приріст електричного опору, називаються резистивними.

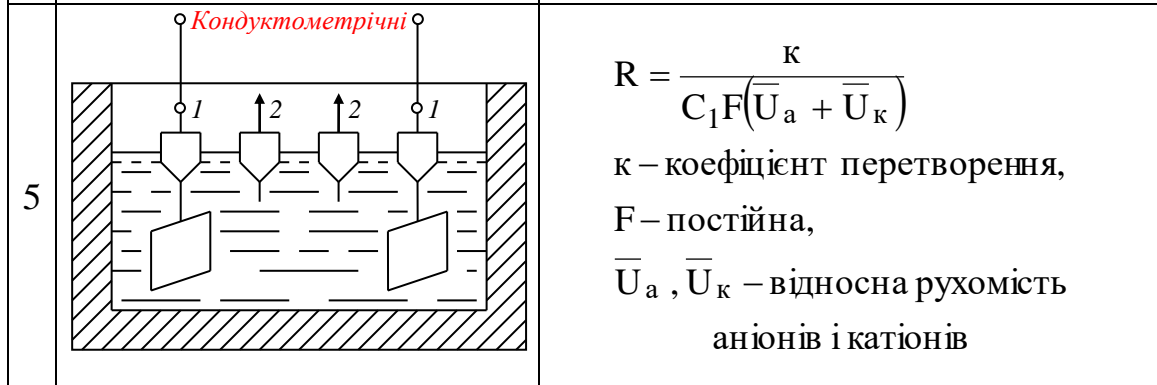
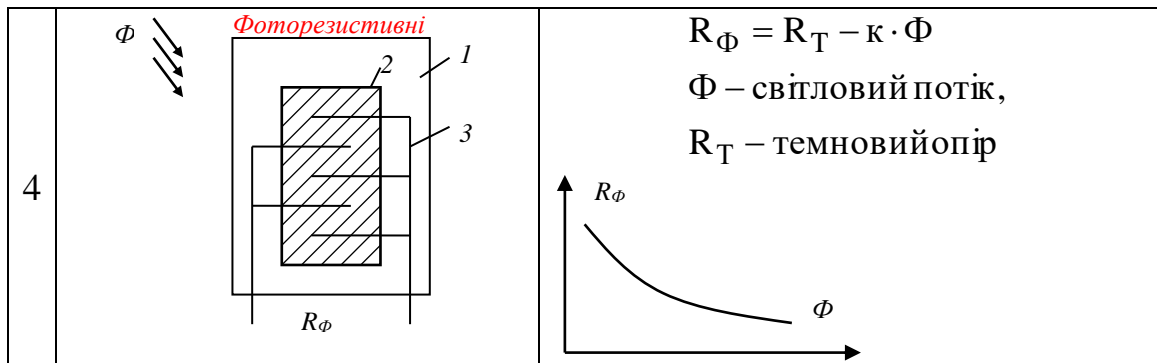
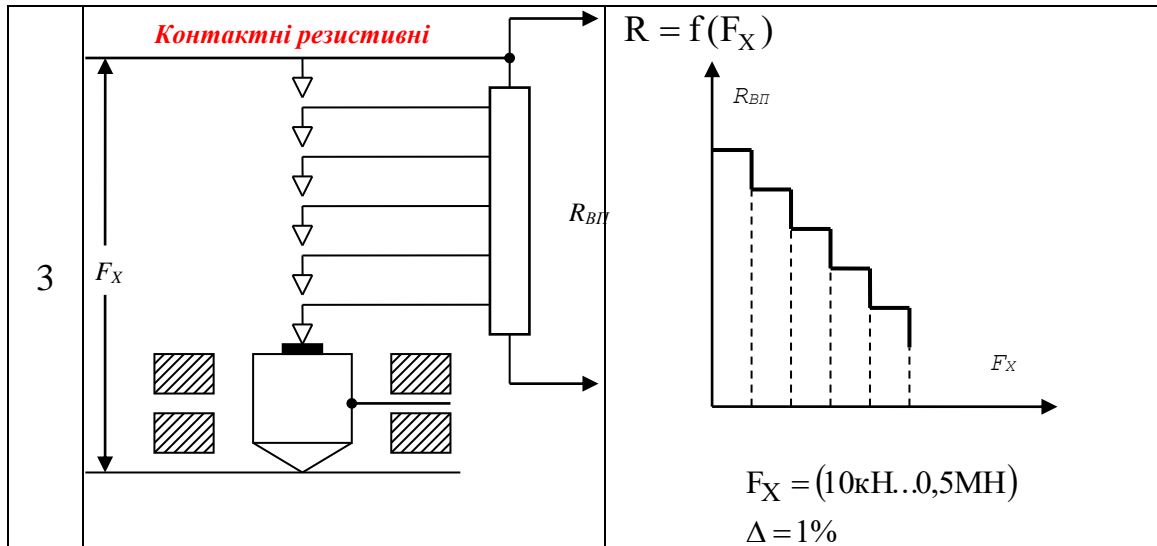
До цієї групи належать реостатні перетворювачі, перетворювачі контактного опору, контактні резистивні перетворювачі, фоторезистивні, кондуктометричні (резистивні електролітичні) перетворювачі, термо- і тензорезистори, магніторезистивні. Основні характеристики цих перетворювачів наведені у табл.6.1. Якщо вхідною величиною є переміщення (лінійне чи кутове), використовують реостатні перетворювачі (схема 1 у табл.6.1), в яких повзун реостата переміщується відповідно до значень вимірюваної величини. Перетворювач складається з обмотки, намотаної на каркас, і рухомої щітки. Опір майже всіх реостатних перетворювачів змінюється не плавно, а ступінчасто. Це призводить до виникнення похибки дискретності Δ_d , яка зменшується із збільшенням кількості витків на одиницю вимірюваного переміщення.

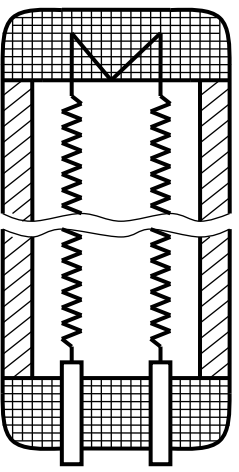
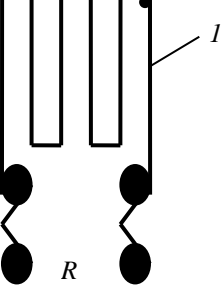
Перетворювачі контактного опору (схема 2 у табл.6.1) побудовані

на залежності перехідного опору між стиковими електропровідними елементами від зусиль їх стискання або деформації. Як електропровідні елементи для таких перетворювачів використовують, наприклад, електропровідний папір, гуму та інші електропровідні матеріали з питомим об'ємним опором $\rho=10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, оскільки перехідний опір набагато більший за об'ємний опір контактувальних елементів. Одним з перших сенсорів цього типу є вугільний мікрофон.

Таблиця 6.1 - Основні різновиди резистивних перетворювачів

Схема	Функціональна схема перетворювача	Рівняння перетворення, метрологічні характеристики
1	<p style="text-align: center;">2</p> 	<p style="text-align: center;">3</p> $R_{ВП} = f(X)$  $\Delta_d = \frac{r}{2R} \cdot \frac{1}{2W},$ <p>r – витковий опір, W – число витків $l_{\max} \leq 1\text{м}$</p>
2	<p><i>Контактного опору</i></p> 	$R = R_0 \left(1 + \frac{k}{P_X} \right),$ <p>k – коефіцієнт перетворення.</p> 



6	<p style="text-align: center;"><i>Терморезистивні</i></p> 	$R_T = R_0(1 + \alpha \cdot T)$ <p>α – температурний коефіцієнт опору</p>
7	<p style="text-align: center;"><i>Тензорезистивні</i></p> 	$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} (1 + 2 \cdot \mu) + \frac{\Delta \rho}{\rho}$ <p>R – опір тензорезистора, l – довжина дроту, ρ – питомий опір матеріалу, μ – коефіцієнт Пуассона.</p>

Контактні резистивні перетворювачі (схема 3 у табл.6.1) використовують у тих випадках, коли немає необхідності в неперервному вимірюванні неелектричної величини, а потрібно визначити тільки досягнення заданого рівня. Вони дешеві і прості в конструктивному виконанні. Недоліком їх є спрацювання контактів, ненадійність роботи при наявності вібрацій.

Фоторезистивні перетворювачі. В основу побудови фоторезистивних перетворювачів покладено явище внутрішнього фотоефекту.

Суть внутрішнього фотоефекту полягає у переміщенні звільнених під дією світлового потоку носіїв заряду (електронів і дірок) усередині твердого тіла (без виходу назовні), що веде до зміни електропровідності тіла або виникнення фото-ЕРС.

Це явище покладено в основу побудови фоторезисторів. Рівняння перетворення фоторезисторів має вигляд

$$G = \Phi a,$$

де G – електропровідність; Φ – світловий потік; a – коефіцієнт нелінійності енергетичної характеристики фотопровідності.

Конструктивно фоторезистори - це нанесений на скляну пластину 1 площею від одиниць до сотень квадратних міліметрів шар напівпровідника 2 з електродами 3, що входять у нього (схема 4 у табл.6.1). Ви-

сока чутливість, можливість одержання значних фотострумів без застосування додаткових підсилювачів і практично необмежений строк служби визначають основну перевагу фоторезисторів. До недоліків цих перетворювачів слід віднести їх інерційність.

Електрохімічні резистивні перетворювачі (їх називають також кондуктометричними) базуються на використанні залежності їх опору від складу і концентрації електроліту:

$$R = \frac{K_{\Gamma}}{\gamma},$$

де K_{Γ} - коефіцієнт перетворення, що залежить від співвідношення геометричних розмірів і визначається експериментально шляхом використання стандартних розчинів із відомими значеннями провідності γ .

Такі перетворювачі використовуються головним чином для вимірювання питомої електропровідності електролітів, за якою визначають концентрацію. Найпростіший контактний кондуктометричний перетворювач містить два електроди, опущених у досліджуваний електроліт. Опір між електродами залежить від концентрації (провідності) розчину.

Для зменшення похибки від поляризації і забруднення електродів іноді застосовують чотириелектродні перетворювачі (схема 5 у табл.6.1) з двома струмовими 1 і двома потенціальними 2 виводами, з яких знімається вимірювана напруга. Як правило, кондуктометричні перетворювачі працюють на змінному струмі, оскільки електроліз розчину проходить на постійному струмі, що призводить до значних похибок вимірювання. Крім визначення концентрації електролітів резистивні електрохімічні перетворювачі застосовуються для вимірювання механічних переміщень і деформацій, вологості газів, деревини тощо.

Терморезистори. Для вимірювання температури в різних галузях народного господарства широко застосовують терморезистори (термометри опору).

Принцип дії термометрів опору засновано на властивості речовини змінювати свій опір при зміні температури.

Для вимірювання температури термометр опору необхідно помістити в середовище, температуру якого необхідно виміряти.

Термометри опору (ТО) виготовляють у вигляді обмотки з тонкою проволоки на спеціальному каркасі із ізоляційного матеріалу. Цю обмотку прийнято називати чутливим елементом. Для захисту чутливого елемента від механічних пошкоджень чутливий елемент розміщують в спеціальній гільзі (схема 6, табл.6.1).

Для вимірювання температур в широкому діапазоні застосовують платинові термометри опору. Вони є найбільш високоточними вимірювальними перетворювачами температури.

В діапазоні температур від 0⁰С до 600⁰С інтерполяційне рівняння перетворення платиного термометра опору має вигляд

$$R_T = R_0 \cdot (1 + AT + BT^2),$$

де R_0 – опір того ж чутливого елемента при температурі 0⁰С, Ом.

Для інтервалу температур від – 180⁰С до 0⁰С інтерполяційне рівняння перетворення є таким

$$R_T = R_0 [1 + AT + BT^2 + CT^3 (T - 100)],$$

де А, В, С – постійні коефіцієнти, які визначаються в точках кипіння води, сірки, кисню.

Основними нормованими характеристиками термоперетворювачів опору є:

- R_0 номінальне значення опору при 0⁰С ;
- R_{100} / R_0 номінальне значення відношення опору перетворювача при 100⁰С R_{100} до опору R_0 .

Функція перетворення, або номінальна статична характеристика перетворювача (НСХП) описується ще таким рівнянням перетворення

$$R_T = R_0 (1 + \alpha \cdot T),$$

де $\alpha = 4.28 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ – температурний коефіцієнт опору.

Термометри опору випускаються двох типів: термоопори платинові (ТОП) і термоопори мідні (ТОМ), в яких як вимірювальні перетворювачі використовують чутливі елементи відповідно з платини і міді.

Платинові термоперетворювачі опору випускаються із значеннями опору R_0 , що дорівнюють

1, 10, 50, 100 і 500 Ом,

яким відповідають НСХП

1П, 10П, 50П, 100П і 500П,

а мідні – із значеннями опору R_0

10, 50, 100 Ом,

яким відповідають НСХП

10М, 50М і 100М.

Технічні характеристики термометрів опору наведено в табл.6.2.

Таблиця 6.2 – Технічні характеристики термометрів опору

Тип ТО	Матеріал чутливого елемента	Номінальне значення опору R_0 , Ом	Номінальне значення відношення опорів	Умовне позначення НСХП	Діапазон температур, ⁰ С
Плати-	Платина	1	1,3910	1П	0...1100
		10		10П	200...+750
		50		50П	250...+1000

новий		100		100П	260...+1000
		500		500П	260...+400
Мідний	Мідь	10	1,4280	10М	50...+200
		50		50М	50...+200
		100		100М	200...+200

Тензометричні перетворювачі. В основу принципу їх дії покладена зміна активного опору $R = \rho \frac{l}{S}$ провідника при його деформації. Широко застосовувані нині наклеювані дотові тензорезистори (схема 7 у табл.6.1) - це тонкий зигзагоподібний дріт 1 (тензочутливий елемент), який наклеюється на еластичну смужку (підкладинку). Тензорезистори наклеюються на досліджуваний об'єкт так, щоб вони разом із ним зазнавали деформації стискання або розтягування.

Принципово нові можливості у розвитку тензорезисторних сенсорів (ТС) на основі напівпровідникових чутливих елементів відкрилися з розробкою і дослідженням структур типу "кремній на діелектрику". Із них найбільш вивчена і технологічно освоєна структура "кремній на сапфірі". Це тонка монокристалічна плівка кремнію, вирощена на монокристалічній сапфіровій підкладинці з певною кристалографічною орієнтацією. Такі перетворювачі мають хороші пружні властивості, малу похибку гістерезису, широкий діапазон вимірюваних деформацій.

В основу принципу дії ТС покладено тензоефект у напівпровідниках. Чутливим елементом ТС є сапфірова мембрана з кремнієвими тензорезисторами R (рис.6.2).

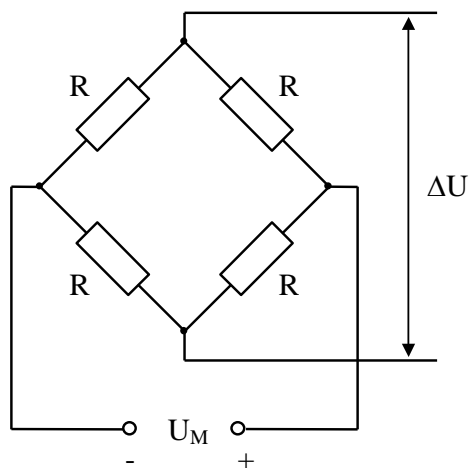
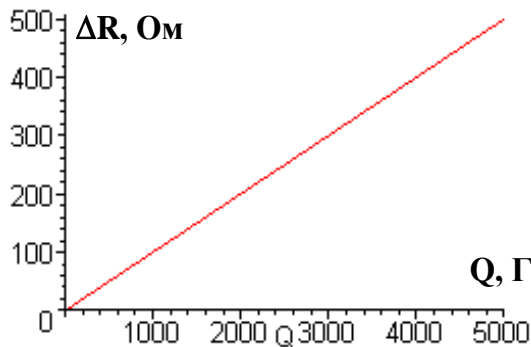


Рисунок 6.2

Суть тензоефекту полягає в зміні напівпровідників при їхній механічній деформації активного опору провідників і.

Під дією інформативного параметра (зусилля Q) мембрана деформується, що, в свою чергу, викликає зміну опору ΔR мостової схеми

тензорезисторів (рис.6.3) $\Delta R = \frac{Q}{S_T}$, де S_T - чутливість тензорезистивного перетворювача [Г/Ом].



Зміна опору приводить до зміни вихідної напруги ΔU тензомоста. Якщо опори всіх чотирьох однакові, то

$$U_1 = U_2 = \frac{U_M}{2},$$

де $U_M = I_M \cdot R$ - напруга, якою живиться мостова схема ТС; I_M - струм джерела живлення

[$I = 2 \text{ mA}$];

Рисунок 6.3

R - опір мостової схеми тензорезисторів [$R = 3.25 \pm 0.25$] кОм.

Коли вхідна величина Q викликає зміну опору ΔR тензорезистивного сенсора, напруга $U_1 \neq U_2$. Тому вихідна напруга тензомоста складає

$$\Delta U = U_1 - U_2 = U_M \cdot \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R}$$

або для малих опорів

$$\Delta U = U_M \cdot \frac{\Delta R}{4R} = \frac{1}{4} \cdot \frac{I_M \cdot Q}{S_T}$$

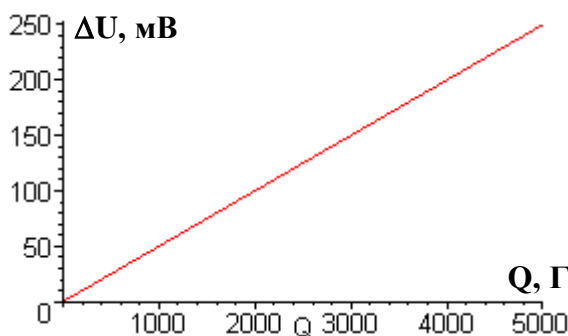


Рисунок 6.4

Тому для даного випадку вихідна напруга ΔU мостової схеми також змінюється в діапазоні $\Delta U \in [260 \div 460] \text{ мВ}$

(рис.6.4).

Для підсилення малих різниць напруги на фоні синфазної за-

вади, яка може бути більшою за значення ΔU , застосовують вимірювальний підсилювач. Після підсилення відбувається аналого-цифрове перетворення.

Тензорезистори всіх типів широко застосовуються при вимірюванні деформацій, зусиль, тисків, моментів тощо.

Магніторезистивні перетворювачі

Магніторезистивний ефект, тобто ефект збільшення електричного опору гальванічного елемента під дією магнітного поля, є результатом викривлення внаслідок цієї дії траєкторії руху носіїв заряду.

Кількісно магніторезистивний ефект проявляється по-різному і залежить від матеріалу гальванорезистивного елемента та його форми. В провідникових матеріалах гальванорезистивний ефект проявляється слабо. Значно сильніше він проявляється в напівпровідниках.

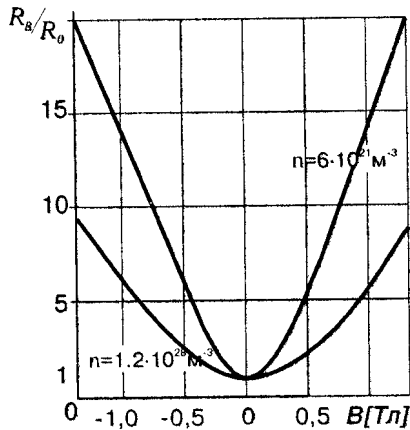


Рисунок 6.5

На рис.6.5 наведена функція перетворення $R_B / R_0 = F(B)$ для двох магніторезисторів з різними концентраціями носіїв ($n=6 \cdot 10^{21} \text{ м}^3$ та $1,2 \cdot 10^{28} \text{ м}^3$). З достатньою для практики точністю залежність опору магніторезистора R_B індукції B (рис.6.5)

може бути записана у вигляді

$$R_B = R_0 (1 + A\mu^2 B^2),$$

де R_0 — опір магніторезистора при відсутності магнітного поля, A — коефіцієнт, що залежить від форми магніторезистора, μ - рухливість носіїв заряду, значення якої обернено пропорційне питомому електричному опором та концентрації n електронів (носіїв).

Найбільшу відносну зміну опору в магнітному полі мають магніторезистори, виконанні у формі так званого диска Корбіно. Однак цей диск має дуже малий опір (від кількох десятків ома до одиниць ома), що зумовлено не тільки формою перетворювача, але й властивостями матеріалів, що використовуються для магніторезистивних перетворювачів, а саме високою рухливістю носіїв струму (малим питомим електричним опором). Крім цього, навантажувальна спроможність диска Корбіно за струмом сильно обмежена. Це пояснюється високою густиною струму в зоні центрального електрода. Функція перетворення такої форми магніторезистивного перетворювача має квадратичний характер.

У магніторезисторах прямокутної форми магніторезистивний ефект проявляється слабше, ніж у перетворювачах у формі диска Корбіно. Однак вони мають значні переваги, зокрема залежність $R_B = f(B)$ має квадратичний характер тільки в слабких магнітних полях і практично лінійна в полях, починаючи з (0,3...0,4)Тл. Електричний

опір магніторезистора у формі прямокутника також невеликий і залежить від конструкції і матеріалу перетворювача, і може становити від одиниць до кількох десятків Ом. Для збільшення електричного опору шляхом збільшення робочої довжини магніторезистора останній виконують у вигляді меандру (рис.6.6, а).

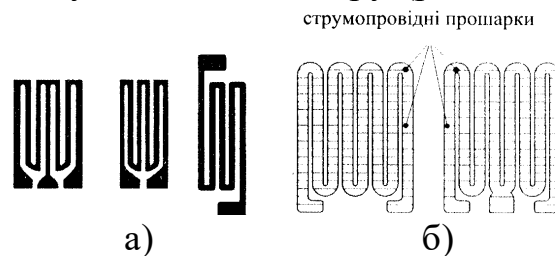
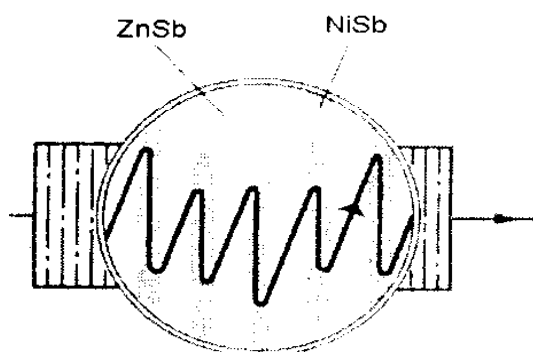


Рисунок 6.6

Для збільшення опору при одночасному збереженні високої чутливості магніторезистор виконують у вигляді ряду послідовно сполучених напівпровідникових пластин, розділених струмопровідними шарами. В цьому випадку перетворювачу надають, звичайно також форму меандру (рис.6.6, б).

Послідовно сполучені ділянки напівпровідника з розділюючими електропровідними шарами створюються сьогодні різними способами. Найперспективнішим є спосіб, що базується на отриманні напівпровідникової сполуки особливої структури. Основою для створення такої сполуки може бути, наприклад, антимонід індію, що має високу рухливість носіїв. Якщо в цей матеріал додати 1,8 % антимоніду нікелю, то після сплавлення при температурі (700...800) °С в атмосфері аргону або водню і наступним вирощуванням синтезованого матеріалу методом спрямованої кристалізації антимонід нікелю викристалізовується в антимоніді індію у вигляді голок діаметром близько 1 мкм і довжиною (10...50) мкм, розташованих паралельно одна одній і достатньо рівномірно на відстані від десятків мкм до десятих часток міліметра.

Питома провідність антимоніду індію дорівнює приблизно $2 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, а питома провідність голок з антимоніду нікелю становить $7 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Отже, голки відіграють роль добре електропровідних електродів, які розділяють основний напівпровідник на окремі зони з малим відно-



шенням довжини до ширини. Потрібно звернути увагу на ту важливу обставину, що антимонід нікелю практично не розчиняється в затверділому антимоніді індію і не має легуючої дії на властивості останнього.

На рис.6.7 приведено зріз

ZnSb/NiSb - магніторезистора та лінії струму при дії магнітного поля.

Рисунок 6.7

Як і для інших напівпровідникових перетворювачів, для магніторезисторів характерна значна температурна нестабільність опору. Так, ТКО антимоніду індію становить 1,2 %/град, а для евтектичного сплаву, легованого телуром, ТКО може бути зменшений до (0,02...0,05) %/град. Магніторезистори мають помітну частотну залежність, яка, своєю чергою, залежить від форми магніторезистора. Зокрема, для диска Корбіно частотна залежність практично не проявляється, а для магніторезисторів прямокутної форми при зміні частоти від 0 до 10 МГц відношення R_B / R_0 зменшується приблизно на (7... 10) %. Магніторезистори можуть безпосередньо використовуватись для вимірювального перетворення магнітної індукції в зміну електричного опору.

Ємнісні перетворювачі

В ємнісних перетворювачах використовується залежність ємності конденсатора від розмірів, взаємного розміщення його обкладок і діелектричної проникності середовища між ними.

В ідеальному випадку ємність плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d},$$

де $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична стала; ε - відносна діелектрична проникність середовища між електродами; S – площа електрода.

З цієї формули випливає, що ємність C плоского конденсатора збільшуватиметься при зростанні діелектричної проникності середовища ε і площі пластин S і зменшуватиметься зі збільшенням відстані між пластинами d . Отже, всі фізичні величини, які безпосередньо або через допоміжні фактори будуть впливати на зміни ε , S і d , можна виміряти за допомогою ємнісних сенсорів. Останні можуть мати найрізноманітніше конструктивне виконання: дві чи три плоскі пластини, циліндр у циліндрі тощо.

Під ємнісним сенсором розуміють систему електродів, ємність яких однозначно залежить від значення заданої фізичної величини.

Чутливість ємнісних перетворювачів з площинними електродами є лінійною функцією зміни площі взаємодії електродів і зміни діелектричної проникності середовища між ними:

$$\frac{\Delta C_s}{C} = \frac{\Delta S}{S}; \quad \frac{\Delta C_E}{C} = \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}.$$

У той самий час чутливість відносної відстані між електродами є нелінійною функцією:

$$\frac{\Delta C_d}{C} = -\frac{\Delta \delta}{\delta} \frac{1}{1 + \frac{\Delta \delta}{\delta}}$$

Розглянемо, перетворювачем яких фізичних величин може бути ємнісний сенсор.

Зміна діелектричної проникності. Величина ϵ має різні значення для різних речовин. Отже, цю особливість можна використати для визначення виду речовини, що знаходиться між електродами сенсора. Якщо є суміш двох речовин, значення ϵ_1 , і ϵ_2 яких відомі, то, вимірюючи результувальне значення ϵ_c (суміші), можна визначити її процентний склад. Наприклад, відносна діелектрична проникність нафти $\epsilon_n=3$, а води $\epsilon_v = 81$. Отже, найменші домішки води у нафті будуть різко збільшувати результувальну проникність ϵ_c . На цій особливості ґрунтується будова ємнісних вимірювачів вологості.

