

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та
робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Моделювання мехатронного модуля приводу промислового маніпулятора
у виробничому середовищі
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи КІТПВМ-22-1
Зозуля К. О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерно-
інтегровані технологічні процеси і
виробництва
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Аллахверанов Р. Ю.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2024р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та роботехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____

(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Студентові _____ Зозулі Кирилу Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання мехатронного модуля приводу промислового маніпулятора у виробничому середовищі

затверджена наказом по університету від "03" листопада 2023р. №1278 Ст.

2. Термін подання студентом роботи " 24 " січня 2024р.

3. Вихідні дані до роботи 3.1 Промисловий маніпулятор;

3.2 Обертальний момент $T_{вих} = 150 \text{ кг}\cdot\text{мм};$

3.3 Число обертів на виході $n=15 \text{ об/хв.}$

3.4 Оформлення текстової документації згідно ДСТУ 3008-2015.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Вступ;

4.2 Аналіз сучасних промислових маніпуляторів;

4.3 Постановка задачі дослідження;

4.4 Дослідження розрахунків до моделювання приводу промислового маніпулятора;

4.5 Моделювання мехатронного модуля приводу промислового маніпулятора

4.6 Забезпечення безпечних умов праці при проведенні досліджень;

4.7 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 14 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасних промислових маніпуляторів	06.11 – 09.11.23	виконано
2	Постановка задачі дослідження	10.11 – 20.11.23	виконано
3	Дослідження розрахунків до моделювання приводу промислового маніпулятора	21.11 – 12.12.23	виконано
4	Моделювання мехатронного модуля приводу промислового маніпулятора	13.12 – 30.12.23	виконано
5	Забезпечення безпечних умов праці при проведенні досліджень	01.01 – 09.01.24	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	10.01 – 13.01.24	виконано
7	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk	14.01 – 16.01.24	виконано
8	Подання роботи на рецензію	17.01 – 19.01.24	виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	20.01 – 22.01.24	виконано
10	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	23.01.24	виконано

Дата видачі завдання 06 листопада 2023 р.

Студент _____ Зозуля К. О.
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Аллахверанов Р. Ю.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 81 с., 37 рис., 4 таб., 2 дод., 13 джерел.

ПРОМИСЛОВИЙ МАНІПУЛЯТОР, ПРИВОД ДЛЯ КЕРУВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ ПРИВОДУ, РОБОЧИЙ ОРГАН, АНАЛІЗ РОЗРАХУНКІВ.

Об'єктом дослідження – керування промисловим маніпулятором у виробничому середовищі для виконання різноманітних промислових операцій.

Предметом дослідження – дослідження розрахунків до моделювання приводу промислового маніпулятора.

Метою роботи – моделювання приводу на прикладі механічного модуля промислового маніпулятора.

Методи дослідження полягають в аналізі теоретичних відомостей щодо промислового маніпулятора, аналізу конструкції та наявних промислових маніпуляторів, аналізі вихідних даних для проектування інтегрованих механічних модулів, аналізі елементів конструкції механічного модуля промислового маніпулятора, проведенні аналізу розрахунків для моделювання приводу.

На базі проведених досліджень, аналізу вихідних даних, було виконано низку експериментів, змодельовано привод, який здійснює переміщення робочого органа, власне “руки”.

ABSTRACT

Explanatory note: 81 pp., 37 fig., 4 tab., 2 supplement, 13 sources.

INDUSTRIAL MANIPULATOR, CONTROL DRIVE, DRIVE SIMULATION, WORKING BODY, CALCULATION ANALYSIS.

The object of the study is the control of an industrial manipulator in a production environment to perform various industrial operations.

The subject of the study is the study of calculations for modeling the drive of an industrial manipulator.

The purpose of the work is to model the drive using the example of a mechanical module of an industrial manipulator.

The research methods consist in the analysis of theoretical information about the industrial manipulator, the analysis of the design and existing industrial manipulators, the analysis of the initial data for the design of integrated mechanical modules, the analysis of the design elements of the mechanical module of the industrial manipulator, the analysis of calculations for modeling the drive.

On the basis of the conducted research and analysis of the initial data, a number of experiments were performed, the drive that moves the working body, actually the "hand", was modeled.

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«22» січня 2024 р.

Зозуля К. О.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	9
Вступ.....	10
1 Аналіз сучасних промислових маніпуляторів	12
1.1 Загальний аналіз промислових маніпуляторів	12
1.2 Дослідження типів і видів промислових маніпуляторів	23
1.3 Дослідження структурної схеми промислових маніпуляторів	28
1.4 Дослідження методів керування промислових маніпуляторів	32
2 Постановка задачі дослідження.....	34
2.1 Аналіз вихідних даних.....	34
2.2 Аналіз елементів конструкції мехатронного модуля приводу промислового маніпулятора	34
3 Дослідження розрахунків до моделювання приводу промислового маніпулятора	45
3.1 Вихідні дані до оптимізації приводу.....	45
3.2 Розрахунок вхідного оберտального моменту.....	45
3.3 Визначення загального коефіцієнта корисної дії приводу.....	45
3.4 Визначення передавального відношення елементів.....	46
3.5 Розрахунок характеристик черв'ячної передачі.....	47
3.6 Розрахунок параметрів циліндричних прямозубих коліс.....	52
3.7 Розрахунок характеристик валів	54
3.8 Розрахунок довговічності підшипників.....	58
3.9 Оцінка похибки механізму та вибір мастильних матеріалів	59
4 Моделювання мехатронного модуля приводу промислового маніпулятора	62

4.1 Створення моделі привода.....	62
4.2 Порівняння аналогічного ММП для вертикального переміщення..	65
4.3 Моделювання ММП з кріпленнями, ланки і моделі захвату деталі	69
4.4 Модель ПМ, його функціонування та використання	71
4.5 Забезпечення безпечних умов праці при проведенні досліджень	74
Висновки.....	78
Перелік джерел посилання	80
Додаток А Апробація результатів досліджень	82
Додаток Б Демонстраційний матеріал	92

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

ІВС – інформаційно-вимірювальна система;

КІБ – катодного-іонного бомбардування;

КПО – коефіцієнт природної освітленості;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ММП – мехатронний модуль привода;

ПМ – промисловий маніпулятор;

СПК – система програмного керування;

СЗ – система зв'язку;

ТП – технологічний процес.

ВСТУП

Машинобудування вважається провідною галуззю сучасної техніки та народного господарства України загалом. Щоб вийти з економічної кризи слід підвищувати ефективність виробництва: якомога ширше впроваджувати до промисловості машини автоматичної дії. Проте більшість із них є дорогими та використовуються у вузькому переліку програмно-апаратних засобів, які ускладнюють їхню реалізацію.

На сьогодні, можна впевнено говорити, що промислові маніпулятори (ПМ) широко реалізуються в різних галузях людської діяльності. Оскільки наразі виробництво автоматизується все більше з метою його вдосконалення, тому застосування такого виду техніки є особливо актуальним та важливим.

ПМ – частина роботизованого технологічного комплексу. Відомо, що застосування ПМ значно спрощує процес виробництва зі своєю появою. З перших ПМ, і до сучасних розумних машин, відразу ж виникла повага та потреба з боку людини. Сьогодні вже не можна уявити повноцінне автоматизоване виробництво без цієї вагової складової частини.

Об'єктом дослідження – керування промисловим маніпулятором у виробничому середовищі для виконання різноманітних промислових операцій.

Предметом дослідження – дослідження розрахунків до моделювання приводу промислового маніпулятора.

Метою роботи – моделювання приводу на прикладі механічного модуля промислового маніпулятора.

Для досягнення поставленої мети необхідно опрацювати такі завдання:

- розглянути наявні програмно-апаратні засоби, що дозволяють отримувати прогнозовані значення щодо величини витрат енергоресурсів;
- проаналізувати математичні методи для отримання найточніших та ефективних прогнозів;

– провести заходи і розрахунки для забезпечення умов безпечної праці у лабораторії, де виконувались дослідження з кваліфікаційної роботи.

Робота виконується згідно з [1-4], як складова наукових досліджень, які здійснюються на кафедрі КІТАР Харківського національного університету радіоелектроніки, результати дослідження опубліковані у [5].

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРОМИСЛОВИХ МАНІПУЛЯТОРІВ

1.1 Загальний аналіз промислових маніпуляторів

ПМ називається автономний пристрій, що складається з механічного маніпулятора і перепрограмованої системи керування. Він застосовується для переміщення об'єктів у просторі в різних виробничих процесах [5].

ПМ можуть замінити людину там, де необхідна важка фізична праця, в умовах із підвищеною температурою та вологістю, шумом, забрудненим повітрям, вібрацією, вибухонебезпечністю та радіоактивністю. ПМ – це перепрограмована автоматична машина, що виконує рухові функції з переміщення предметів виробництва або технологічного оснащення, аналогічні людським.

Роботи дають можливість замінити монотонну фізичну працю, підвищити якість виробів, збільшити їхній випуск. Один робот може виконувати роботу чотирьох людей.

Історія розвитку робототехніки виокремлює три покоління роботів:

– роботи першого покоління, як правило, називаються програмними. Вони призначені для виконання запрограмованої послідовності операцій за чіткою схемою, що складається з урахуванням вимог того чи іншого технологічного процесу. Доволі ефективним застосуванням роботів першого покоління є для незмінних та строго визначених умов експлуатації. З огляду на це, вони активно впроваджуються до виробництва з метою виконання найпростіших операцій складання, встановлення, зняття, упакування та транспортування виробів. Проте завдяки простоті зміни програми, що закладена до пам'яті системи керування ПМ, є можливість перенавччити його шляхом перепрограмування для виконання операцій іншого класу;

– роботи другого покоління називаються адаптивними. Системи керування такими промисловими-маніпуляторами містять більш широкий,

порівняно з програмним, набір датчиків інформації про стан зовнішнього середовища, а також характеризуються більшою складністю. Алгоритм керування ПМ другого покоління є значно складнішим за ПМ з жорсткою програмою, до того ж часто має ситуаційний характер, який вимагає його реалізації за допомогою мікроелектронно-обчислювальної машина (ЕОМ) чи мікропроцесора. З огляду на широко розвинене програмне забезпечення, наявність досконалих пристроїв системи чутливості роботи другого покоління спроможні пристосовувати свою поведінку до поточної ситуації;

– роботи третього покоління називаються інтелектуальними чи розумними. Їхні функціональні можливості значно розширені, зокрема, від імітації фізичних дій людини до автоматизації елементів його інтелектуальної діяльності. У порівнянні з адаптивними промисловими маніпуляторами такі роботи характеризуються більш складною системою керування, що містить елементи штучного інтелекту. У зв'язку з цим інтелектуальні роботи можуть сприймати вербальну мову та вести діалог з людиною, розпізнавати й аналізувати різні ситуації, навчатися навичкам, будувати модель зовнішнього середовища, засвоювати поняття, програмувати рух, планувати поведінку в різноманітних умовах експлуатації. На сьогодні випускається значна кількість робототехнічних пристроїв, які розрізняються за компоновальними схемами, а також конструктивним виконанням.

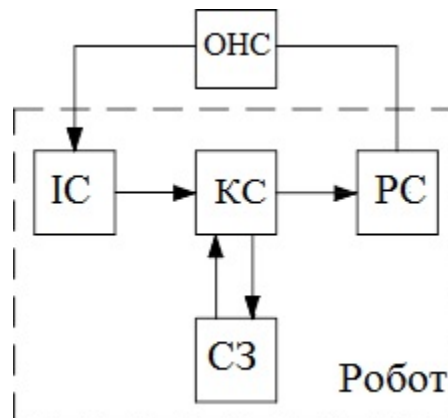
Незалежно від типу, класу, покоління та призначення ПМ складається з двох основних частин: механічної та системи керування. Механічна частина має підстав, за допомогою якого робот розміщується на підлозі поблизу основного технологічного обладнання чи монтується на станині. Крім того, робот може рухатися відносно обладнання рейками, порталом або направляючими. Корпус конструктивно об'єднує всі органи ПМ, а також привід робочих органів.

Виконавчим пристроєм ПМ є маніпулятор, який виконує всі рухові функції, обладнаний приводом і пристроєм керування. Роботи можуть мати

два і більше синхронно чи незалежно діючих маніпуляторів. Робочий орган – це складова частина маніпулятора, що призначається для безпосереднього виконання передбачених дій. Робочий орган може бути різною конструкцією, що іноді є вирішальним чинником для визначення можливостей застосування ПМ, наприклад, для маніпулювання крихким, великогабаритним або профільованим об'єктом. Пристрій керування відповідно до заданої програми формує керуючий вплив, який передається до виконавчого пристрою, а потім на приводи через багатожильний кабель або пневмодріт.

Узагальнену схему промислового робота представлено на рисунку 1.1.

Система зв'язку ПМ реалізує функції обміну інформацією між людиною і робототехнічним пристроєм задля видачі роботу завдань, діагностики, контролю його дій тощо. З цією метою застосовують не тільки механічні пристрої інформації, змонтовані на пульті керування (клавіші, кнопки, перемикачі), а також пристрої для вербального керування (мікрофони). Передання інформації від ПМ до людини у вигляді звукових і світлових сигналів виконується за допомогою дисплеїв.



ІС – інформаційна система; КС – керівна система; РС – рухова система;

СЗ – система зв'язку; ОНС – об'єкт навколишнього середовища

Рисунок 1.1 – Узагальнена схема промислового робота

Інформаційна система виконує функції штучних органів почуттів (сенсорів) ПМ і призначена для сприйняття і перетворення інформації про стан об'єктів зовнішнього середовища і самого ПМ відповідно до алгоритму керуючої системи. В якості сенсорів інформаційної системи ПМ найбільшого поширення набули акустичні датчики, лазерні та ультразвукові далекоміри, тактильні, контактні та індукційні датчики, датчики положення, швидкості, сил і моментів, оптико-електронні пристрої та інші [6].

Керуюча (інтелектуальна) система призначена для формування законів (алгоритмів) управління приводами і виконавчими механізмами рухової системи відповідно до сигналів зворотного зв'язку інформаційної системи. Керуюча система зазвичай складається з мікро ЕОМ або мікропроцесора в комплекті з набором вхідних (аналого-цифрових) і вихідних (цифро-аналогових) перетворювачів і інтерфейсних каналів зв'язку, за якими здійснюється обмін аналоговими і дискретними сигналами між роботом і зовнішнім середовищем.

Інформаційна система реалізує функції штучних органів почуттів (сенсорів) ПМ, тому призначена для сприйняття та перетворення інформації про стан об'єктів зовнішнього середовища і власне ПМ відповідно до алгоритму системи керування. Як сенсори інформаційної системи ПМ найпоширнішими є акустичні датчики, ультразвукові та лазерні далекоміри, тактильні, контактні та індукційні датчики, датчики швидкості, положення, сил і моментів, оптико-електронні пристрої тощо [6].

Система керування (інтелектуальна) призначена для формування законів (алгоритмів) керування приводами та виконавчими механізмами рухової системи відповідно до сигналів зворотного зв'язку інформаційної системи. Система керування, як правило, складається з мікро ЕОМ або мікропроцесора разом із набором вхідних (аналого-цифрових) і вихідних (цифро-аналогових) перетворювачів, а також інтерфейсних каналів зв'язку, через які відбувається обмін аналоговими і дискретними сигналами між роботом і зовнішнім середовищем.

Інтелектуальні здібності ПМ характеризуються алгоритмічним і програмним забезпеченням його системи керування. Рухова (моторна) система реалізує функції цілеспрямованого впливу ПМ на об'єкти навколишнього середовища відповідно інформаційно-керуючої системи, що керує сигналами. Конструктивно-рухова система може бути обладнана різними приводами (двигунами), маніпуляторами (механічні руки і інші елементи).

Для переміщення предметів, не орієнтованих у просторі, достатньо трьох ступенів свободи, а для повної просторової орієнтації – шести. Як правило, три ступені рухливості забезпечує базовий механізм ПМ, а ще два – додає механічний пристрій такий ,як кисть ПМ, де кріпиться робочий інструмент.

Використання промислових роботів у виробництві наразі є дуже актуальною задачею і причини є очевидними.

По-перше, будь-який ПМ у більшості випадків застосовується для заміни ручної праці. У зв'язку з цим робот може використовувати інструментальне захоплення для фіксації інструментів, а також виконувати обробку деталей або утримати безпосередньо заготовку, щоб перемістити її для подальшої обробки на робочу зону.

По-друге, робот має низку обмежень, до яких належать: зона досяжності, потреба уникнення зіткнення з можливими перешкодами, необхідність програмування будь-яких рухів, вантажопідйомність. У разі правильного його застосування та попереднього аналізу функціонування системи робот може забезпечувати безупинне виробництво, збільшувати якість та ефективність робочого процесу. Ключовими особливостями, що розрізняють ПМ, є наступні показники.

Під час використання ПМ, як правило, збільшується продуктивність. Насамперед, це пояснюється більш швидким позиціонуванням і пересуванням під час процесу обробки. Крім того, має значення такий чинник, як автоматичний ПМ 24 години на добу без перерв і простоїв.

У разі грамотно підбраної реалізації роботизованої системи в рази підвищується продуктивність (порівняно з ручним виробництвом). Звернемо увагу на той факт, що за умови досить широкої номенклатури продукції, постійного переналагодження, потреби значної кількості периферійного обладнання для різних деталей продуктивність може зменшуватися, в результаті чого процес стане важким і неефективним.

Підвищення економічних показників. Придбати робот – отримати заміну людині. Машина ефективно зменшуватиме витрати на оплату фахівців. Такий чинник важливий для економічно розвинених країн, які вирізняються великими заробітними платами працівникам, а також потребою в істотних надбавках за нічний час, перепрацювання тощо.

У разі застосування автоматизованої системи або ПМ, в цеху є затрубуваним лише оператор, який контролює процес та, водночас, виконує нагляд за системою.

Зауважимо, що при початковій закупівлі роботизовані осередки потребують доволі серйозних грошових вкладень. Неправильна робота з обладнанням, а також ймовірні помилки під час його розміщення і комплектації здатні спричинити збільшення трудомісткості роботи або часу обробки, відповідно, відбудеться зниження економічності виробництва.

Дотримання високого рівня безпеки. Застосування роботів досить ефективно на шкідливих виробництвах, які негативно впливають на людей, зокрема, в ливарній промисловості, під час зачистки зварних швів, зварювальних процесів, фарбувальних роботах ПМ тощо. У разі, якщо ручна праця обмежена законодавством, то єдиним рішенням може стати запровадження ПМ.

У більшості випадків однією з причин впровадження інноваційної системи на базі промислового ПМ є потреба в забезпеченні необхідної за якістю обробки відповідно до документації на виріб.

Певна точність позиціонування ПМ, а також повторюваність надає можливість усунути ймовірність виробничого браку і забезпечити високу

якість продукції. Виключити людський чинник – мінімізувати робочі помилки, а також зберегти постійну повторюваність протягом всієї виробничої програми.

Мінімізація робочого простору. Компактність досягається завдяки невеликого розміру місця, що займає ПМ, його ергономічній конструкції, можливості розташовувати його в підвішеному стані тощо.

ПМ є багатоланковим механічним маніпулятором, який імітує рухи людської руки, до того ж, забезпечений пристроєм керування. Крім того, він може бути обладнаний засобами переміщення.

Основне призначення ПМ полягає у механізуванні й автоматизуванні маніпуляції, що дозволяє замінити людей на вже діючих виробничих ділянках без значної перебудови їхньої технологічної й організаційної структури.

Усі промислові механізми можна поділити на автоматичні та керовані від дистанційного пристрою. Якщо автомати виконують певну дію суто за алгоритмом програми, занесеної оператором, то дистанційні апарати виконують завдання шляхом віддаленого керування людиною.

ПМ може включати в конструкцію одну або кілька рук маніпуляторів і, як правило, один блок ЕОМ. Конструкція руки ПМ містить типові модулі, що підбираються відповідно до вимог замовника, який має визначитися з вантажопідйомністю, точністю позиціонування, ступенем свободи.

Блок ЕОМ дозволяє перепрограмувати ПМ, провести налаштування точності і швидкості роботи. Фактично, для кожного завдання створюється індивідуальна програма з набором алгоритмів дій, за якими орієнтуватиметься робот.