Загалом міжелектродний простір може бути тільки частково заповнений якою-небудь твердою, сипкою або рідкою речовиною. Якщо відомо ϵ цієї речовини, то за виміряною ємністю можна визначити ступінь заповнення міжелектродного простору в лінійних мірах або у мірах площі.

На цій основі можуть бути побудовані вимірювачі переміщення твердих або рідких сипкого і рідкого середовищ у закритих, недоступних безпосередньому спостереженню резервуарах.

Статична характеристика вимірювальних перетворювачів в основу побудови яких покладено зміну ϵ є лінійною (рис.6.8).

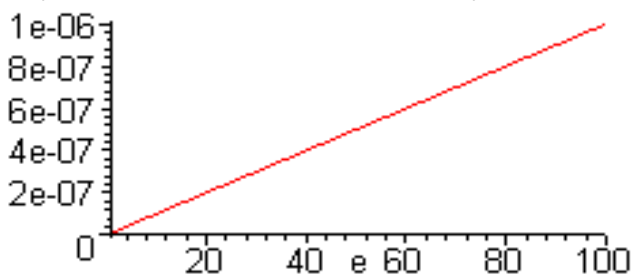


Рисунок 6.8

Зрештою, ϵ може змінюватись від температури. Якщо закон таких змін для даної речовини відомий і однозначний, то на цій основі можна створювати вимірювачі температури.

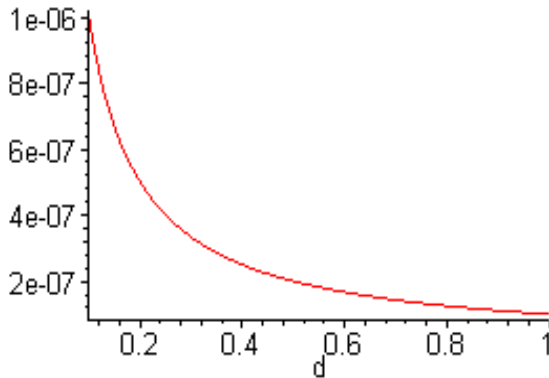
Зміна площі. Площа S може змінюватись або при лінійних переміщеннях однієї з пластин відносно іншої, або при їх відносному повертанні. Таким чином, на цій основі можуть бути створені ємнісні сенсори лінійних і кутових переміщень. Пластини можуть мати значні розміри, /до 100 мм/, складатись із спарених секцій, тому ємнісні датчики такого типу придатні для вимірювання порівняно великих переміщень і кутів від 0 до 360°.

Якщо ємнісний сенсор виконати так, що вільному відносному лі-

нійному або кутовому переміщенню пластин будуть перешкоджати відповідні пружини із наперед заданими характеристиками, то він буде придатний для вимірювання сил чи моментів, що їх обертають.

Залежність (рис.6.8) ємності від зміни площі $C = f(S)$ лінійна, як і в перетворювачах $C = f(\epsilon)$.

Зміна відстані δ між пластинами. Таку відстань часто називають зазором, ємність сенсора змінюється обернено пропорційно зазору δ . Тому залежність $C = f(\delta)$ в перетворювачах такого типу (рис.6.9) є



нелінійною.

Це вимагає особливого підходу до створення вимірювальних кіл, що працюють у парі з такими сенсорами, оскільки, звичайно, намагаються забезпечити лінійну залежність між вимірюваною й вихідною величинами.

Рисунок 6.9

Крім того, на відміну від лінійних розмірів відстань δ між пластинами не може бути великою через виникнення електричних полів розсіювання.

Однак значення δ може набувати дуже малих значень - десяті і соті частки міліметра.

Таким чином, після зміни відстані δ між пластинами можна вимірювати переміщення так, як і після зміни S . Проте такі сенсори придатні для вимірювання дуже малих переміщень з дуже високими чутливістю і роздільною здатністю. Так, в Інституті електродинаміки НАН України створені дистанційні цифрові прилади з роздільною здатністю $5 \cdot 10^{-6}$ мм. Цифровий міст при винесенні сенсора на 10...20 м від приладу виявляє деформації, мікропереміщення, які у тисячі разів менші за товщину людської волосини. Очевидно, що зміну зазору δ між пластинами сенсора також можна використати для визначення сил, моментів деформацій, зважування вантажів, вимірювання тисків і вібрацій при відповідному оснащенні сенсорів пружними елементами.

Через нелінійність функції перетворення $C = f(\delta)$ діапазон перетворень дуже вузький і не перевищує $0.1 \delta_0$ (де δ_0 – максимальна відстань між електродами).

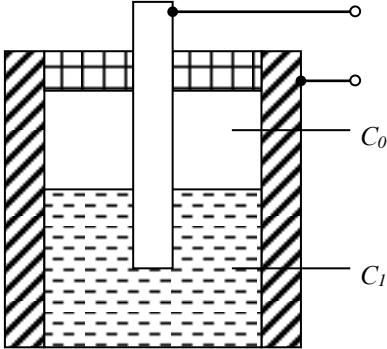
Найпоширеніші конструкції ємнісних перетворювачів наведені в табл. 6.3.

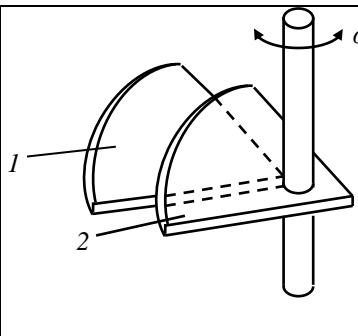
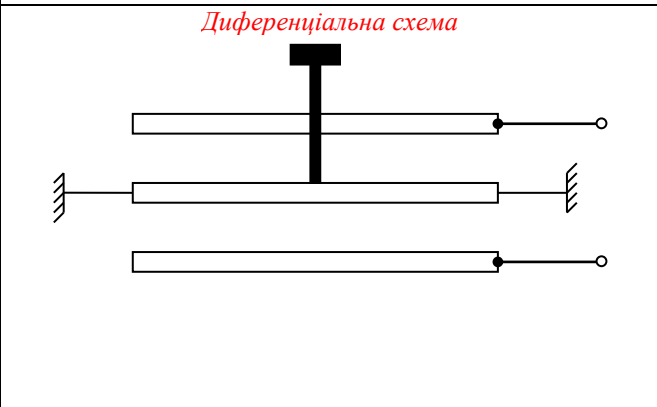
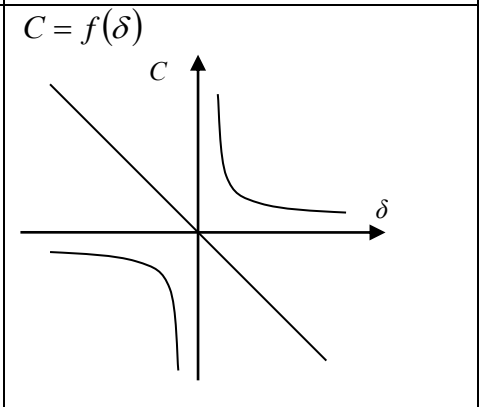
Для лінеаризації статичної характеристики та розширення діапазону ємнісних перетворювачів, в основу побудови яких покладено зміну відстані між пластинами, застосовують диференційну схему включення (схема 4, табл.6.3). Такий перетворювач являє собою здвоєний конденсатор, між нерухомими електродами якого переміщується рухомий електрод. Під дією вимірюваної величини один із конденсаторів збільшує свою ємність, а другий зменшує. Це призводить не тільки до розширення діапазону перетворень, але й до лінеаризації статичної характеристики.

Ємнісні перетворювачі (табл.6.3) використовуються для лінійних і кутових переміщень, рівня рідини, вологості сипких матеріалів, а сумісно з електромеханічними вимірювальними перетворювачами – для вимірювання тиску, сил, прискорення, вібрацій тощо.

Основні переваги ємнісних сенсорів - висока чутливість; відсутність рухомих деталей, які труться; простота конструкції; мала інерційність. До їх недоліків слід віднести вплив зовнішніх електричних полів, паразитних ємностей, температури і вологості.

Основні різновиди ємнісних перетворювачів

Схема	Функціональна схема перетворювачів	Рівняння перетворення
1	<p style="color: red; text-align: center;"><i>Ємнісний перетворювач рівня</i></p> 	$C = C_1 + C_0 = \frac{2\pi}{\ln R1/R2} [\epsilon + (l_0 - l)\epsilon_0],$ <p> l_0 – повна довжина циліндра; l – рівень рідини; ϵ – діелектрич на проникність рідини; $R1, R2$ – радіуси зовнішнього і внутрішнього циліндрів </p>
2	<p style="color: red; text-align: center;"><i>Ємнісний перетворювач товщини</i></p>  <p> 1 – ролики; 2 – пластина конденсатора; 3 – стрічка із діелектрика. </p>	$C = \frac{S}{\frac{(\delta - \delta_d)}{\epsilon_0} + \frac{\delta_d}{\epsilon_d}},$ <p> δ – зазор між пластинами; S – площа пластин; δ_d – товщина стрічки; ϵ_d – діелектрич на проникність стрічки </p>

3	 <p>1 – нерухома пластина; 2 – рухома пластина.</p>	$C = f(\alpha)$ Форма пластин дозволяє одержати необхідну функціональну залежність
4	<p><i>Диференціальна схема</i></p> 	$C = f(\delta)$ 

Приклад будови ємнісного акселерометра

Для вимірювання вібрацій в теперішній час застосовують акселерометри, що являють собою сенсори лінійних прискорень. Структурну схему одного з таких сенсорів наведено на рис.6.10. Він являє собою диференціальну конденсаторну структуру з повітряним діелектриком.



Електроди конденсатора вирізані з плоского куска полікремнієвої плівки товщиною 2 мкм. Нерухомими електродами цього конденсатора є прості консольні стержні, що розташовані на висоті 1 мкм від поверхні кристала в повітрі на полікремнієвих стовбчиках-анкерах, що приварені до кристала на молекулярному рівні.

Рисунок 6.10

Тут показано тільки основний конструктивний блок сенсора. Фактично сенсор має 54 таких елементарних комірки. Інерційна маса сенсора прискорення під час вимірювання швидкості переміщення зміщується відносно іншої частини кристала. Її пальцеподібні виступи утворюють рухомий електрод конде-

нсатора. Обидві сторони цієї структури опираються на стовпчики-анкери. Розтяжки, що утримують інерційну масу, виконують роль механічної пружини постійної пружності, що обмежує переміщення маси і її повернення у вихідне положення. Під дією прискорення сила інерції

$$F = m a$$

зрівноважується силою пружини

$$F = k x ,$$

де m – маса , a – прискорення; x – зміщення маси відносно вихідного положення.

Прирівнявши силу інерції і силу протидії, отримаємо

$$a = \frac{k}{m} x = S_a \cdot x .$$

Причому $S_a = \frac{k}{m} = \text{const}$ – чутливість, значення якої залежить від конструктивних параметрів (k і m) сенсора.

Оскільки переміщення інерційної маси відбувається в площині полікремнієвої плівки, то вісь чутливості сенсора знаходиться в цій же площині, і, відповідно вона паралельна площині друкованої плати, до якої закріплюють сенсор.

В стані покою (рух з постійною швидкістю) всі «пальці» рухомого електроду завдяки дії розтяжки знаходяться на однаковій відстані від пари «пальців» нерухомого електрода. При будь-якому прискоренні рухомі електроди наближаються до одного з наборів нерухомих електродів і віддаляються від другого набору. В результаті цього відносне переміщення стає не однаковим, і ємність між рухомих електродом і кожним із рухомих електродів змінюється пропорційно віброприскоренню.

Завершуючи знайомство з акселерометрами ємнісного типу, наведемо декілька цифр, що характеризують конструкцію і рівень технології виготовлення цих сенсорів (табл.6.4).

Таблиця 6.4 – Параметри акселерометрів ємнісного типу

Найменування параметра		Числове значення
1	Інерційна маса	0.1 мкГ
2	Ємність кожної частини диференціального конденсатора	0.1 пФ
3	Мінімальне розрізнення відхилення ємності	20 аФ (10^{-18} Ф)
4	Зміна ємності, що відповідає зміні прискорення в повному діапазоні	0.01 пФ
5	Відстань між електродами конденсатора	1.3 мкм

6	Мінімальне розрізнення відхилення рухомих електродів конденсатора	0.2 ангстрема (0.2 від діаметра атома)
---	---	---

Індуктивні перетворювачі

В індуктивних перетворювачах із змінною довжиною повітряного зазору (схема 1 у табл.6.5) використовується залежність індуктивності L від довжини повітряного зазору δ .

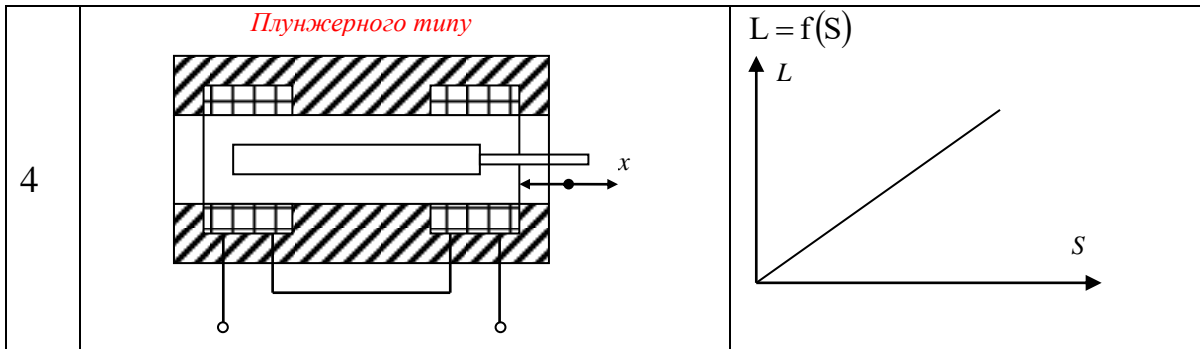
Якщо знехтувати опором магнітопроводу, незначним порівняно з магнітним опором зазору, а також втратою потужності в магнітопроводі, то одержимо

$$L = \frac{\mu_0 \omega^2 S}{\delta},$$

де μ_0 - магнітна постійна, ω - число витків котушки, S - ефективна площа повітряного зазору.

Таблиця 6.5 - Основні різновиди індуктивних перетворювачів

Схема	Функціональні схеми перетворювачів	Рівняння перетворення
1	<p><i>Із зміною розміру повітряного зазору</i></p>	$L = \frac{\mu_0 \omega^2 S}{\delta}$
2	<p><i>Диференціальна схема</i></p>	$L = 2\mu_0 \omega^2 S \frac{\Delta\delta}{\delta} \cdot \frac{1}{1 - (\Delta\delta/\delta)}$
3	<p><i>Із зміною площі S повітряного зазору</i></p>	$L = f(S)$



Як наслідок, індуктивний перетворювач із змінною довжиною повітряного зазору є нелінійним перетворювачем, залежність L від довжини зазору δ близька до гіперболічної. З достатнім для практики рівнем наближення можна вважати його лінійним лише при малих відносних змінах довжини повітряного зазору $\Delta\delta/\delta$.

У реальних конструкціях перетворювачів відносна зміна зазору $\Delta\delta/\delta=0,1\dots0,15$ при нелінійності характеристики 1-3%. Тому такі перетворювачі застосовуються для перетворень невеликих переміщень (0,01...10 мм).

Значне покращення лінійності при одночасному збільшенні чутливості досягається в диференціальних перетворювачах із двома перетворювальними елементами, що мають загальну рухому частину (схема 2 у табл.6.5). У них рухомий яркір розміщений симетрично відносно обох осердь із початковим зазором δ , і магнітні опори для потоків, що створюються двома котушками, однакові. Зміни магнітних опорів, що відбуваються при переміщенні $\Delta\delta$ яркоря, мають протилежні знаки. При зустрічно-послідовному вмиканні обмоток їх сумарна індуктивність

$$L = \frac{\mu_0 \omega^2 S}{\delta - \Delta\delta} - \frac{\mu_0 \omega^2 S}{\delta + \Delta\delta} = 2\mu_0 \omega^2 S \frac{\Delta\delta}{\delta} \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta\delta}{\delta}\right)^2}.$$

Внаслідок того, що в знаменнику останнього виразу відношення $\Delta\delta/\delta$ знаходиться у квадраті, в диференціальному перетворювачі лінійність характеристики забезпечується в більш широких межах. Через це практично всі індуктивні перетворювачі виконуються диференціальними.

Індуктивні перетворювачі із змінною площею повітряного зазору (схема 3 у табл.6.5) застосовуються для перетворення переміщень рухомого феромагнітного осердя в діапазоні 5...20 мм. Функція перетворення таких перетворювачів практично лінійна.

Найбільш поширені індуктивні перетворювачі плунжерного типу. В основу принципу дії цих перетворювачів покладено зміну магнітного опору ділянок розсіювання магнітного потоку, а отже, й індуктивності

катушки при переміщенні феромагнітного рухомого елемента (плунже-ра) всередині катушки. Найчастіше застосовуються диференціальні плунжерні перетворювачі з магнітопроводом (схема 4 у табл.6.5). Плунжерні перетворювачі мають, як правило, лінійні характеристики і забезпечують перетворення переміщень від кількох міліметрів до кількох десятків сантиметрів.

Генераторні вимірювальні перетворювачі

У генераторних перетворювачах вхідна величина перетворюється у вихідний сигнал, який має енергетичні властивості.

Основні різновиди генераторних перетворювачів наведені у табл.6.6.

Індукційні перетворювачі

Принцип роботи таких перетворювачів ґрунтується на використанні явища електромагнітної індукції (схема 1 у табл.6.6).

При лінійних або кутових переміщеннях вимірювальної катушки у відомому магнітному полі наведена в ній е. р. с.

$$e = -B_p l \frac{dx}{dt} \quad \text{або} \quad e = -B_p S_p \frac{d\alpha}{dt},$$

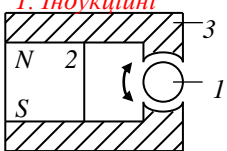
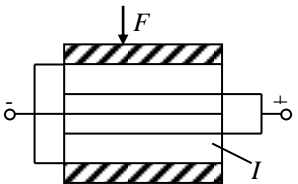
де B_p - індукція в робочому зазорі;

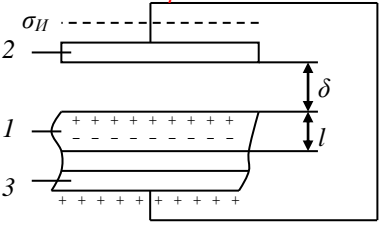
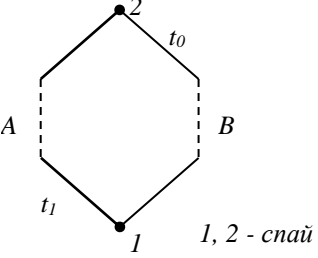
l - активна довжина вимірювальної катушки;

x, α - переміщення, відповідно, лінійне або кутове;

S_p - активна площа рамки.

Таблиця 6.6 - Основні різновиди генераторних перетворювачів

Тип перетворювачів	Рівняння перетворення
<p>1. Індукційні</p>  <p>1. якорь 2. магніт 3. катушка</p>	$e = nB\omega \sin nt$ <p>n – частота обертання, ω – кількість витків катушки, B – індукція в зазорі</p>
<p>2. П'єзоелектричні</p>  <p>F - сила I - кристал</p>	$d = q / F = CU / F$ <p>q – електричний заряд, F – сила, C – ємність, U – напруга</p>

<p style="text-align: center;"><i>3. Електретні</i></p> 	$E = \frac{Q}{\delta(C_0 + C_1)}$ <p>Q – заряд електрета , δ – сумарна довжина , C₀ – ємність електрета , C₁ – ємність повітряного зазору</p>
<p style="text-align: center;"><i>4. Термоелектричні</i></p> 	<p>Результувальна термо – е.р.с. $e_{AB} = U_{AB}(t_0) + U_{BA}(t_0) + U_B(t_0t_1) + U_A(t_0t_1)$ $U_{AB}(t_0), U_{BA}(t_0)$ – термо – е.р.с. Зеєбека $U_A(t_0t_1), U_B(t_0t_1)$ – термо – е.р.с. Томсона</p>

Індукційні перетворювачі використовуються для вимірювання лінійної і кутової швидкостей, а також інших величин, функціонально пов'язаних із ними. Перетворювачі цього типу, призначені для вимірювання кутової швидкості і виконані у вигляді невеликих генераторів постійного чи змінного струмів, називаються тахогенераторами.

Джерелами похибок індукційних перетворювачів є нелінійність функції перетворення і нестабільність параметрів магнітних матеріалів у часі і при зміні температури. Нелінійність зумовлена головним чином неоднорідністю магнітного поля в зазорі і оберненим впливом поля котушки при проходженні по ній струму. Похибки індукційних перетворювачів складають 0,1... 1%.

П'єзоелектричні перетворювачі

Принцип дії п'єзоелектричних перетворювачів оснований на явищах прямого та зворотного п'єзоєфектів.

Суть прямого п'єзоєфекту полягає в електризації кристалів деяких діелектриків під дією механічних напружень, а зворотного – у виникненні механічної деформації кристала під дією електричного поля.

Особливістю п'єзоєфекту (схема 2 у табл.6.6) є зміна його знака, тобто при зміні напрямку механічного напруження змінюється полярність електричних зарядів і при зміні полярності електричного поля змінюється напрям механічної деформації, що зумовлює роботу п'єзоелектричних перетворювачів у динамічному режимі. До матеріалів, яким властивий п'єзоєфект, належать кварц, сегнетова сіль, а також п'єзокераміка.

Можливі різні способи деформацій п'єзоелектричних матеріалів: за товщиною, довжиною, об'ємні, зсуви по товщині і поверхні. Основними видами деформації є деформації за товщиною і довжиною.

Електричний заряд q , що виникає на гранях п'єзоелектричного перетворювача під дією сили F (схема 2, табл.6.6), дорівнює:

$$q = dF,$$

де d – п'єзоелектричний модуль.

Одним із основних питань при проектуванні п'єзоелектричних сенсорів є вибір п'єзоелектричного матеріалу, при якому необхідно звертати увагу на п'єзоелектричний модуль d . Коефіцієнти d для випадків прямого і оберненого ефектів чисельно однакові.

Вихідною величиною п'єзоелектричного перетворювача є напруга на його електродах

$$U = \frac{d}{C} F,$$

де C – ємність, утворена електродами.

П'єзоелектричні перетворювачі використовуються для вимірювання сили, тиску, механічних напружень, прискорень тощо.

На основі п'єзоелементів будують п'єзореzonансні перетворювачі, вихідною величиною яких є частота коливань п'єзореzonатора

$$f = f_0 \left[1 + k_1(T - T_0) + k_2(T - T_0)^2 + k_3(T - T_0)^3 \right],$$

де f – частота коливань перетворювача (вихідна величина); f_0 – власна частота його коливань при температурі T_0 ; k_1, k_2, k_3 – сталі коефіцієнти.

Головні переваги цих перетворювачів: малі габарити, висока надійність, простота конструкції, можливість вимірювати швидкозмінювані параметри.

Їхні недоліки: неможливість вимірювати статичні величини, наявність гістерезису і нелінійності.

Електретні перетворювачі

Під електретом розуміють постійний наелектризований діелектрик із різнойменними полюсами, що має зовнішнє електричне поле. У більш загальному випадку електрет - це діелектрик, що тривало зберігає поляризацію після віддалення зовнішнього електричного поля і створює в навколишньому просторі електричне поле.

Якщо електрет 1 розміщено між металевими пластинами 2 і 3, з'єднаними провідником (схема 3 у табл.6.6), то на металевих електродах буде виникати наведений заряд, густина якого

$$\sigma_u = \varepsilon_0 E = \frac{\sigma}{1 + \varepsilon S / \varepsilon_0 l},$$

де δ - густина електричного заряду; ε, l, S - діелектрична проникність,

товщина і площа матеріалу електрета; E - напруга електричного поля, що створюється електретом.

Коли один із електретів коливається, то наведений на ньому заряд буде змінюватись і по зовнішньому колу протікає струм

$$i = S \frac{d\sigma_u}{dt}$$

Електретні перетворювачі можуть використовуватись для вимірювання параметрів вібрацій (електретний мікрофон, телефон), але більше застосування вони знайшли для перетворення тиску навколишнього повітря.

Недолік електретних перетворювачів полягає в тому, що вони зазнають впливу температури. При нагріванні електрет втрачає свої внутрішню поляризацію і поверхневий заряд. Основним фактором, що ускладнює практичне застосування електретів, є складність одержання двох або кількох електретів із різною поверхневою густиною зарядів. І, зрештою, поверхнева густина заряду змінюється в часі, отже, електричне поле поза електретом нестабільне. У той самий час електрет має низьку вартість і просту конструкцію.

Термоелектричні перетворювачі

В основу побудови термопар покладено явища Томсона і Зеебека.

Явище Томсона полягає у появі на кінцях однорідного провідника, який має температурний градієнт, деякої різниці потенціалів внаслідок того, що електрони дифундують з гарячого кінця провідника до холодного. ЕРС, що виникає при цьому і називається термо-е.р.с. Томсона

$$e = \int_{T_2}^{T_1} \sigma dT$$

де σ – коефіцієнт Томсона для даного провідника.

Якщо скласти коло з двох різних провідників a і b (схема 4 у табл.6.6), то сумарна термо- ЕРС Томсона дорівнює різниці термо-ЕРС Томсона кожного провідника і визначається

$$e = \int_{T_2}^{T_1} (\sigma_a - \sigma_b) dT$$

де σ_a і σ_b , - коефіцієнти Томсона для провідника a і b відповідно.

Явище Зеебека. При з'єднанні двох різнорідних провідників у місці їх контакту виникає контактна різниця потенціалів, зумовлена різною концентрацією носіїв заряду.

Зеебеком було встановлено, що в замкненому колі двох різнорідних провідників, спаї яких мають різні температури, електрорушійна сила E_{ab} (T_1), яка виникає при переході від провідника a до провідника b в точці з температурою T_1 і електрорушійна сила E_{ba} (T_2), яка виникає

при переході від провідника b до провідника a, мають протилежні знаки і не дорівнюють одна одній.

Сумарна термо-ЕРС, яка виникає у колі, що складається з двох різних провідників a і b є сумою контактних е.р.с. і е.р.с. Томсона:

$$e_{ab}(T_1, T_2) = E_{ab}(T_1) + E_{ba}(T_2) + \int_{T_1}^{T_2} (\sigma_a - \sigma_b) dT.$$

Ця сумарна термо-ЕРС для даної пари провідників залежить тільки від значень температур T_1 і T_2 і може бути подана різницею відповідних функцій:

$$e_{ab}(T_1, T_2) = E_{ab}(T_1) - E_{ba}(T_2).$$

Якщо різниці температур малі, то можна припустити, що термо-е.р.с. яка формується термопарою, пропорційна різниці температур спайів:

$$e_{ab}(T_1, T_2) = k(T_1 - T_2),$$

де k – сталий коефіцієнт, різний для різних матеріалів термоелектродів.

Якщо один спай помістити в середовище з постійною температурою, наприклад T_2 , то термо-е.р.с., що виникне в загальному випадку, є нелінійною функцією температури T_1

$$e_{ab}(T_1, T_2) = e(T_1).$$

Наприклад, для мідь-константанових термопар функція перетворення має вигляд:

$$e = aT + bT^2 + cT^3$$

де a , b і c – постійні коефіцієнти, які визначаються під час градування термопари.

Спай термопари, який поміщають в досліджуване середовище, називають робочим або гарячим, а кінці електродів, температура яких підтримується переважно постійною, – вільними або холодними.

Чутливий елемент термоелектричного перетворювача, тобто пару термоелектродів, називають термопарою.

Матеріалами термоелектродів служать сплави хромель, копель, алюмель, вольфрамрений, платинородій, а також платина, мідь і залізо. Від назви термоелектродів походить назва типу самого перетворювача, наприклад, перетворювач типу ТХА має електроди з хромелю та алюмелю. Характеристики деяких типів термоелектричних перетворювачів наведено в табл.6.7.

Таблиця 6.7 – Характеристики термопар

Тип термопари	Матеріали термоелектродів	Тип НСХП	Діапазон вимірювання, °С
ТХА	Хомель-Алюмель	ХА(К)	-270...+1000
ТХК	Хромель - Копель	ХК(Л)	-200...+600
ТПП	Платинородій (10% платина)	ПП(С)	

ТВР	Вольфрам – реній ВРС Вольфрам – реній ВР(А)-1	ВР(А)-1	0...2200
-----	--	---------	----------

Функція перетворення (або НСХП) термоелектричних перетворювачів, як правило нелінійна і для кожного типу перетворювача задається у вигляді таблиць

$$e = f(T)$$

при температурі вільних кінців 0°C (див. табл.6.8).

Таблиця 6.8 – НСХП термопари тину ТХА

Вимірювана температура, $T^{\circ}\text{C}$	0	200	400	600	800	1000	1200
Значення термо-ЕРС e , мВ	0	8.137	16.395	24.902	33.277	41.269	48.828

Статична характеристика для цього типу термопари в обмеженому діапазоні перетворення наведена на рис.6.11.

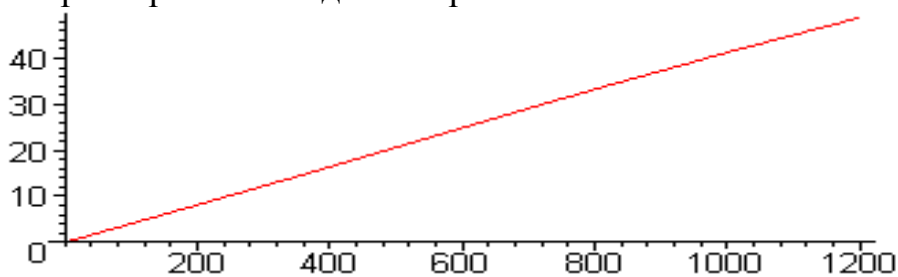


Рисунок 6.11

Апроксимова НСХП поліномом другого порядку має вигляд

$$e = 0.01441 + 0.03931 \cdot T^1 + 0.000006 \cdot T^2$$

і в цьому діапазоні вимірювання температури практично лінійна.

Фотоелектричні перетворювачі

В основу побудови генераторних фотоелектричних перетворювачів покладено явище зовнішнього фотоелектричного ефекту. До них належать фотодіоди і фототранзистори.

Суть зовнішнього фотоелектричного ефекту полягає в емісії (випусканні) електронів на поверхні фотокатода у вакуум під дією світлового потоку.

Кванти світла, що досягають фоточутливої поверхні катода, викликають емісію фотоелектронів, які під дією зовнішнього електричного поля створюють фотострум.

Рівняння перетворення фотодіода має такий вигляд

$$E = \frac{kT}{e} \ln \left(S_I \frac{\Phi}{I_s} - 1 \right),$$

де E – фото-ЕРС; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура; e – заряд електрона; S_I – чутливість; I_s – тепловий струм.

Фотоелектричні перетворювачі використовуються для вимірювання як світлових, так і несвітлових неелектричних величин. Прикладами використання фотоелектричних перетворювачів є швидкість обертання, кут повороту, кутова швидкість, обертальний момент та інші.

Розглянемо застосування фотоелектричних перетворювачів в сенсорах швидкості.

Принцип дії фотоелектричного сенсора швидкості ґрунтується на модуляції освітлення робочої поверхні фотоелектричного елемента числом обертів (частотою обертання n).

Із великої кількості фотоелектричних перетворювачів найбільш поширені сенсори з перериванням світлового потоку (рис.6.12). Світловий потік спрямовується оптичною системою на обертний диск і після переривання потрапляє на фотоелемент, який реєструє імпульс фотоструму.

У разі переривання світлового потоку на об'єкт вимірювання (вал, який обертається) необхідно насадити диск з отворами або прорізами, а на випадок відбиття нанести на об'єкт глянцевої або матової поверхні. Частота пульсацій f фотоструму з частотою обертання об'єкта вимірювання пов'язана такою залежністю:

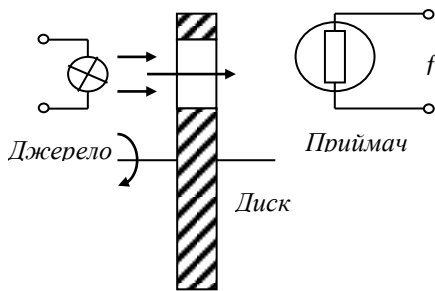


Рисунок 6.12

$$f = \frac{n z}{60},$$

де z - кількість прорізів або отворів у диску.

У разі переривання світлового потоку на об'єкт вимірювання (вал, який обертається) необхідно насадити диск з отворами або прорізами, а на випадок відбиття нанести на об'єкт глянцевої або матової поверхні. Частота пульсацій f фотоструму з частотою обертання об'єкта вимірювання пов'язана такою залежністю:

$$f = \frac{n z}{60},$$

де z - кількість прорізів або отворів у диску.

Фотоелектричні перетворювачі використовуються для вимірювання час-

тоти обертання та інших фізичних величин, функціонально пов'язаних з нею. Їхні переваги: широкий діапазон вимірювання (від 10^{-3} до 10^6 об/хв.), простота конструкції, мале навантаження на об'єкт вимірювання, висока завадостійкість, практично необмежений строк служби.

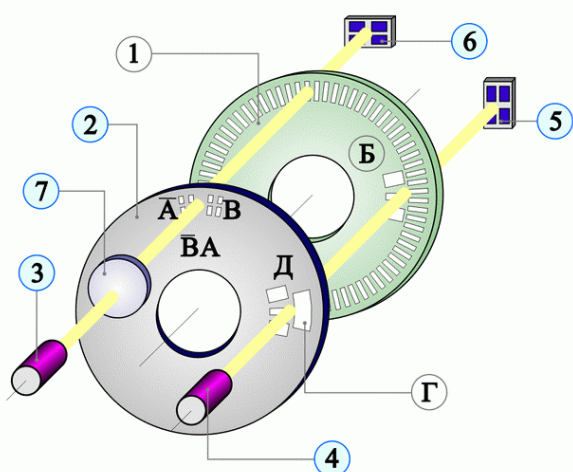
Недоліки: похибка, зумовлена нерівномірним нанесенням отворів (прорізів, поділок, позначок); похибка від ексцентриситету між центром диска і віссю вала, на якому він встановлений.

4. Принцип дії перетворювачів кутових переміщень.

Перетворювачі кутових переміщень знайшли широке застосування в електроенергетиці та електромеханіці для вимірювання кутових переміщень, кутових швидкостей та прискорень. Вони здійснюють перетворення кутового переміщення в послідовність електричних сигналів, яка містить інформацію про значення і напрямок інформативного сигналу (рис.6.13).

Принцип дії перетворювачів кутових переміщень засновано на фотоелектричному зчитуванні растрових і кодових спряжень, реєстрації відносної величини потоку оптичного випромінювання, що пройшло через растрове спряження як координатно-періодичної функції взаємного кутового положення регулярного растра шкали і растрів вікон аналізатора.

Перетворювач має два кінематично функціональних зв'язаних

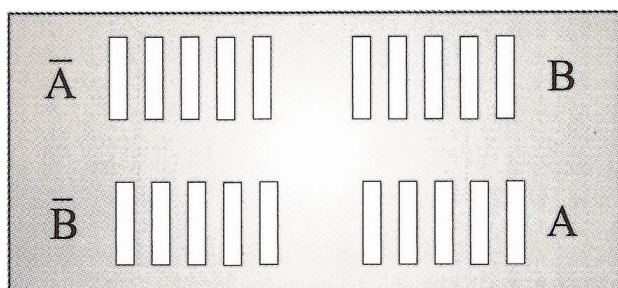


блоки: радіальну растрову шкалу 1, яка жорстко зв'язана з валом перетворювача, і растровий аналізатор 2 нерухомого блоку зчитування (рис.6.13).

До складу растрового аналізатора входять чотири поля зчитування $\bar{A}, \bar{A}, \bar{B}, \bar{B}$, кожне з яких зсунуте в просторі відносно попереднього на $1/4$ періоду растра.

Рисунок 6.13

Паралельний світловий потік, сформований конденсором 7 випромінювача 3, проходячи через растрове спряження, аналізується 4-х квадрантним фотоприймачем 5.



Здвоєні відповідним чином фотоприймачі дозволяють отримати два ортогональних струмових

сигнали I_A та I_B (рис.6.15), постійна складова яких не залежить від рівня освітленості.

Рисунок 6.14

Наявність двох ортогональних вимірювальних сигналів дозволяє визначати напрямок переміщення та суттєво підвищити роздільну здатність в процесі обробки цих сигналів в електронному блоці.

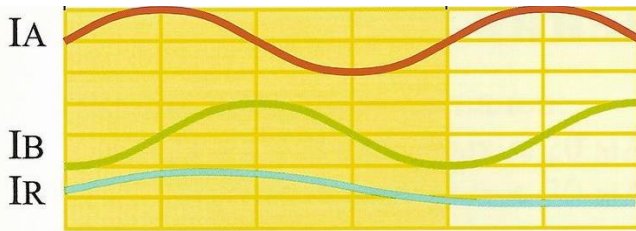


Рисунок 6.15

Растровий аналізатор крім вікон інкрементувального зчитування має референтну мітку Д. Референтна мітка Д позиційно узгоджена з до-ріжкою референтних міток лімба. Сигнал референтної мітки на рис.6.15 позначено I_R . Він формується один раз за один повний оберт вала, що дозволяє цей перетворювач використовувати також в якості сенсора положення.

На виходах сенсора електронною схемою можуть формуватися сигнали у вигляді:

- синусоїди струму ($CC \sim 11 \text{ мкА}$; $U_{ж} = +5 \text{ В} \pm 5\%$);
- синусоїди напруги ($CH \sim 1 \text{ В}$; $U_{ж} = +5 \text{ В} \pm 5\%$);
- прямокутних імпульсних сигналів (ПІ типу TTL; $U_{ж} = +5 \text{ В} \pm 5\%$).

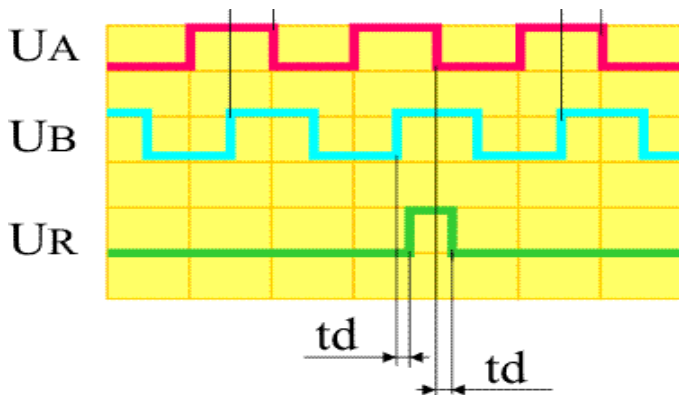


Рисунок 6.16

Час затримки сигналу U_R референтної мітки відносно основних сигналів U_A і U_B $t_d \leq 300 \text{ нс}$.

Рівняння перетворення для широко вживаних в електроенергетиці

Сигнал I_A випереджає сигнал I_B під час обертання вимірювального лімба за годинниковою стрілкою, який жорстко зв'язаний з валом перетворювача (вид зі сторони вала перетворювача).

Приклад вихідних прямокутних сигналів типу TTL наведено на рис.6.16.

Рівні вихідних TTL сигналів:

$U_1 > 2,4 \text{ В}$ при $I_{вих.} \leq 20 \text{ мА}$;
 $U_0 < 0,5 \text{ В}$ при $I_{вих.} \leq 20 \text{ мА}$.
 Тривалість фронтів вихідних сигналів не перевищує 100 нс.

та електромеханіці сесорів, в основу побудови яких покладено перетворювач кутових переміщень, наведено в табл.6.9.

Рух обертальних механізмів можна описувати термінами «кутова швидкість» чи «частота обертання», сутність яких різна.

Приведемо визначення цих параметрів кутових переміщень, що відповідають міжнародній системі одиниць вимірювання.

Кутовою швидкістю називається фізична величина, зумовлена першою похідною від кута повороту φ за час t , рад/с:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt}.$$

Частотою обертання n називається фізична величина, обумовлена відношенням кількості обертів N обертового вала до часу обертання $\Delta t \in [0, T]$

$$n(t) = \frac{N}{t}.$$

Одиниця вимірювання n відрізняється від ω у формулі множителем 2π .

Таблиця 6.9 – Рівняння перетворення сенсорів кутових переміщень

Вимірювана ФВ	Одиниці вимірювання	Рівняння перетворення
Кут повороту	град	$\alpha_x = i \cdot \frac{360}{z},$ α_x - кут повороту; i - поточна кількість вихідних імпульсів ($i \in 0..z$); z - кількість імпульсів за один повний оберт ($z \in 10^3..10^6$).
	рад	$\alpha_x = i \cdot \frac{2\pi}{z}$
Частота обертання	об/хв	$f_x = \frac{n_x z}{60},$ де n_x - швидкість обертання; f_x - частота вихідних прямокутних імпульсів.
Кутова швидкість	рад/с	$f_x = \frac{\omega_x z}{2\pi},$ де ω_x - кутова швидкість.

Неважно з'ясувати, що вживане поняття «швидкість обертання n » точно відповідає величині «частота обертання». Основне рівняння вимірювання швидкості обертання як і частоти обертання

$$n = \frac{N}{t}.$$

Ці визначення вказують на те, що швидкість обертання, як і частота

та обертання, ніяк не є синонімами кутової швидкості. За фізичним змістом це різні величини, не пропорційні одна іншій. При періодичному обертанні $n = \text{const}$, але кутова швидкість може бути змінною протягом одного оберту. Рівність

$$\omega = 2\pi n$$

справедлива тільки для рівномірного обертання.

Контрольні питання :

1. Наведіть основні особливості вимірювання неелектричних величин.
2. З яких основних частин складається ЗВ неелектричних величин?
3. Що таке градувальна характеристика сенсора? Чому бажано, щоб вона була лінійною?
4. З якою метою запровадили уніфікацію вихідних сигналів сенсорів і у якому вигляді їх подають?
5. Які вимірювальні перетворювачі називаються параметричними? Наведіть їхні основні різновиди.
6. Поясніть принцип дії резистивних перетворювачів контактного типу.
7. Розкрийте сутність явища внутрішнього фотоэффекту.
8. Будова, принцип дії, галузі застосування фоторезисторів.
9. Будова, принцип дії, галузі застосування кондуктометричних вимірювальних перетворювачів.
10. Будова, принцип дії, галузі застосування (терморезисторів) термометрів опору.
11. Будова, принцип дії, галузі застосування тензорезисторів.
12. Сформулюйте сутність явища тензоэффекту у напівпровідниках.
13. Виведіть рівняння перетворення тензомостового вимірювального перетворювача.
14. Сформулюйте сутність явища магніторезистивного ефекту.
15. Будова, принцип дії, галузі застосування магніторезисторів.
16. Перетворювачем яких фізичних величин може бути ємнісний сенсор?
17. Ємнісні перетворювачі на основі зміни діелектричної проникності.
18. Ємнісні перетворювачі на основі зміни площі пластин.
19. Ємнісні перетворювачі на основі зміни відстані між пластинами.
20. Будова, принцип дії, галузі застосування ємнісного перетворювача різниці.
21. Будова, принцип дії, галузі застосування ємнісного перетворювача товщини.
22. За рахунок чого в диференціальній схемі ємнісному перетворювача розширюється діапазон вимірювання?
23. Будова, принцип дії, галузі застосування ємнісного акселерометра.
24. Наведіть основне рівняння вимірювання, що покладено в основу побудови індуктивних вимірювальних перетворювачів.
25. Будова, принцип дії, галузі застосування індуктивних вимірювальних перетворювачів із змінною повітряною зазором.
26. Дайте поняття генераторних вимірювальних перетворювачів та наведіть їхні різновиди.
27. Будова, принцип дії, галузі застосування індукційних вимірювальних

перетворювачів.

28. Сформулюйте сутність явища прямого п'єзоефекту.
29. Будова, принцип дії, галузі застосування п'єзоелектричних вимірювальних перетворювачів.
30. Будова, принцип дії, галузі застосування електретних вимірювальних перетворювачів.
31. Сформулюйте сутність явищ Томпсона та Зеебека.
32. Будова, принцип дії, галузі застосування термопар.
33. Сформулюйте сутність явища зовнішнього фотоэффекту.
34. Будова, принцип дії, галузі застосування фотоелектричного сенсора швидкості.
35. Будова, принцип дії, галузі застосування фотоелектричних вимірювальних перетворювачів кутових переміщень.
36. Наведіть рівняння перетворення сенсорів кута повороту, кутової швидкості, частоти обертання.

Лекція

Інформаційна лекція

Кількість годин: 2

ТЕМА . РОБОТИ МАНІПУЛЯТОРИ . ОЦІНКА ПРОМИСЛОВИХ МОДЕЛЕЙ.

Мета: Ознайомитись із промисловими моделями роботів маніпуляторів.

ПЛАН

1. Застосування роботів маніпуляторів в АПК
2. Аналіз конструктивних особливостей існуючих моделей промислових роботів, оцінка конструкцій.
3. Класифікація роботів маніпуляторів.
4. Системи основних координатних переміщень маніпуляторів.

Рекомендована література:

1. Купчук І. М., Гонтар В. Г., Єленич А. П., Дідик А. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Науковий твір «Узагальнена структурно-технологічна схема з описом «Універсальний подрібнювач рослинних відходів» : Свідоцтво № 102203 від 01.02.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 63, 2021.(28673)

2. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Твердохліб І. В., Телекало Н. В., Колесник Т.В., Дідик А. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Optimization of agricultural transportation v. 1.0» («Agro-transportation optimization v. 1.0») : Свідоцтво №107370 від 16.08.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 66, 2021.

3. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Холодюк О. В., Левчук К. І., Гонтарук Я. В., Дідик А. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Harvesting Cereals Optimization v. 1.1.5» («Harvesting cereals v. 1.1.5») : Свідоцтво № 102287 від 03.02.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 63, 2021.(27950)

4. Купчук І.М. Перспективи розвитку конструктивних схем вібраційних приводів транспортних і технологічних машин АПК. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2018. . №3(90). С. 44-52.

5. Купчук І.М., Браніцький Ю.Ю. Розробка програмного алгоритму розрахунку кінематичних параметрів робочих органів віяльно-калібрувальної машини. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. №2(97). С. 80-87.

6. Купчук І.М., Токарчук О. А., Гонтар В.Г., Дідик А. М. Аналіз балансу потужності технологічної системи подрібнення рослинних сільськогосподарських відходів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. № 4 (111). С. 122-128.

7. Ловеїкін В.С., Ромасевич Ю.О., Човнюк Ю.В. Мехатроніка. Навчальний посібник. – К., 2012. - 357 с.

8. Ольшанський В.П., Сліпченко М.В., Твердохліб І.В., Купчук І.М. Коливання імпульсно навантаженого осцилятора з квадратичним опором у складі дисипативної сили. *Вібрації в техніці та технологіях*. № 2 (101). С. 35-45.

9. Пришляк В. М., Купчук І. М., Дідик А. М. Купчук В. М. Стан і перспективи застосування програм віддаленого адміністрування в навчальному процесі студентів інженерних спеціальностей. *Вісник Хмельницького*

національного університету. Серія: Технічні науки. 2020. № 4 (287). С. 57-63. (27534)

10. Солона О.В., Купчук І.М. Практикум з теорії механізмів і машин: навч. посібник. Вінниця: ТОВ “Друк”, 2020. 252 с.

11. Солона О.В., Купчук І.М. Теорія механізмів і машин. Курсове проектування: навч. посіб. 2-ге вид., допов. і перероб. Вінниця: ВНАУ, 2019. 248 с.

1. Застосування роботів маніпуляторів в АПК

Обсяг виробництва в різних галузях економіки вимагає прискорення технічного прогресу, збільшення потужності всіх технічних засобів, оновлення основних фондів, поліпшення їх використання. Розвиток виробництва багато в чому формується технічним прогресом. Розробка і впровадження новітніх конструкцій і механізмів, відповідних необхідному сучасному рівню розвитку науки і техніки, веде до збільшення ефективності виробництва і забезпечує механізацію виробництва. Статистика свідчить, що з усього часу перебування готової продукції на підприємстві - велика частина йде на виконання транспортно-складських і вантажно-розвантажувальних робіт. Цим пояснюється їх висока частка в ціні випуску продукції. Сучасна стратегія розвитку транспортного комплексу передбачає створення нових машин і механізмів, підвищення рівня механізації виробництва для забезпечення продукцією необхідної якості з мінімальними витратами. Скорочення важкої фізичної праці на будь-якому виробництві пов'язано в першу чергу з механізацією і роботизацією вантажно-розвантажувальних робіт. В наш час проблема з автоматизацією підйомно-транспортних машин, вантажо-розвантажувальних, транспортно-складських робіт і комплексної механізації залишається актуальною в будівництві, переробній промисловості, сільському господарстві та в інших областях. Переміщення і позиціонування важких великогабаритних вантажів необхідно в різних галузях при будівництві, заміні та монтажу агрегатів і енергетичних установок як стаціонарних, так і на транспорті. Рівень ефективності виробництва продукції безпосередньо залежить від часу, що витрачається на вантажно-розвантажувальні роботи. Вантажно-розвантажувальні операції вважаються низькопродуктивні, так як тут вся увага зосереджена на збереженні переміщуваних вантажів. Так само вантажно-розвантажувальні роботи характеризуються важкими умовами. За своєю тяжкістю ці роботи відносяться до третьої категорії тяжкості праці, що супроводжуються високим травматизмом. Тому, до теперішнього часу, продуктивність праці на вантажно-розвантажувальних операціях залишається вкрай низькою. Деякі вантажі відрізняються невисоким опором механічного впливу, тому одним із шляхів зниження втрат якості продукції в процесі її навантаження є застосування контейнерів сильні удари є причинами пошкоджень, але заходи повинні бути застосовані і для запобігання ударів малої сили. Якщо це не буде зроблено, то наслідки від ударів малої сили будуть підсумовуватися і наносити не меншої шкоди перевантажується продукції. Втрати від пошкоджень плодово-овочевої продукції при вантажно-розвантажувальних роботах складають в середньому 20-30%. Найчастіше ці проблеми вирішуються за рахунок укрупнення вантажних одиниць (пакети, контейнери), а також раціонального

вибору режимів роботи вантажно-розвантажувальних засобів, застосування різних демпферів, зупинок тощо. Контейнерна вантажопереробка необхідна в багатьох технологічних процесах виробництва продукції. Для невеликих підприємств річне завантаження вантажно-розвантажувальної техніки невелика, особливо для роботи зі штучними вантажами і досягає декількох десятків годин. Внаслідок чого, в таких випадках раціонально використовувати універсальні і роботизовані навантажувачі. Пошкодження вантажу при вантажно-розвантажувальних роботах обумовлені кількома факторами, основним з яких є прискорення випробовується при переміщенні то одним із головних експлуатаційних вимог, що пред'являються до навантажувачів, є підвищення плавності переміщення.

Плавність ходу виконавчих ланок навантажувальних маніпуляторів є важливим якісним показником його роботи, що характеризує здатність переміщення в інтервалі експлуатаційних швидкостей без швидкої стомлюваності оператора або пошкоджень вантажу, що перевозиться, обумовлених його коливаннями. Вибором раціональної траєкторії, можна істотно скоротити час холостого переміщення робочого органу на монотонних операціях навантаження - розвантаження. Технологічний процес переміщення вантажу за оптимальними траєкторіями в сукупності з модернізованими системами управління буде досить ефективний на розвантаження штучних вантажів в складських приміщеннях, коли потрібно переміщати вантажі на відстані в межах зони дії навантажувача. Причому, він дуже легко може бути автоматизований для повторюваних траєкторій, що підвищить ефективність застосування навантажувального засобу і виключить помилки оператора. Навантажувальні маніпулятори відносяться до підйомно-транспортних машин безперервної або періодичної дії і можуть виконувати такі операції, як захоплення вантажу, його підйом і транспортування, опускання і звільнення. Деякі з цих операцій зазвичай поєднуються повністю або частково. Важливий фактор підвищення продуктивності праці, який залежить від маневреності машини і кваліфікації оператора - це поєднання операцій.

Маніпулятори, забезпечені позиційними стежать приводами ланок і керовані оператором, дозволяють механізувати різноманітні трудомісткі вантажно-розвантажувальні операції. Але навіть при роботі з однотипними вантажами робоча операція змінюється від циклу до циклу, що викликано зміною координат початкової та кінцевої точок траєкторії, тобто робоча операція не цілком зрозуміла заздалегідь, а варіюється в широких межах. Очевидно, ці завдання можна виконати, розвиваючи та вдосконалюючи навантажувачі, мають широкі можливості для механізації різних технологічних процесів. Цим вимогам відповідають навантажувальні маніпулятори, в кінематичних ланцюгах яких присутні просторові виконавчі механізми, що дозволяють здійснити переміщення вантажо-захоплювального органа за складних траєкторіях при порівняно простому конструктивному виконанні на даний час існує безліч різновидів просторових вантажопідіймальних машин.