Роботів, як правило, програмують оператори, пересуваючи руку в потрібній їм послідовності або відтворюючи певну послідовність за допомогою налаштування дистанційного керування. Зрідка складні роботи можуть програмуватися безпосередньо голосом, отримуючи накази, на кшталт, «пересунути на задану відстань» або «в заданому напрямку».

Сучасні приклади роботів обладнані сенсорним зворотним зв'язком і здатні реагувати на те, що відбувається в безпосередній близькості від них. Для збільшення протяжності робочого простору, в якому може рухатись рука ПМ, встановлюють на напрямні платформи або рами, тим самим обмежуючи рухливість. Діапазон розмірів є доволі великим: від мініатюрних складальних роботів, які здатні маневрувати в просторі об'ємом близько десяти кубічних сантиметрів, і роботів, які можуть переміщати вантажі масою до 1,5 т в просторі об'ємом в кілька кубічних метрів.

Використання сучасних ПМ збільшує продуктивність обладнання і випуск продукції, поліпшує якість, замінює людину на монотонних і важких ПМ, сприяє економії матеріалів і енергії. До того ж, вони мають достатню гнучкість, що дозволяє застосовувати їх для випуску продукції середніми і малими партіями, тобто в тій галузі, де традиційні засоби автоматизації не застосовуються. Дрібносерійна продукція має великий попит.

Проте роботи ще не наділені багатьма найважливішими якостями, притаманних людині, зокрема, не здатні до розумно реагувати на непередбачену обстановку чи зміну робочого середовища, до самонавчання на базі власного досвіду, використання тонкої координації системи "Рука – око". Роботи із захватом або подібні до них застосовуються для виконання маніпуляційних операцій, наприклад, при литті, очищенні злитків, термообробці, куванні, формуванні, пакуванні, обслуговуванні верстатів на навантаженні-розвантаженні, розміщенні деталей в палети і складанні.

Руки роботів замість захвату можуть устатковуватись різними інструментами для виконання робіт: з розпилювання речовини, фарбування, нанесення клейових і ізоляційних покриттів, а також свердління, шліфування, закручування гайок, піскоструминого очищення. До того ж, роботів можна застосовувати для точкового та дугового зварювання, теплової обробки і різання за допомогою полум'я або лазера, очищенні водяними струменями. На сьогодні роботи успішно отримують спеціалізацію, стаючи фарбувальними, зварювальними, складальними ПМ тощо.

ПМ розрізняються також за способом кріплення. На рисунку 1.2 представлено загальний вигляд роботів підлогової конструкції.



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд роботів підлогової конструкції

Роботи підлогової конструкції складають 53 % від загальної кількості, а також 39 % – з кріпленням на базових вузлах устаткування і лише 8 % – підвісні конструкції. Проте підлогові конструкції є нераціональними та неекономічними, оскільки потребують значних додаткових площ, мають складнощі під час налаштування та обслуговування, до того ж, наділені мінімальними можливостями "багатоверстатного" обслуговування.

Особливість сучасного етапу науково-технічного прогресу полягає в тому, що визначальним чинником під час проектування нової техніки стає обмеженість матеріальних і людських ресурсів. Необхідно вибирати обмежену кількість об'єктів розробки таким чином, щоб при реальних можливостях отримувати найбільші соціально-економічні результати. У стратегічному плані мова йде про поворот до першочергового технічного переоснащення власне тих ланок виробництва, де можна отримати результати завдяки застосуванню прогресивної технології, нових методів і процесів, зокрема, концентрації операцій, багатопозиційного та багатоінструментального оброблення чи збирання. В тактичному плані мова йде про зниження тиражування тих технічних засобів роботизації, що не

забезпечують високих кінцевих результатів або ці результати є односторонніми, зокрема, скорочення часу ручного обслуговування. Проте в конкретних виробничих умовах слід послуговуватись відомими методами розрахунків і обґрунтованими принципами технічної політики. Виділяють чотири принципи технічної політики.

Першим принципом вважається принцип досягнення кінцевих результатів. Засоби роботизації повинні не просто імітувати або заміщати дії людини, а виробничі реалізовувати функції швидше і краще, тільки тоді вони будуть по-справжньому ефективними. Зміна кількості будь-якої категорій працівників або заміна ручного маніпулювання автоматичним – не є метою і результатом.

Другим принципом технічної політики за умови роботизації виробництва є принцип комплектного підходу. Найважливіші компоненти виробничого процесу такі, як об'єкти виробництва, технології, основне і допоміжне обладнання, кадри, системи керування і обслуговування, видалення відходів – усі повинні бути розглянуті і врешті-решт вирішені на новому, більш високому рівні. Іноді, якщо випустити з уваги хоча б один компонент виробничого процесу, наприклад, конструкцію виробу, то вся система заходів щодо автоматизації стане неефективною. Спроби звести автоматизацію на перетворення лише окремих компонентів, на кшталт, створення складних і дорогих систем мікропроцесорного керування зі збереженням відсталого технології, теж не є перспективними. Як ПМ, так і автоматизовані системи керування повинні розроблятися і впроваджуватися з урахуванням прогресу технології та конструкції і в комплексі пристосовуватися до вимог виробництва – лише в такому разі вони будуть ефективними.

Третім принципом технічної політики при автоматизації виробництва є принцип необхідності: засоби роботизації, зокрема, перспективні і прогресивні, повинні використовуватись не там, де їх можна пристосувати, а там, де без них обійтись не можна.

Переважна більшість універсальних металорізальних верстатів, пресів, зварювальних установок є однопозиційними й одноінструментальними, в яких одночасно обробляється лише один виріб одним інструментом. Це характеризується обмеженими можливостями людини, що не може одночасно керувати декількома процесами чи об'єктами.

Четвертим принципом назвемо принцип своєчасності: впровадження і тиражування недостатньо зрілих технічних рішень є неприпустимим.

Зрештою, впровадження дорогих, малонадійних і тихохідних систем і засобів автоматизації призводить лише до їхньої дискредитації. На розвиток роботизації як нового науково-технічного напрямку, безсумнівно, повпливало те, що спочатку проектуванням промислових роботів займалися фахівці з обчислювальної техніки, технічної кібернетики тощо, які раніше не розглядали виробничі питання автоматизації, тому щиро вірили, що найголовніше – створити конструкцію ПМ, перш за систему його керування, і комплекс керуючих програм для процесів маніпулювання, що імітують дії людини [7].

ПМ не є чимось надприродним. Їхнє впровадження може бути ефективним або збитковим, при чому скорочувати кадровий дефіцит або загострювати його, все залежить від конкретних умов. Актуальність промислових роботів не в заміні людини під час обслуговування відомих машин. Вони стали тією ланкою, що дозволила об'єднати розрізнене технологічне устаткування в комплексні гнучкі автоматизовані виробничі системи машин і приладів. Саме за такими системами майбутнє. Тому ПМ і надалі розвиватимуться і завойовуватимуть все нові позиції. Проте не слід змішувати перспективи з реальними можливостями сьогодення. Враховуючи недосконалість конструкції та непідготовленості виробництва, а також допущені помилки, постає спірне питання, що ПМ уже найближчим часом можуть істотно вплинути на загальний рівень ручних робіт на виробництві, а тим паче на рівень продуктивності праці в усіх можливих застосунках.

1.2 Дослідження типів і видів промислових маніпуляторів

Класифікація ПМ вертикального переміщення може виконуватись з урахуванням різних ознак щодо:

- областей застосування;
- виробничо-технологічних особливостей;
- спеціалізації;
- виду базової системи координат;
- вантажопідйомності;
- величин лінійних переміщень;
- обсягу робочої зони, класу точності;
- можливості пересування (мобільності);
- типу приводу;
- способу облаштування на робочому місці;
- типу системи керування;
- способу програмування тощо.

За галуззю застосування ПМ вертикального переміщення класифікуються відповідно до конкретного виду їхнього використання як основного технологічного устаткування. За такою ознакою можна виділити основні різновиди ПМ:

- зварювальні;
- фарбувальні;
- складальні;
- контрольно-вимірювальні.

У залежності від виду базової системи координат або конфігурації маніпулятора можна виокремити п'ять основних різновидів ПМ вертикального переміщення щодо:

- прямокутної, або декартової, системи координат;
- циліндричної системи координат;
- сферичної, або полярної, системи координат;

- кутової, або ангулярно-сферичної, системи координат;
- ангулярно-циліндричної, або складної циліндричної, системи координат [8].

Компонування та конструктивне виконання ПМ, першочергово, залежать від того, які рухи і за якою послідовністю повинен виконувати маніпулятор під час функціонування. Для перенесення об'єкта маніпулювання до будь-якого місця робочої зони необхідно наділити маніпулятор трьома ступенями рухливості, кожен з яких може бути як поступальним, так і обертальним. На рисунку 1.3 зображено загальний вигляд ПМ.



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд ПМ вертикального переміщення

Такі ступені рухливості переносні або регіональні, вони визначають систему координат, в яких реалізуються основні рухи виконавчого пристрою ПМ щодо перенесення об'єкта.

Залежно від характеру кожного з переносних ступенів рухливості (поступального чи обертального), їхньої послідовності і взаємної орієнтації в просторі формується та чи інша базова система координат маніпулятора зі своїми особливостями і формою просторової фігури, що описується робочим органом ПМ. Отже, вид базової системи координат ПМ вертикального

переміщення визначає його конструктивне виконання, рівень складності системи керування, а також труднощі програмування виконавчих рухів.

ПМ вертикального переміщення, що функціонує в прямокутній, або декартовій, системі координат, налічує три поступальних базових ступеня рухливості. Цей тип ПМ складається з рами 1 у вигляді балкової бруківки чи порталної конструкції, що переміщається поступально, поперечної візки або каретки 2, відносно якої в вертикальному напрямку переміщається "рука" маніпулятора 3 у вигляді стійки або колони. Форма утворюється з просторової фігури, що описується робочим органом, так званої робочої зони 4, що має вигляд прямокутного паралелепіпеда (рисунок 1.4 а)

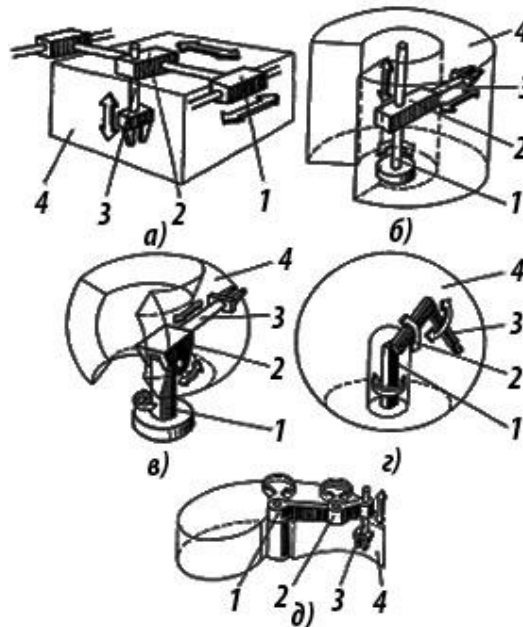


Рисунок 1.4 – Класифікація ПМ за базовою системою координат

ПМ, який діє в циліндричній системі координат, містить один обертальний і два поступальних базових ступеня рухливості зі взаємно вертикальними та перпендикулярними напрямками переміщень. Маніпулятор такого ПМ складається з поворотної колони, або стійки, 1, що переміщається нею у вертикальному напрямку каретки 2, відносно якої поступально рухається "рука" маніпулятора 3. Форма утворення робочої зони 4 являє собою неповний циліндр (рисунок 1.4, б).

ПМ, який діє в сферичній, або полярній, системі координат, налічує два обертальних взаємно перпендикулярних і поступальних ступені рухливості. Даний тип ПМ складається з обертаючої колони, або підстави, 1, поворотної (хитаючої) каретки 2 і переміщається нею поступально за допомогою "руки" 3. Форма робочої зони 4 – це неповна куля, що обмежена сферичними і плоскими поверхнями (рисунок 1.4, в).

ПМ, який діє в кутовій, або ангулярно-сферичній системі координат, містить три обертальних базових ступеня рухливості. Така конфігурація маніпулятора, що також називається складною сферичною, або антропоморфною, складається з ланок, які здатні повертатися подібно до руки людини: де до обертального "тулуба", у вигляді корпусу або колони, 1 шарнірно прикріплюється "плече" 2, до якого, в свою чергу, – "лікоть" 3. Форма робочої зони 4 – складна куля, що обмежена сферичними та циліндричними площинами (рисунок 1.4, г).

ПМ, який діє в ангулярно-циліндричній, або складній циліндричній, системі координат, налічує два обертальні в горизонтальній площині ступеня рухливості, а також перпендикулярну в ньому – поступальну, тобто спрямовану вертикально, площину. ПМ складається з обертової колони, або корпусу, 1, приєднаного до нього, і повертається в тій же горизонтальній площині ланки 2, на кінці якої вертикально переміщається "рука" 3. Форма утвореної робочої зони 4 – прямий складний циліндр (рисунок 1.4, д).

За рівнем введення і способом навчання ПМ можна поділити на чотири основні категорії. До того ж, кожній категорії ПМ притаманний певний рівень вводимі ззовні інформації, якої необхідно та достатньо для повноцінного функціонування в заданих технологічних умовах, а також органічно пов'язаний з цим способом його навчання (або програмування). З огляду на те, яку інформацію достатньо отримати роботу для виконання заданої роботи і як при цьому "навчити" його новим операціям, можна говорити про його технологічні можливості та ступінь автономності [8].

Нездібні ПМ з жорстким циклом операцій обладнані заздалегідь підготовленою значно простою програмою, що повторює одну й ту ж задану послідовність операцій незалежно від мінливих обставин, крім того, не піддається зміні простими засобами.

“Не навчені” ПМ із змінним циклом операцій мають повний набір інформації, що не змінюється під час виконання самої роботи, але піддається коригуванню шляхом "перенавчання" за умови зміни (переналадці) технологічного процесу, для чого передбачаються спеціальні засоби і методи (заміна або зміна програми). Це дозволяє легко і швидко змінювати склад і послідовність дій ПМ за умови зміни зовнішніх умов, а також під час переходу від однієї технологічної операції до іншої. Набір програм, записаних до пристрою керування, дозволяє легко налаштовувати ПМ на виготовлення необхідного виробу. Однак це ПМ першого покоління, що не мають сенсорного забезпечення і не здатні коригувати свої дії під час функціонування в залежності від зміни умов.

Навчальні ПМ із змінним циклом операцій разом із повним набором програмної інформації містять сенсорне забезпечення і зворотні зв'язки, що дозволяють в певною мірою коригувати програмні дії відповідно до зміни параметрів технологічного процесу. Алгоритмічне і програмне забезпечення таких ПМ дозволяє системі керування на базі сигналів зворотних зв'язків формувати закони керування маніпулятором з урахуванням фактичної обстановки, тобто навчатися в процесі взаємодії з об'єктами виробництва (адаптуватися) до умов, що змінюються. "Початкове" навчання таких роботів виконується, як правило, за першим робочим циклом, для чого перед початком роботи людина-оператор у режимі навчання вручну проводить захватний пристрій ПМ робочою траєкторією.

Крім того, до пристрою системи керування ПМ автоматично записуються координати вузлових точок робочої траєкторії, а також певна інформація про стан робототехнічної системи в процесі виконання технологічної операції. Далі система керування ПМ переходить в робочий

режим, а записана до пам'яті інформація, що перетворюється в командні сигнали, подається на приводи виконавчої системи, і маніпулятор виконує задану схему і послідовність дій. Такі ПМ, як правило, належать до другого покоління.

Самонавчальні ПМ з елементами штучного інтелекту, крім розвиненої сенсорної системи, зокрема, штучних органів зору, слуху, дотику тощо, повинні володіти могутньою інформаційно-керувальною системою і досконалим алгоритмічним і програмним забезпеченням, яке здатне розпізнавати образи і ситуації, моделювати навколишнє середовище, планувати поведінку та самонавчанням під час функціонування, формувати схему та послідовність своїх дій на основі поставленої мети та інформації про навколишнє середовище в умовах неорганізованого робочого простору. Це роботи третього покоління, що використовують у найскладніших технологічних процесах монтажу, складання, контрольно-вимірювальних та спеціальних технологіях.

1.3 Дослідження структурної схеми промислових маніпуляторів

Загалом ПМ складається з виконавчого пристрою (маніпулятора) і пристрої програмного керування. Структурну схему складових частин ПМ вертикального переміщення подано на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Структурна схема складових частин ПМ вертикального переміщення

Маніпулятор ПР призначається для виконання всіх його рухових функцій і є багатоланковим механізмом із розімкненим кінематичним ланцюгом, який обладнаний приводами і робочим органом, а також в загальному випадку – пристроєм пересування. Конструктивний маніпулятор складається з опорних (несучих) конструкцій, маніпуляційної системи, робочих органів, приводу і пристрою пересування.

Пристрій керування ПМ служить для формування і видачі керувальних впливів маніпулятора відповідно до програми керування. Він складається з системи керування, інформаційно-вимірювальної системи з пристроями зворотного зв'язку, а також системи зв'язку.

Опорні, або несучі, конструкції призначаються для розміщення всіх пристроїв і агрегатів ПМ, а також забезпечення необхідної міцності та жорсткості маніпулятора. Опорні конструкції за своїм виконанням дуже різноманітні, тому можуть бути у вигляді корпусів, підстав, стійок, металоконструкцій, колон, рам візків, порталів тощо.

Маніпуляційна система використовується для перенесення й орієнтації робочого органу чи об'єкта маніпулювання до заданої точки робочої зони і структурно являє собою, як правило, багатоланковий просторовий механізм із розімкненим кінематичним ланцюгом.

Робочий орган ПМ, призначений для безпосереднього впливу на об'єкт маніпулювання під час виконання технологічних операцій або допоміжних переходів, має вигляд захватного пристрою чи робочого інструмента.

Пристрій пересування призначається для переміщення маніпулятора або ПМ в цілому в потрібне місце робочого простору, отже, конструктивно складається з ходової частини і приводних пристроїв.

Система програмного керування (СПК) використовується для безпосереднього формування та видачі керівних сигналів, отже, конструктивно складається з пульта керування, жорсткого диску, обчислювального пристрою, блоків керування приводами маніпулятора, а також технологічного обладнання.

Інформаційно-вимірювальна система (ІВС), призначена для збору та первинної обробки інформації для системи керування про стан елементів і механізмів ПМ і зовнішнього середовища, конструктивно входить до складу пристрою керування ПМ і містить пристрої зворотного зв'язку та порівняння сигналів, крім того, датчики зворотного зв'язку.

Система зв'язку (СЗ) призначається для забезпечення обміну інформацією між ПМ та оператором або іншими ПМ з технологічними пристроями задля формулювання завдань, контролю за функціонуванням систем ПМ і технологічного обладнання, діагностики несправностей, регламентної перевірки тощо.

Структурно-функціональна схема взаємодії систем і складових частин ПМ з технологічним обладнанням наведено на рисунку 1.6.

Кінематичні ланки маніпулятора з'єднані ротаційними шарнірами, а самі вони нагадують кисть, лікоть та плече руки людини, це й надає конструкції антропоморфного характеру. Конструктивно маніпулятор створений у вигляді колони 1 (рисунок 1.6), на якій шарнірно закріплено плече 2, яке несе верхню руку 3 та передню руку (лікоть) 4. Кисть 5 має три ступені рухомості, а на її фланці закріплено різноманітні пристрої технологічного призначення: захвати, складальні та зварювальні головки тощо. Кожна з ланок обладна автономним електромеханічним приводом, який складається з електродвигуна і передачі обертання шарнірів руки маніпулятора.

Привід повороту плеча навколо осі колони 1 складається з електродвигуна 10, що передає через зубчасту передачу 9 і 11, проміжний вал 7 і ведучу шестерню 6 обертання колесу 8, кінематично зв'язаний з основою плеча 2. Таким чином передається обертання плечу навколо осі колони. Поворот же верхньої руки 3 відносно осі самого плеча виконується електродвигуном 16, вбудованим безпосередньо на корпусі руки. При цьому обертання від двигуна передається конічною зубчастою парою 17 і проміжним валом 12 шестерні 13, яка обкатується по нерухомо закріпленому

у корпусі 15 колесу 14. Отже, верхня рука 3 повертається на кут, заданий керуючою програмою (КП).

Особливістю конструкції передпліччя й ліктя маніпулятора є те, що частина робочого навантаження приймається їхніми зовнішніми кожухами. Це дає можливість мінімізувати маси рук, забезпечуючи при цьому їхню достатню міцність. Електродвигун обертання передньої руки 4 також розміщено у корпусі верхньої руки. Даний двигун через конічну передачу 19, вал 20 і ведучу шестерню 18 передає обертання веденому колесу 21, в результаті чого і виконується відповідно до заданої програми поворот передньої руки 4.

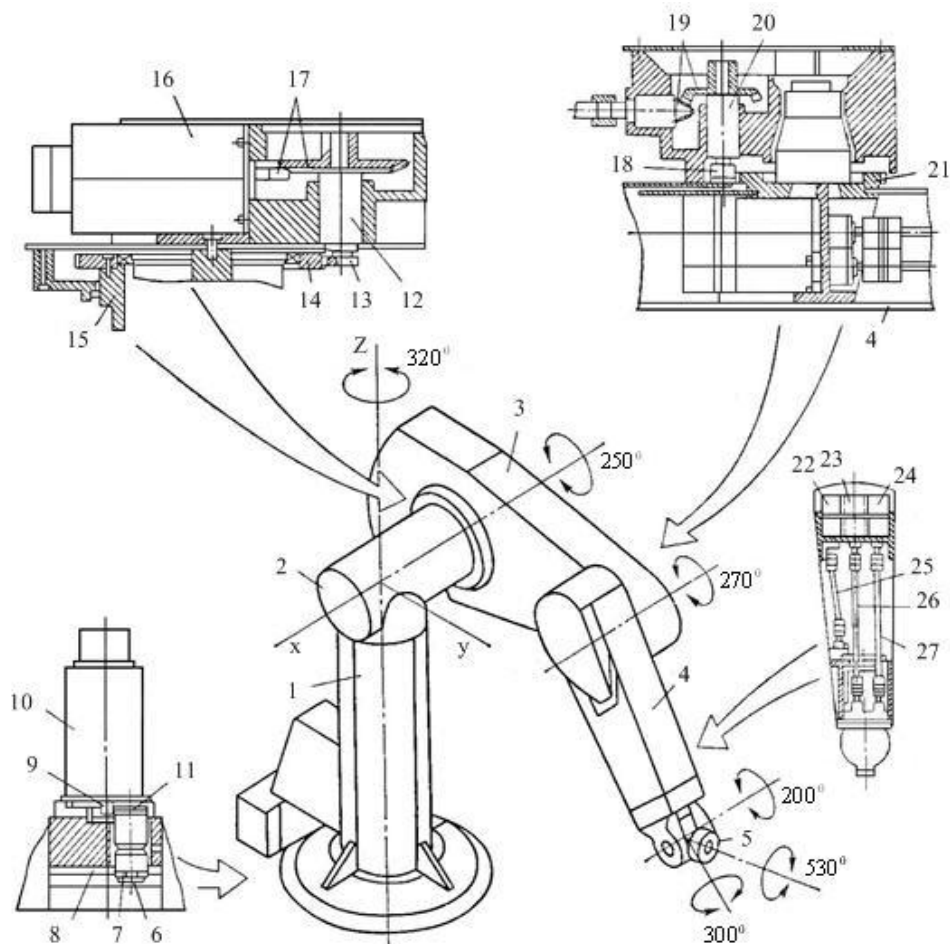


Рисунок 1.6 – Структурно-функціональна схема взаємодії систем і складових частин ПМ

Технологічні рухи кисті 5 навколо відповідних осей інструментальної системи координат виконуються електродвигунами 22-24, кінематично зв'язаними з кистю приводними валами 25-27 відповідно, до того ж, на кожний приводний вал припадає по два редуктори, що розміщені на початку і в кінці вала [8].

Серед найпоширеніших дій, які виконують промисловими маніпуляторами можна назвати наступні:

- переміщення деталей і заготовок від верстата до верстата або від верстата до систем змінних палет;
- зварювання швів і точкове зварювання;
- фарбування;
- виконання операцій різання шляхом руху інструмента по складній траєкторії.

Переваги використання:

- досить швидка окупність;
- виключення впливу людського чинника на конвеєрних виробництвах, а також під час проведення монотонних робіт, що вимагають високої точності;
- підвищення точності виконання технологічних операцій і, як результат, поліпшення якості;
- можливість використання технологічного обладнання в три зміни, 365 днів на рік;
- раціональне використання виробничих приміщень;
- виключення впливу шкідливих чинників на працівників виробництв із підвищеною небезпекою [9].

1.4 Дослідження методів керування промислових маніпуляторів

Сучасні роботи діють на основі принципів зворотного зв'язку, підпорядкованого керування та ієрархічності системи керування ПМ.

Ієрархія системи керування ПМ має передбачати розподіл системи керування на горизонтальні шари, що керують загальною поведінкою ПМ, обчисленням необхідної траєкторії руху маніпулятора, поведінкою окремих його приводів, і шари, що безпосередньо виконують керування двигунами приводів.

Підпорядковане керування застосовують для побудови системи керування приводом. Якщо необхідно побудувати систему керування приводом за положенням (наприклад, за кутом повороту ланки маніпулятора), то система керування замикається зворотнім зв'язком за положенням, а всередині системи керування за положенням активізується система керування за швидкістю зі своїм зворотнім зв'язком, всередині якої існує контур керування за струмом зі своїм зворотнім зв'язком.

Сучасний ПМ обладнаний не тільки зворотними зв'язками, але й щодо положення, швидкості та прискорення ланок. Під час захоплення деталей ПМ повинен знати, чи вдало він виконав дію. Якщо деталь тендітна або її поверхня має високу ступінь чистоти, будуються складні системи зі зворотним зв'язком із зусиллями, що дозволяють роботу схоплювати деталь, не пошкоджуючи її поверхню, а також не руйнуючи її.

Керування ПМ може виконувати як людина-оператор, так і система керування промисловим підприємством, яка приводить в дію ПМ з готовністю заготовок і верстатів з числовим програмним керуванням до виконання технологічних операцій.

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Аналіз вихідних даних

Об'єктом дослідження виступає ПМ із переміщенням робочого органа в вертикальному напрямку. Для його проєктування за основу взято вихідні дані: обертальний момент $T=150$ кг·мм і число обертань на виході $n=15$ об/хв.

Предмет дослідження в даному об'єкті – вихідні данні до проєктування інтегрованого механічного модулю, що забезпечує позиціонування інструменту ПМ, та залежність похибки механізму від вихідних даних.

Вихідними даними для дослідження є:

- обертальний момент;
- число обертів на виході.

Обертальний момент є векторною фізичною величиною, що дорівнює векторному добутку радіус-вектора (проведеного від осі обертання до точки прикладання сили – за визначенням), на вектор цієї сили. Характеризує обертальну дію сили на тверде тіло.

Від кількості оборотів на виході механізму залежить швидкість і плавність руху органа ПМ. Це характеризує обертальну дію сили на тверде тіло.

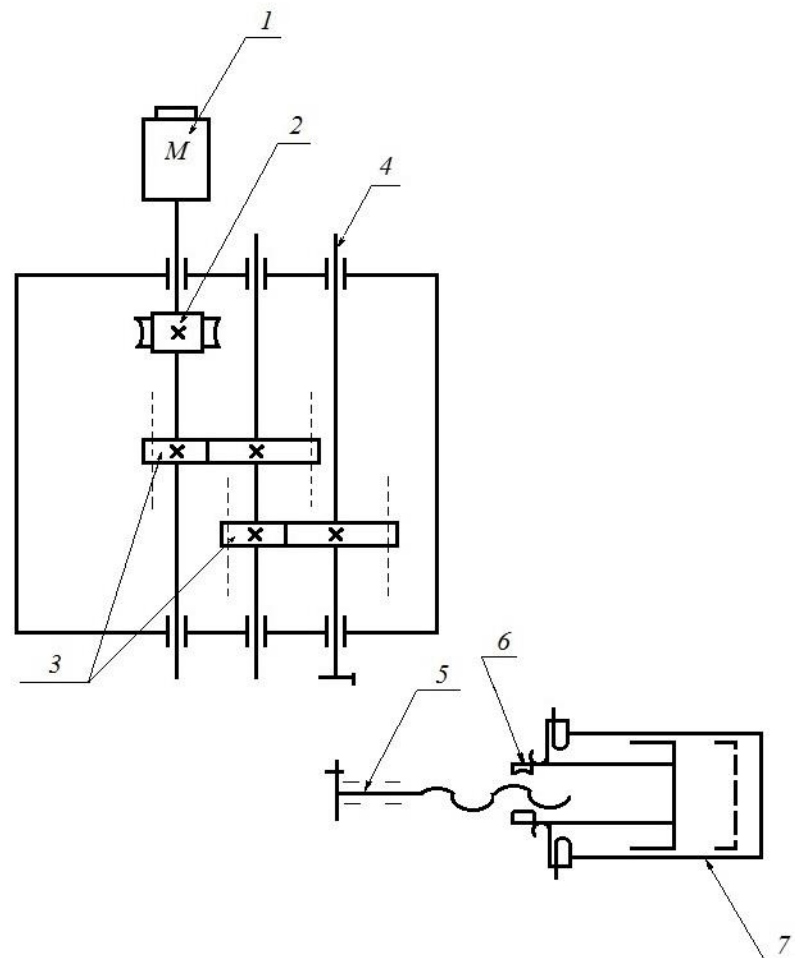
2.2 Аналіз елементів конструкції мехатронного модуля приводу промислового маніпулятора

2.2.1 Аналіз конструкції приводу

Привід ПМ, який є складовою частиною його маніпулятора, призначений для перетворення енергії на енергію руху виконавчих ланок

маніпуляційної системи та пристроїв пересування ПМ відповідно до сигналів, які надходять від системи керування [9].

У загальному вигляді привід складається з перетворювача енергії у вигляді енергоустановки, певних двигунів і передавальних механізмів (передач). Кінематичну схему приводу можна представити в такому вигляді (рисунок 2.1). У конкретному випадку вона складається з електродвигуна, що суміщений з провідним валом модуля за допомогою черв'ячної передачі і двох пар циліндричних прямозубих коліс. Елементи приводу в складі маніпулятора можуть охоплюватись як внутрішніми, так і зовнішніми зворотними зв'язками, за наявності яких привід може спостерігати, що дозволяє створювати роботів з елементами адаптації.



1 – двигун; 2 – черв'ячна передача; 3 – прямозуба циліндрична передача; 4 – підшипник; 5 – вал; 6 – поршень; 7 – камера

Рисунок 2.1 – Кінематична схема приводу

Привід, певним чином, визначає структуру, параметри та технологічні можливості маніпулятора і ПМ в цілому. Ключовими параметрами приводу є: швидкість і швидкодія, потужність, точність відпрацювання командного сигналу.

Для вибору того чи іншого приводу під час проектування найбільш суттєвими є такі класифікаційні ознаки: вид виконавчих двигунів, спосіб керування, вид енергоносія, спосіб використання енергії, що надходить і відводиться від механічної системи.

Крім того, розрізняють приводи за видами енергоносія: пневматичний, гідравлічний, електричний та їхні комбінації. Наразі приблизно 40% роботів у світі виконані з пневматичними приводами, практично стільки ж – із гідравлічними, і тільки близько 20 % – з електричними, проте частка останніх постійно зростає. Для нашого приводу найбільш ефективним є електричний двигун CSMT-04BR1ANT (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Електродвигун CSMT-04BR1ANT

За одним із визначень привід є механізмом, який служить для зниження кутових швидкостей веденого вала з метою підвищення обертальних моментів. У приводах використовуються різні передачі: зубчасті, ланцюгові, черв'ячні. До того ж, їх використовують у різних поєднаннях – ланцюгові та зубчасті чи черв'ячні і зубчасті тощо. Існують комбіновані приводи, в яких приводи поєднують з варіатором. Привід застосовують у вантажопідйомних, транспортних, обробних та інших машинах [9].

Проте в будь-якому разі, головними характеристиками приводу є: потужність, коефіцієнт корисної дії (ККД), кутові швидкості валів, передавальне відношення, кількість ступенів і передач тощо.

2.2.2 Загальні відомості про зубчасті передачі

Зубчаста передача – це механізм, який служить для передачі обертального руху з одного вала на інший, а також зміни частоти обертання за допомогою зубчастих коліс і рейок.

Зубчасте колесо, розташоване на валу, що передає обертання, називається ведучим, а колесо, що отримує обертання – веденим. Менше з двох коліс сполученої пари називають шестернею; більше – колесом; термін "зубчасте колесо" належить до обох деталей передачі.

Зубчасті передачі є найпоширенішим видом передач у сучасному машинобудуванні. Вони є дуже надійними в роботі, забезпечують сталість передавального числа, компактні, мають високий ККД, прості в експлуатації, довговічні, до того ж, можуть передавати будь-яку потужність (до 36 тис. кВт).

До недоліків зубчастих передач належать: необхідність високої точності виготовлення та монтажу, шум під час роботи зі значними швидкостями, неможливість безступінчатої зміни передавального числа.

У зв'язку з обширністю умов експлуатації форми елементів зубчастих зачеплень і конструкції – вельми різноманітні передачі.

Зубчасті передачі класифікуються за такими ознаками.

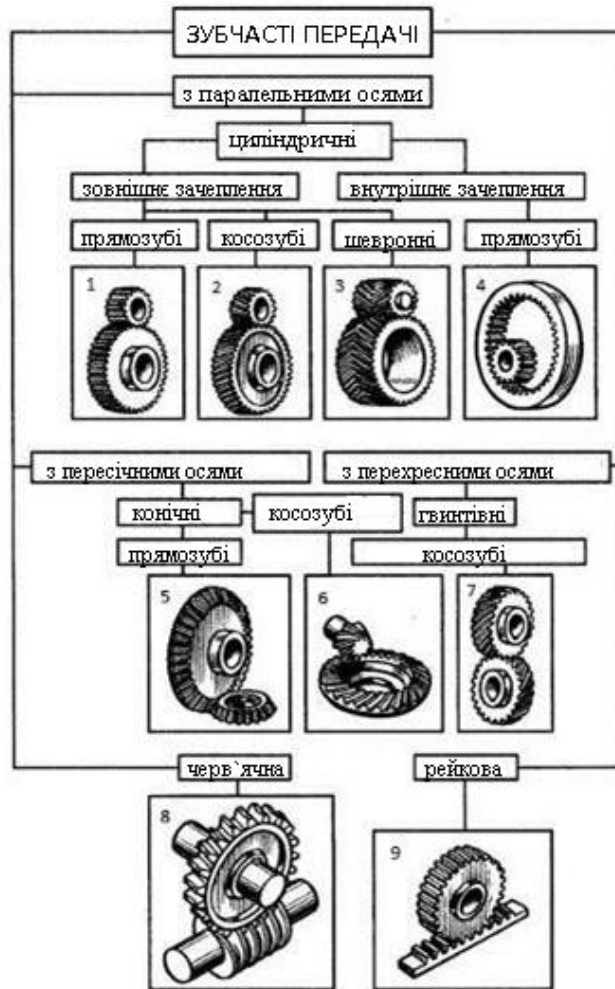


Рисунок 2.3 – Класифікація зубчастих передач

За взаємним розташуванням осей коліс: із паралельними осями (циліндрична передача – рисунок 2.3, поз. 1-4); із пересіченими (конічна передача – рисунок 2.3, поз. 5,6); із перехресними (гвинтова передача – рисунок 2.3, поз. 7; черв'ячна передача – рисунок 2.3, поз. 8).

У залежності від відносного обертання коліс, а також розташування зубів визначають передачі з зовнішнім і внутрішнім зачепленням. У першому випадку (рисунок 2.3, поз. 1-3) обертання коліс реалізується в протилежних напрямках, у другому (рисунок 2.3, поз. 4) – в одному напрямку. Рейкова передача (рисунок 2.3, поз. 9) використовується для перетворення обертального руху на поступальний.

За формою профілю розрізняють евольвентні (рисунок 2.3, поз. 1,2) і неевольвентні зуби, зокрема, циліндрична передача Новікова, зуби коліс якої окреслені дугами окружності.

З огляду на розташування теоретичної лінії зуба розрізняють колеса з прямими (рисунок 2.3, поз. 1), косими (рисунок 2.3, поз. 2), шевронними (рисунок 2.3, поз. 3) і гвинтовими зубами (рисунок 2.3, поз. 4). В непрямозубих передачах збільшується плавність роботи, відповідно, зменшується знос і шум. Завдяки цьому не прямозубі передачі, як правило, використовують в установках, які вимагають високих окружних швидкостей і передачі великих потужностей.

За конструктивним оформленням виділяють закриті передачі, що розміщені в спеціальному водонепроникному корпусі і забезпечені постійним мастилом з масляної ванни, а також відкриті, що працюють без змащення або змащуються періодично консистентними мастилами [9].

За величиною окружної швидкості існують такі передачі: тихохідні (v рівної до 3 м/с), середньошвидкісні (v рівної від 3.15 м/с) та швидкохідні (v більше 15 м/с).

Розглянемо детальніше передачі, що наявні в нашому приводі.

2.2.3 Прямозуба циліндрична передача

Зубчасті колеса для паралельних валів називаються циліндричними. Приклад прямозубого циліндричного колеса наведено на рисунку 2.4. Одне з двох, які входять у зачеплення зубчастих коліс та передає рух – є ведучим, інше – веденим.



Рисунок 2.4 – Прямозуба циліндрична передача

Якщо одне з коліс значно менше за інше, то його називається шестернею. Якщо відношення частот обертання ведучого і веденого коліс дорівнює одиниці, то обидва зубчастих колеса однакового розміру. Передавальне відношення дорівнює відношенню чисел зубів двох коліс. Як приклад, шестерня з 10 зубами обертається в 4 рази швидше зчепленого з нею зубчастого колеса, що має 40 зубів. Зуби можуть розташовуватись як на зовнішній, так і внутрішній поверхні колеса [8]. За умови зовнішнього зачеплення колеса обертаються в протилежних напрямках, а у разі внутрішнього – в одному. Для перетворення обертання на лінійне переміщення ведене колесо замінюється зубчастою "рейкою" – це, на кшталт, зубчастого колеса нескінченно великого діаметра.

2.2.4 Черв'ячна передача

Черв'ячною (чи зубчато-гвинтівною) передачею називається кінематична пара, що складається з черв'яка і черв'ячного колеса. Черв'ячні передачі використовують для передачі обертання між валами, осі яких перехрещуються під кутом 90° . Черв'ячну передачу зображено на рисунку 2.5.

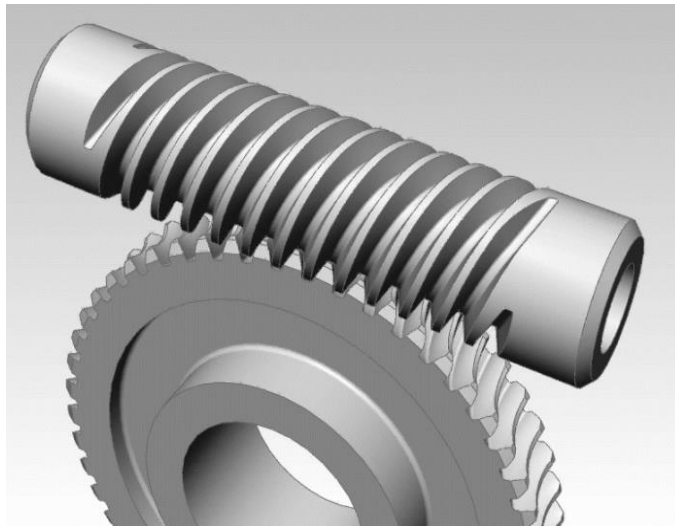


Рисунок 2.5 – Черв'ячна передача

Ведуча ланка черв'ячної передачі в більшості випадків – це черв'як, а ведена – черв'ячне колесо. Зворотня передача часто неможлива, оскільки ККД черв'ячного редуктора в сукупності з передавальним відношенням активізують самогальмування редуктора [8].