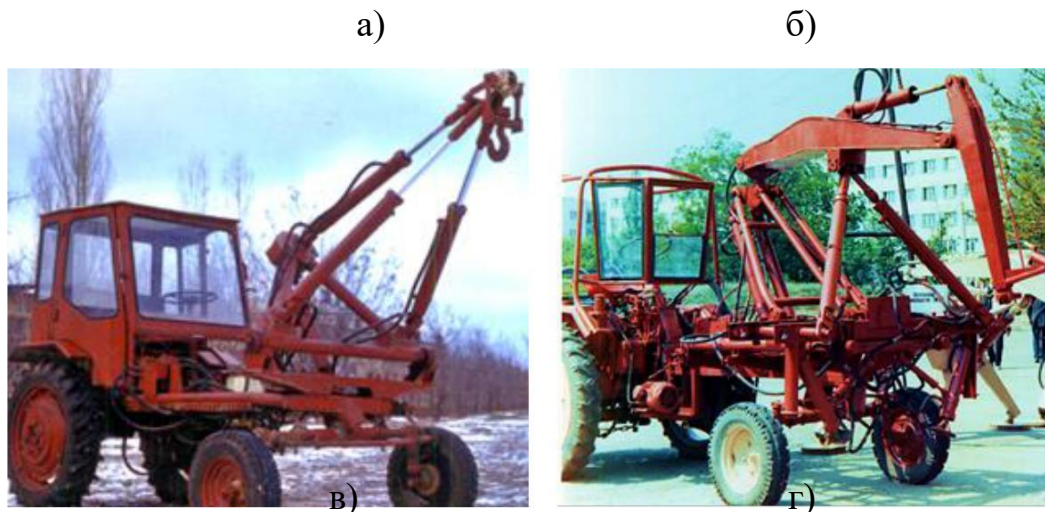


Рис.1.23. Навантажувачі та маніпулятори на с/г техніці.

а) навісний навантажувальний маніпулятор НПМ-0,6; б) навісний навантажувальний маніпулятор НПМ-0,8; в) бесстреловой навантажувальний маніпулятор БПМ-0,5; г) стріловий навантажувальний маніпулятор СПМ-0,6

2. Аналіз конструктивних особливостей існуючих моделей промислових роботів, оцінка конструкцій.

Застосування роботів маніпуляторі виходить за рамки промисловості та сільського господарства. В наш час вони широко застосовуються і в побуті. Модельний ряд маніпуляторів нараховує більше 100 позицій в різних галузях. Компанії розширюють портфоліо зосереджуючись на програмному забезпеченні.



Рис.1.24. Модельний ряд роботів маніпуляторів.

3. Класифікація роботів маніпуляторів.

Загальна класифікація маніпуляторів виділяє три наступних класи цих систем:

- маніпуляційні;
- мобільні (рухомі);
- інформаційні та керуючі.

Інформаційні РТС є комплекси вимірювально-інформаційних систем і керуючих засобів, автоматично реалізують збір, обробку, передачу інформації і формування у відповідність з цією інформацією різних керуючих сигналів (системи автоматичного контролю і управління виробництвом). Мобільні РТС це рухливі системи, що мають у своїй структурі пересувних роботів, які забезпечують автоматичне переміщення об'єктів маніпулювання в просторі. Як правило, це технічні системи, до складу яких входять підйомно-транспортні роботи у вигляді візків, штабелерів і переміщують роботів з запрограмованими маршрутами переміщень і запрограмованої мети. Вони застосовуються для обслуговування складів, перевезень об'єктів між цехами і ділянками і т.д. Щоб сформулювати уявлення про найбільш розвинених і найбільш поширених сьогодні маніпуляційних робототехнічних системах і відповідних їм роботах розглянемо їх більш детально. Як показано на (рис. 1.25.) маніпуляційні робототехнічні системи, і відповідні їм роботи і маніпулятори, підрозділяються на види, пологи і типи.

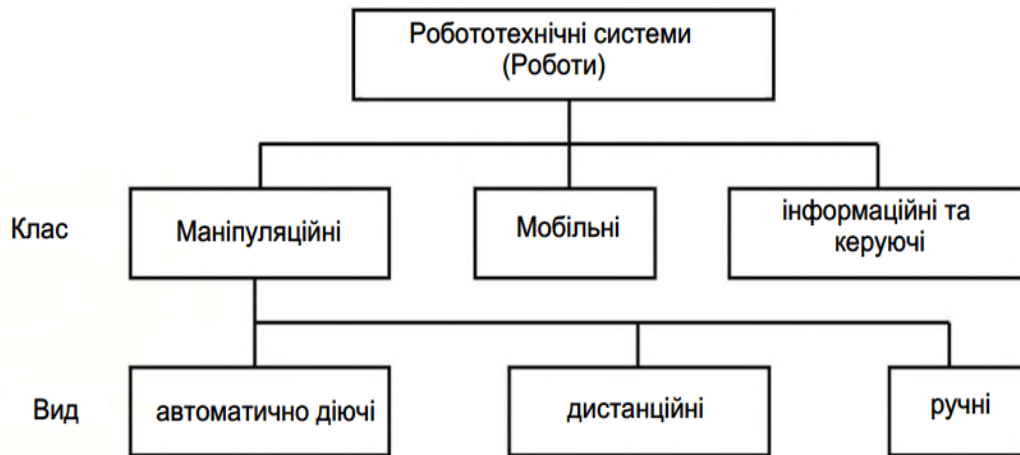


Рис.1.25. Класифікація робототехнічних систем.

Сукупність автоматично діючих роботів класу маніпуляційних РТС утворена чотирма пологами: жостковбудовані, програмні, адаптивні, інтелектні. Термін «інтелектні» виник як альтернативний терміну «інтелектуальний» стосовно до властивостей машин, зовні нагадує і, почасти, що збігається з розумовою діяльністю людини.

Жостковбудовані маніпулятори називають нульовим (дороботним) поколінням, яке характеризується відсутністю у них власних переналагоджуваних (перепрограмованих) пристроїв програмного управління. В результаті жорстко пов'язані з іншим технологічним обладнанням вони управляються системою управління цього обладнання і є маніпулятори і автооператори.

Програмні роботи або, як їх ще називають, роботи першого покоління комплектуються керованими приводами для всіх кінематичних пар (званих деякими авторами суглобами), утворених їх ланками. Наявність власної переналагоджуваної системи програмного управління забезпечує їх перепрограмування на виконання різних операцій. Однак відповідність своїм функціональним призначенням цих роботів можливо лише в строго певній обстановці, для чого необхідне використання додаткових пристосувань. Це призводить до подорожчання їх експлуатації, зниження гнучкості і звуження використання.

Адаптивні роботи - роботи другого покоління допускають деяку недетермінованість зовнішнього середовища або її зміна в певних межах, що розширює їх можливості при експлуатації без додаткової технологічної оснастки, підвищує гнучкість і продуктивність. Досягається це використанням в конструкції роботів датчиків, що реагують на обстановку і систем обробки інформації від датчиків, які виконуються в компактних мікропроцесорних пристроях. Інакше кажучи, адаптивні роботи в змозі самостійно в певних межах перепрограмувати (гнучко змінювати) руху маніпулятора, пристосовуючись до змін зовнішнього середовища.

Інтелектні роботи або роботи третього покоління, що забезпечується використанням комплексу засобів спільно з системами технічного зору і розвиненою мікропроцесорної обробкою інформації. Наявність перерахованих

коштів надає цим роботам певні властивості штучного інтелекту. Це дозволяє роботу працювати в недетермінованій зовнішньому середовищі або пристосовуватися до її змін, за рахунок програмування самим роботом рухів маніпулятора шляхом автоматичної вироблення «рішень» про свої подальші дії, заснованих на розпізнаванні обстановки і спрямованих на вирішення поставленого завдання, яку оператор вводить в його систему управління в найбільш загальній формі. Перераховані фактори дозволяють працювати цим роботам з рухомими об'єктами, з об'єктами різних форм і розмірів, самостійно орієнтованими в просторі і т.д.

Типи роботів визначають відповідно до виду енергоносія, що забезпечує рух маніпулятора і його ланок. Розрізняють чотири типи роботів: електромеханічний, пневматичний, гідравлічний і комбінований.

З усього різноманіття роботів стандартом виділяється частина, яка називається промисловими. Основну частину промислових роботів (ПР), що застосовуються в машинобудуванні, утворює чотири покоління, що належать до виду автоматично діючих класу маніпуляційних РТС. З цієї причини не станемо зупинятися на розгляді роботів, що відносяться до дистанційно-керованих і ручних класів мобільних та інформаційних і керуючих РТС і належних до них роботів, т.д.

В загальному випадку, конструкцією сучасних промислових роботів передбачено використання низки функціонально подібних структурних елементів (рис. 1.26), які утворюють дві основні підсистеми робота: механічну (маніпулятор) та систему керування.

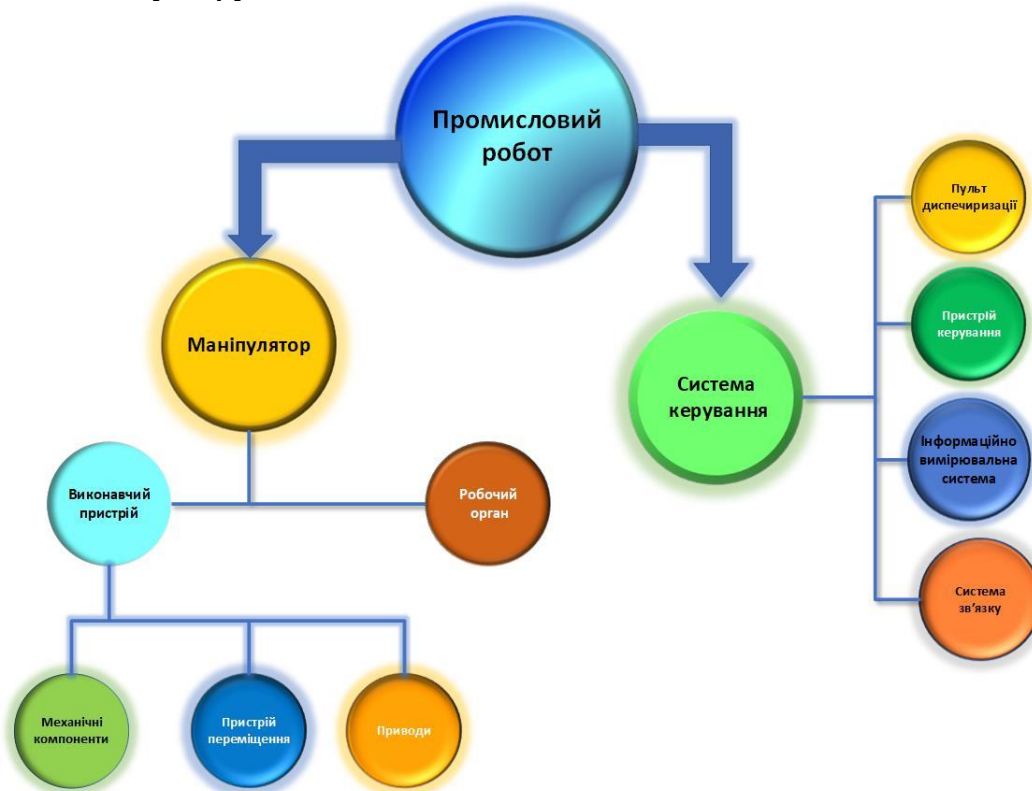


Рис. 1.26. Узагальнена структурна схема промислового робота-маніпулятора

Маніпулятор, як механічна система, являє собою керований багатоланковий просторовий механізм, основними компонентами якого є виконавчий пристрій, що

приводить в дію робочий орган, відповідно до заданих законів руху, що в підсумку дозволяє виконання потрібних технологічних операцій.

До структури виконавчого механізму входять ланки, що з'єднані між собою поступальними, обертальними, циліндричними, сферичними та іншими типами кінематичних пар, комбінування яких дозволяє забезпечити потрібний для виконання поставлених завдань ступінь вільності W . Переміщення виконавчого пристрою здійснюється із використанням приводів, що об'єднані за допомогою механічних компонентів в цілісну систему та забезпечують мобільність мехатронної системи в цілому.

4. Системи основних координатних переміщень маніпуляторів.

Серед численної кількості технічних характеристик маніпулятора (рис. 2.1), на основі яких здійснюють оцінку ефективності та придатності для виконання поставлених завдань, особливо важливими показниками, що визначають функціональність робота-маніпулятора є ступінь рухомості, маневреність та об'єм зони обслуговування (робочої зони маніпулятора).



Рис. 2.1 – Основні технічні характеристики робота-маніпулятора

Для просторових механізмів ступінь рухомості визначається за формулою Сомова-Малишева:

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1, \quad (2.1)$$

де n – число рухомих ланок механізму; p_i – кількість кінематичних пар відповідного класу.

Маневреністю маніпулятора називають його число ступенів вільності при нерухомому захваті. Аналіз конструктивних особливостей та маневреності різних схем маніпуляторів показує, що маневреність залежить не тільки від кількості ступенів вільності захвату, а й від розташування кінематичних пар. Підвищення маневреності маніпулятора дозволяє виконувати рухи більш високих класів та збільшує свободу дії оператора при виконанні потрібних переміщень.

Тип і параметри робочої зони маніпулятора визначають область навколишнього простору, у межах якої він може здійснювати маніпуляції, не пересуваючись, тобто при нерухомій основі.

Робоча зона маніпулятора – це простір, у якому може перебувати його робочий орган при всіх можливих положеннях ланок маніпулятора. Форма робочої зони визначається системою координат, у якій здійснюється рух робочого органу маніпулятора, і числом ступенів вільності маніпулятора. На сьогодні науковцями розроблено низку конструктивних схем маніпуляторів, проте базовими та найбільш поширеними в агропромисловому комплексі є чотири типові схеми, що представлені на рис. 2.2 – 2.5.

Декартовий тип (рис. 2.1). У цього промислового робота його трьох принципова вісь має призматичні з'єднання, або вони рухаються лінійно ретельно один до одного. Декартові роботи найкраще підходять для дозування клею у автомобільній промисловості. Основна перевага декартів полягає в тому, що вони здатні рухатися в декількох лінійних напрямках, а також вони здатні робити прямолінійні вставки та їх легко програмувати. Недоліками декартового робота є те, що він займає занадто багато місця, оскільки більша частина місця у цього робота не використовується.

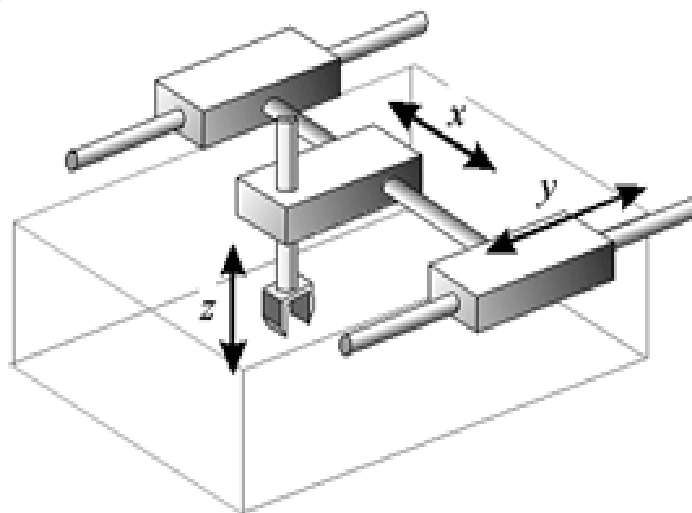


Рис. 2.2. Маніпулятор декартового типу

Циліндричний тип має три осі руху - вісь кругового руху та дві лінійні осі

в горизонтальному та вертикальному русі руки (рис.2.2). Так він має 1 обертовий шарнір, 1 циліндричний і 1 призматичний шарнір. Сьогодні циліндричний робот менш використовується і замінюється більш гнучкими та швидкими роботами, але він займає дуже важливе місце в історії, оскільки його використовували для зчеплення та виконання завдань задовго до розробки шести робочих осей. Його перевага полягає в тому, що він може рухатися набагато швидше, ніж декартовий робот. Його недолік полягає в тому, що він вимагає зусиль для перетворення декартової системи координат на циліндричну систему координат.

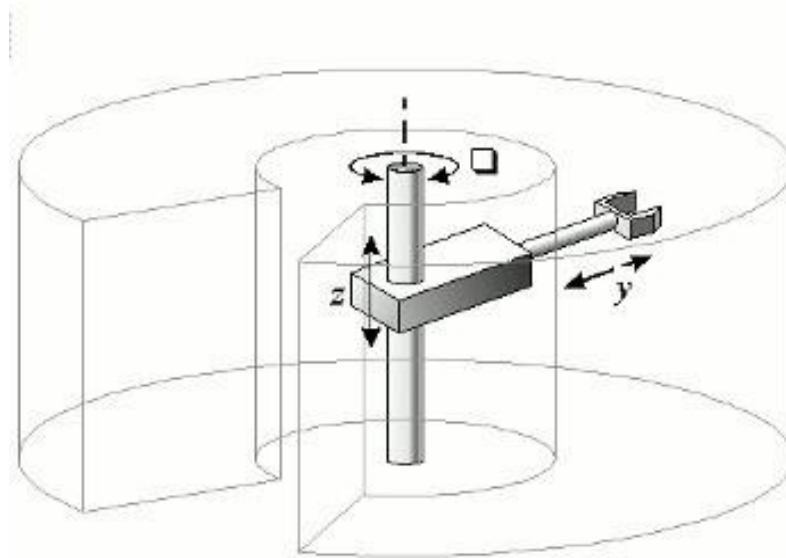


Рис. 2.3. Маніпулятор циліндричного типу

Сферичний тип (рис. 2.3). Це нерухомі рукоятки робота зі сферичними або майже сферичними робочими оболонками, які можуть бути розміщені в полярній системі координат. Вони більш досконалі, ніж декартові, але його управління набагато складніше. Він має 2 обертових з'єднання та 1 призматичний шарнір. Його основні напрямки роботи в керуванні операціями на виробничій лінії.[11.12.]

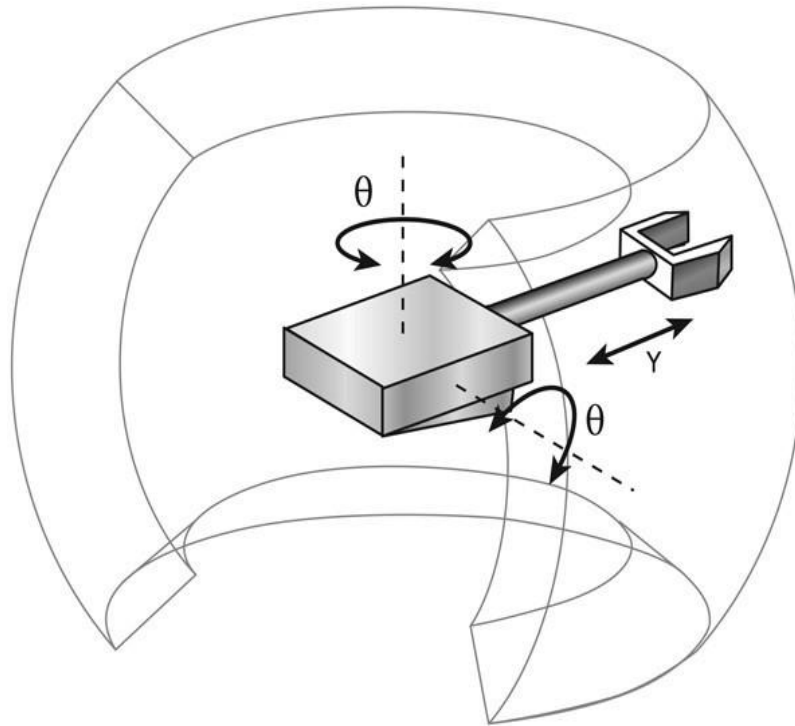


Рис. 2.4. Маніпулятор сферичного типу

Ангулярний тип представляє собою Шарнірний маніпулятор, який іноді також називають зчленованим, ліктьовим або антропоморфним маніпулятором (рис. 2.4.). Вони, як правило, складаються з двох «плечових» суглобів, одного для обертання навколо вертикальної осі та одного для підняття з горизонтальної площини, «ліктьового» суглоба, вісь якого, як правило, паралельний плечовому суглобу та двох або трьох суглобів «зап'ястя» на кінці маніпулятора. Тому такий робот нагадує руку людини. Його зона обслуговування значно більша, ніж у маніпуляторів інших типів. Він здатний обходити перешкоди набагато різноманітнішими шляхами і навіть складатися, але разом з тим він виключно складний в управлінні.

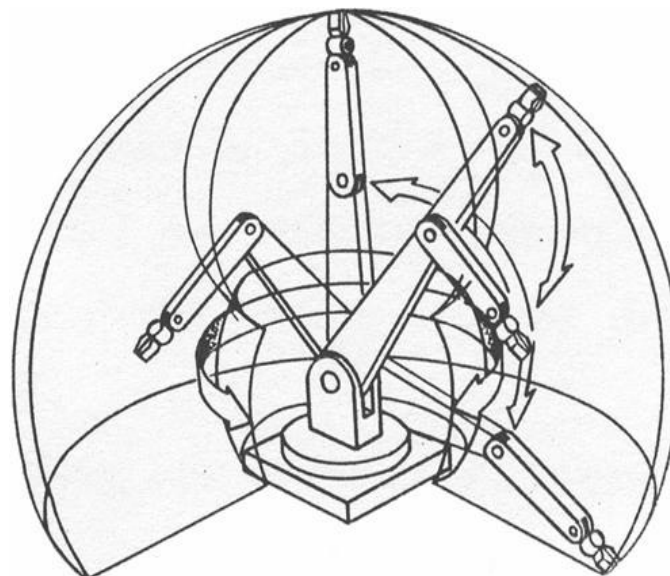


Рис. 2.5. Маніпулятор ангулярного типу

Лекція

Інформаційна лекція

Кількість годин: 2

ТЕМА . РОЗРОБКА ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОТОТИПУ АНГУЛЯРНОГО МАНІПУЛЯТОРА

Мета: Ознайомитись із моделями прототипу ангулярного маніпулятора.

ПЛАН

1. Виготовлення деталей адаптивним нарощуванням.
2. Складання виконавчої частини маніпулятора.
3. Апаратна частина.
4. Програмне забезпечення.

Рекомендована література:

1. Kupchuk I., Tokarchuk O., Hontar V., Zamrii M. The kinematic analysis of a vibration crusher for feed grain. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1 (100). С. 32-38.
2. Sisinni E., Saifullah A., Han S., Jennehag U., Gidlund M. Industrial Internet of Things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Trans. Ind. Informat.*, 2018. vol. 14, №. 11, P. 4724_4734.
3. Solona O., Kovbasa V., Kupchuk I. Analytical study of soil strain rate with a ploughshare for uncovering slit. *Agraarteadus*. 2020. Vol. 31, №2. P. 212–218.
4. Solona O., Kupchuk I. Dynamic synchronization of vibration exciters of the three-mass vibration mill *Przegląd Elektrotechniczny*. 2020. Vol. 96, №3. P. 161–165.
5. Yanovych V., Kupchuk. I. Development of movement mathematical model for executive bodies of gyroscope-type mill. *SWorld journal: Technical sciences*. 2017. Issue 13. С. 174-184.
6. Купчук І. М., Зубар І. В., Онищук Ю. В., Дідик А. М., Замрій М. А. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Harvesting Cereals Optimization v. 1.2» («Harvesting cereals v. 1.2») : Свідоцтво № 103729 від 05.04.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 64, 2021.
7. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Зубар І. В., Онищук Ю. В. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Fuel consumption calculation v.1.0» : Свідоцтво № 103401 від 24.03.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 64, 2021.
8. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Твердохліб І. В., Телекало Н. В., Колесник Т.В., Дідик А. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Optimization of agricultural transportation v. 1.0» («Agro-

transportation optimization v. 1.0») : Свідоцтво №107370 від 16.08.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 66, 2021.

9. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Холодюк О. В., Левчук К. І., Гонтарук Я. В., Дідик А. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Harvesting Cereals Optimization v. 1.1.5» («Harvesting cereals v. 1.1.5») : Свідоцтво № 102287 від 03.02.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 63, 2021.(27950)

10. Солона О.В., Купчук І.М. Практикум з теорії механізмів і машин: навч. посібник. Вінниця: ТОВ “Друк”, 2020. 252 с.

11. Солона О.В., Купчук І.М. Теорія механізмів і машин. Курсове проектування: навч. посіб. 2-ге вид., допов. і перероб. Вінниця: ВНАУ, 2019. 248 с.

1. Виготовлення деталей адаптивним нарощуванням

Підготовка деталей для друку була проведена в програмному забезпеченні CURA 15.04.6 шляхом формування профілей цифрових моделей (Рис.3.1.).

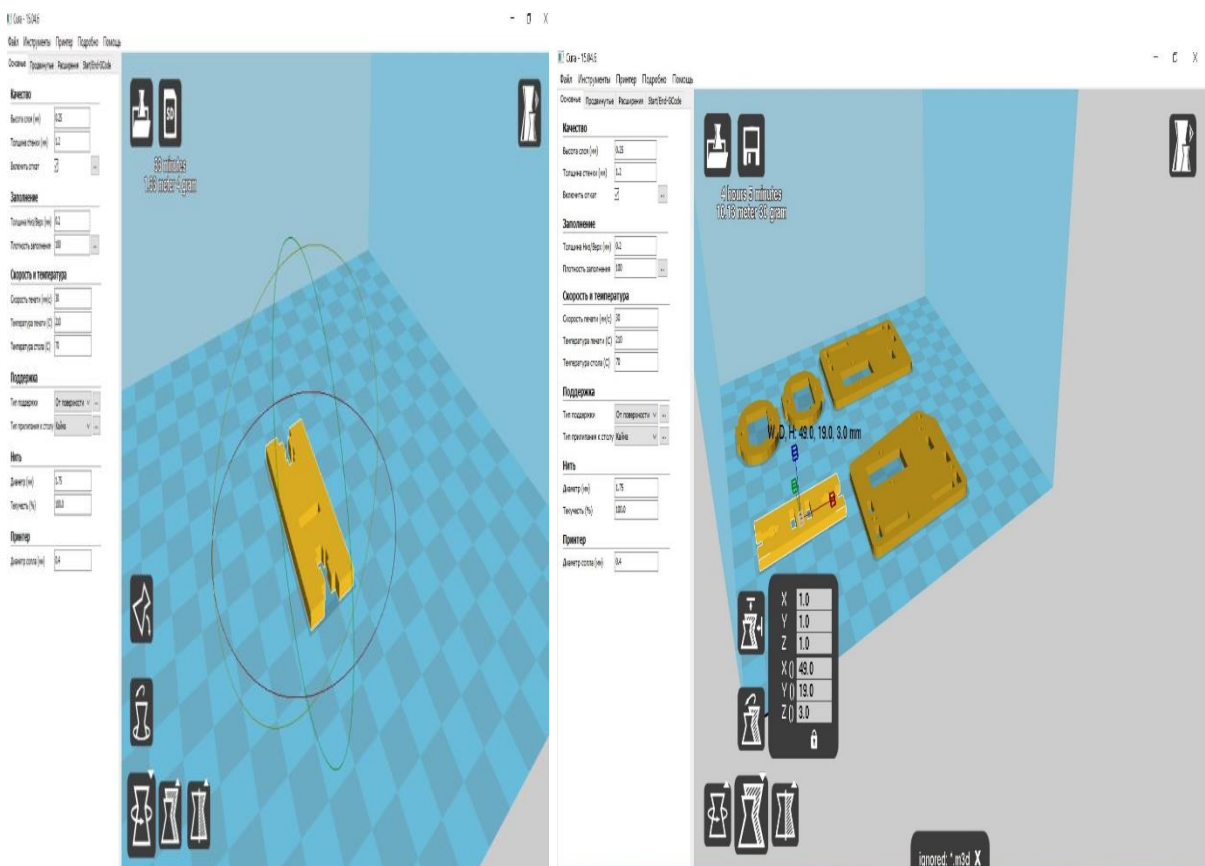


Рис.3.1. Цифровий вигляд деталей в програмному забезпеченні CURA 15.04.6.