Перевага черв'ячної передачі в порівнянні з гвинтовою зубчастою полягає в тому, що початковий контакт ланок реалізується по лінії, а не в точці. Кут схрещування валів черв'яка і черв'ячного колеса може бути яким завгодно, але, як правило, він дорівнює 90° . На відміну від косозубого колеса обід черв'ячного колеса має увігнуту форму. Вона сприяє деякому облягання черв'яка, а, отже, збільшенню площі контактних поверхонь. Напрямок та кут підйому зубів черв'ячного колеса аналогічні до витків різьби черв'яка. Різьба черв'яка може бути як одновхідною, так і багатовхідною, до того ж, правою чи лівою. Найпоширенішою є права різьба з числом заходів $z_1 = 1 \dots 4$.

Розрізняють два провідних види черв'ячних передач: циліндричні, або просто черв'ячні передачі (з циліндричними черв'яками) і глобоїдні (з глобоїдними черв'яками).

У порівнянні зі звичайними зубчастими передачами, передавальне відношення (передавальне число) черв'ячного редуктора може бути значно більшим. Наведемо приклад, при одновхідному черв'яку ($z_1=1$) і черв'ячному колесі з $z_2=100$ передавальне число передачі $u=100$. За умови одного і того ж

передавального числа черв'ячний редуктор є набагато компактнішим за звичайну зубчасту передачу. Можливість реалізації великого передавального числа при одному щаблі передачі, а також компактність, плавність і безшумність роботи є основними перевагами редукторів із черв'ячною передачею. Завдяки зазначеним перевагам черв'ячні передачі активно застосовують на підйомно-транспортних машинах, різних верстатах та інших машинах. Передавальне число черв'ячної передачі приймають, як правило, в межах $u=8\dots 90$, але в спеціальних установках воно доходить до $u=1000$ та більше.

У черв'ячної передачі окрім втрат переданої потужності, що властиві зубчастій передачі, є втрати потужності, що властиві гвинтовій парі. Таким чином, ККД черв'ячного редуктора значно менше, що позначається як основний недолік черв'ячних передач. До недоліків також належать: схильність витків різьби черв'яка та зубів колеса до заїдання, а також необхідність використання для вінців черв'ячних коліс дорогих антифрикційних матеріалів. У зв'язку з навністю перелічених недоліків черв'ячні редуктори використовують значно рідше, ніж зубчасті й тільки для передачі невеликих і середніх потужностей, здебільшого до 50 кВт і рідше – до 200 кВт.

Переваги черв'ячних передач:

- плавність і безшумність роботи;
- компактність і порівняно невелика маса конструкції;
- можливість великого редукування, іншими словами, отримання великих передавальних чисел (в окремих випадках в не силових передачах 1000);
- можливість отримання самогальмуючої передачі, інакше кажучи, допускає передачу руху тільки від черв'яка до колеса, самогальмування черв'ячної передачі дозволяє створити механізм без гальмівного пристрою, що перешкоджає зворотному обертанню колеса;
- висока кінематична точність.

Недоліки черв'ячних передач:

- відносно низький ККД внаслідок ковзання витків черв'яка по зубам колеса;
- значне виділення теплоти в зоні зачеплення черв'яка з колесом;
- потреба у застосуванні для вінців черв'ячних коліс дефіцитних антифрикційних матеріалів;
- підвищене зношування і схильність до заїдання.

Черв'яки розрізняють за характерними ознаками:

а) за формою поверхні, на якій утворюється різьблення:

- 1) циліндричні;
- 2) глобоїдні;

б) у напрямку лінії витка:

- 1) праві;
- 2) ліві;

в) за кількістю входів різьби:

- 1) одновхідні;
- 2) багатовхідні;

г) за формою гвинтової поверхні різьби:

- 1) з архімедовим профілем;
- 2) з конволютним профілем;
- 3) з евольвентним профілем;

Зубчасті колеса розрізняють за наступними ознаками:

а) за профілем зуба:

- 1) прямий – (контакт з точки, що не навантажені передачі);
- 2) увігнутий – "охоплює" черв'як (контакт по лінії);
- 3) роликовий – зуби сектора замінені на гвинтовий ролик;

б) за типом зубчастого колеса:

- 1) повне колесо (повний оборот, безперервне обертання);
- 2) зубчастий сектор (поворот сектора від одного крайнього положення до іншого);

3) вироджений сектор (в парі з глобоїдним черв'яком – робоча довжина сектора менша за робочу довжину черв'яка) [8].

Після проведення аналізу елементів конструкції приводу та ознайомлення з усіма перевагами та недоліками зубчастих передач, запропоновано додати до конструкції приводу черв'ячну передачу з однохідним архімедовським черв'яком. Однохідним черв'яком називається черв'як, у якого в торці починається одна гвинтова лінія. Черв'як з $z_1=1$ наділений ефектом самогальмування і дозволяє значно зменшити габаритні розміри конструкції, оскільки виключається необхідність встановлення на неї додаткових гальмувальних елементів, а також зменшує помилку всього механізму, проте одночасно знижує ККД модуля.

Після аналізу конструкції приводу робочого органа ПМ, а також його обчислення було розроблено креслення плати правої, черв'яка і колеса на базі програмного забезпечення КОМПАС-3D V13. Ми застосовуємо черв'ячну і прямозубу циліндричну передачу. Перевага такого поєднання полягає в можливості отримання великих передавальних чисел, зниження кутової швидкості ведучого вала з метою підвищення крутного моменту, крім того, висока плавність руху, безшумність роботи і можливість точних ділильних переміщень. Програмне середовище КОМПАС-3D V13 безкоштовне та легке у використанні, за допомогою українського інтерфейсу можна налаштувати програму під «особисте» використання.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРАХУНКІВ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИВОДУ ПРОМИСЛОВОГО МАНІПУЛЯТОРА

3.1 Вихідні дані до оптимізації привода

Вихідними даними є:

- обертальний момент $T_{вих} = 150$ кг·мм;
- число обертів на виході $n = 15$ об/хв.

3.2 Розрахунок вхідного обертального моменту

$T_{вх}$ визначається за формулою (3.1):

$$T_{вх} = \frac{T_{вих}}{i_{заг} \cdot \eta_{заг}}, \quad (3.1)$$

де $i_{заг}$ – передавальне відношення елементів;
 $\eta_{заг}$ – загальний коефіцієнт корисної дії.

3.3 Визначення загального коефіцієнта корисної дії привода

$\eta_{заг}$ визначається за формулою (3.2):

$$\eta_{заг} = \eta_{чп} \eta_{зн} \eta_{пн}^2 = 0,6 \cdot 0,96 \cdot 0,93^2 = 0.498, \quad (3.2)$$

де $\eta_{чп} = 0,6$ – ККД черв'ячної передачі;

$\eta_{пн} = 0,96$ – ККД пар підшипників (1 пара);

$\eta_{зн} = 0,93$ – ККД зубчатої передачі.

3.4 Визначення передавального відношення елементів

$$i_{заг} = U_{12} \cdot U_{23} = n_{двиг} / n_{вих} = 6000 / 15 = 400, \quad (3.3)$$

де U_{12} – передавальне відношення черв'ячної передачі;

U_{23} – передавальне відношення зубчастої передачі.

Використаємо передавальне відношення зубчастої передач $U_{23}=4$, тоді визначаємо U_{12} :

$$U_{12} = i_{заг} / U_{23} = 400 / 4 = 100. \quad (3.4)$$

Передавальне число передач – це відношення числа зубів черв'ячного колеса z_2 до числа заходів черв'яка z_1 :

$$U = z_2 / z_1. \quad (3.5)$$

Для проектованої черв'ячної передачі оберемо число заходів $z_1=1$, звідси,

$$z_2 = U_{12} / z_1 = 100 / 1 = 100. \quad (3.6)$$

Звідси обчислюємо $T_{вх}$:

$$T_{вх} = T_{вих} / (i_{заг} \cdot \eta_{заг}) = 12 / (400 \cdot 0,498) = 0,06 \text{ кг} \cdot \text{мм}. \quad (3.7)$$

Для обчислених характеристик доцільно використати електродвигун постійного струму Д–15М з незалежним збудженням, що призначений для роботи в апаратурі спеціального призначення. Кріплення двигуна CSMT-04BR1ANT є торцевим.

Технічні особливості CSMT-04BR1ANT:

- номінальна потужність CSMT-04BR1ANT – 60 Вт ;
- напруга живлення $27 \text{ В} \pm 2,7 \text{ В}$;
- номінальний обертальний момент – $0,0323 \text{ Н} \cdot \text{м}$;
- струм обмотки якоря – $1,5 \text{ А}$;
- споживаний струм обмотки збудження – $0,8 \text{ А}$;
- номінальна частота обертання – 6000 об/хв ;
- габаритні розміри:
- довжина – 98 мм ;
- діаметр – 40 мм ;
- маса приладу – $0,4 \text{ кг}$;
- мінімальне напрацювання CSMT-04BR1ANT – 500 год ;
- термін експлуатації – 8 років .

3.5 Розрахунок характеристик черв'ячної передачі

У черв'ячних передачах за обчислення модуля приймають осьовий модуль черв'яка m , який дорівнює окружному модулю черв'ячного колеса m_1 . Значення модуля m черв'ячних передач є стандартизованими (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Значення модуля m та коефіцієнта діаметра черв'яка q

m , мм	1-й ряд	2,0	2,5	3,15	4,0	5,0	6,3
	2-й ряд	3,0	3,5	6,0	7,5	12	
q	1-й ряд	8,0	10,0	12,5	16,0	20,0	25,0
	2-й ряд	7,1	9,0	11,2	14,0	18,0	22,4

У циліндричних черв'ячних передачах з архімедовими черв'яками крок черв'яка дорівнює кроку зубів черв'ячного колеса.

У черв'ячній передачі з архімедовим черв'яком (рисунок 3.1), розрізняють початкові діаметри d_{w1} і d_{w2} ділильні діаметри черв'яка 1 і колеса 2 d_1 і d_2 . У передачах без зміщення початкового контуру під час нарізування

$$d_{w1} = d_1, d_{w2} = d_2.$$

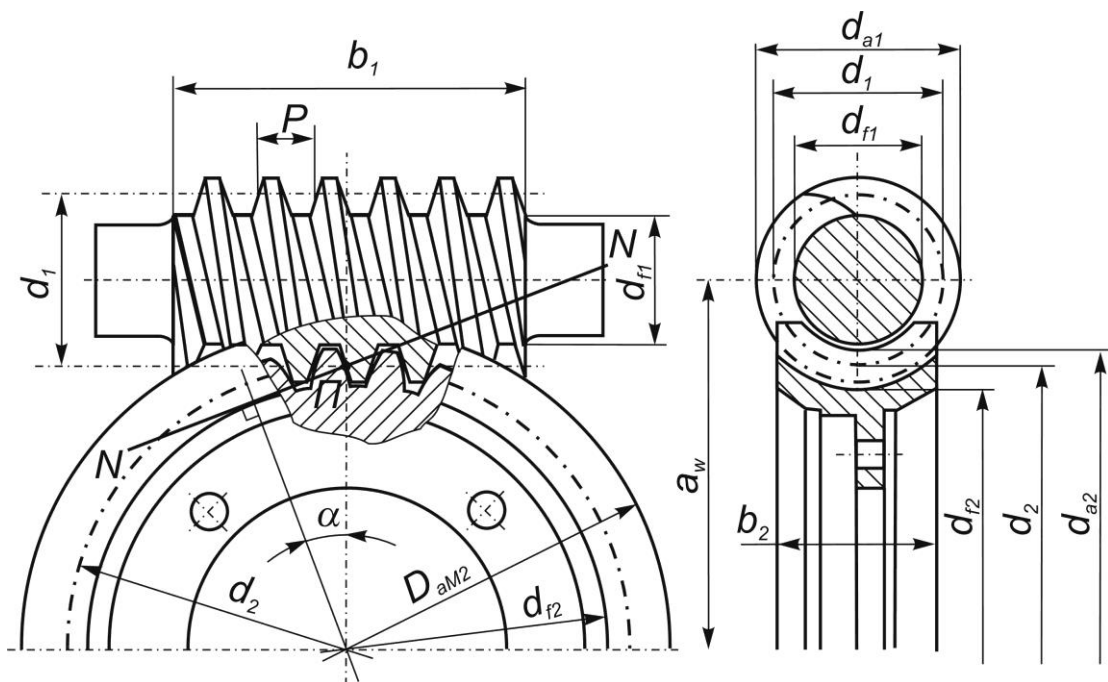


Рисунок 3.1 – Основні геометричні параметри черв'ячної передачі

Кроком називається відстань P_x осової нарізки черв'яка, а відношення $P_x/\pi = m$ – модулем зачеплення в осьовому перерізі черв'яка.

Під час розробки черв'ячної передачі обрали однозахідного черв'яка. Однозахідний черв'як – це черв'як, у торці якого починається одна гвинтова лінія. Такий черв'як виконує процес гальмування, це дозволяє значно зменшити габарити конструкції, оскільки відпадає необхідність включати додаткові гальмувальні елементи, а також зменшується похибка механізму.

Модуль зачеплення в осьовому діаметрі черв'яка розраховується за такою формулою:

$$m \geq K_H \sqrt[3]{\frac{T \cdot K_D \cdot K_{HB} \cdot K_{FU} \cdot Y_F}{z_2^2 \cdot \psi \cdot b \cdot d \cdot [\delta F]}}, \quad (3.8)$$

де T – обертальний момент (кг·мм);

z_2 – кількість зубів на колесі.

$$T_{23} = T_{\text{вих}} / (i_{u23} \cdot \eta_{\text{заг}}) = 150 / (4 \cdot 0,498) = 7,5 \text{ кг} \cdot \text{мм}. \quad (3.9)$$

Для задіяного привода характерний режим роботи близький до статичного, тому прийємо $K_d = 1$, $K_n = 1,4$.

Коефіцієнт $K_{H\beta}$ враховує перевантаження окремих місць зуба вздовж лінії контакту, $K_{H\beta} = 1,2$.

Y_F – коефіцієнт форми зуба. $Y_F = 3,85$.

z – кількість зубів на колесі, $z_2 = 100$, у даному разі $\psi_{bd} = 0,4$.

σ^F – обирається відповідно до матеріала колеса (сталь 45). $\sigma^F = 11,5$ кг.

$$m \geq 1,4 \cdot \sqrt[3]{\frac{7,5 \cdot 1,2 \cdot 3,85}{100^2 \cdot 0,4 \cdot 11,5}} = 0,125 \text{ мм}. \quad (3.10)$$

З таблиці 3.2 вибираємо взаємопов'язані значення.

Таблиця 3.2 – Поєднання m , q и z_1 .

m	q	z_1	m	Q	z_1
1,0	16	1	1,6	10; 12,5; 16;	1; 2; 4
	20	1; 2; 4		20	
1,25	12,5; 16; 20	1; 2; 4			1; 2; 4

– модуль зачеплення в осьовому зрізі черв'яка $m = 0,125$ мм;

– коефіцієнт діаметра черв'яка $q = 12,5$;

– число витків черв'яка $z_1 = 1$;

– кількість зубів черв'ячного колеса $z_2 = 100$.

Графік залежності коефіцієнта зачеплення від кількості зубів колеса подано на рисунку 3.2.

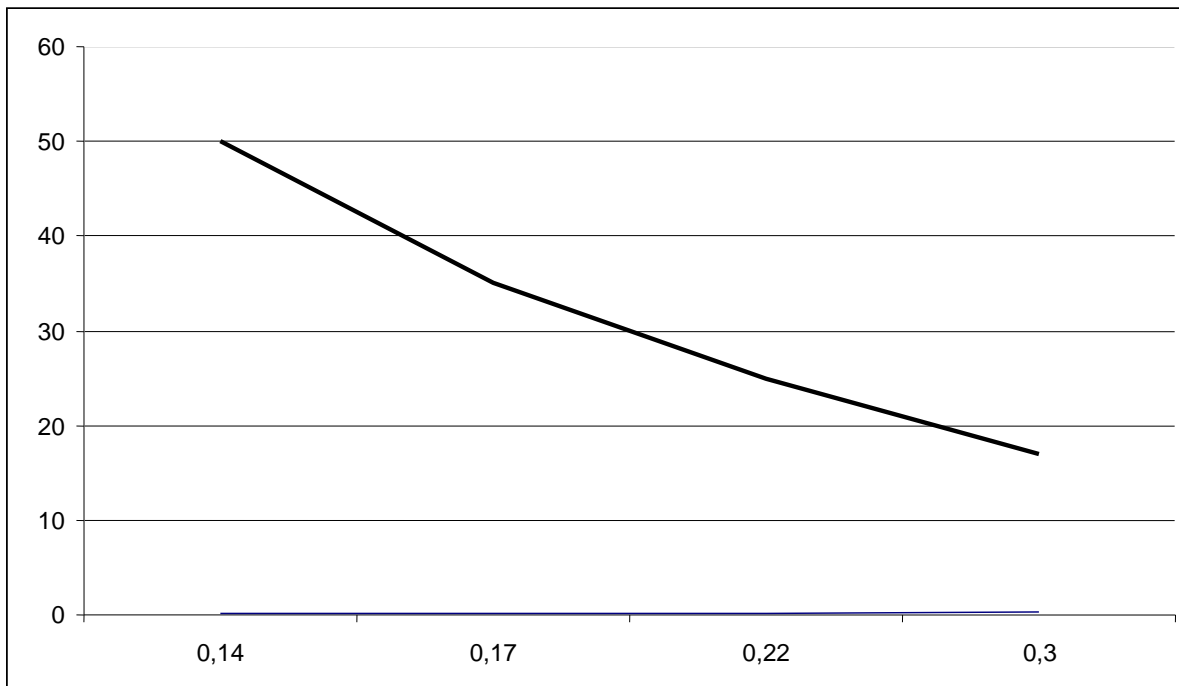


Рисунок 3.2 – Графік залежності коефіцієнта зачеплення від кількості зубів колеса

Визначимо дільний діаметр d , діаметр вершин d_a та впадин d_f за умови $c^* = 0,2$:

$$\begin{cases} d_1 = m \cdot q = 0,125 \cdot 12,5 = 1,5625 \text{ мм}, \\ d_{a1} = d_1 + 2m = m \cdot (q + 2) = 0,125 \cdot (12,5 + 2) = 1,8125 \text{ мм}, \\ d_{f1} = d_1 - 2 \cdot (h_a^* + c^*) m = m \cdot (q - 2,4) = 0,125 \cdot (12,5 - 2,4) = 1,2625 \text{ мм}, \end{cases} \quad (3.11)$$

Обчислимо довжину нарізної частини черв'яка:

$$b_l \geq (11 + 0,06z_2) \cdot m = (11 + 0,06 \cdot 100) \cdot 0,125 = 2,125 \text{ мм}. \quad (3.12)$$

Кут обхвату витків черв'яка дорівнює $2\delta = 70^\circ \div 120^\circ$, кут зачеплення $a_w = 20^\circ$, d_2 – діаметр колеса z_2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} d_2 = m \cdot z_2 = 0,125 \cdot 100 = 12,5 \text{ мм}, \\ d_{a2} = d_2 + 2 d_a m = m(z_2 + 2) = 0,125(100 + 2) = 12,75 \text{ мм}, \\ d_{f2} = m \cdot (z_2 - 2,4) = 0,125(100 - 2,4) = 12,2 \text{ мм}, \\ d_h < d_{a2} + k_h = 12,75 + 0,25 = 13 \text{ мм}. \end{array} \right. \quad (3.13)$$

При $z_1 = 1$, $k_h = 2m$.

Визначимо ширину вінця b_2 відповідно до кута обхвату черв'яка колесом 2δ :

$$b_2 \leq 0,75 d_{a1} \leq 19,2. \quad (3.14)$$

Обчислимо ділительний кут підйому гвинтової лінії γ :

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\pi \cdot m \cdot z_1}{\pi \cdot d_1} = \frac{z_1}{q} = \frac{1}{12,5} = 0,08. \quad (3.15)$$

Визначимо міжосьову відстань у черв'ячній передачі без зміщення:

$$a_w = 0,5m \cdot (z_2 + q) = 0,5 \cdot 0,125 \cdot (100 + 12,5) = 7,03 \text{ мм}. \quad (3.16)$$

Число зубів колеса z_3 зубчатої передачі приймемо за 17, число зубців колеса z_4 звідси:

$$z_4 = z_3 \cdot U_{23} = 17 \cdot 4 = 68. \quad (3.17)$$

Міжосьова відстань дорівнюватиме:

$$a_w = 0,5 \cdot (d_{w1} + d_{w2}) = 0,5m \cdot (z_1 + z_2) = 0,5 \cdot 0,125 \cdot (1 + 100) = 6,31 \text{ мм}. \quad (3.18)$$

Коефіцієнт ширини зубчатого вінця вибирається з таблиці 3.3:

Таблиця 3.3 – Коефіцієнт ширини зубчатого вінця

ψ_{ba}	Примітки
0,01 – 0,1	Кінематичні та легко навантажені передачі
0,1 – 0,25	Легко навантажені передачі при підвищеній жорсткості валів
0,25 – 0,40	Передачі підвищеної завантаженості при достатній жорсткості валів

$$b = a_w \cdot \psi_{ba} = 6,31 \cdot 0,1 = 0,63 \text{ мм.} \quad (3.19)$$

3.6 Розрахунок параметрів циліндричних прямозубих коліс

Розрахуємо параметри циліндричних прямозубих коліс пари z_3 та z_4 . Креслення зубчатого колеса зображено на рисунку 3.3.

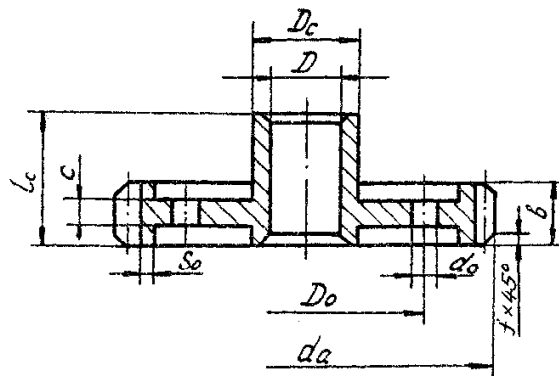


Рисунок 3.3 – Креслення зубчатого колеса

Для колеса z_3 :

$$d_{w1} = d_1 = mz_3 = 0,125 \cdot 17 = 2,125 \text{ мм,} \quad (3.20)$$

для колеса z_4 ;

$$d_{w2} = d_2 = mz_4 = 0,125 \cdot 68 = 8,5 \text{ мм.} \quad (3.21)$$

Висота зуба дорівнюватиме:

$$h = h_a + h_f = 2,625 \text{ мм}, \quad (3.22)$$

$$h_a = h_a^* \cdot m = 1 \cdot 0,125 = 0,125 \text{ мм}, \quad (3.23)$$

де h_a^* – коефіцієнт висоти головки зуба. $h_a^* = 1$.

$$h_f = h_a^* \cdot c^* = 2,5 \text{ мм}, \quad (3.24)$$

де c^* – коефіцієнт радіального зазору. $c^* = 0,25$.

Обчислимо діаметр вершини зубів колеса z_3 :

$$d_a = d + 2 \cdot h_a \cdot m = m \cdot (z_3 + 2) = 0,125 \cdot (17 + 2) = 2,375 \text{ мм}, \quad (3.25)$$

для колеса z_4 :

$$d_a = d + 2 \cdot h_a \cdot m = m \cdot (z_4 + 2) = 0,125 \cdot (68 + 2) = 8,75 \text{ мм}. \quad (3.26)$$

Обчислимо діаметр впадин для колеса z_3 :

$$d_f = m \cdot (z_3 - 2,5) = 0,125 \cdot (17 - 2,5) = 1,81 \text{ мм}, \quad (3.27)$$

для колеса z_4 :

$$d_f = m \cdot (z_4 - 2,5) = 0,125 \cdot (68 - 2,5) = 8,19 \text{ мм}, \quad (3.28)$$

Розрахуємо міжосьову відстань зубчатої пари:

$$a_w = 0,5 \cdot m \cdot (z_2 + z_3) = 0,5 \cdot 0,125 \cdot (17 + 68) = 5,31 \text{ мм}, \quad (3.29)$$

Ширина зубчатого колеса обчислюється за формулою:

$$b = \alpha_w \cdot \psi_{ba} = 5,31 \cdot 0,1 = 0,53 \text{ мм.} \quad (3.30)$$

3.7 Розрахунок характеристик валів

Обираємо розміри та геометричні параметри згідно з визначеним модулем m :

- $d_1 = 2$ мм;
- $d_2 = 5$ мм;
- $b = 1$ мм;
- $L = 10$ мм.

На рисунку 3.4 наведено схематичне зображення розміщення зубчатих коліс у корпусі.

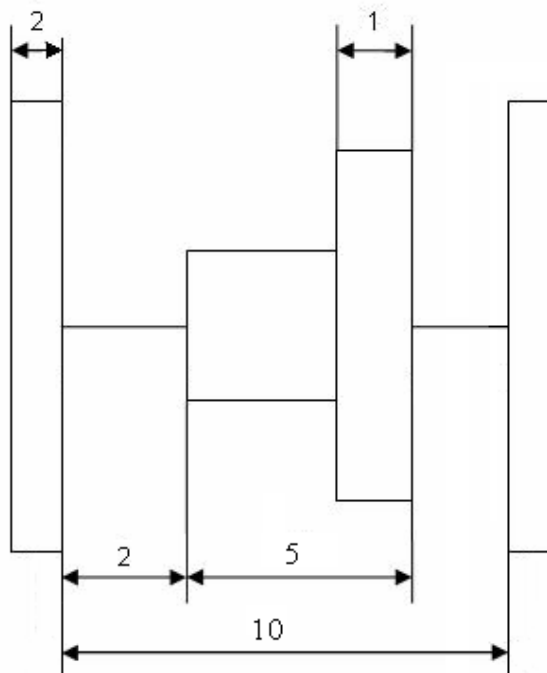


Рисунок 3.4 – Схематичне зображення розміщення зубчатих коліс у корпусі

Визначення зусилля на зчепленні зубчатих коліс F_t . Схему зчеплення двох зубчатих коліс представлено на рисунку 3.5.

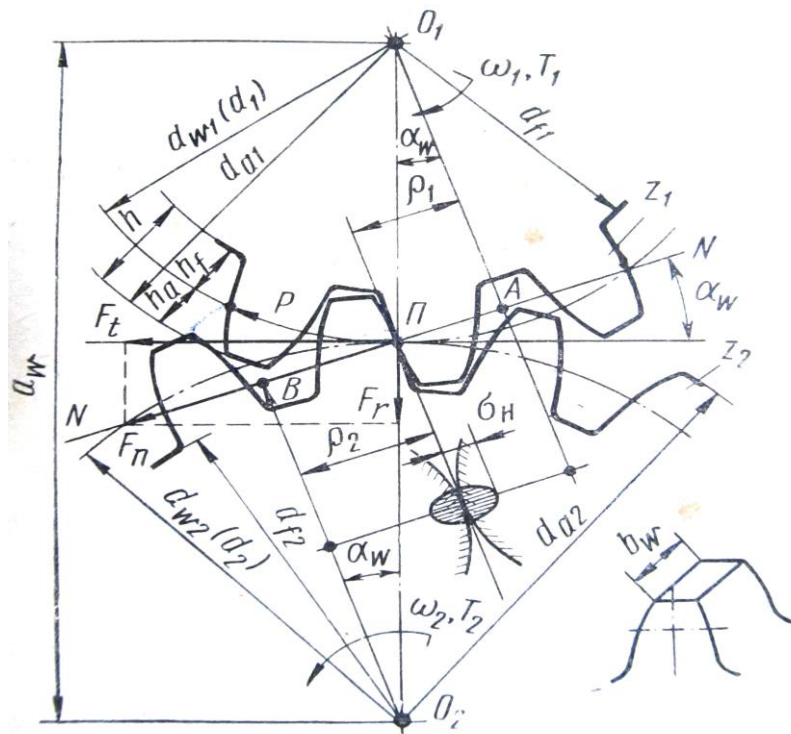


Рисунок 3.5 – Схема зчеплення двох зубчатих коліс

$$F_t = \frac{2T_2}{d_2} = \frac{2 \cdot T_{\text{вих}}}{d_2 \cdot i \cdot 0.92 \cdot 0.96^2} = \frac{2 \cdot 150}{10 \cdot 6 \cdot 0.92 \cdot 0.96^2} = 5.9 \text{ Н} \quad (3.31)$$

Радіальне зусилля F_r :

$$F_r = F_t \cdot \text{tg} \alpha = 5.9 \cdot 0.177 = 1.04 \text{ Н} \quad (3.32)$$

Визначення реакції в опорах у горизонтальному положенні:

при $\sum M_{Ar} = 0$:

$$-R_{Bz} \cdot 10 + F_r \cdot 7 = 0, \quad (3.33)$$

$$R_{Bz} = \frac{1.04 \cdot 7}{10} = 0.728 \text{ Н} \quad (3.34)$$

при $\sum M_{Br} = 0$:

$$R_{A_z} \cdot 10 - F_r \cdot 3 = 0, \quad (3.35)$$

$$R_{A_z} = \frac{1,04 \cdot 3}{10} = 0,024H. \quad (3.36)$$

Визначення реакцій в опорах у вертикальних площинах:

при $\sum M_{A_B} = 0$:

$$-R_{B_e} \cdot 10 + F_t \cdot 7 = 0, \quad (3.37)$$

$$R_{B_e} = \frac{5,9 \cdot 7}{10} = 4,13H. \quad (3.38)$$

при $\sum M_{B_B} = 0$:

$$R_{A_6} \cdot 10 - F_t \cdot 3 = 0, \quad (3.39)$$

$$R_{A_6} = \frac{5,9 \cdot 3}{10} = 1,77H. \quad (3.40)$$

Визначення обертаючих моментів для вертикальної площини:

при $\sum M_{x_1} = 0$:

$$M_{x_6} = R_{A_6} \cdot x. \quad (3.41)$$

При $x_1 = 0$, $M_{x_6} = 0$ Н/мм, а при $x_1 = 7$, $M_{x_6} = 0,966$ Н·мм.

При $\sum M_{x_2} = 0$:

$$M_{x_6} = R_{B_6} \cdot (1 - x). \quad (3.42)$$

При $x_2 = 7$, $M_{x_2e} = 1.932$ Н/мм, а при $x_2 = 1$, $M_{x_2B} = 0$ Н·мм.

Визначення обертаючих моментів для горизонтальної площини

При $\sum Mx_1 = 0$:

$$M_{x_1} = R_{A_1} \cdot x. \quad (3.43)$$

При $x_1 = 0$, $M_{x_1} = 0$ Н/мм, а при $x_1 = 7$, $M_{x_1} = 0,168$ Н·мм.

При $\sum Mx_2 = 0$:

$$M_{x_2} = R_{B_1} \cdot (1 - x). \quad (3.44)$$

При $x_2 = 7$, $M_{x_2e} = 0,336$ Н/мм, а при $x_2 = 1$, $M_{x_2\Gamma} = 0$ Н·мм.

Визначення еквівалентного моменту у небезпечному розрізі:

$$M_{екв} = \sqrt{M_{x_1}^2 + M_{x_2}^2 + T_{кр}} = \sqrt{0,966^2 + 0,168^2 + 0,161} = 1,06 \text{ Н} \cdot \text{мм}. \quad (3.45)$$

Визначення еквівалентної напруги в небезпечному розрізі:

$$\sigma_{екв} = \frac{M_{екв}}{0,1 \cdot d_1^3} = \frac{1,06}{0,1 \cdot 125} = 0,085 \text{ Н} \cdot \text{мм}^2. \quad (3.46)$$

З'ясувавши реакції в опорах вала, а також склавши вирази для моментів для різних ділянок, необхідно побудувати епюри моментів та осьових сил від усіх наявних навантажень (рисунок 3.6). Такі епюри застосовуються для розрахунку навантажень в буд-якому розрізі вала, а також для обчислення запасу міцності [9].

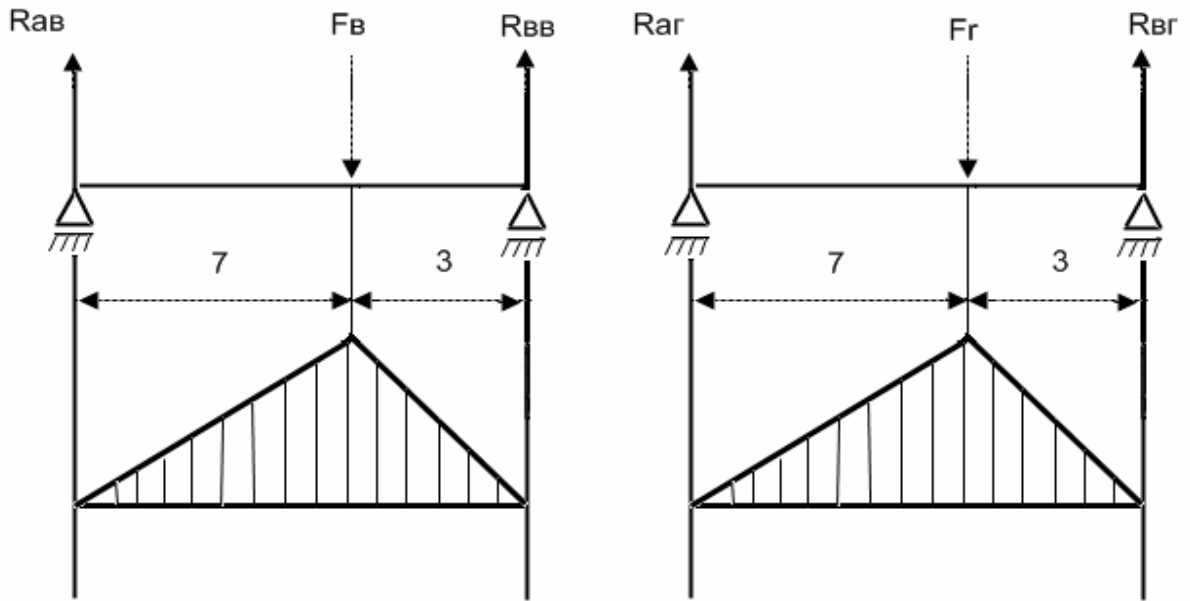


Рисунок 3.6 – Епюри реакцій в опорах

3.8 Розрахунок довговічності підшипників

Під довговічністю підшипників визначають число обертів, яке підшипник повинен виконати до виявлення перших ознак втомленості матеріалу кілець.

$$L_p = \frac{60n \cdot L_n}{10^6} = 6000 \text{ год.} \quad (3.47)$$

Еквівалентне навантаження P обчислюється за формулою:

$$P = (X \cdot V \cdot F_r + Y) K_\sigma \cdot K_t = 0,168 \text{ кг.} \quad (3.48)$$

де $X=1$ – коефіцієнт радіального навантаження, коефіцієнт обертання при обертанні всередині колеса $V=1$, коефіцієнт безпеки, що зважає на характер навантаження $K_\sigma=1$, $K_t=1$.

$$F_r = \sqrt{R_{\sigma\sigma}^2 + R_{\sigma z}^2} = 1,65H = 0,168 \text{ кг.} \quad (3.49)$$

Аналіз динамічної вантажопідйомності:

$$L = \left(\frac{C}{p} \right)^\alpha; \quad (3.50)$$

$$C_p = \sqrt[3]{6000 \cdot 0,005} = 3,057. \quad (3.51)$$

3.9 Оцінка похибки механізму та вибір мастильних матеріалів

3.9.1 Дослідження відхилення виконуємо за формулою

$$\delta_{откл} = ((i - i_{факт}) / i_{факт}) * 100 = ((i - U_{12} * U_{23}) / (U_{12} * U_{23})) * 100 = 0\%. \quad (3.52)$$

$\delta_{откл} < 4\%$, що задовольняє ДСТУ 2144–96

3.9.2 Дослідження кутової швидкості приводу

$$w_1 = \pi * n_{вх} / 30 = 3.14 * 6000 / 30 = 628 \text{ (с}^{-1}\text{)}; \quad (3.53)$$

$$w_2 = w_1 / U_{12} = 628 / 4 = 157 \text{ (с}^{-1}\text{)}. \quad (3.54)$$

3.9.3 Дослідження приблизної окружної швидкості

$$V = 0.43 * (W_{ном} * (0.01 * w_1)^3)^{1/4} = 0.43 * (12 * (0.01 * 628)^3)^{1/4} = 3.17 \text{ м/с}. \quad (3.55)$$

Проведені дослідження підтверджують те, що двигун було обрано правильно. Він відповідає усім розрахунковим характеристикам та забезпечує необхідну швидкість позиціонування.

Оцінка похибки механізму виконується за формулою:

$$\delta_{\varphi} = \delta_{fh} + \delta_{\varphi h} + \delta_{fcc} + \delta_{foo} + \delta_{\varphi m} + \delta_{\varphi t} = 27.42 \text{ кут.хв} \quad (3.56)$$

де δ_{fh} – похибка мертвого ходу;

δ_{fcc} – похибка скручування валів;

δ_{foo} – похибка від зазору в опорах;

$\delta_{\varphi m}$ – похибка муфти;

$\delta_{\varphi t}$ – похибка температури;

$\delta_{f_{1,M}}$ – похибка на ведучому колесі.

Похибка для колеса z_2 :

$$\delta_{f_{2,i}} = \frac{7,4 \cdot j_n}{m \cdot z} = 28,3. \quad (3.57)$$

Похибка для колеса z_3 :

$$\delta_{f_{3,M}} = \frac{\delta_{f_{2,M}}}{U_{2'3}} = 14,15. \quad (3.58)$$

Похибка для колеса z_3 :

$$\delta_{f_{3,M}} = \frac{7,4 \cdot j_n}{m \cdot z} = \frac{7,4 \cdot 55}{0,8 \cdot 18} = 28,3. \quad (3.59)$$

Похибка для колеса z_4 :

$$\delta_{f_{4,M}} = \frac{\delta_{f_{3,M}}}{U_{3'4}} = 9,76. \quad (3.60)$$

$$\delta_{\varphi_m} = \frac{\delta_{f_{3M}} \cdot U_{2'3}}{2 \cdot U_{3'4}} + \delta_{f_{4M}} = \frac{14,5 \cdot 2}{2 \cdot 2,9} + 9,76 = 14,64. \quad (3.61)$$

Аналіз розрахунку $\Delta\varphi_k$ на останньому колесі:

$$\Delta\varphi_k = \frac{4,8}{m} \left(\frac{\Delta F_1}{z_2 \cdot U_{2'3}} + \frac{\Delta F_2}{z_3 \cdot U_{3'4}} \right) = \frac{4,8}{0,8} \left(\frac{44}{18 \cdot 2} + \frac{48}{18 \cdot 2,9} \right) = 12,78 \text{ кут.хв} \quad (3.62)$$

Регулярне змазування зубчастих передач і підшипників зменшує втрати на тертя, запобігає підвищеному зносу та нагріву деталей, до того ж оберігає деталі від корозії. Зниження втрат на тертя сприяє підвищенню ККД редуктора [10].

За способом підведення мастильного матеріалу та зачепленням розрізняють змазування картера і циркуляційне.

Для цього редуктора вибрано систему картера мастила. Змазування східців виконується автоматично.

За в'язкістю з рекомендованих вибираємо мастило індустріальне И-70А.

Мінімальний рівень мастила має бути таким, щоб колесо опускалося в нього не менше ніж на висоту зуба.

Для змазування підшипникових вузлів доцільно обрати метод розбризкування із загальної мастильної ванни.

Як ущільювачі на вали передбачені манжети гумові армовані.