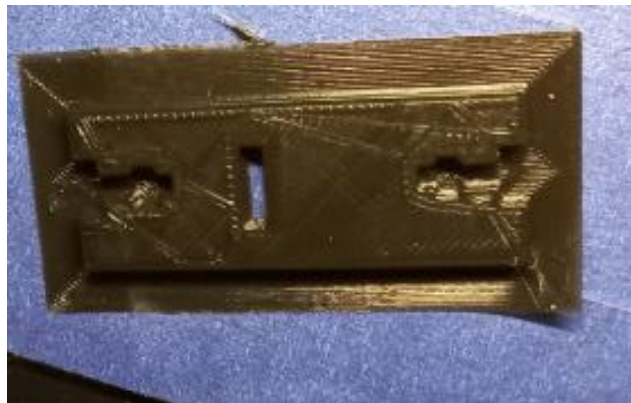
Було запропоновано виготовляти деталі шляхом адитивного нарощування шарів спеціального полімерного матеріалу на основі даних цифрових моделей на 3D-принтері KLEMA 180 (3DDevice, м. Київ, Україна). Витратний матеріал –

пластик PET G 1,75 мм (Devil Design, Польща). Основні параметри процесу 3D-друку: висота шару нанесення – 0,25 мм; товщина зовнішньої стінки – 1,2 мм; товщина верхнього та нижнього шарів – 0,2 мм; щільність заповнення – 100 %; швидкість друку – 30 мм/с; температура друку – 210 °С; температура стола – 70 °С; текучість матеріалу – 100 %; діаметр сопла екструдера – 0,4 мм.(Рис. 3.2.)

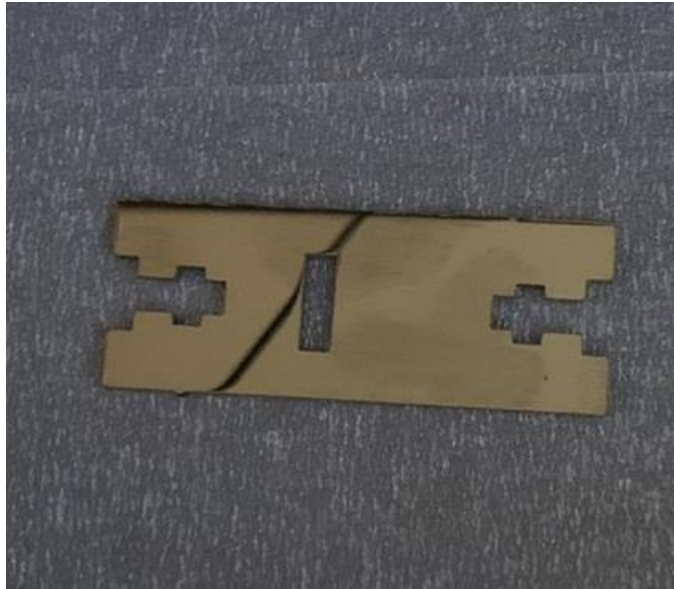


Рис. 3.2. Налаштування 3D-принтера та запуск керуючої програми

Після 3D друку характерні напливи на деталях усувалися механічним очищенням, що є необхідною умовою для подальшого їх використання та складання в діючу модель.(Рис 3.3.)



а



б

Рис.3.3. Деталі виготовлені на 3 D: а) деталь до механічного очищення; б) після механічного очищення;

2. Складання виконавчої частини маніпулятора

Складання ангулярного маніпулятора виконувалося під час проходження виробничої практики на кафедрі ЗТД та ОП. Під час проходження першої частини практики було розроблено та виготовлено деталі представленні (на рис 3.3). На другому етапі проходження виробничої практики було виконано Відпрацювання конструкції маніпулятора на технологічність.

Технологічність — відповідність продукції вимогам економічної технології її використання. Вона забезпечується при розробці конструкції виробу. Технологічність конструкції — це сукупність властивостей конструкції виробу, які проявляються у можливості оптимальних (найвигідніших техніко-економічних) витрат праці, коштів, матеріалів і часу при технологічній підготовці виробництва, виготовленні, експлуатації та ремонті виробу. Технологічність конструкції виробу характеризує можливість його виготовлення, експлуатації та зберігання за умов використання наявних у виробника та споживача виробу трудових, матеріальних, енергетичних та інших ресурсів. Будь-який виріб повинен бути технологічно раціональним для заданих конкретних умов підготовки його виробництва, виготовлення, експлуатації та ремонту.

Таким чином, було виконано складання механічної частини ангулярного робота для усунення конструктивних недоліків які були допущенні на ранньому прототипуванні деталей. Після закінчення механічного збирання перевірили робочі зони ангулярного маніпулятора, а також дальність захвату конструкції. На (рис 3.4.) представлена готова механічна частина ангулярного маніпулятора.



Рис. 3.4. Механічна частина ангулярного маніпулятора.

3. Апаратна частина

Виконавши складання механічної частини ангулярного маніпулятора наступним завданням було розробка апаратного забезпечення. На (рис 3.5.) зображена схема підключення серво приводів.

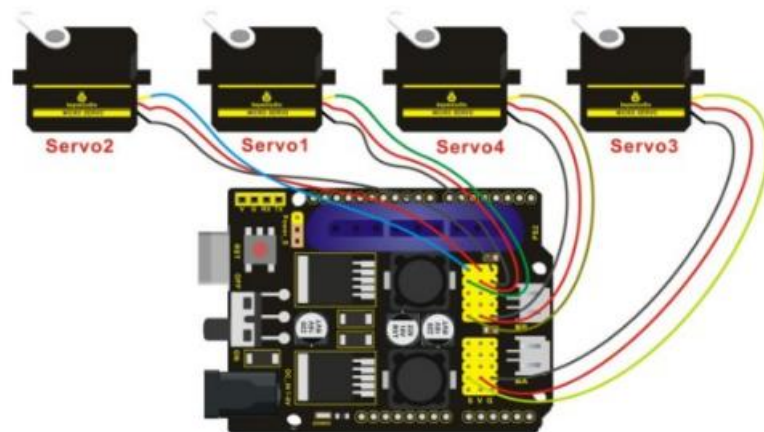


Рис. 3.5. Схема підключення серво приводів.

Поворот ланок маніпулятора і стиснення/розтиснення захватного пристрою здійснюватимуть цифрові серводвигуни. При довжині з урахуванням розміру захватного пристрою приблизна максимальна довжина маніпулятора буде 30 см. Для визначення потужність, необхідну серводвигуну для підняття маніпулятора, необхідно визначити вагу маніпулятора. Для цього врахуємо вагу серводвигунів і деталей ланок та захватного пристрою. Серводвигун важить в середньому 9 грам,

оскільки їх 4, то загальна вага становить 36 грам, інші деталі будуть зроблені з пластика та металу, в цілому вага робота має бути близько 200 грам. Припустимо що маса робота приблизно розподілена рівномірно уздовж всієї його довжини, отже, при закріпленій основі і розташуванні ланок робота перпендикулярно силі тяжіння, маса в робочій точці робота буде 50 грам. При масі 50 грам в робочій точці і довжині робота в 30 см, момент на валу серводвигуна буде 1,25 кг/см за умови, що захватний пристрій маніпулятора буде без вантажу. Тому обираємо серводвигун з необхідним моментом ks0194 (Keyestudio) показаний (на рисунку 3.6.)



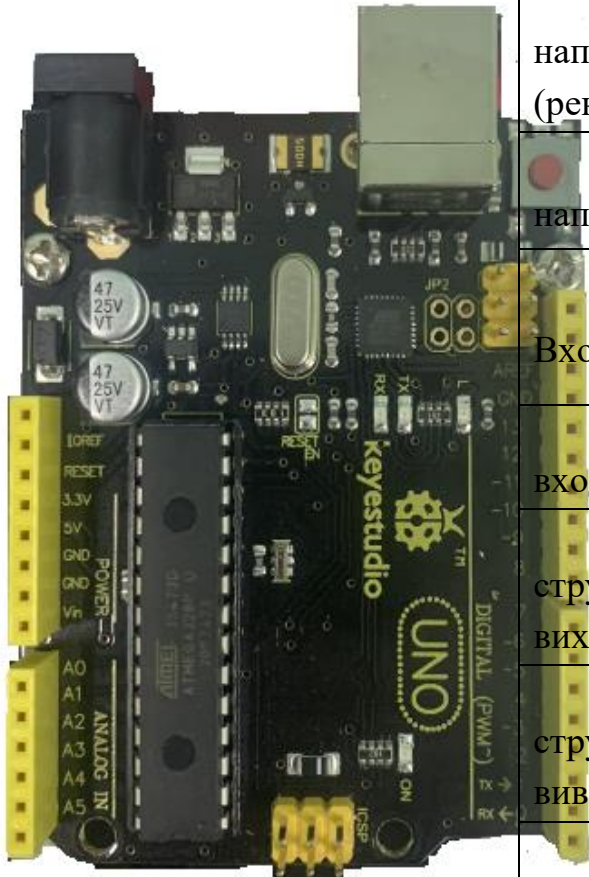
Рис. 3.6. Зовнішній вигляд серводвигуна Ks0194

Характеристика	Значення
Робоча напруга	4,8 V~6V
Діапазон кута	180 °
Діапазон імпульсів	500 → 2500μsec
Швидкість без навантаження	0,12 ± 0,01 сек / 60 (4,8 В); 0,1 ± 0,01 сек / 60 (6 В)
Струм без навантаження	200 ± 20mA (4,8) V 8; 220 ± 20mA (6V)
Пусковий момент	1,3 ± 0,01 кг / см (4,8 В); 1,5 ± 0,1 кг / см (6V)
Довжина дроту	250 ± 5 мм
Розміри	22,9мм * 12,2мм * 30мм
Вага	9 ± 1 г(без сервокріплень)


Табл. 3.1 Характеристики серводвигуна Ks0194

Таблиця 3.2. Контролер Arduino Uno R3 ATmega328

Характеристики Arduino Uno	
Мікроконтролер	ATmega328
Робоча напруга	5 V
Вхідна напруга (рекомендований)	7-12 V
Вхідна напруга (граничне)	6-20 V
Цифрові Входи / Виходи	14 (6 із яких виходи ШИМ)
Аналогові входи	6
Постійний струм через вхід / вихід	40 mA
Постійний струм для виведення 3.3 В	50 mA
Флеш пам'ять	32 кБ (з них 0.5 кБ зарезервовано системою)
ОЗУ	2 кБ
EEPROM	1 кБ
Тактова частота	16 МГц



Таблиця 3.3. Плата розширення Arduino Sensor Shield V5.0 APC220

 <p>Arduino Sensor Shield V5.0 APC220</p>	Характеристики Arduino Sensor Shield V5.0 APC220		
	Напру га живлення плати:	5 V	
	Джере ло живлення:	від контролера Arduino та/або зовнішніх джерел;	
	<p>Досту пні інтерфейси розширення:</p>	SD card interface (інтерфейс для підключення карт пам'яті SD);	
		Ultrasonic interface (інтерфейс для підключення ультразвукових датчиків);	
		I2C (ІС) port (Inter-Integrated Circuit) - послідовна шина даних для зв'язку інтегральних схем;	
		Інтерфейс RS232 (послідовна шина COM);	
		ACP220 wireless module interface (інтерфейс для підключення зовнішнього Wi-Fi модуля ACP220);	
		Bluetooth interface (інтерфейс для підключення зовнішнього пристрою Bluetooth);	
LCD parallel interface і LCD serial interface (паралельний і послідовний порт для підключення			

		рідкокристалічного дисплея);
	габари тні розміри:	57 x 57 x 20 мм;
	вага:	26 г

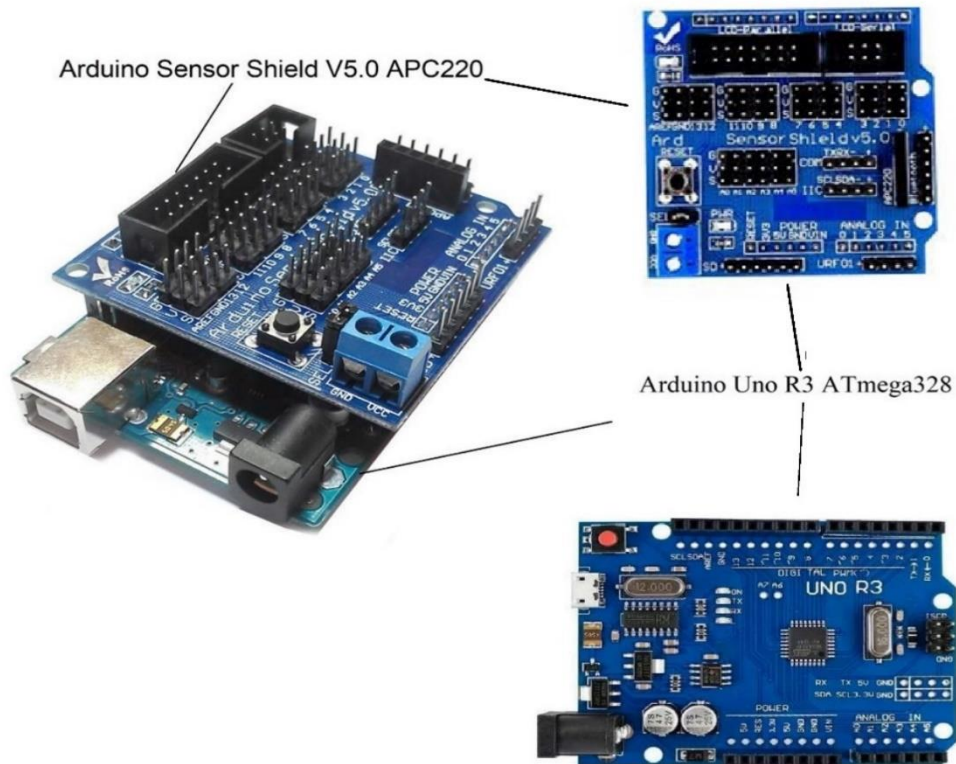


Рис.3.7 СХЕМА ПІДКЛЮЧЕННЯ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

4. Програмне забезпечення

Програмне забезпечення ангулярного робота почалося з написання програмного коду, а саме написання коду на кожен серво привод, який буде приводити в рух одну із частин маніпулятора, при його використанні.

Комп'ютерна програма є спеціалізованим програмним забезпеченням та призначена для джойстикowego керування серводвигунами. Апаратна частина ангулярного маніпулятора створений на базі плати мікроконтролерів з відкритим кодом Arduino UNO. Для управління серводвигунами застосовується передача інформації у вигляді сигналів, які генеруються джойстиками. Формування імпульсів відбувається при виконанні протоколів якими керується джойстиками.

При підключенні ArduinoUnoR3 до джерела живлення, в ній тут же запускається програма і посилає сигнали на серводвигуни, щоб вони повернулися в початкове положення. Далі програма починає чекати команди, що надходять від

пульта керування. Блок-схема роботи програми представлена (на рисунку 3.8.)



Рис. 3.8. Блок-схема роботи програми.

Програма представлена у вигляді окремих файлів і папок, що містить вихідний код відтворений на мові програмування Arduino (базується на об'єктно-орієнтованій мові C++ із доповненням деяких специфічних бібліотек) Програма керування апаратними компонентами роботехнічної платформи (файли в папці «**Robot_Smart_IR_1_0**»);

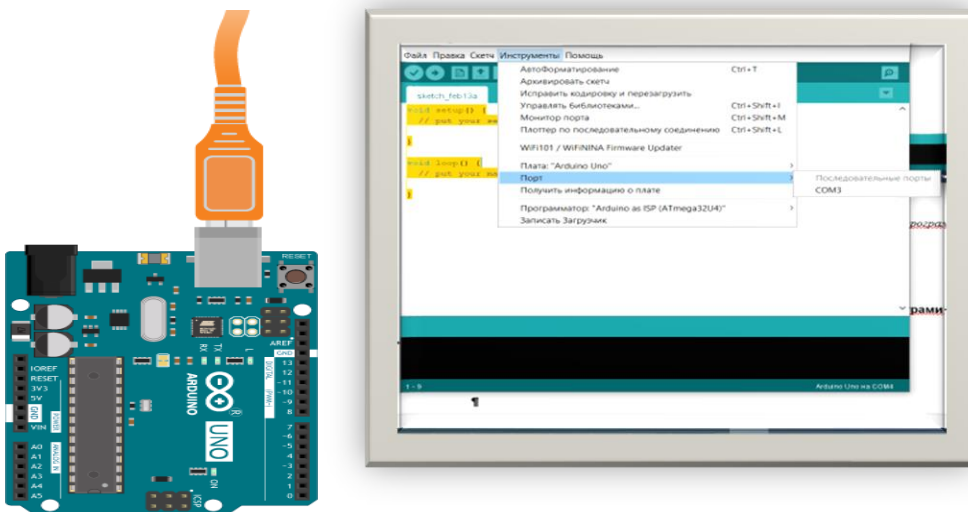


Рис. 3.9. Підключення Arduino UNO R3 до ПК та запуск програми Arduino IDE

Відкрити файл із вихідним кодом програми «**Robot_Smart_IR_1_0.ino**», що розміщується в директорії: [«**Robot_Smart_IR_1_0\Robot_Smart_IR_1_0\Robot_Smart_IR_1_0.ino**»](#).

Файли програми керування апаратними компонентами:

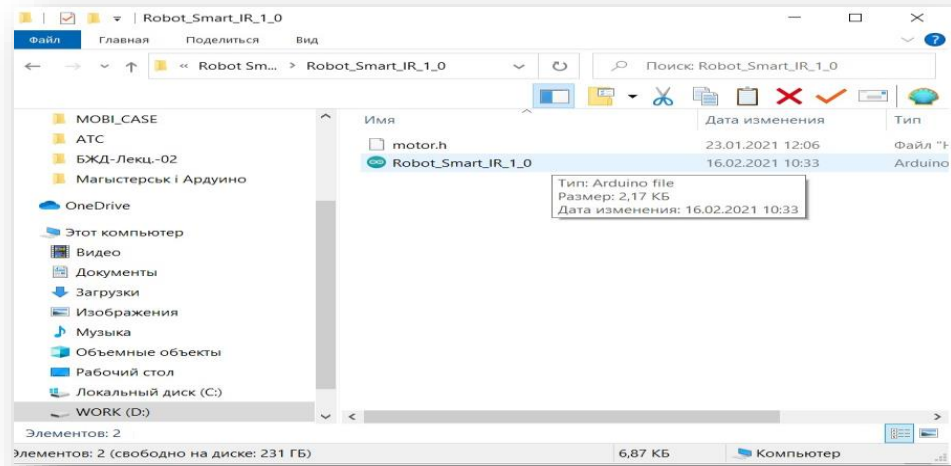


Рис. 3.10 Файлы программы керування апаратними компонентами ангулярного маніпулятора:

Завантажити програму керування в пам'ять мікроконтролера Arduino UNO. Для цього на панелі інструментів потрібно виконати дію «Загрузка» та дочекатися повідомлення про успішне завантаження.

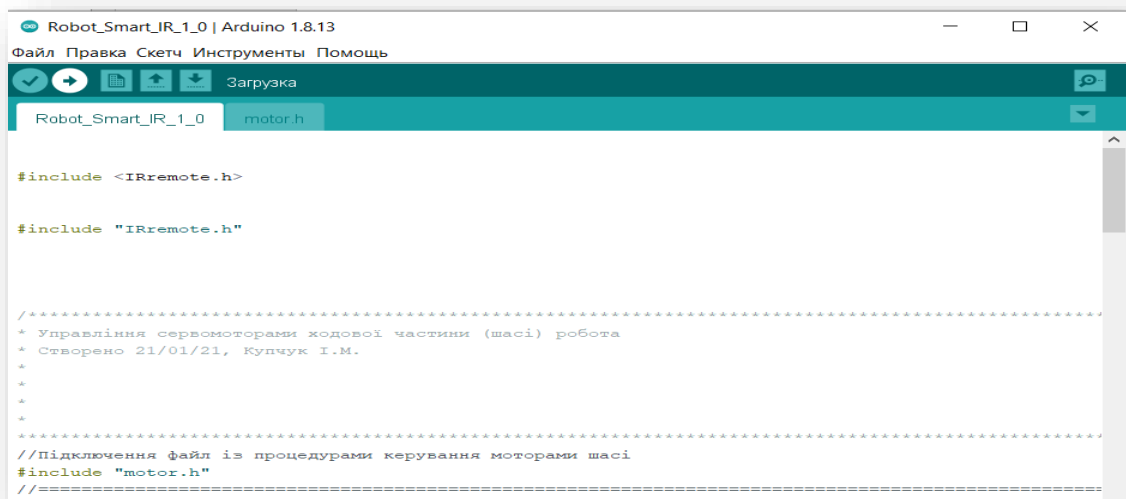


Рис. 3.11. Завантаження вихідного коду в пам'ять мікроконтролера Arduino UNO

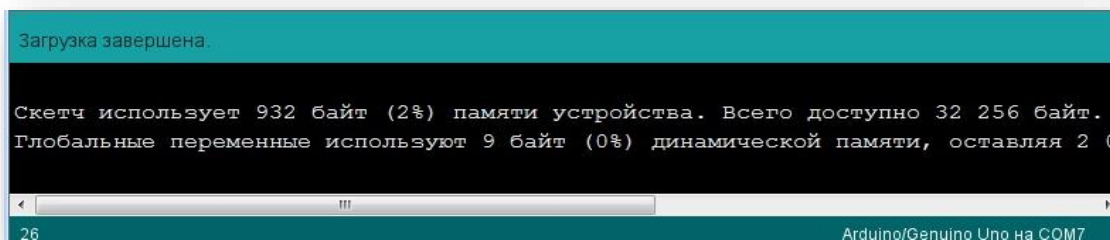


Рис. 3.12. Повідомлення про завершення завантаження

Лекція

Інформаційна лекція

Кількість годин: 2

ТЕМА . ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ АНГУЛЯРНОГО МАНІПУЛЯТОРА

Мета: Ознайомитись із параметрами ангулярного маніпулятора.

ПЛАН

1. Розробка структурно-кінематичної схеми просторового механізму.
2. Передумови та припущення для аналітичного програмування маніпулятора.
3. Розв'язок прямої і оберненої задачі кінематики маніпулятора.
4. Розробка віртуальної 3D моделі маніпулятора.
5. Визначення діапазонів кутів повороту ланок.
6. Дослідження динамічних характеристик маніпулятора.

Рекомендована література:

1. Gunko I., Hraniak V., Yaropud V., Kupchuk I., Rutkevych V. 2021. Optical sensor of harmful air impurity concentration. *Przegląd Elektrotechniczny*. Vol. 97, №7. P. 76-79.
2. Hrushetskyi S., Yaropud V., Kupchuk I., Semenushena R. The heap parts movement on the shareboard surface of the potato harvesting machine. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*. 2021. Vol. 14 (63), № 1. P. 127-140.
3. Kovbasa V., Solona O., Deikun V., Kupchuk I. Functions derivation of stresses in the soil and resistance forces to the motion of a plough share for cavity creation. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2021. 83(3). P. 305–318.
4. Kupchuk I., Tokarchuk O., Hontar V., Zamrii M. The kinematic analysis of a vibration crusher for feed grain. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1 (100). С. 32-38.
5. Kuznietsova I., Bandura V., Paziuk V., Tokarchuk O., Kupchuk I. Application of the differential scanning calorimetry method in the study of the tomato fruits drying process. *Agraarteadus*. 2020. Vol. 31, №2. P. 173–180.
6. Sisinni E., Saifullah A., Han S., Jennehag U., Gidlund M. Industrial Internet of Things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Trans. Ind. Informat.*, 2018. vol. 14, №. 11, P. 4724_4734.
7. Solona O., Derevenko I., Kupchuk I. Determination of plasticity for pre-deformed billet. *Solid State Phenomena*. 2019. Vol. 291. P. 110–120.
8. Solona O., Kovbasa V., Kupchuk I. Analytical study of soil strain rate with a ploughshare for uncovering slit. *Agraarteadus*. 2020. Vol. 31, №2. P. 212–218.

9. Solona O.V., Kovbasa V.P., Kupchuk I.M. The contact interaction dynamics of the working tool of the mole plowshare with the soil during forming process a channel for an anti-filtration screen. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. №2 (97). С. 81-89.

10. Yanovych V., Kupchuk. I. Development of movement mathematical model for executive bodies of gyroscope-type mill. *SWorld journal: Technical sciences*. 2017. Issue 13. С. 174-184.

11. Гончарук І. В., Купчук І. М., Солона О. В., Мельник О. С. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Smart IR-Control Robotic Chassis v 1.0» («Robot Smart Control v 1.0») : Свідоцтво № 103284 від 18.03.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 64, 2021.

12. Граняк В.Ф., Купчук І.М., Гонтар В.Г. Метод та засіб прямого автоматизованого вимірювального контролю ізоляції обмоток електричних машин. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. №2 (109). С. 129-137.

13. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Зубар І. В., Онищук Ю. В. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Fuel consumption calculation v.1.0» : Свідоцтво № 103401 від 24.03.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 64, 2021.

14. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Твердохліб І. В., Телекало Н. В., Колесник Т.В., Дідик А. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Optimization of agricultural transportation v. 1.0» («Agro-transportation optimization v. 1.0») : Свідоцтво №107370 від 16.08.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 66, 2021.