4 МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ ПРИВОДУ ПРОМИСЛОВОГО МАНІПУЛЯТОРА

4.1 Створення моделі привода

Для створення 3D-моделі привода було обрано програму SolidWorks, оскільки вона є однією з найкращих функціональних програм для створення 3D-моделей деталей, а також є доступною. Програма устаткована великим набором інструментів, за допомогою якого можна створити модель вибраного привода. Крім того, є можливість освоїти роботу в програмі лише за кілька днів і почати проектувати найрізноманітніші 3D-моделі [11]. Провівши моделювання привода, на рисунку 4.1 представлено вид зверху, а на рисунку 4.2 – вид збоку.

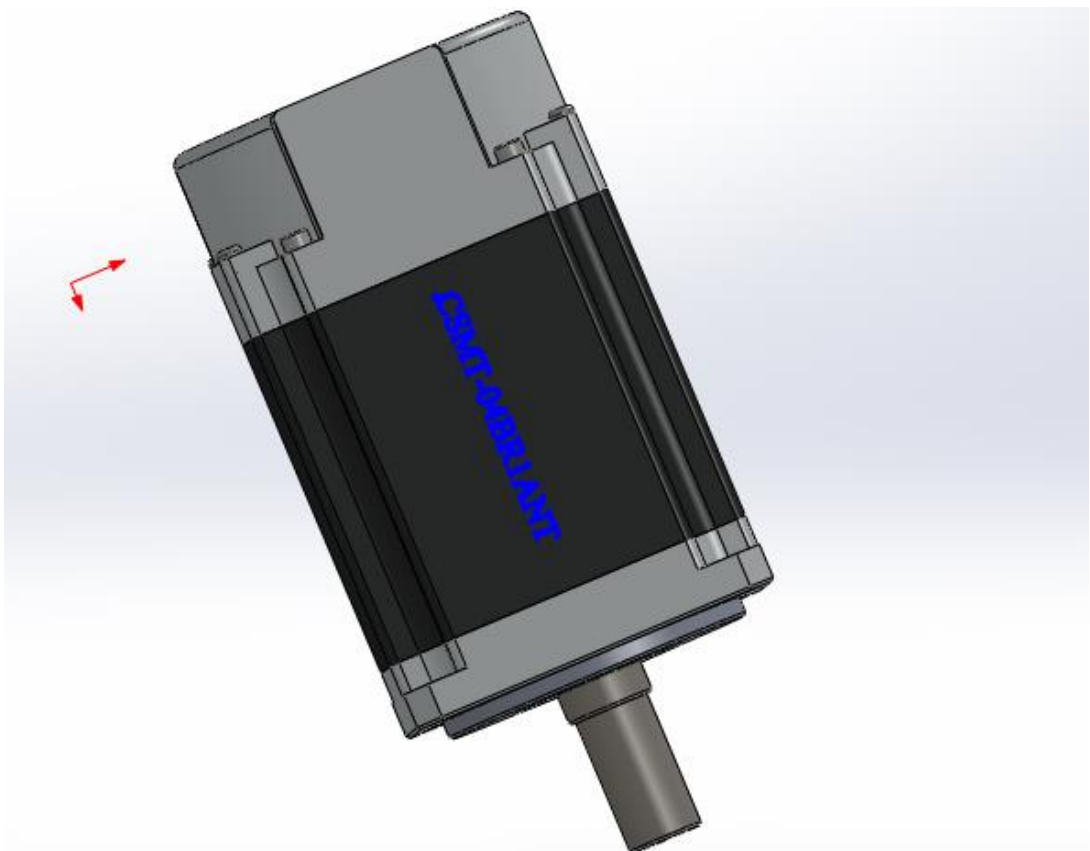


Рисунок 4.1 – Вид зверху, модель ММП CSMT-04BR1ANT

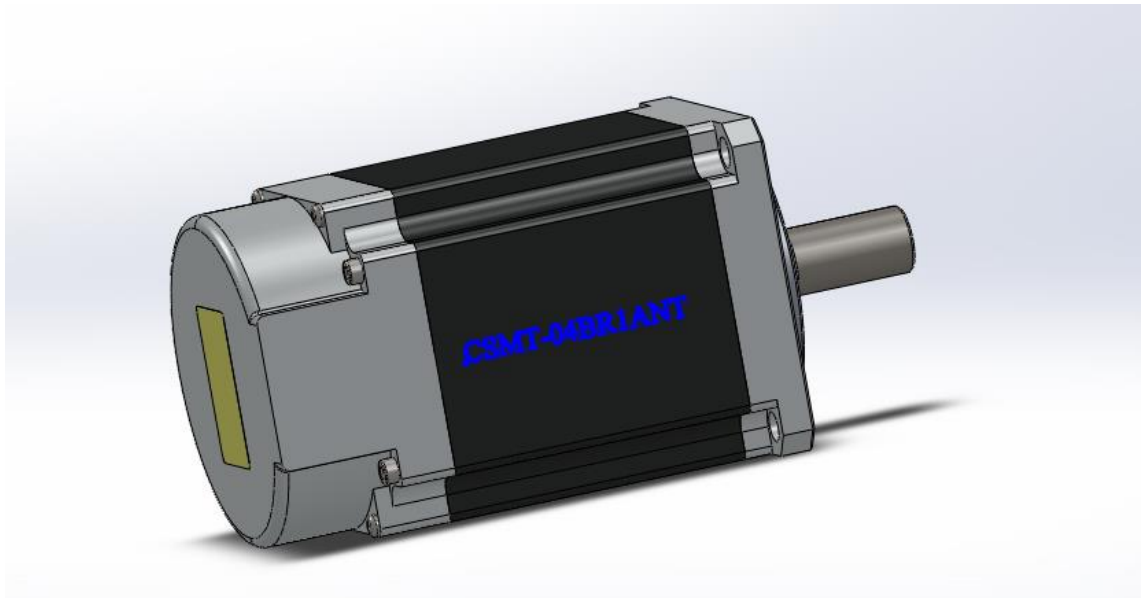


Рисунок 4.2 – Вид збоку, модель ММП CSMT-04BR1ANT

Як вже зазначалось у пункті 2.2.1 за приклад ММП ми використовуємо двигун CSMT-04BR1ANT. Схему ПМ, який виконуватиме вертикальне переміщення, зображено на рисунку 4.3.

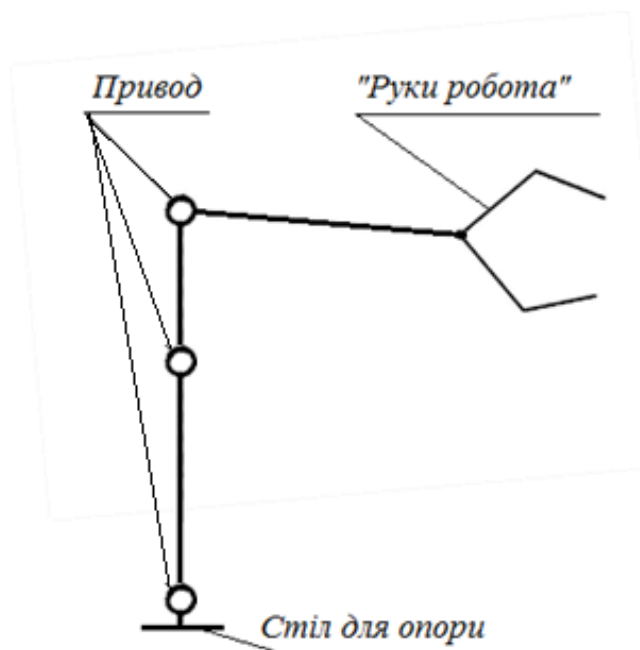


Рисунок 4.3 – Схема ПМ вертикального переміщення

За допомогою ММП виконується піднімання й опускання деталі у вертикальному напрямку. Стіл слугує для опори ПМ. Обраний стіл буде зі сталі для більш високої стійкості, а також утримування елементів: приводу,

“рук ПМ” і власне деталі, що буде захватувати робот, оскільки при підніманні деталі навантаження діє не тільки на “руки ПМ”, але й на стіл. Під час моделювання приводу вибрали двигун як приклад ММП під назвою CSMT-04BR1ANT. Даний зразок є компактним, що засвідчують його габаритні розміри: довжина – 70,5 мм., ширина – 35 мм. З огляду на потужність нашого приводу 60 Вт., довжина маніпулятора – 0 см, оскільки, вантажопідйомність маніпулятора повинна становити близько 1700 грам. Привід повинен розвивати момент не менше 75 кг·см для одного лише вантажу без урахування ваги ПМ. Для визначення ваги маніпулятора потрібно врахувати вагу ММП разом із деталями ланки та захвату.

Привод важить 300 гр, інші деталі будуть в основному з пластика, загалом вага ПМ має бути близько 1200 гр, найважчою тут буде опора зі сталі – 700 гр. Згідно з конструкцією маса ПМ розподілена рівномірно уздовж всієї його довжини, таким чином, при закріпленій підставі і розташуванні ланки ПМ перпендикулярно силі тяжіння, маса в робочій точці ПМ дорівнюватиме 850 гр (рисунок 4.4).

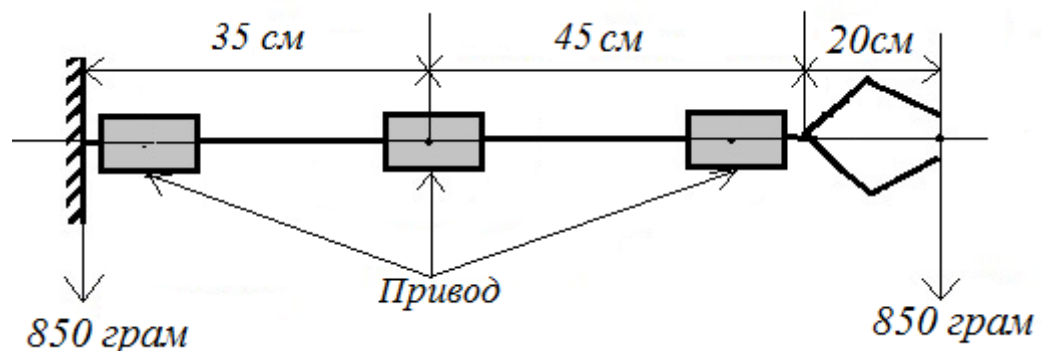


Рисунок 4.4 – Орієнтовна оцінка маси ПМ

При масі 850 гр у робочій точці і довжині ПМ в 90 см, момент на валу ММП дорівнюватиме 24,5 кг·см за умови, що захват ПМ буде без вантажу.

Для більш естетичного вигляду розмістимо наш привод у корпус (рисунок 4.5).

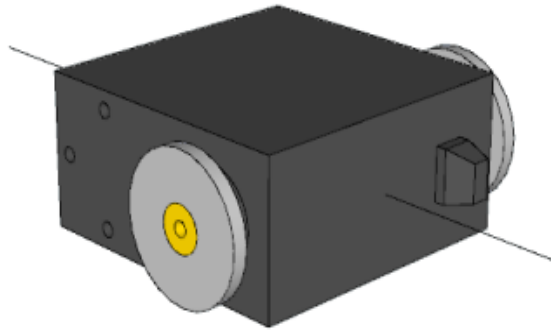


Рисунок 4.5 – Загальний вигляд ММП у корпусі

4.2 Порівняння аналогічного ММП для вертикального переміщення

Зразком для моделювання ММП слугував шарнірний робот-маніпулятор Malto SX17, у якому застосовують привод Д2РТ. Його загальний вигляд зображено на рисунку 4.6.



Рисунок 4.6 – Загальний вигляд ММП Д2РТ

Габаритні розміри ММП: довжина – 107,5 мм., ширина – 42 мм., потужність 80 Вт. У порівнянні з нашим приводом даний привод є більшим за розмірами та потужнішим.

Власне робот Malto SX17, який зображено на рисунку 4.7, призначений для переміщення малогабаритних деталей: гайок, гвинтів, підшипників, транзисторів, мікросхем тощо. Однак із наявною великою потужністю пристрій використовує більше електроенергії, що не є доцільним за умови пересування малогабаритних деталей.



Рисунок 4.7 – Загальний вигляд Malto SX17

Використовуючи програму MatLab, визначили такі дані: горизонтальне переміщення захватів по осі x і y , середню швидкість переміщення по осям x , y і z , вертикальне переміщення по осі z , робочий рух кулачка механізму, похибку позиціонування в автоматичному режимі, а також вантажопідйомність ПМ. Усі дані було занесено до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняння ПМ Malto SX17 і змодельованого ПМ

Найменування параметрів	Фактичні значення	
	Malto SX17	Наш робот
Горизонтальне переміщення захватів по осі x , м	не менше 0,30	не менше 0,26
Середня швидкість переміщення по осі x , м/с	не менше 0,04	не менше 0,038
Горизонтальне переміщення захватів по осі y , м	не менше 0,30	не менше 0,34
Середня швидкість переміщення по осі y , м/с	не менше 0,08	не менше 0,10
Вертикальне переміщення захватів по осі z , м	не менше 0,16	не менше 0,11
Середня швидкість переміщення по осі Z , м/с	не менше 0,032	не менше 0,02
Робочий рух кулачка механізму захоплення деталей, мм	не менше 5	не менше 7
Похибка позиціонування в автоматичному режимі, мм	не гірше $\pm 0,5$	не гірше $\pm 0,4$
Вантажопідйомність ПМ, кг	0,25	1,2

Крім того, було досліджено температуру ММП за допомогою програми Matlab Simulink, використовуючи інструменти із бібліотек Simscape та Simscape Electronics CSMT-04BR1ANT за перші 6 секунд його запуску. Це все представили на рисунку 4.8, з якого видно, що на старті температура двигуна дорівнює $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, а після 3 секунди, коли ми виконуємо навантаження на привод, відбувається різкий стрибок температури до $25,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, однак це не впливає на роботу нашого ММП, навіть якщо ми помістили його до корпусу. Таким чином, на рисунку 4.8 можна побачити, що за 6 секунд температура збільшилась на $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 4.8 – Дослідження температури ММП CSMT-04BR1ANT за перші 6 секунд його запуску

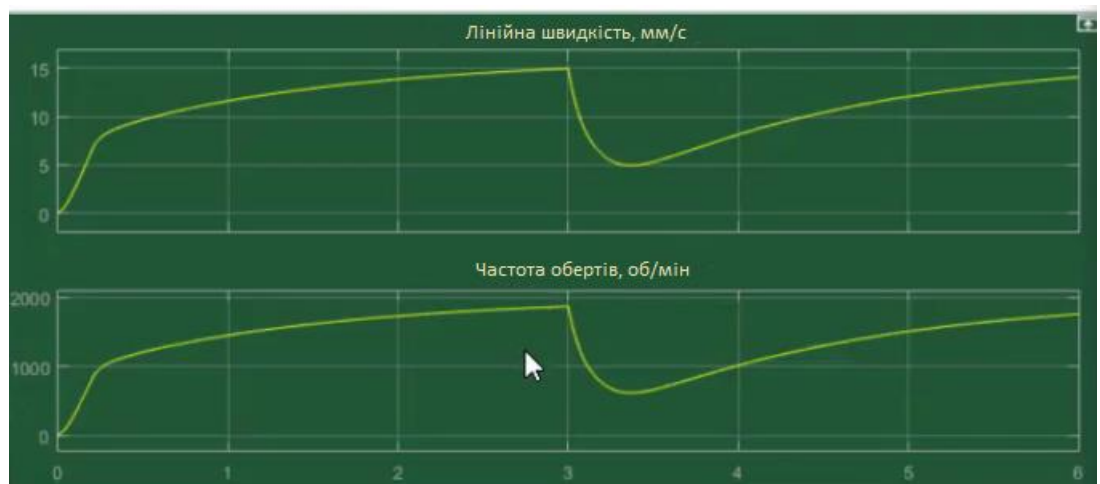


Рисунок 4.9 – Дослідження лінійної швидкості і частоти обертів ММП CSMT-04BR1ANT за перші 6 секунд його запуску

На рисунку 4.9 показано, як регулятор відпрацьовує уставку за частотою обертання в період збільшення навантаження на 3 секунді, відповідним чином змінюється й лінійна швидкість ММП. До того ж, цілком очікувано, що росте струм якоря, оскільки ми збільшили навантаження на наш двигун (рисунок 4.10).

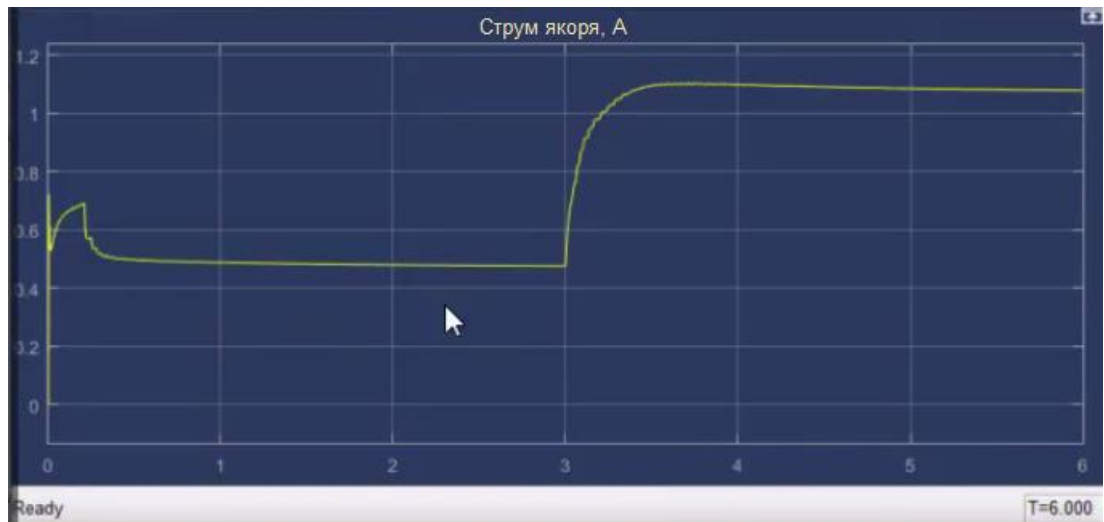


Рисунок 4.10 – Дослідження струму ММП CSMT-04BR1ANT за перші 6 секунд його запуску

4.3 Моделювання ММП з кріпленнями, ланки і моделі захвату деталі

Для проектування 3D-моделей деталей ПМ обрали програму Google SketchUp, у зв'язку з тим, що вона є однією з найпростіших програм для 3D-моделювання та компонування, до того ж має інтерфейс українською мовою і є безкоштовною. Програма устаткована спрощеним набором інструментів, з яким працювати користувачеві максимально зручно. Це дозволить лише за кілька годин опанувати роботу в програмі та почати проектувати найрізноманітніші 3D-моделі [11].

Після попереднього переміщення ММП до корпусу закріпимо його за допомогою кронштейна (рисунок 4.11).

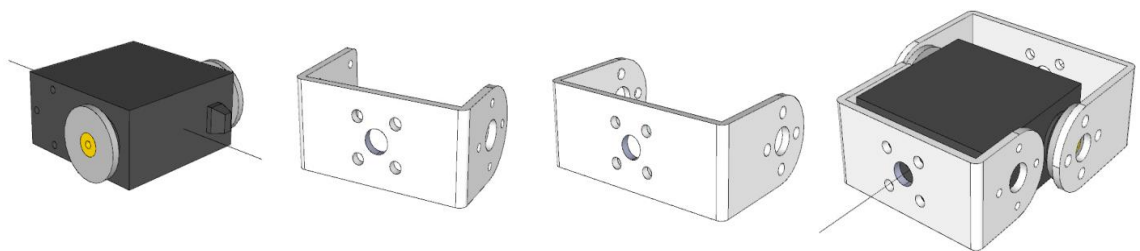


Рисунок 4.11 – 3D-модель ММП CSMT-04BR1ANT і кронштейни

Ланку необхідно змоделювати у такий спосіб, щоб вона могла кріпитися до ММП. Отже, необхідно зробити в деталі такі ж отвори, як і в кронштейнах, щоб їх можна було стягнути болтами. Діаметр отворів – 3 мм, відстань між ним – 10мм. Деталь повинна мати порожнисту конструкцію, щоб на її виготовлення витратити менше матеріалу, водночас вона має бути досить міцною, щоб витримати всі навантаження.

Необхідно враховувати, що привод, з'єднаний із деталлю, утворюють єдину ланку маніпулятора, що повинна мати довжину – 450 мм (рисунок 4.12), у зв'язку з цим довжину деталі потрібно підібрати таким чином, щоб ця умова була виконана.

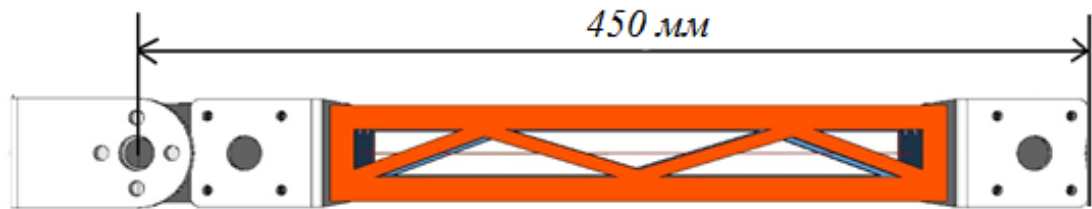


Рисунок 4.12 – Модель ланцюга

Вид деталі зверху і збоку зображено на рисунку 4.13, тривимірний вид деталі – на рисунку 4.14. Модель краще зробити з пластику для меншої ваги ПМ.

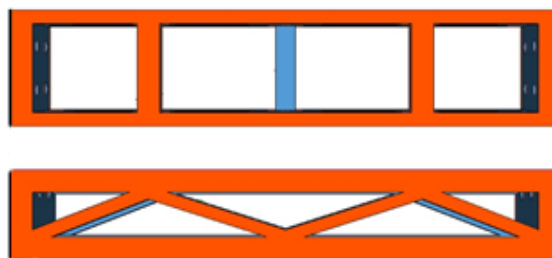


Рисунок 4.13 – Вид деталі зверху і збоку

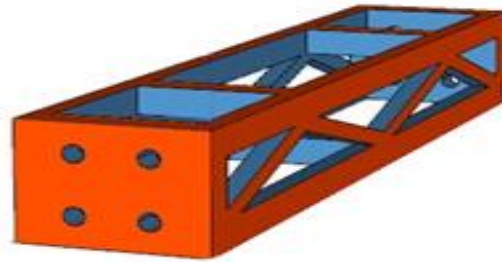


Рисунок 4.14 – Тривимірний модель деталі

Для захвату та переміщення деталі чи об'єкта у вертикальному напрямку, використаємо “руку ПМ”. Елементи “руки ПМ”, які зображено на рисунку 4.15, повинні кріпитися до деталі ланки, отже, повинно бути спеціальне кріплення з такими ж отворами, як у ланці. Розташування кріплення для приводу, що помістили до корпусу, будемо закріплювати з ланкою за допомогою кронштейнів, захват власне ПМ буде широко розкриватися за допомогою додаткового ММП, який доцільно встановити на “руці”.

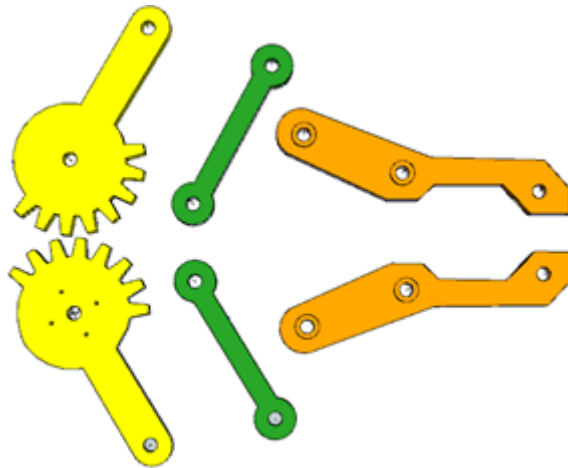


Рисунок 4.15 – Модель “Рука”

4.4 Модель ПМ, його функціонування та використання

Під час моделювання ПМ ми застосували 3 ММП для більш точного переміщення об'єктів. 2 ММП використано для переміщення “руки” маніпулятора, 1 привод – для захвату об'єкта (рисунок 4.16).

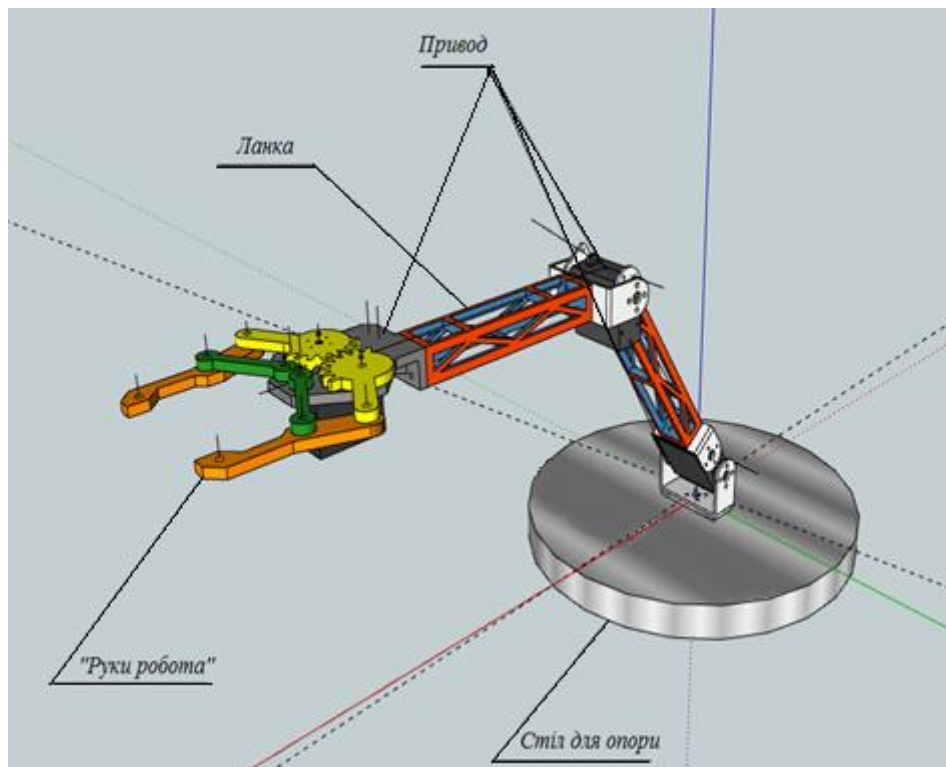


Рисунок 4.16 – Загальний вигляд моделі ПМ для переміщення об’єкта у вертикальному напрямку

На рисунку 4.17 продемонстровано захват деталі, а на рисунку 4.18 – опускання деталі.

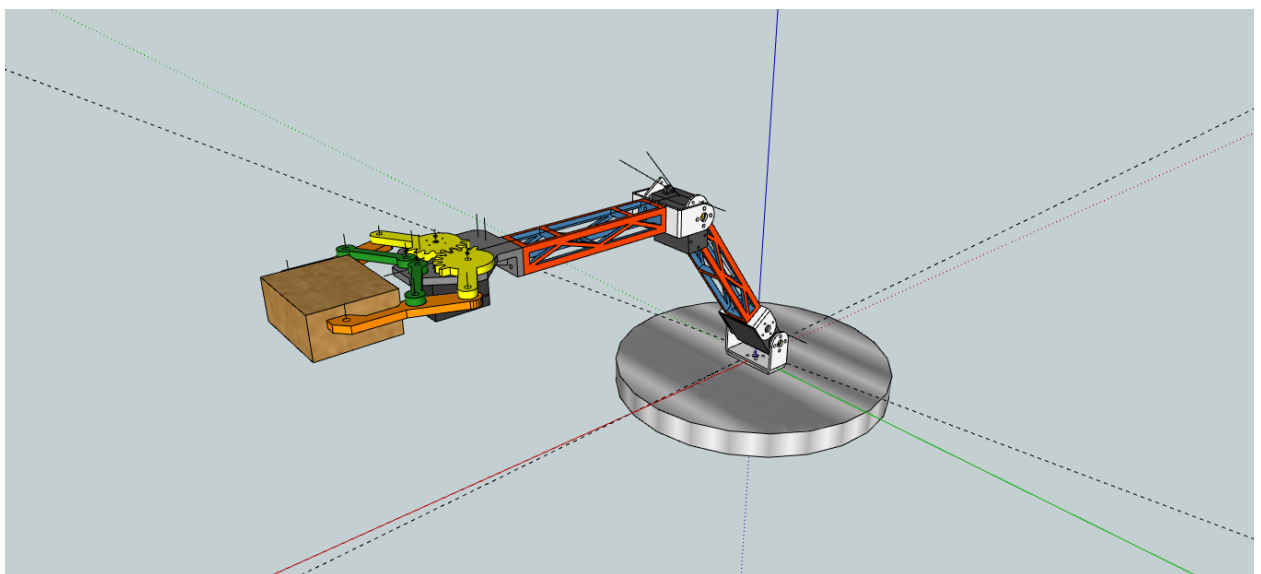


Рисунок 4.17 – Модель ПМ, переміщення об’єкта у вертикальному напрямку захвату деталі

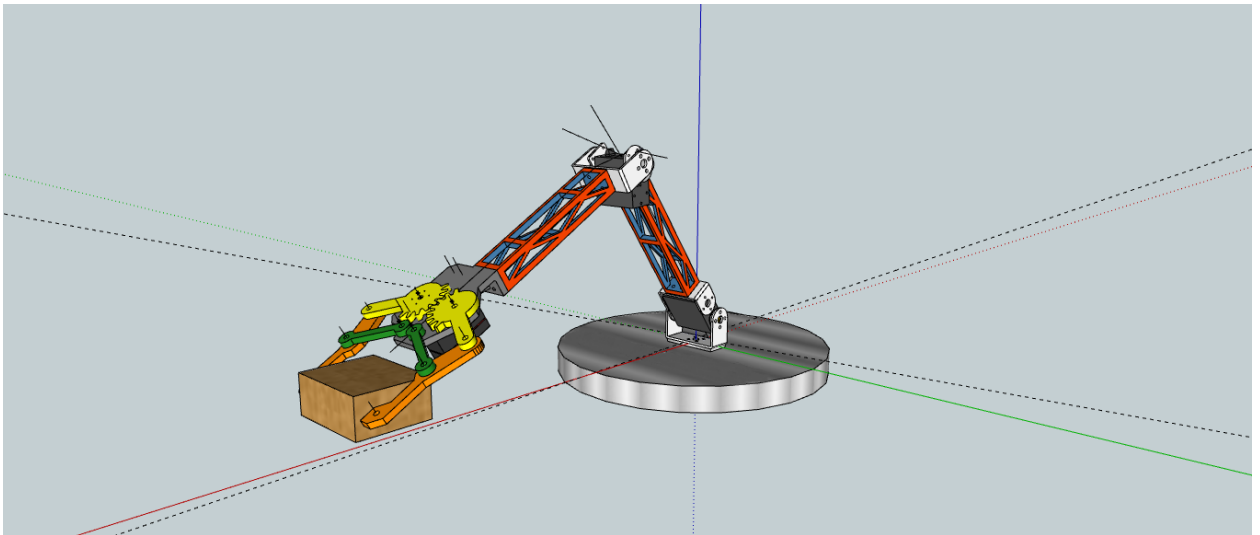


Рисунок 4.18 – Модель ПМ, переміщення об’єкта у вертикальному напрямку опускання деталі

Виконавши захват деталі за допомогою ММП, активізуються 2 інші приводи для переміщення у вертикальному напрямку, проте деталь так і залишається зажатою у “руці”. Потім деталь опускається вертикально і переміщається на задану траєкторію, “рука” розжимається, а деталь розташовується на конвеєр або рухливу площину для подальшого її переміщення. У свою чергу робот за допомогою ММП повертається до свого вихідного положення (рисунок 4.19).

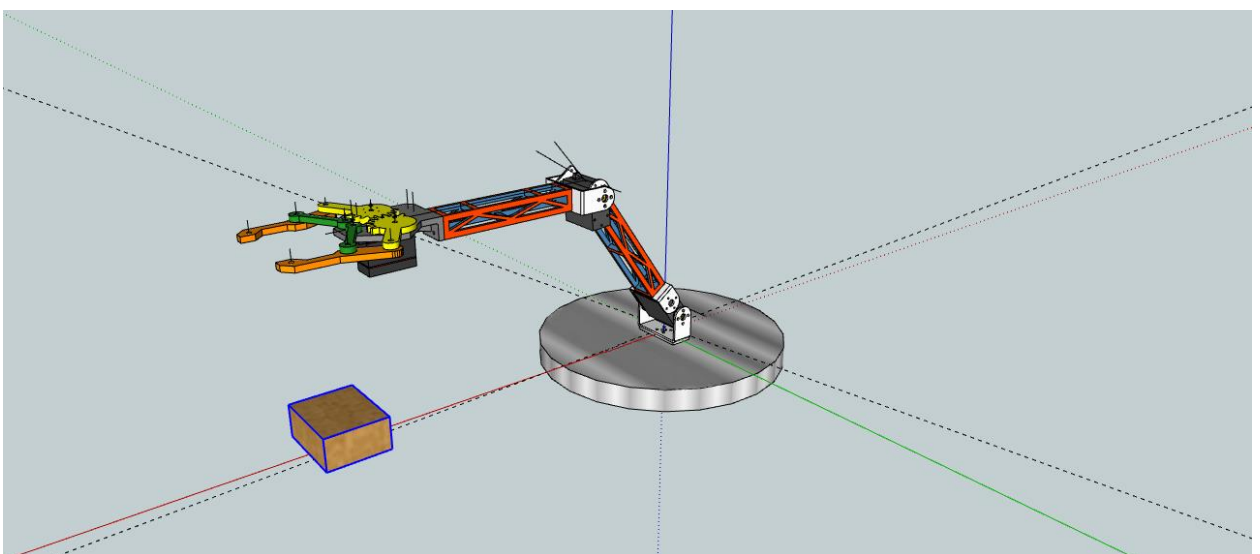


Рисунок 4.19 – Модель ПМ, переміщення об’єкта у вертикальному напрямку коли опущена деталь

Змодельований привід для переміщення у вертикальному напрямку можна застосовувати у роботі для подачі об'єкта на стіл або конвеєр. Приклад використання наведено на рисунку 4.20.

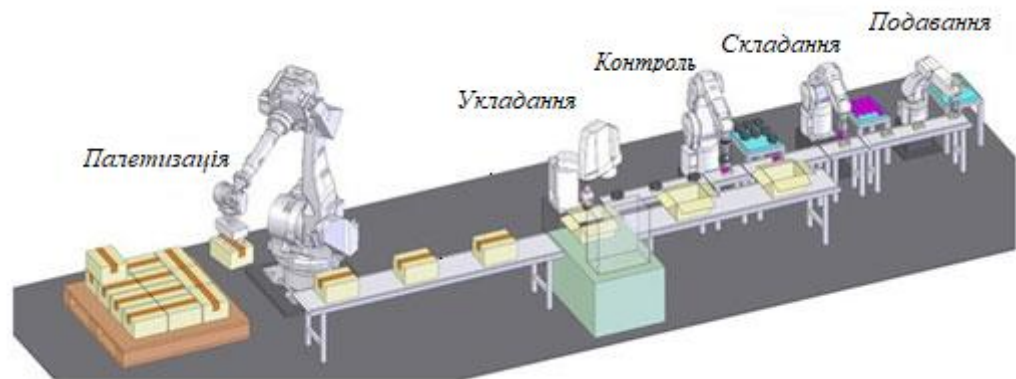


Рисунок 4.20 – Використання ММП у виробничому середовищі, на прикладі промислових маніпуляторів

Таким чином, виконавши моделювання приводу, в програмному середовищі SolidWorks і помістивши його до корпусу, на базі двигуна CSMT-04BR1ANT, закріпивши кронштейнами до ланки і створивши модель ПМ у програмному середовищі SketchUp, ми отримали вдосконалену модель ПМ з використанням приводів. Проаналізувавши приводи з аналогами, впевнились, що вибраний нами привод є точним щодо позиціонування, конкурентоспроможним на ринку, до того ж, економічним, а також повністю виконує поставлену задачу вертикального переміщення у вертикальному напрямку.

4.5 Забезпечення безпечних умов праці при проведенні досліджень

Розміри лабораторії, в якій проводилась робота, складають 5 м × 6 м. Робоче місце складається зі стола, стільця та персонального комп'ютера. У приміщенні працює 4 людини. Площа приміщення 30 м², об'єм – 90 м³. Згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 площа на одне робоче місце повинна становити не менше 6 м², а об'єм – 20 м³. Для даного приміщення робоча площа й об'єм

на одну людину відповідає нормам, оскільки в нашому випадку площа на одне робоче місце становить 10 м^2 , а об'єм – 30 м^3 .

Живлення комп'ютерів виконується від трифазної чотирипровідної електричної мережі змінного струму з глухо-заземленою нейтраллю і напругою 220 В, частотою 50 Гц.

Згідно з НПАОП 40.1-1.21-98 лабораторію можна віднести до категорії без підвищеної небезпеки, тому що в приміщенні відсутні чинники, що спричиняють підвищену чи особливу небезпеку.

Для створення безпечних умов праці необхідно провести низку організаційних і технічних заходів. Згідно з НПАОП 40.1-1.32-01 для запобігання ураження людини електричним струмом у приміщенні застосовується система занулення.

Згідно з вимогами НПАОП 0.00-4.12-05 необхідно провести увідний, первинний на робочому місці, повторний, цільовий та позаплановий інструктажі. Зміст інструктажу відповідає вимогам НПАОП 0.00-4.12-05. Інструктаж фіксується в відповідних журналах з підписами інструктованих та інструктора.

Робота в лабораторії проводиться сидячи і не вимагає фізичного напруження. Тому вона належить до категорії Іа (легкі фізичні роботи, енергозатрати до 120 ккал/ч). З метою забезпечення комфортних умов для працівників та згідно з ДСН 3.3.6.042-99 у приміщенні встановлені наступні метеорологічні параметри:

а) для холодного періоду:

- 1) температура повітря від $22 \text{ }^\circ\text{C}$ до $24 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 2) вологість повітря від 40 % до 60 %;
- 3) швидкість руху повітря оптимальна до 0,1 м/с;

б) для теплого періоду року:

- 1) температура повітря від $23 \text{ }^\circ\text{C}$ до $25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 2) вологість повітря від 40 % до 60 %;
- 3) швидкість руху повітря оптимальна до 0,1 м/с.

Для освітлення робочих місць і приміщення в цілому застосовується як природне бічне освітлення, так і штучне освітлення.

Приміщення з ЕОМ повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Природне світло повинно проникати через бічні світлові прорізи, зорієнтовані, як правило, на північ або північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5 %:

$$e^{IV} = 1.35,$$

де $e^{IV}_{\text{норм}}$ – нормоване значення КПО для 4-го поясу світлового клімату.

Згідно з ДСН 3.3.6.037-99 рівень шуму в лабораторії не перевищує 50 дБ.

Загальний рівень штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності.

Розрахункова формула методу [17]:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (4.1)$$

де W – питома потужність, Вт/м²;

S – площа приміщення, м²;

W_{Σ} – загальна потужність освітлювальної установки, Вт.

Загальна потужність освітлювальної установки обчислюється за формулою

$$W_{\Sigma} = W_{cv} \cdot n_{cv}, \quad (4.2)$$

де W_{cv} – потужність одного світильника, $W_{cv} = 80$ Вт;

n_{cv} – кількість світильників у приміщенні, $n_{cv} = 4$ шт.

Розглянуте приміщення має площу 30 м^2 , в якому встановлено шість світильників потужністю 80 Вт

$$W_{\Sigma} = 4 \cdot 80 = 320 \text{ Вт},$$

$$W = \frac{320}{30} = 11 \text{ Вт/м}^2.$$

Табличне значення для отриманого результату освітленості складе 200 лк , коли згідно зі стандартом ДБН В.2.5-28-2006. у лабораторії освітленість повинна бути $300\text{-}500 \text{ лк}$. Для отримання освітленості в 400 лк необхідна питома потужність 21 Вт/м^2 .