15. Купчук І. М., Шаргородський С. А., Холодюк О. В., Левчук К. І., Гонтарук Я. В., Дідик А. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Harvesting Cereals Optimization v. 1.1.5» («Harvesting cereals v. 1.1.5») : Свідоцтво № 102287 від 03.02.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 63, 2021.(27950)

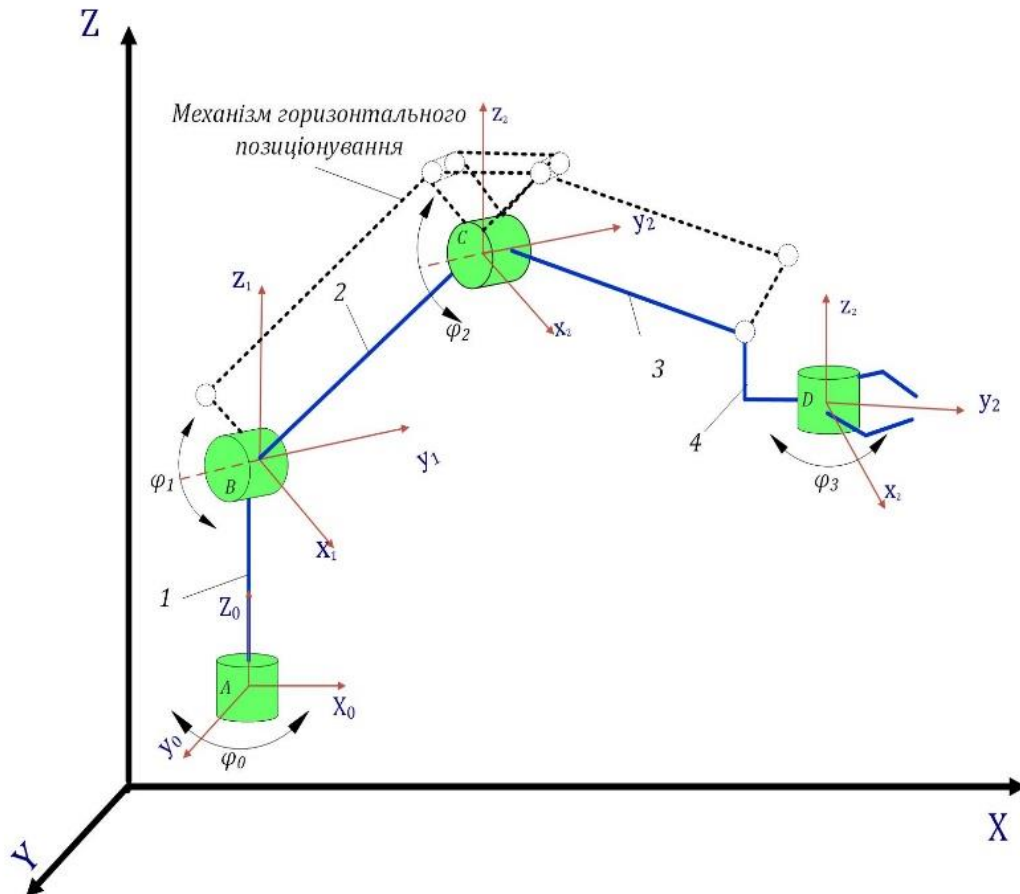
16. Купчук І.М. Компромісна оптимізація режимних параметрів процесу подрібнення зернової сировини при виробництві етилового спирту. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. №4 (87). С. 91-100.

17. Купчук І.М., Браніцький Ю.Ю. Розробка програмного алгоритму розрахунку кінематичних параметрів робочих органів віяльно-калібрувальної машини. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. №2(97). С. 80-87.

1. Розробка структурно-кінематичної схеми просторового механізму.

Перед розробкою тривимірної моделі конструкції маніпулятора необхідно розробити його структурну кінематичну схему (рис. 2.5). Було вирішено розробити

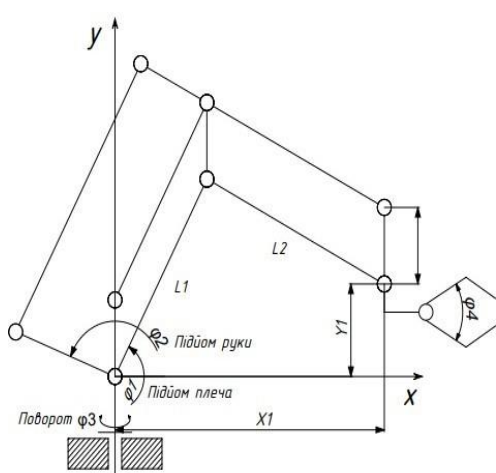
маніпулятор ангулярного типу, тому обертальні кінематичні пари найбільш прості в конструкції і легко реалізовані, також така конструкція має досить велику робочу зону і своєю гнучкістю дозволяє обходити деякі перешкоди. Щоб захватний пристрій захоплював об'єкти правильно, він повинен бути спрямований в певній орієнтації, для цього в кінематичну схему доданий спеціальний механізм для утримання захватного пристрою в незмінній орієнтації.



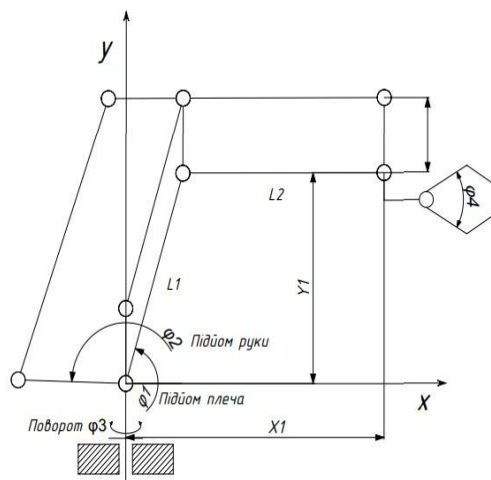
1 – основа; 2 – плече; 3 – передпліччя; 4 – кисть; XYZ – базова система координат; $x_i y_i z_i$ – локальні системи відліку; φ_i – кутова координата положення i -ї ланки в системі $x_i y_i z_i$ (поворот i -ї ланки відносно $(i-1)$).

Рис. 2.6. Структурно - кінематична схема ангулярного маніпулятора

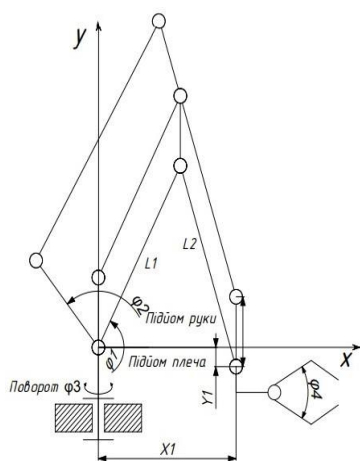
У цій кінематичній схемі використовуються деякі додаткові ланки і елементи, які утворюють паралельний механізм, що дозволяє захватному пристрою маніпулятора залишатися завжди паралельно основі незалежно від того, на які кути φ_1 і φ_2 φ_3 повернуться ланки маніпулятора. На рисунку 2.6 (а,б, в, г) показаний принцип роботи паралельного механізму, на якому видно що при зміні кута повороту ланок, захватний пристрій робота зберігає паралельне положення щодо основи. Дана властивість зручна для захоплення, переміщення і встановлення об'єкта в нове положення, при цьому зберігається його вертикальна орієнтація.



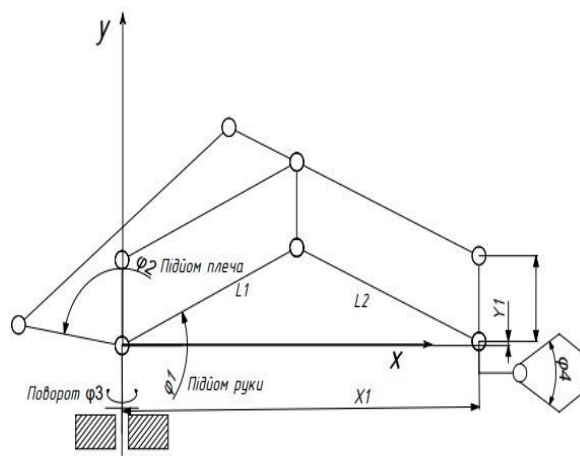
а)



б)



в)



г)

Рис. 2.7. Принцип роботи паралельного механізму.

2. Передумови та припущення для аналітичного програмування маніпулятора.

Для виконання кінематичного дослідження можна використати спрощену кінематичну схему (рис. 2.7), адже робот здійснює плоско-паралельне переміщення захватного пристрою.

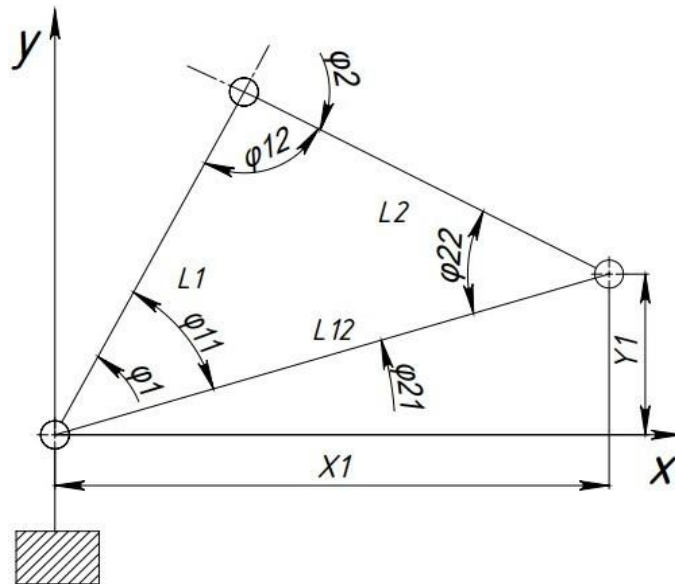


Рис. 2.8. Спрощена кінематична схема лабораторного маніпулятора

Маніпулятор має 2 ланки $L1$ та $L2$, а також 2 кінематичні пари обертового типу, що працюють в одній площині. Шляхом повороту на кути φ_1 та φ_2 здійснюється переміщення кінематичних пар.

За рахунок обертання маніпулятора на кут φ_3 відносно осі Y виконується переміщення у тривимірному просторі, тому розглянемо переміщення маніпулятора в одній площині.

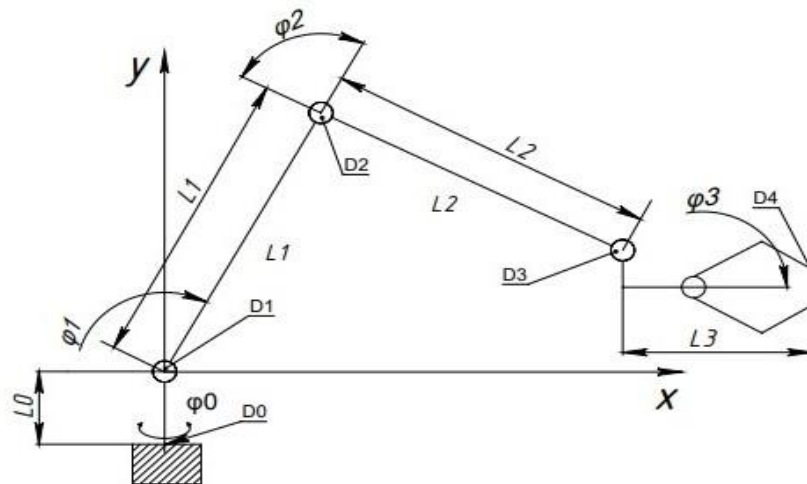
Перша ланка $L1$ закріплена на основі і обертається на кут φ_1 , а друга ланка $L2$ кріпиться на кінці першої і обертається щодо неї на кут φ_2 . Робочий орган маніпулятора знаходиться на кінці 2 ланки.

Треба знайти такі кути φ_1 і φ_2 , які дозволять маніпулятору із ланками $L1$ і $L2$ помістити робочий орган в задану точку (x, y) , що можна зробити за допомогою зворотної задачі кінематики.

3. Розв'язок прямої і оберненої задачі кінематики маніпулятора.

Пряма задача – це визначення положень ланок маніпулятора при заданих кутах повороту з'єднань і розмірів ланок. Обернена задача це визначення кутів повороту при заданих координатах положення робочої точки маніпулятора.

Перед вирішенням завдань складемо структурну схему (рис. 2.8) з потрібними для вирішення позначеннями.



$\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$ - кути повороту; L_0, L_1, L_2, L_3 - довжини ланок; D_0, D_1, D_2, D_3, D_4 - точки положення ланок.

Рис. 2.9. Структурна схема ангулярного маніпулятора

Визначимо значення кутів та довжин:

$$\varphi_0 := 65 \frac{\pi}{180}; \quad \varphi_1 := 15 \frac{\pi}{180}; \quad \varphi_2 := 35 \frac{\pi}{180}; \quad \varphi_3 := -(q_1 + q_2). \quad (2.5)$$

$$L_0 := 30; \quad L_1 := 80; \quad L_2 := 80; \quad L_3 := 30.$$

Матриці перенесення:

$$AL_0 := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad AL_1 := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad AL_2 := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & L_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad AL_3 := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & L_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Матриці повороту:

$$Aq_0 := \begin{pmatrix} \cos(q_0) & -\sin(q_0) & 0 & 0 \\ \sin(q_0) & \cos(q_0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad Aq_1 := \begin{pmatrix} \cos(q_1) & 0 & \sin(q_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(q_1) & 0 & \cos(q_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (2.7)$$

$$Aq_2 := \begin{pmatrix} \cos(q_2) & 0 & \sin(q_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(q_2) & 0 & \cos(q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad Aq_3 := \begin{pmatrix} \cos(q_3) & 0 & \sin(q_3) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(q_3) & 0 & \cos(q_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Обчислення матриць положення точок:

$$A0 := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.8)$$

$$A1 := A0 \cdot Aq0 \cdot AL0; \quad A2 := A1 \cdot Aq1 \cdot AL1; \quad A3 := A2 \cdot Aq2 \cdot AL2; \quad A4 := A3 \cdot Aq3 \cdot AL3.$$

Координати точок маніпулятора:

$$X := \begin{pmatrix} A0_{0,3} \\ A1_{0,3} \\ A2_{0,3} \\ A3_{0,3} \\ A4_{0,3} \end{pmatrix} \quad Y := \begin{pmatrix} A0_{1,3} \\ A1_{1,3} \\ A2_{1,3} \\ A3_{1,3} \\ A4_{1,3} \end{pmatrix} \quad Z := \begin{pmatrix} A0_{2,3} \\ A1_{2,3} \\ A2_{2,3} \\ A3_{2,3} \\ A4_{2,3} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Наводимо схему для розв'язання прямої задачі (рис 2.9.)

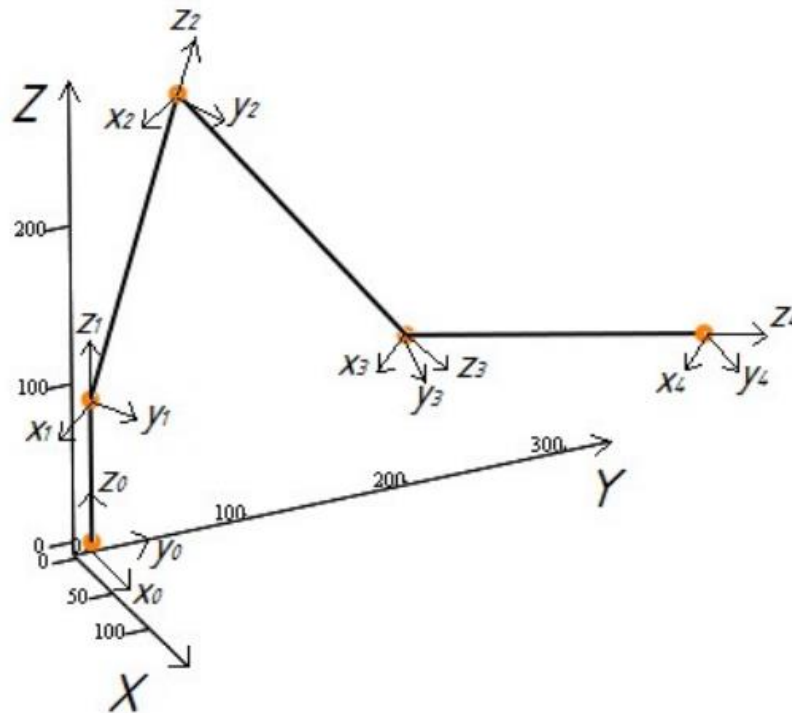


Рис. 2.10. Схема для розв'язання прямої задачі

Для наочного уявлення розв'язання оберненої задачі показана геометрична схема (на рисунку 2.10.)

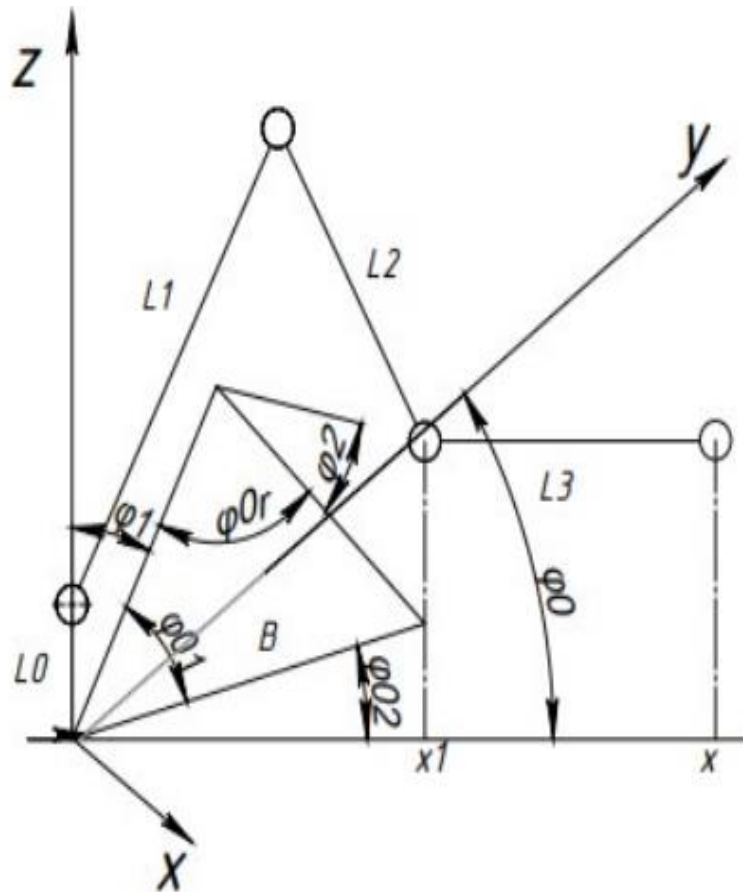


Рис 2.11. Схема для розв'язання оберненої задачі

Розв'язання оберненої задачі:

Установлюємо довжини ланок:

$$L0 := 30; \quad L1 := 80; \quad L2 := 80; \quad L3 := 30.$$

Задаємо координати положення точки захватного пристрою:

$$x := A4_{0,3} = 148; \quad y := A4_{1,3} = 317; \quad z := A4_{2,3} = 130.$$

Знаходимо проекцію точки P4 на площину OXY:

$$x := \sqrt{x^2 + y^2} \tag{2.10}$$

Знаходимо проекцію точки P3 на площину OXY:

$$x1 := x - L3 \tag{2.11}$$

Зміщуємо вниз координату z точки P3 на довжину L0:

$$z1 := z - L0 \tag{2.12}$$

Знаходимо відстань між початком координат і точкою P3:

$$B := \sqrt{x1^2 + z1^2} \tag{2.13}$$

Знаходимо кут φ_0 :

$$\varphi_0 := a \sin\left(\frac{y}{x}\right) = 1.134 \quad (2.14)$$

Перша і друга ланки та відрізок В утворюють трикутник, оскільки їх довжини відомі, то можемо визначити кути цього трикутника за формулами:

Знаходимо кут φ_{01} :

$$\varphi_{01} := a \cos\left(\frac{L1^2 + B^2 - L2^2}{2 \cdot B \cdot L2}\right) = 1.091 \quad (2.15)$$

Знаходимо кут φ_{0r} :

$$\varphi_{0r} := a \cos\left(\frac{L1^2 + L2^2 - B^2}{2 \cdot L1 \cdot L2}\right) = 0.96 \quad (2.16)$$

Знаходимо кут φ_{02}

$$\varphi_{02} := a \sin\left(\frac{z1}{B}\right) = 0.218 \quad (2.17)$$

Знайшов кути трикутника визначаємо кути поворотів ланок:

$$\varphi_1 := \frac{\pi}{2} - \varphi_{01} - \varphi_{02}; \quad \varphi_2 := \frac{\pi}{2} - \varphi_{0r}. \quad (2.18)$$

Знайдемо значення кутів і градусів:

$$\varphi_0 := \varphi_0 \frac{180}{\pi} = 65 \quad \varphi_1 := \varphi_1 \frac{180}{\pi} = 15 \quad \varphi_2 := \varphi_2 \frac{180}{\pi} = 35 \quad (2.19)$$

Розв'язання показує, що підставив значення координат з розв'язання прямої задачі в зворотну задачу і розв'язав її, одержимо значення кутів такі ж як задавали в прямій задачі, що підтверджує правильність рішення цих задач.

4. Розробка віртуальної 3D моделі маніпулятора.

Для проектування 3D моделі маніпулятора використано програмний комплекс САПР для автоматизації промислового підприємства на етапах конструкторської та технологічної підготовки виробництва – SolidWorks (Dassault Systèmes, Республіка Франція). Комплекс забезпечує розробку виробів будь-якого ступеня складності і призначення та має велику базу стандартних деталей, що дозволяє скоротити час проектування виробу.

Першим етапом проектування було створення основи, до якої кріпляться інші

деталі. На основу маніпулятора найбільші навантаження, також вона прийме на себе всю його вагу. Основа, зображена на рисунку 2.12, має отвори для кріплення до неї деталей, плат керування та ніжок, які покращують стійкість всієї конструкції.

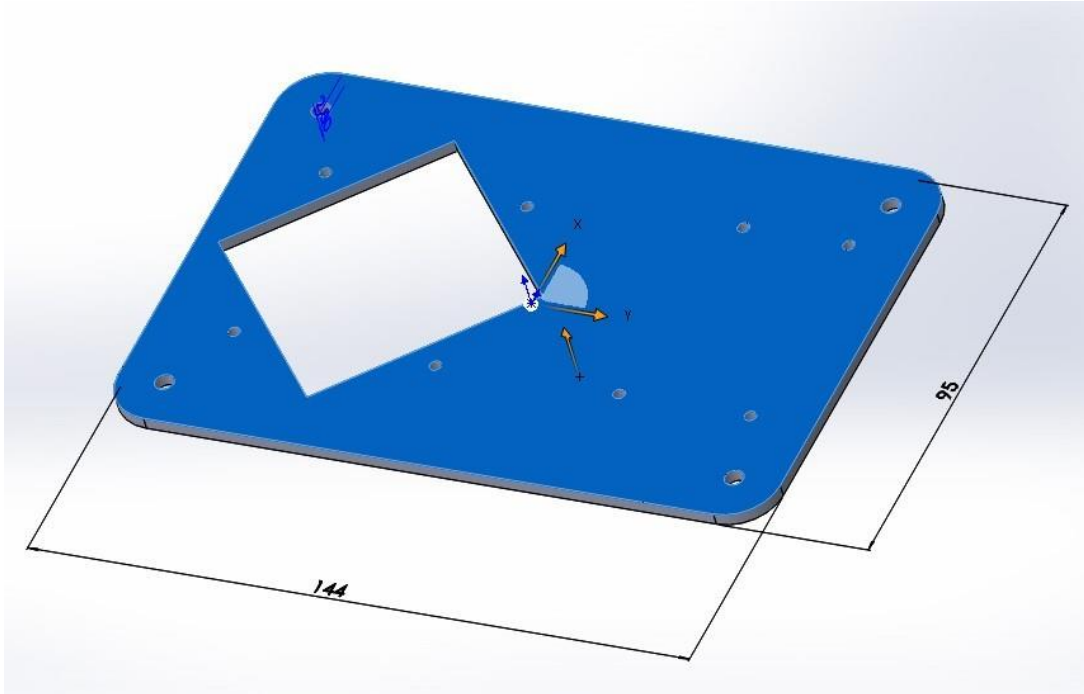


Рис. 2.12. 3D модель основної плити

Для кріплення серводвигунів до інших деталей було спроектовано плиту (рис. 2.13), яка притискає двигун в необхідному місці.

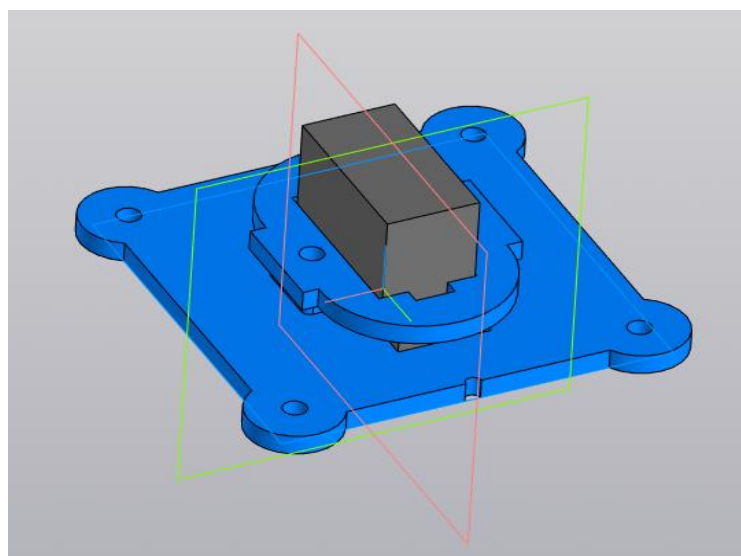
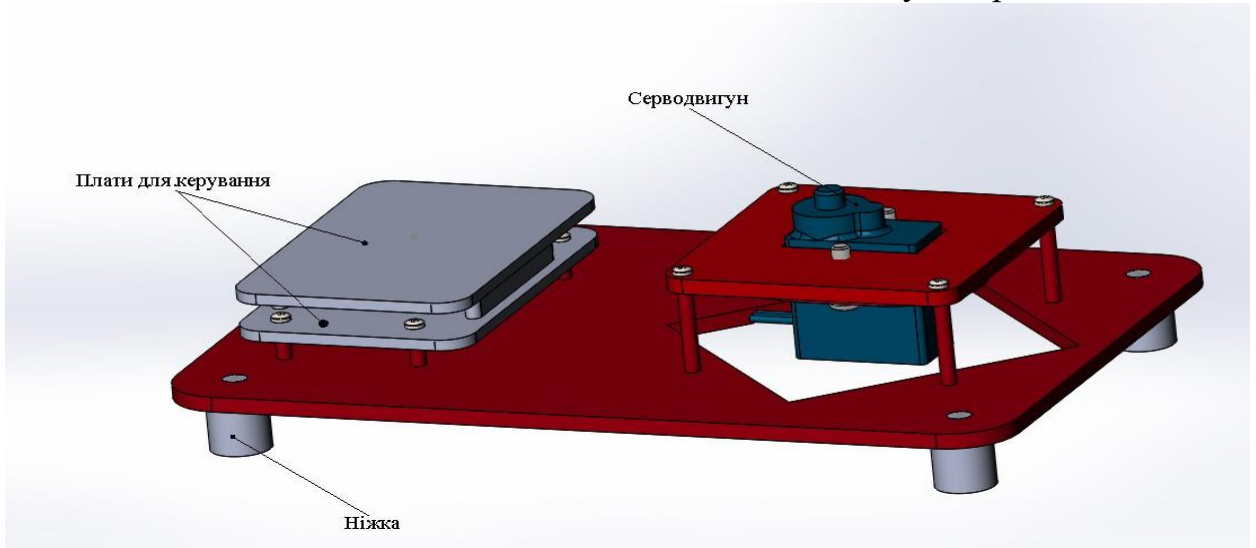


Рис. 2.13. 3D модель з'єднання притискної плити та серводвигуна.

Спроектував ще декілька різних деталей та зібрав їх в одне ціле було отримано всю нижню частину маніпулятора (рис. 2.14). Також в цю частину було додано спрощені моделі керуючої плати ArduinoUnoR3 та модуль драйверу керування серводвигунами для розуміння розміщення цих елементів у конструкції.

Рис. 2.14. 3D модель нижньої частини маніпулятора.



Наступним кроком моделювання лабораторного маніпулятора було конструювання частин основи для руки. Конструкція, зображена на рисунку 2.15, складається з декількох різних пластин з'єднаних між собою гвинтами та 2 серводвигунів, які виконують роль переміщення захватного пристрою по осям X та Y, тобто вгору, вниз, вперед та назад.

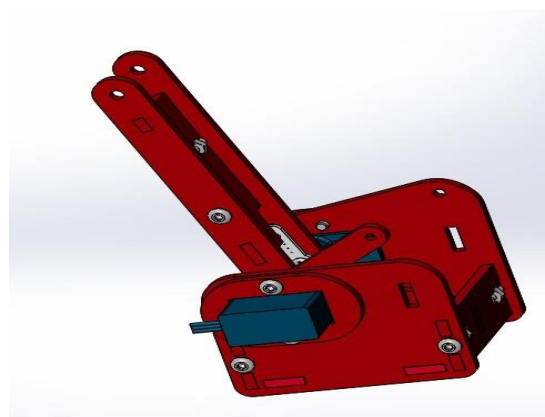


Рис. 2.15. 3D модель частин основи для руки.

Для з'єднання між собою захватного пристрою та основи руки використовується зап'ястний суглоб (рис. 2.16).

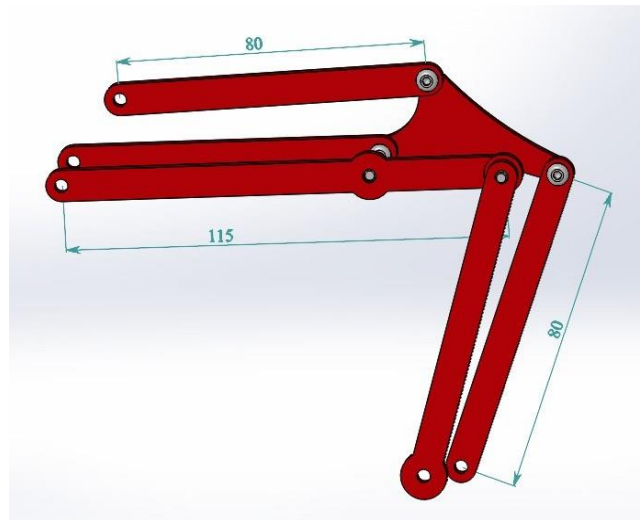


Рис. 2.16. 3D модель зап'ястного суглобу.

Останнім етапом у моделюванні маніпулятора є створення захватного пристрою (рис. 2.17). Спосіб кріплення серводвигуна для захватного пристрою було змінено, у порівнянні з іншими кріпленнями, для того, щоб можна було вставити деталі до яких кріпиться зап'ястний суглоб.

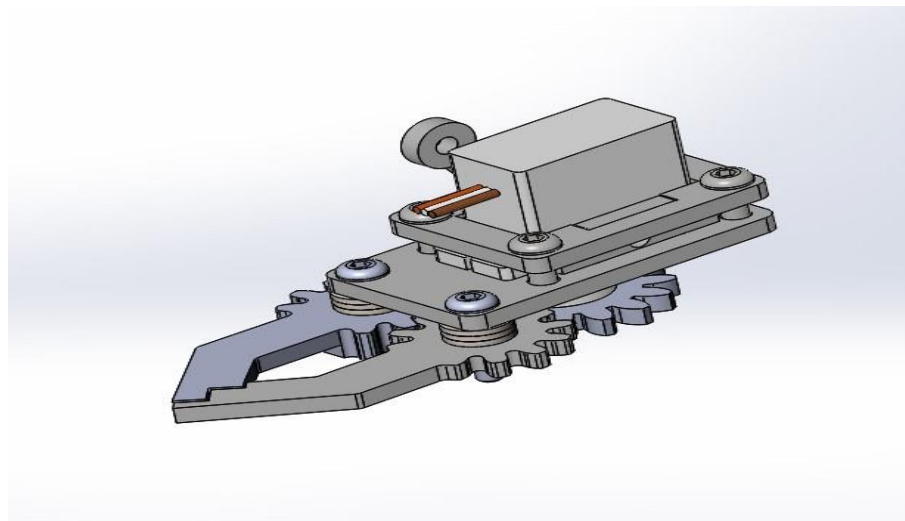


Рис. 2.17. 3D модель захватного пристрою.

Захватний пристрій складається з 3 рухомих деталей та 4 пластин для кріплення, має невеликі розміри та легко знімається, якщо потрібно змінити конструкцію клешні.

Використовуючи розроблені вище моделі деталей маніпуляторанеобхідно поєднати їх між собою гвинтами та гайками і отримати модель повністю зібраного маніпулятора (рис. 2.18).

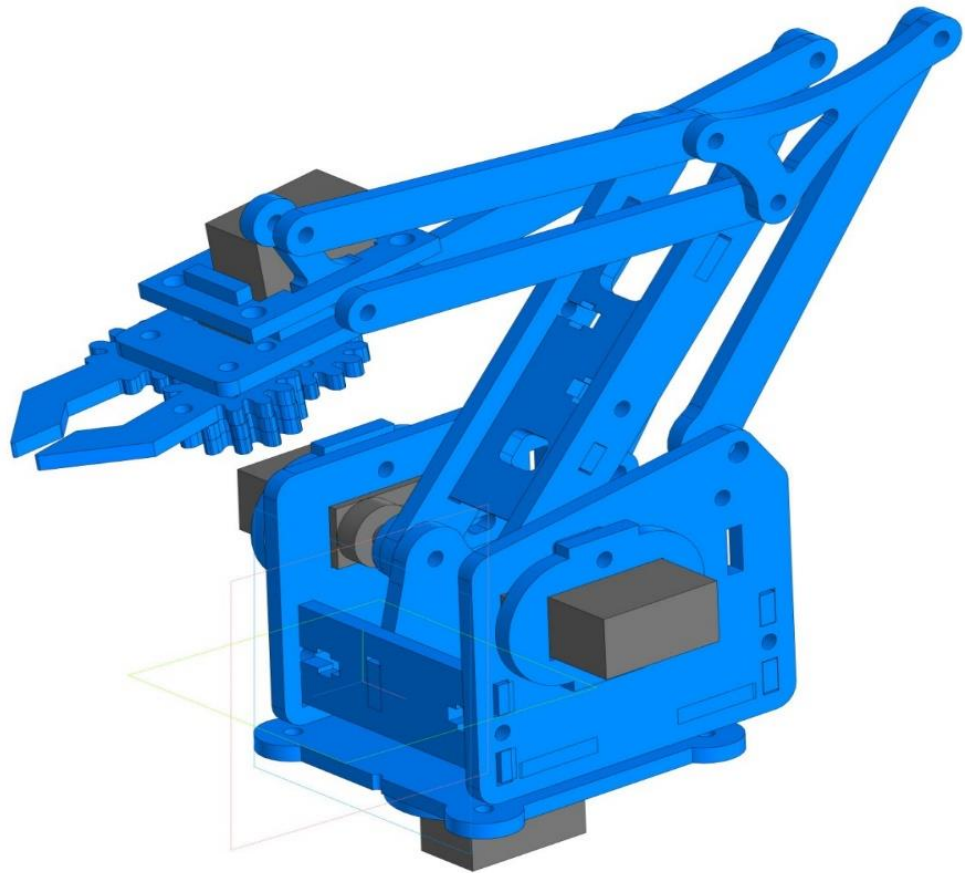


Рис. 2.18. 3D модель зібраного лабораторного маніпулятора.

5. Визначення діапазонів кутів повороту ланок.

3D модель маніпулятора (рис. 2.19) з урахуванням всіх довжин ланок і розмірів деталей, дозволяє визначити діапазони кутів поворотів ланок робота щодо початкового положення. Ці діапазони враховуються при визначенні робочої зони динамічної моделі маніпулятора.

За поворот маніпулятора відповідає серводвигун Ks0194, діапазон його повороту становить 180° . У конструкції робота немає перешкод, що обмежують цей діапазон, отже робот буде повертати на $\pm 90^\circ$ щодо початкового положення (рис. 2.16).

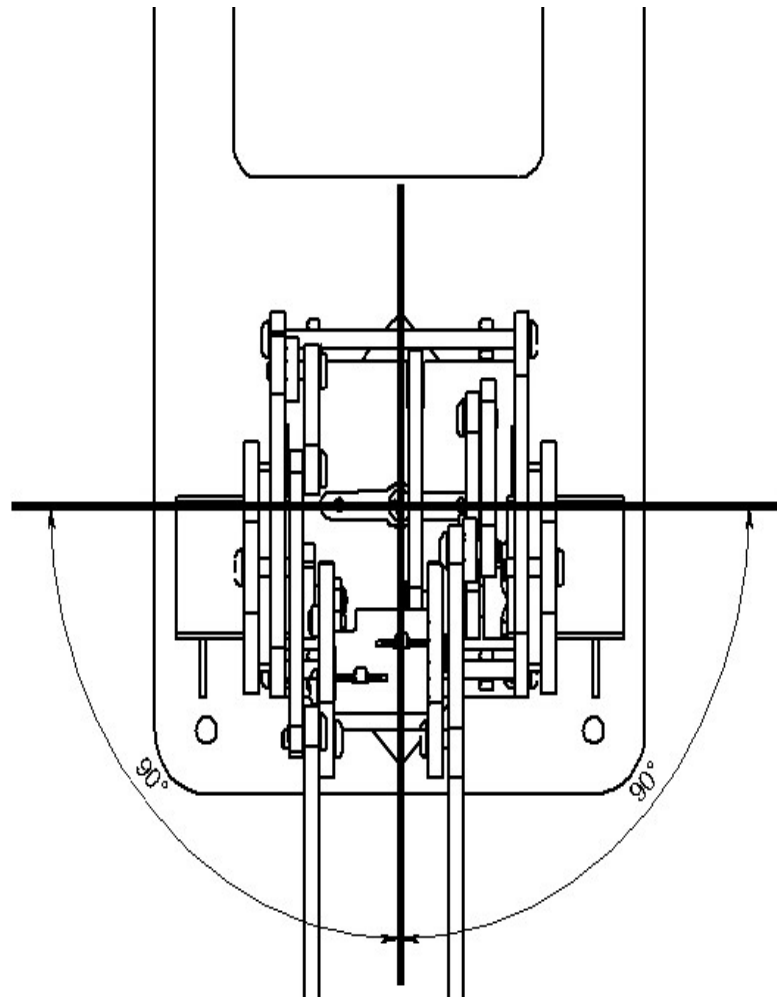


Рис. 2.19. Кут повороту φ_3 .

Кут φ_1 – підйом плеча:

За підйом плеча відповідає серводвигун Ks0194 з діапазоном повороту 180° . Конструкція маніпулятора дозволяє максимально нахилити ланку в одну сторону на 73° , а на поворот в інший бік 67° щодо початкового положення (рис. 2.20).

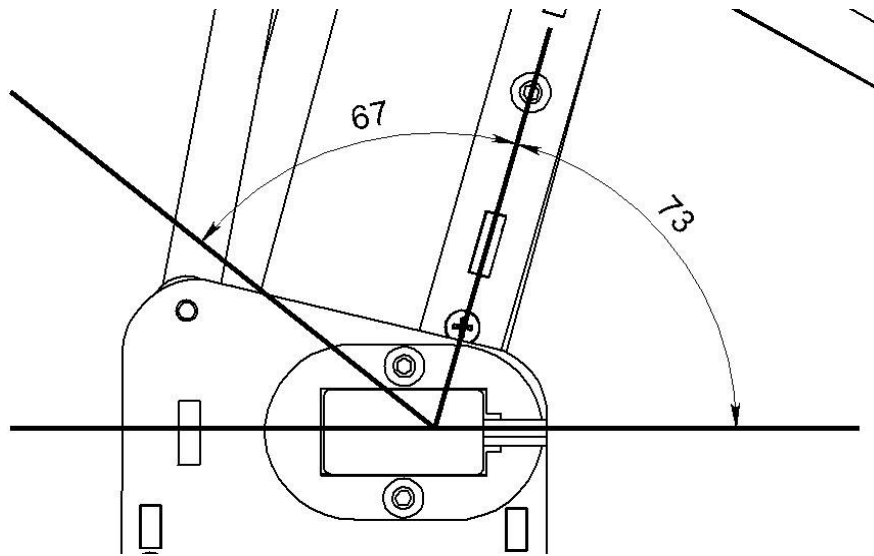


Рис. 2.20. Кут $\phi 1$ – підйом плеча.

Кут $\phi 2$ – підйом руки:

За підйом руки відповідає серводвигун Ks0194 з діапазоном повороту 180° . Конструкція робота дозволяє максимально нахилити ланку в одну сторону на 48° , поворот в іншу можливий тільки на 90° (рис. 2.21).

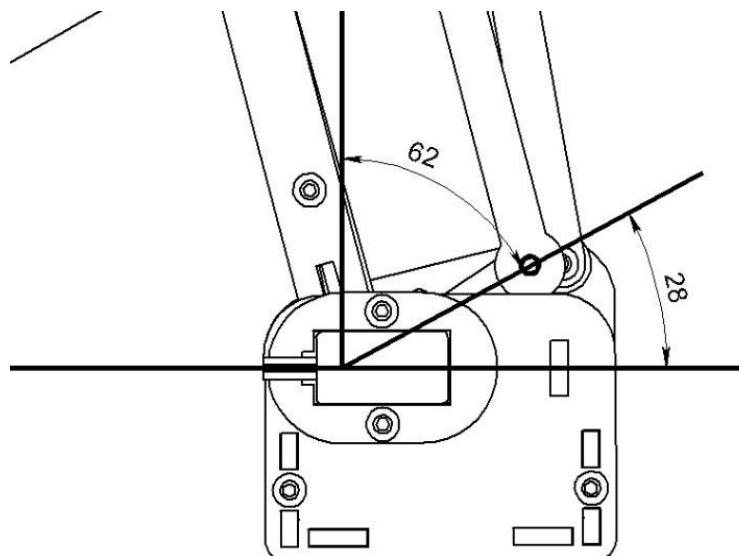


Рис. 2.21. Кут $\phi 2$ – підйом руки.

Діапазони поворотів кутів були зроблені максимально можливими для того, щоб зробити робочу зону перед роботом якомога більше.

6. Дослідження динамічних характеристик маніпулятора.

Дослідження динамічних характеристик ангулярного маніпулятора було проведено у програмі SolidWorks, а саме за допомогою додатку SolidWorks Motion та вже готової 3D моделі у цій програмі (рис. 2.19).

Перед початком проведення досліджень було створено всі необхідні сполучення між деталями, які рухаються. Далі за допомогою вікна анімації та панелі інструментів для створення рухів було надано всі необхідні для дослідження налаштовані двигуни (рис. 2.22). Останнім етапом в створенні анімації є розрахунок руху, який займає багато часу, адже програма в режимі реального часу аналізує задані рухи.

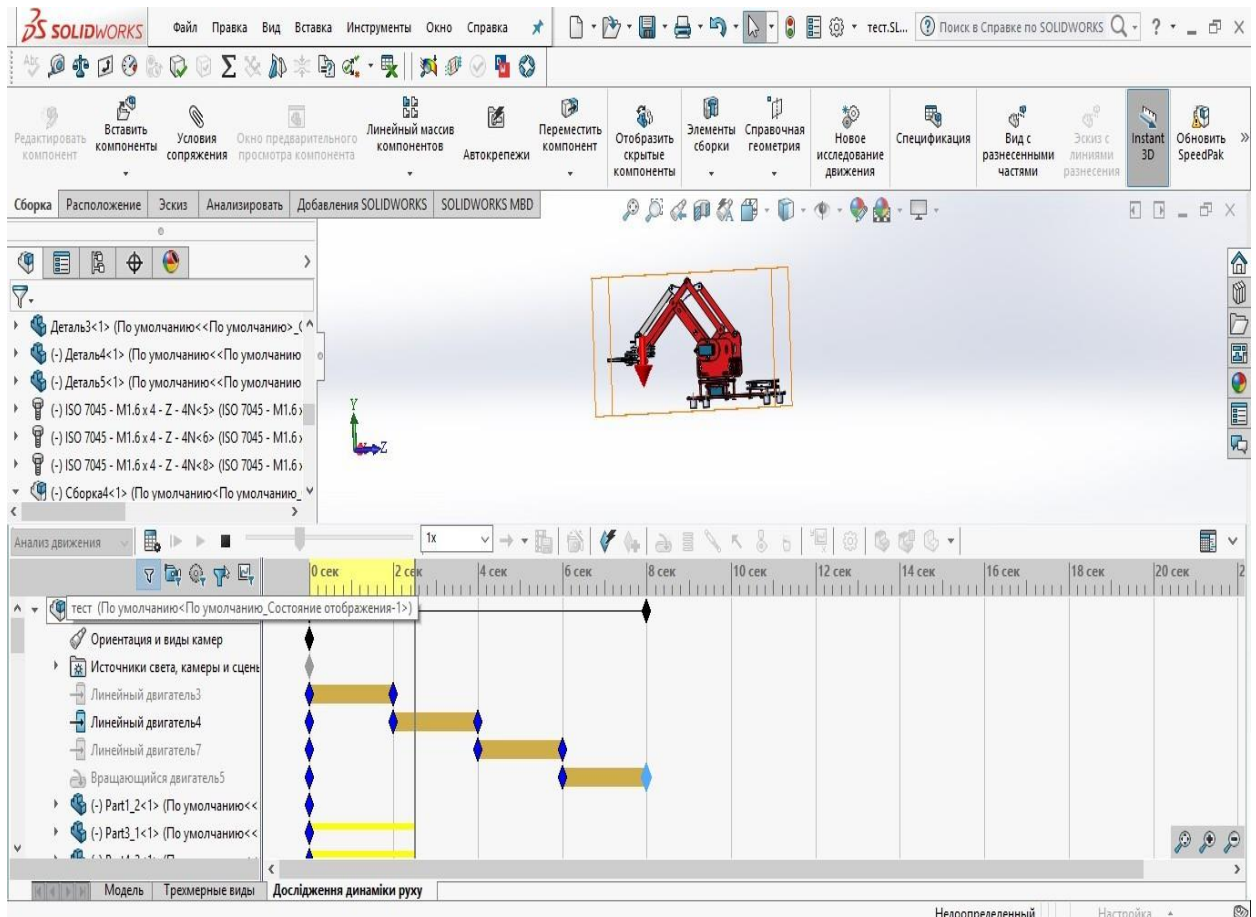


Рис. 2.22. Вікно налаштування анімації рухів маніпулятора.

Для дослідження потрібно визначити динамічні характеристики в точках повороту ланок маніпулятора ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 , ϕ_4 (рис. 2.23) при різних його положеннях і пересування, адже в цих точках розташовані серводвигуни.

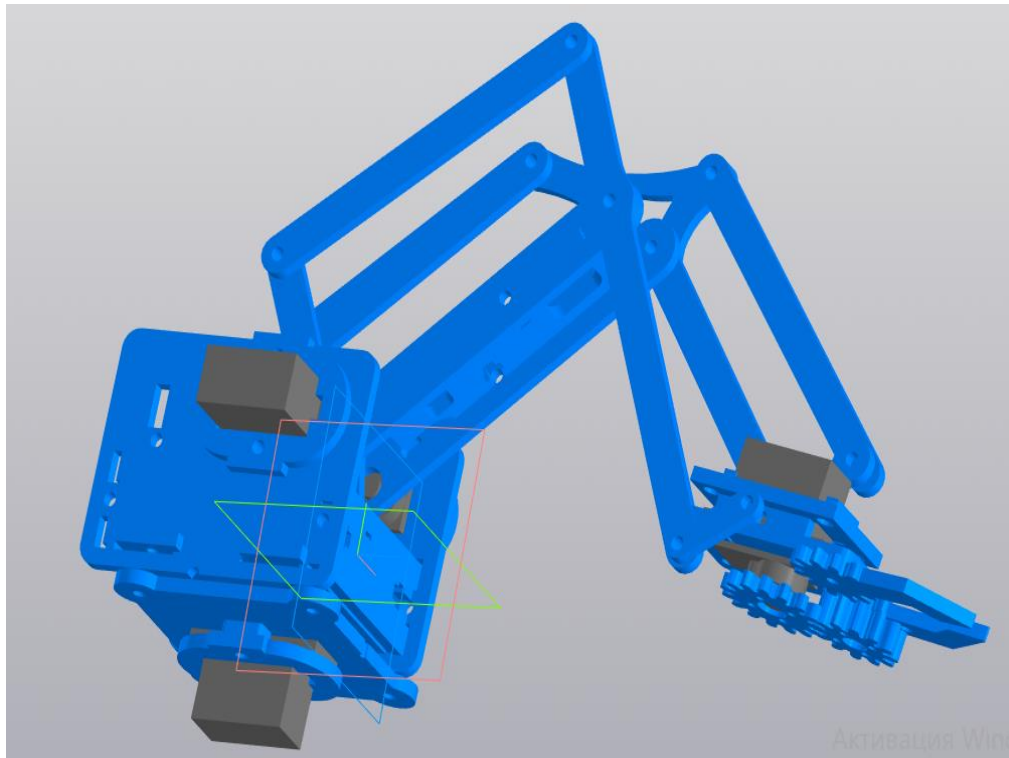


Рис. 2.23. Точки в яких будуть визначені динамічні характеристики.

Динамічні характеристики будуть наступними: сила F , кутова швидкість ω , кутове прискорення a . Щоб їх визначити потрібно задати рух ланок моделі маніпулятора, а саме повернути на певні кути, які було визначено ще у попередньому розділі. Далі програма розрахує масив даних, на основі яких побудуються графіки, за якими можна визначити значення динамічних характеристик при певному куті повороту ланки і в конкретний момент часу.

Визначення динамічних характеристик в точках φ_1 і φ_2 .

Було задано рух ланок моделі маніпулятора таким чином, що він рухається у 3 різних напрямках, при цьому середня кутова швидкість повороту кожної ланки становила 1.57 рад / с, досягнув кожного положення маніпулятор зупинявся на 0.5 секунд.

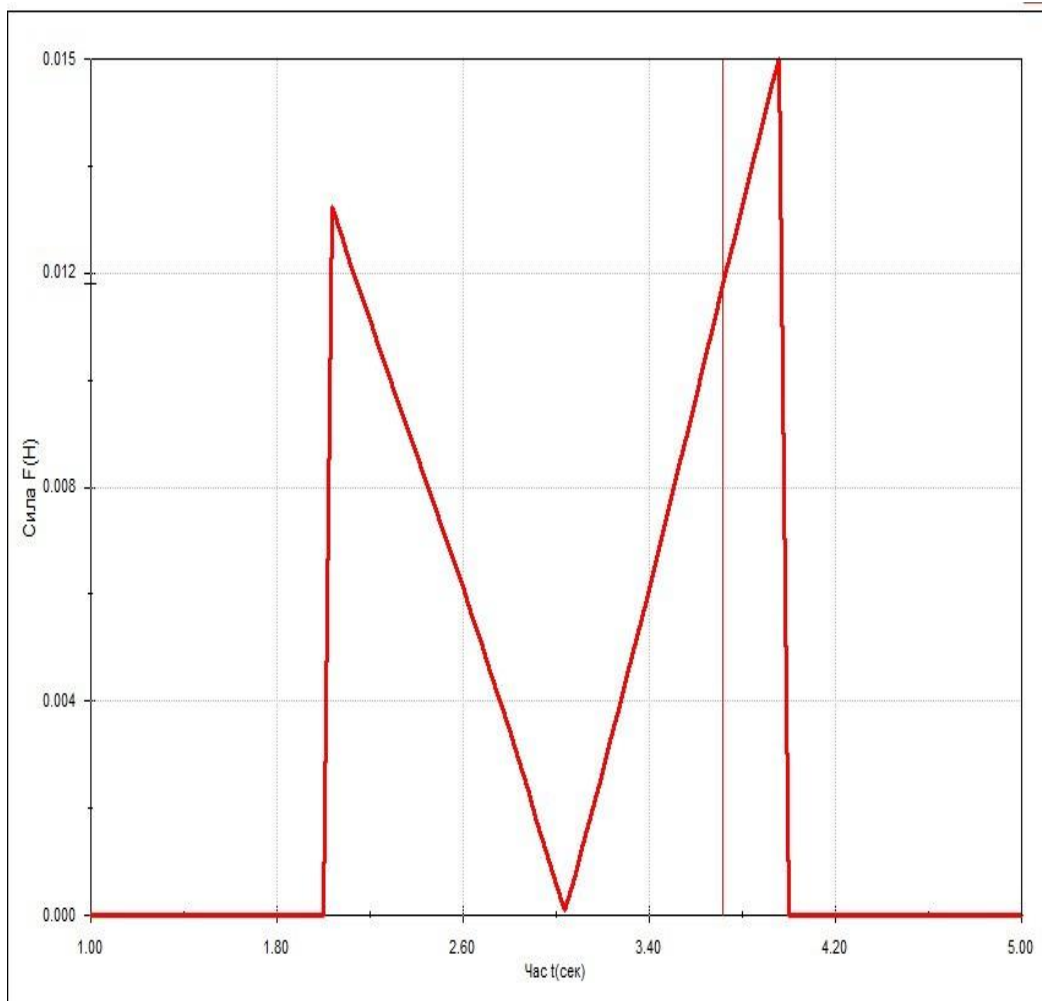


Рис. 2.24. Параметр сили у точці $\phi 1$.

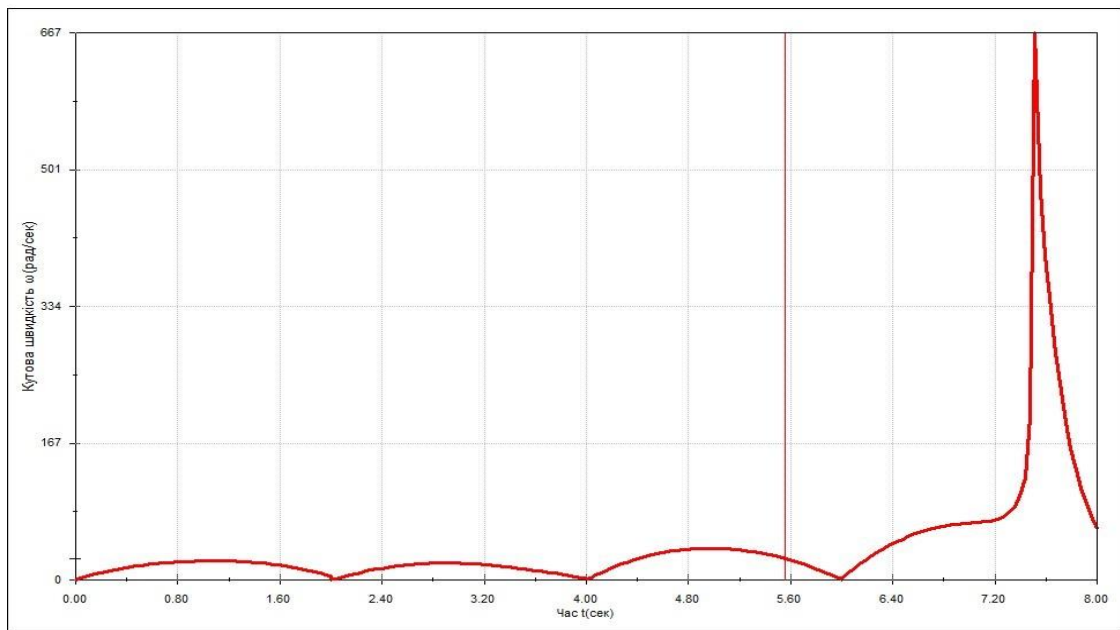


Рис. 2.25. Параметр кутової швидкості у точці $\phi 1$.

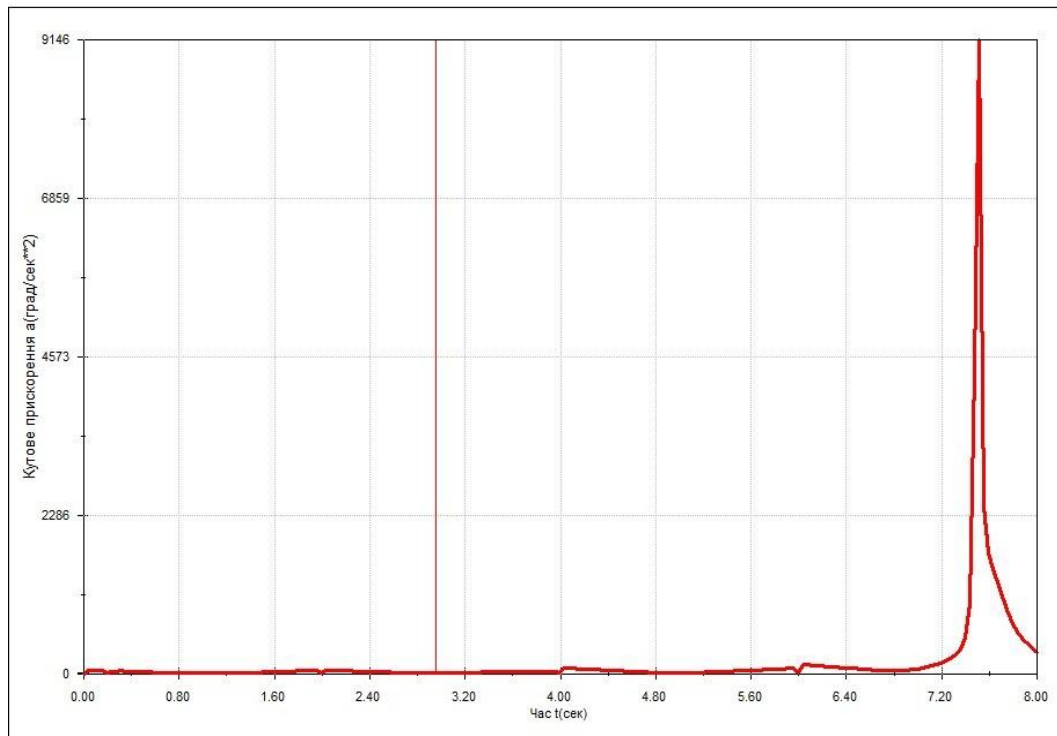


Рис. 2.26. Параметр кутового прискорення у точці $\phi 1$.

На рисунках 2.24-2.26 зображені динамічні характеристики маніпулятора у точці $\phi 1$ за невеликий проміжок часу.

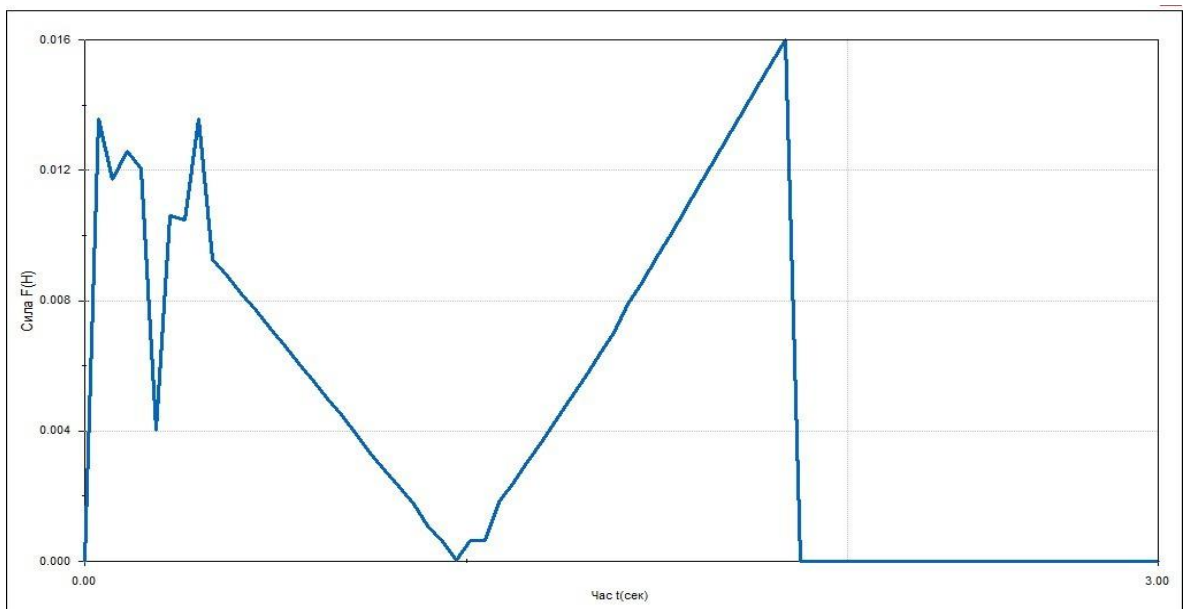


Рис. 2.27. Параметр сили у точці $\phi 2$.

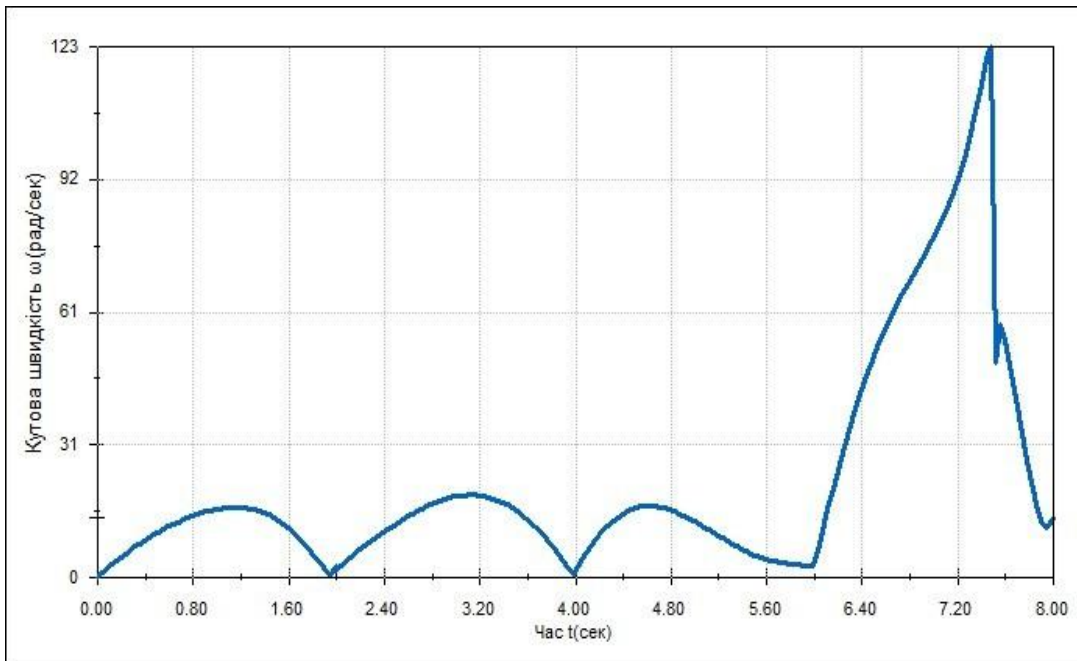


Рис. 2.28. Параметри кутової швидкості у точці ϕ_2 .

На рисунках 2.27-2.28 зображені динамічні характеристики маніпулятора у точці ϕ_2 за невеликий проміжок часу.

Якщо порівняти отримані результати у двох різних точках можна побачити, що результати є дуже схожими між собою, та це і не дивно, адже для руху в цих точках використовуються однакові серводвигуни, також ці двигуни відповідають за рух руки маніпулятора в одній площині.

Варто зауважити, що в динамічних дослідженнях кутова швидкість змінюється плавно, а крутний момент в середньому не перевищує 1 Н*м, що є припустимим навантаженням реального серводвигуна.

Визначення динамічних характеристик в точці ϕ_3 і ϕ_4

На рисунках 2.29-2.31 зображені динамічні характеристики маніпулятора у точці ϕ_3 за невеликий проміжок часу.

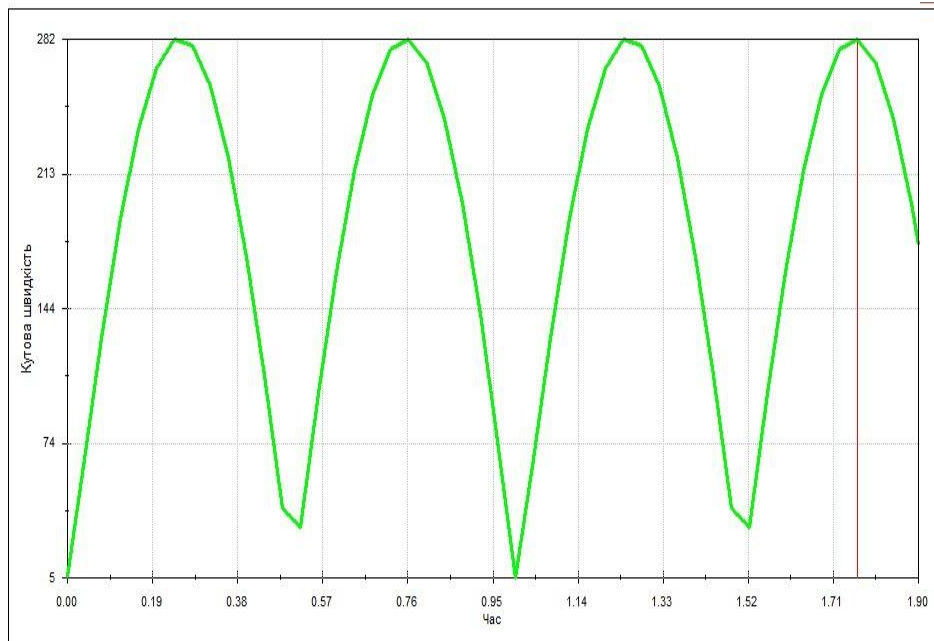


Рис. 2.29. Параметр кутової швидкості у точці ϕ_3 .

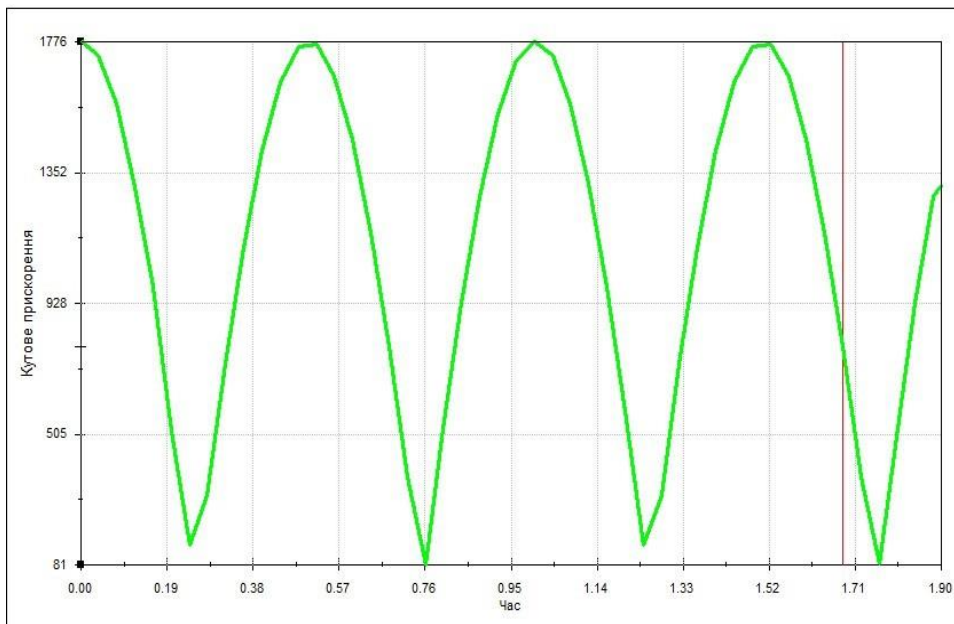


Рис. 2.30. Параметр кутового прискорення у точці ϕ_3 .

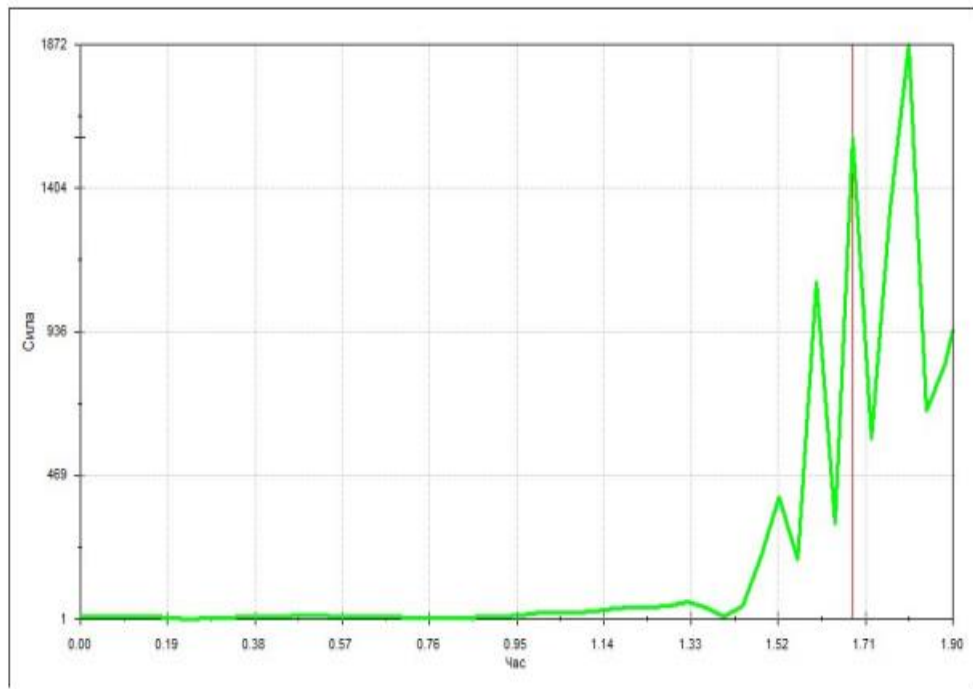


Рис. 2.31. Параметр сили у точці φ3

На рисунках 2.32-2.34 зображені динамічні характеристики маніпулятора у точці φ3 за невеликий проміжок часу.

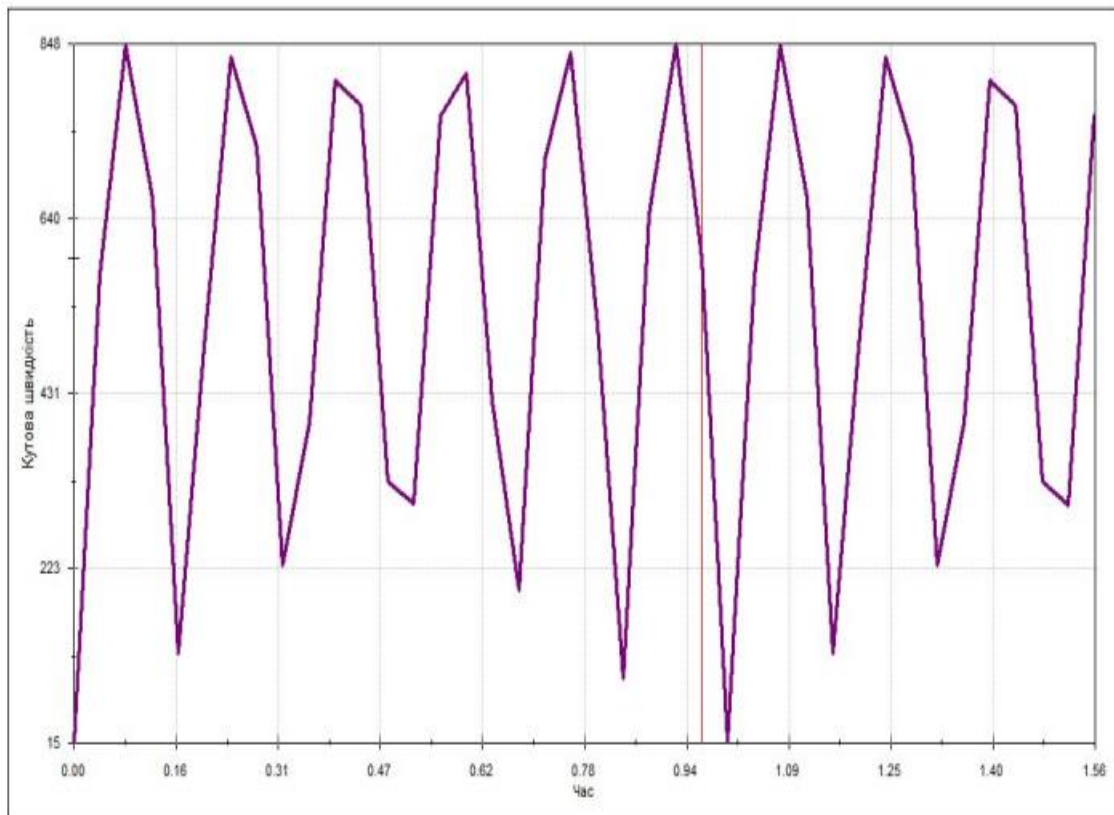


Рис. 2.32. Параметр куткової швидкості у точці φ4.

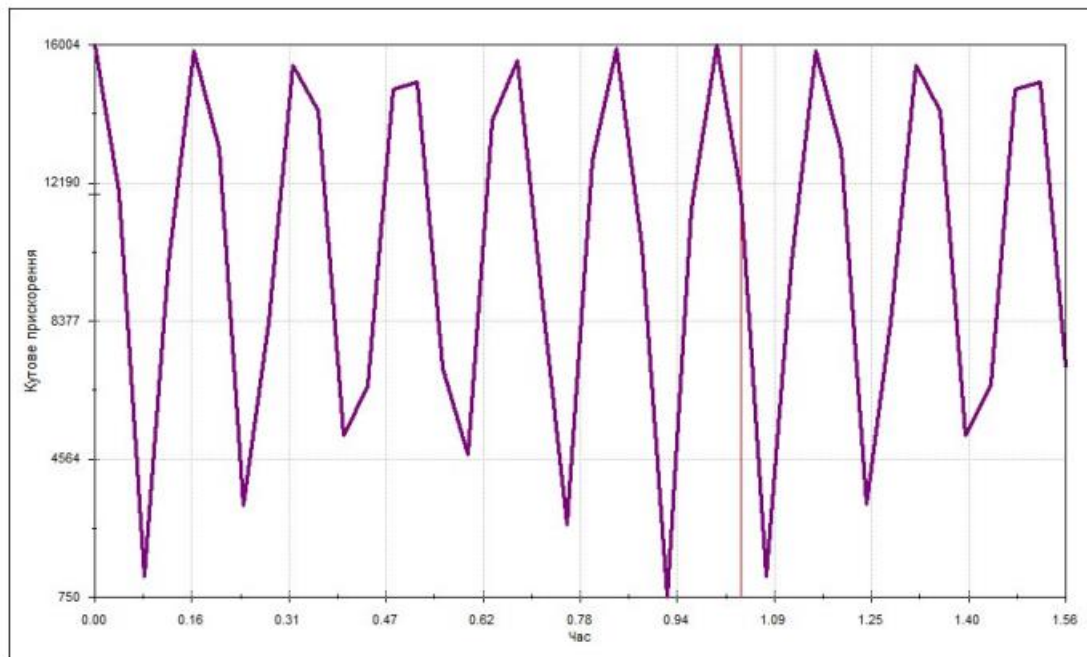


Рис. 2.33. Параметр кутowego прискорення у точці $\phi 4$.

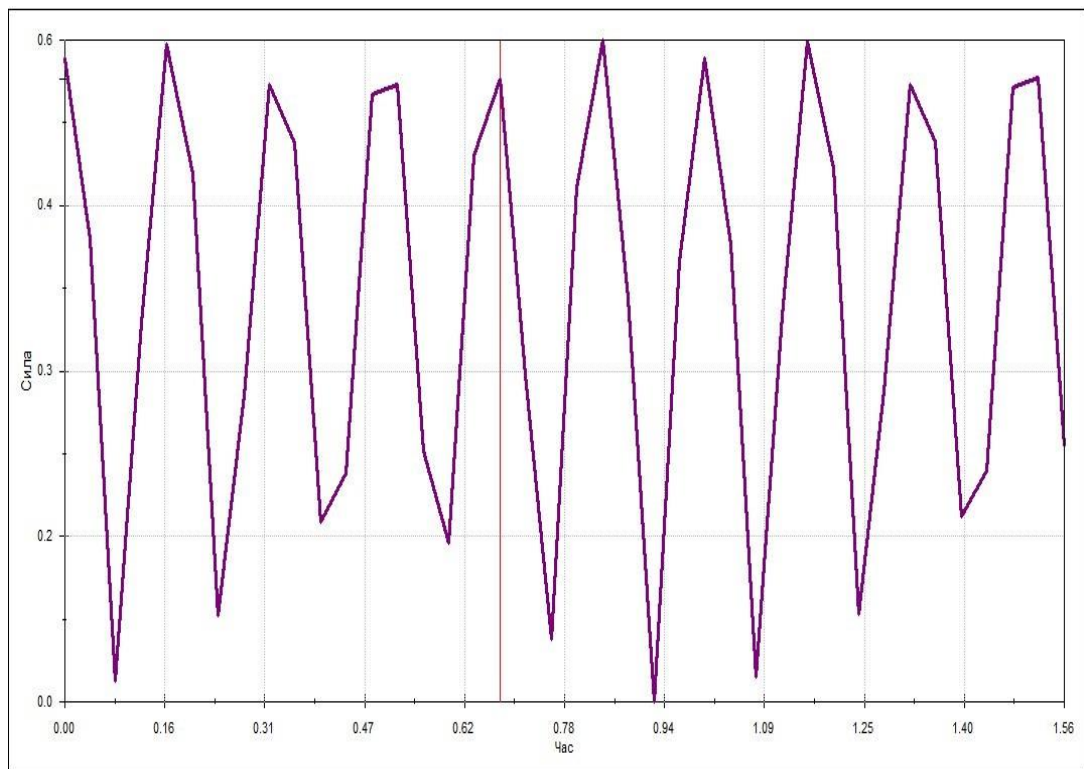


Рис. 2.34. Параметр сили у точці $\phi 4$.Робоча зона маніпулятора

Робочий простір промислового робота - це простір, в якому робочий орган механічного пристрою може знаходитися.

Розрізняють плоский і просторовий робочий простір. Тип робочого простору

визначає число ступенів свободи і характер відносин між кінематичними парами маніпулятора.

Робочою зоною плоского маніпулятора є фігура, окреслена безліччю гранично можливих положень центру захватного пристрою або його граничної траєкторією.

Далі будемо розглядати робочу зону розроблюваного лабораторного маніпулятора, який працює в ангулярній системі координат. Робоча зона маніпуляторів такого типу представлена на рисунку 2.35.

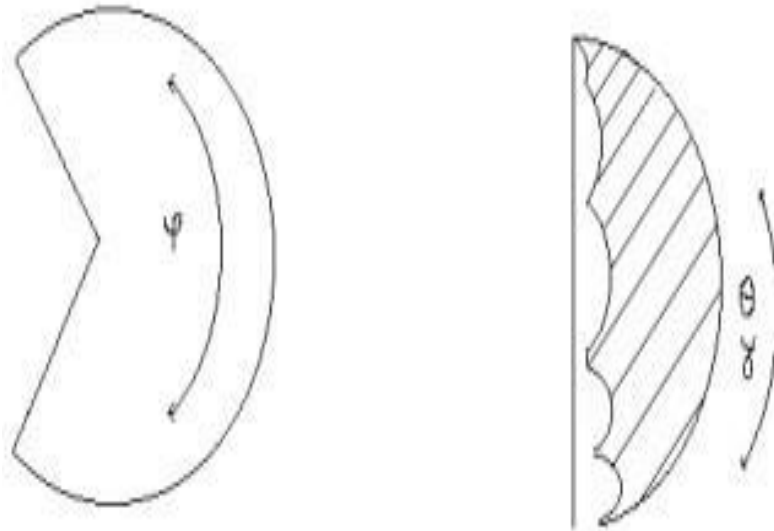


Рис. 2.35. Робоча зона маніпулятора, який працює в ангулярній системі координат.

За допомогою вже готової анімації руху маніпулятора в програмі SolidWorks було створено контур робочої зони, зображений на рисунку 2.36.

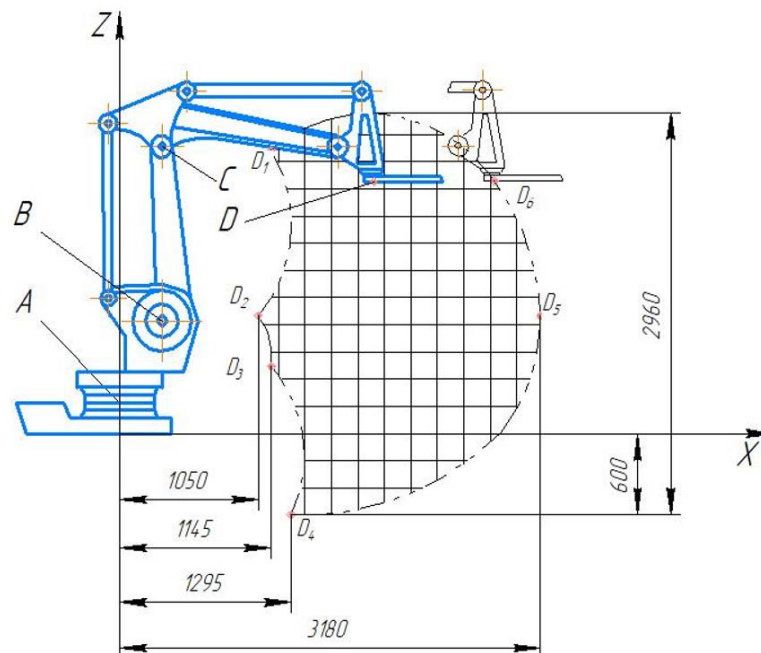


Рис. 2.36. Робоча зона лабораторного маніпулятора (вид збоку).