Для поліпшення умов роботи в лабораторії необхідно в денний час використовувати додаткове освітлення.

ВИСНОВКИ

Під час проведення досліджень у ході виконання кваліфікаційної роботи реалізовано моделювання ММП на прикладі CSMT-04BR1ANT за допомогою програмного середовищ SolidWorks. З метою використання ММП було змодельовано ПМ у програмному середовищі Google SketchUp, ПМ здійснював переміщення деталі чи об'єкта у вертикальному напрямку, проаналізовано наявні аналоги промислових роботів, а також проведено дослідження розрахунків.

У ході роботи було виконано оцінку:

- правильності вибору двигуна, на базі отриманих вимог до характеристик;
- вибраних параметрів зубчастої та прямозубої передач;
- правильності вибору передаточних чисел, відповідно до чинних оптимальних рекомендацій, а також згідно з габаритами передач;
- горизонтального переміщення захватів по осі x і y ;
- середньої швидкості переміщення по осям x , y і z ;
- вертикального переміщення по осі z ;
- робочого руху кулачка механізму;
- похибки позиціонування в автоматичному режимі;
- вантажопідйомності ПМ.

Ґрунтуючись на проведених дослідженнях та аналізі вихідних даних до моделювання приводу виконали:

- побудували кінематичну схему;
- побудували графік залежності коефіцієнта зачеплення від кількості зубів колеса;
- провели оцінку похибки позиціонування інструмента ПМ;

– за отриманими результатами визначили, що обраний двигун, передачі та матеріали, з яких вони виготовлені, забезпечують необхідну точність при позиціонуванні інструмента ПМ.

Для більш компактного й естетичного вигляду привод було поміщено до корпусу, після цього в програмному середовищі MatLab SimuLink було виконано дослідження змодельованого приводу в корпусі за перші 6 його секунд запуску за умови навантаження, дослідили виявили, що нагрівання пристрою було 0,2 °С, струм збільшився на 1,1 А, після 3 секунди можна побачити збільшення струму. Змодельований привід повністю задовольняє поставленої задачі і є конкурентоспроможним для ринку України. Доцільно його використовувати на виробництвах для переміщення малогабаритних деталей.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І.Ш. Невлюдов, Р.В. Артюх, Н.П. Демська, В.В. Євсєєв, О.І. Филипенко, О.М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 50 с.
2. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: навч. посіб. / за ред. І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. Київ, 2016. 320 с.
3. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація «Звіти у сфері науки і техніки». Структура та правила оформлювання. / В. Земцева; Ю. Поліщук, канд. фіз.-мат. наук; Р. Санченко, канд. техн. наук; Л. Шрамко; А. Ямчук (науковий керівник) ДП «УкрНДНЦ» від 22 червня 2015р. № 61 з 2017-07-01.
4. Пащенко О.С., Зозуля К.О. / Сучасне виробництво з використанням комп'ютерного управління та інформаційних технологій / «AUTOMATION AND DEVELOPMENT OF ELECTRONIC DEVICES», ADED-2023 Part 2. Харків, ХНУРЕ.: 2023. С. 394-400.
5. Невлюдов І.Ш. Основи виробництва електронних апаратів / І.Ш. Невлюдов. – Харків: Компанія СМІТ, 2005. – 592 с.
6. Невлюдов І.Ш. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019. – 366 с.

7. Невлюдов І.Ш. Людино-машинний інтерфейс в технічних засобах автоматизації: Навчальний посібник / І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипенко, Б.О. Шостак. – Харків: «ХТМТ», 2019. – 244 с.
8. Костюк В. І. Робототехніка і мехатроніка / В. І. Костюк, Г. О. Спину. – К.: Вища школа, 1994. – 446 с.
9. System for automatic planning, execution and evaluation of assembly sequences for industrial robots / U. Thomas, F.M. Wahl. – Institute of Robotics and Process Control, Technical University of Braunschweig, Germany, 2017. – 23 с.
10. Карнаух, С. Г. Розрахунки механічних передач / С. Г. Карнаух, Н. В. Чоста, – К.: ДДМА, 2018. – 100 с.
11. Антоненко, І. І. Технічна механіка / І. І. Антоненко, С. М. Перга – К.: КДПУ, 2017. – 191 с.
12. Діагностика та контроль робочих процесів: навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної та дистанційної форм навчання / В. М. Доля – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – 129 с.
13. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Організація керування умовами праці" підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стищенко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 108 с.

ДОДАТОК А
АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Міністерство освіти і науки України



NURE

Харківський національний університет
радіоелектроніки

ЗБІРНИК

студентських наукових статей

«Автоматизація та приладобудування»

«Automation and Development of Electronic Devices»

ADED-2023

(Випуск 2)

[електронне видання]



<http://nure.ua/department/kafedra-komp-yuterno-integrovanih-tehnologiy-avtomatizatsiyi-ta-mehatroniki-kitam>



<http://itez.zntu.edu.ua/>



<http://kafea.kdu.edu.ua>

Харків 2023

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки
кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(КІТАР)



ЗБІРНИК

студентських наукових статей

«Автоматизація та приладобудування»

«Automation and Development of Electronic Devices»

ADED-2023

(Випуск 2)

[електронне видання]

Харків 2023

СУЧАСНЕ ВИРОБНИЦТВО З ВИКОРИСТАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОГО УПРАВЛІННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

О.С. Пашченко, К.О. Зозуля

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: oleksandr.pashchenko@nure.ua, kyrylo.zozulia@nure.ua

Анотація: Розглянуто сучасне виробництво з комп'ютерною системою управління і широким застосуванням інформаційних технологій, що забезпечує можливість пов'язування окремих процесів, функцій і завдань у єдину систему для підвищення ефективності та якості виробництва.

Ключові слова: комп'ютерно-інтегроване виробництво, інформаційні технології, система управління, верстат, виконавчі пристрої

MODERN PRODUCTION WITH THE USE OF COMPUTER CONTROL AND INFORMATION TECHNOLOGY

O.S Pashchenko, K.O. Zozulya

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky av., 14

E-mail: oleksandr.pashchenko@nure.ua, kyrylo.zozulia@nure.ua

Annotation: The article considers modern production with a computerized control system and widespread use of information technology, which makes it possible to link individual processes, functions and tasks into a single system to improve the efficiency and quality of production.

Keywords: computer-integrated production, information technology, control system, machine tool, actuators

Вступ. Принциповою особливістю інтегрованих виробництв є наявність нової компоненти – комп'ютерної системи управління, а також широкого застосування інформаційних технологій, що забезпечують можливість ув'язування окремих процесів, функцій і завдань в єдину систему для підвищення ефективності виробництва. Подальший розвиток робіт в даному напрямку призвело до появи поняття комп'ютерно-інтегрованого виробництва (КІВ). Концепція КІВ мала на увазі новий підхід до організації та управління виробництвом, новизна якого полягала не тільки в застосуванні комп'ютерних технологій для автоматизації технологічних процесів і операцій, але в створенні інтегрованої інформаційної системи управління виробничою діяльністю підприємства.

1. Комп'ютерно-інтегроване виробництво. Реалізація комплексу проектів по створенню автоматизованих виробництв (АВ) почалася з виробництва металорізальних верстатів, що представляють собою спробу практичної реалізації концепції КІВ. Було виконано попереднє проектування АВ, виготовлені дослідні зразки нового обладнання, створено випробувальний полігон, створені основні компоненти інтегрованої автоматизованої системи управління.

Ряд подібних проектів було здійснено також і за кордоном. Одним з перших став проект АВ, реалізований в Японії фірмою Mazak, для виробництва пристроїв металорізальних верстатів. Завод включав в себе: комплекс гнучких виробничих модулів (ГПМ) і ГВС, автоматизовані склади, робочу транспортну систему. Передбачалося використання комп'ютерних мереж для сервісної та технічної підтримки філій, а також взаємодії з

підприємствами комплектуючих виробів. В цілому за період 1985-1995 рр. в різних країнах було створено близько 20 КІВ з різним рівнем автоматизації, з яких вісім АВ випускали металорізальне обладнання, чотири – вироби для аерокосмічної промисловості (США), інші КІВ були орієнтовані на випуск різних агрегатів широкої номенклатури, включаючи компоненти обчислювальної техніки і електричних машин. Від впровадження КІВ очікувалося: зменшення розмірів підприємств, збільшення коефіцієнта використання устаткування і зниження накладних витрат, значне зменшення обсягу незавершеного виробництва, скорочення витрат на робочу силу в результаті організації «безлюдного» виробництва, прискорення змінюваності моделей продукції, що випускається відповідно до вимог ринку, скорочення термінів поставок продукції і підвищення її якості.

Проте, не дивлячись на те, що дослідженням в області застосування інформаційних технологій в гнучкому виробництві було присвячено значну кількість наукових досліджень, а на створення експериментальних комп'ютерно-інтегрованих виробництв витрачені значні фінансові кошти, – досягти поставленої науково-практичної задачі загальної/глобальної інтеграції виробничого процесу за допомогою автоматизації управління не вдалося. З ряду об'єктивних причин, а також через допущені методологічних помилок системотехнічного характеру, проекти не були реалізовані в повному обсязі, а науково-технічні напрацювання, отримані в результаті проведених НДДКР, використані в проектах меншого масштабу. Невдачі в реалізації ідей і принципів КІВ, так само як і багатьох проектів з розробки автоматизованих систем управління виробничими процесами (АСУВП) були обумовлені тим, що в їх концепцію спочатку закладений принцип максимально можливої міри автоматизації управління, практично повністю виключає участь людей-операторів (осіб приймають рішення) в управлінні виробництвом.

Прихильники заміни природного інтелекту людини його штучним подобою для вирішення різних практичних завдань спочатку обмежилися вивченням закономірностей поведінки об'єктів управління (через їхню складність) на основі порівняння вхідних впливів і вихідних результатів, ігноруючи при цьому їх внутрішній устрій.

Даний методологічний підхід, відомий в кібернетичній науці як принцип «чорного ящика», отримав широкий розвиток в теорії автоматичного управління і забезпечив задовільні результати в створенні технічних пристроїв. Однак, спроби розширити межі його застосування до рівня управління складними соціально-економічними системами з активними елементами (людьми) виявилися безперспективними.

З цієї причини, незважаючи на істотний внесок цієї категорії досліджень в інженерію знань, реалізація багатьох проектів автоматизованих систем управління в ХХ столітті закінчилася негативним результатом. Неухильне дотримання ідеї заміни людини машиною поставило перед дослідниками і розробниками КІВ складну методологічну проблему адекватного уявлення в машинній середовищі знань про реальні об'єкти і процеси, вирішити яку за допомогою апарату теорії автоматичного управління і формалізованих методів класичної математики об'єктивно не можливо в переважній більшості випадків. Спроби рішення важко формалізованих і неформалізованих задач управління, що переважають у складних виробничо-економічних системах, за допомогою обмеженого інтелекту ЕОМ з класичною архітектурою приводили до грубих помилок в оперативному регулюванні складного динамічного процесу виробництва. Нерозв'язні в рамках цього напрямку методологічні проблеми не дозволили розробникам створити в машинній середовищі автономну (тобто не вимагає додаткового звернення до інтелекту людини) модель управління виробництвом.

В кінцевому підсумку концепція КІВ вичерпала свої можливості обмежившись завданнями автоматизації технологічних операцій (процесів) в багатофункціональних обробних центрах, що дозволяють виготовляти деталі на одному робочому місці в одну установку. Створювані на

їх основі гнучкі роботизовані виробництва з надлишковою функціональністю (ГВС/FMS) здатні в напівавтоматичному (умовно-автономному) режимі здійснювати паралельну обробку пристроїв багатопредметного виробництва виробів в межах заданої номенклатури без необхідності переривання на переналагодження і передачі предметів праці на інші обробні центри. Пристосування до випуску нових виробів здійснюється за рахунок зміни робочого стану (переналадки технічних засобів / інструменту,

Основу здебільшого адаптивних/гнучких роботизованих виробничих систем складають багатофункціональні обробні центри на базі вертикальних токарних верстатів (наприклад, багатофункціональний обробний центр серій C50U виробництва німецької верстатобудівної фірми Maschinenfabrik Berthold Hermle AG, представлений на рис. 1, а), які здатні виконувати практично будь-які технологічні операції в одну установку заготовки/деталі (токарна обробка, фрезерування, свердління, розгортання, шліфування, різьбонарізання, зубофрезерування, лазерне зварювання).

В результаті їх об'єднання з роботизованою системою завантаження/розвантаження пристроїв і великовантажним стелажем може бути створена високопродуктивна адаптивна виробнича система (як приклад на рис. 1, б приведена роботизована система RS4 тієї ж верстатобудівної фірми).

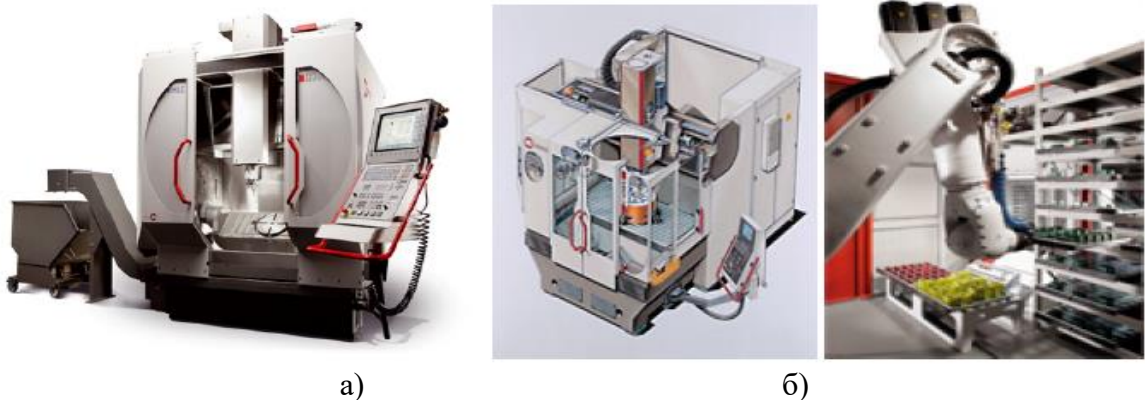


Рисунок 1 – Гнучка роботизована виробнича система, реалізована на базі багатофункціональних обробних центрів (а) і роботизованої системи завантаження/розвантаження пристроїв зі стелажем (б)

Така система може включати до трьох вбудованих обробних центрів із можливістю її розблокування щодо того чи іншого обробного центру. Це дозволяє обслуговувати як роботизовану систему, так і обробний центр вручну, не перериваючи автоматичний процес роботи іншого модуля. У такій системі можна використовувати змінні великовантажні стелажі самої різної конструкції. За допомогою автоматично замінних одинарних/подвійних захоплень можливе завантаження і вивантаження заготовок, оброблюваних пристроїв і палет.

Перспективні розробки в напрямку збільшення функціональної надмірності виробничих ділянок механічної обробки, з переважним використанням машин і обладнання автоматичної дії, спрямовані на розвиток нової концепції мехатронних обробних центрів/модулів, які мають можливість автоматичної зміни їх інструментальної компоновки і просторової конфігурації в реальному режимі роботи преривнопоточного виробництва.

Таким чином, подолання згаданих в роботі протиріч між технологічною базою індустриального (масового і серійного) виробництва, в тому числі і в приладобудуванні, розрахованої на постійний випуск одномодельної продукції, і новими вимогами

конкурентного ринку здійснюється в напрямку заміни верстатів і агрегатів з жорсткою функціональною структурою і компонуванням на гнучкі виробничі модулі/системи (ГВС/FMS) з подальшим переходом в майбутньому на реконфігуровані виробничі системи (РВС/RMS), що володіють можливістю зміни/адаптації просторово-часової організації (архітектури) виробничої системи до змін ринкового попиту на продукцію в залежності від застосовуваних методів організації виробництва. Що розвивається за кордоном концепція RMS, розглядається як альтернатива гнучким виробничим системам.

Її реалізація почалася за кордоном в США і потім в Німеччині, Японії (Koren Y., U1soy AG, Mehrabi MG).

З цією метою було створено і активно діє науково-дослідний центр в складі Мічиганського університету, який по суті є національним центром розвитку і реалізації концепції RMS в США (Engineering manufacturing center for Reconfigurable manufacturing systems, University of Michigan), яка вписана в концепцію національного розвитку машинобудівного виробництва до 2030 року (Visionary manufacturing challenges for 2030), як одне з основних науково – дослідних напрямків по створенню реконфігурованих виробництв і підприємств (Reconfigurable enterprises). При цьому центрі утворений і діє експериментальний завод для проведення і реалізації досліджень. Як видно з рис. 2, модулі/осередку RMS працюють одночасно і сконструйовані так, що при виконанні одного робочого циклу одноразово здійснюється кілька операцій різних видів. Останнє виключає необхідність переміщення і очікування пристроїв в черзі між операціями обробки, знижують рівень матеріально виробничих запасів і кількість робочих забезпечуючи мінімізацію витрат і збільшення оборотності ресурсів.

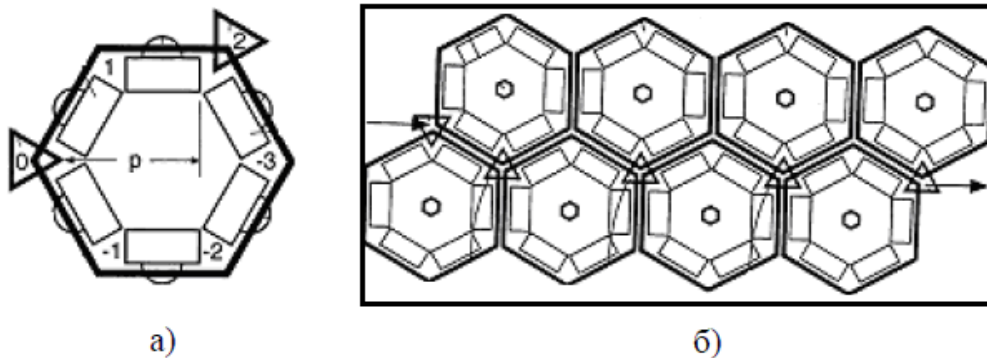


Рисунок 2 – Планування ділянки реконфігурованих виробництва на основі стільникових виробничих осередків/модулів

Блочно-модульна/матрична структура реконфігурованою виробничої системи дає можливість компонувати багатовимірні віртуальні технологічні ланцюжки з різною просторово-часовою конфігурацією. Це дозволяє по черзі включати технологічні осередки в роботу при послідовному чергуванні подібних технологічних процесів / партій предметів праці на багатопредметних групових/змінно-потоківих лініях із суцільним запуском. Організація виробництва на основі подібного роду функціонально надлишкових модулів у вигляді розподіленої виробничо-технологічного середовища дозволяє одночасно (паралельно) виконувати більшу частину технологічних операцій з обробки предметів праці, що є найбільш ефективним щодо продуктивності.

На більшості вітчизняних підприємств машинобудування, незалежно від використовуваних ними моделей організації виробництва (традиційної або гнучкою), етапи виробничого процесу найчастіше виконуються послідовно. Це призводить до того, що час проходження виробу через

технологічний процес включає тривалість всіх послідовно здійснюваних етапів виробництва, а також непродуктивні втрати часу на транспортування пристроїв і очікування між операціями по їх обробці.

У свою чергу, посилення конкурентної боротьби виробників на товарних ринках вимагає, крім забезпечення високої якості та оптимальної вартості продукції, – швидкості реакції на запити споживачів. На сьогоднішній день основною конкурентною перевагою стає висока швидкість виконання замовлень в умовах нестабільної кон'юнктури ринку. Дана перевага може бути забезпечена скороченням виробничого циклу (підвищенням потужності виробничої системи) за рахунок організації паралельних технологічних процесів на основі застосування комплексу багатофункціональних обробних центрів зі зосередженим виконанням деталей операцій.

При точковій формі організації виробництва (виконання різних деталей операцій) робота повністю виконується на одному робочому місці. Виріб виготовляється там, де знаходиться його основна частина (аналогом є збірка виробів/будівництво будівлі з переміщенням робочих навколо нього). Організація точкового виробництва має ряд переваг: забезпечується можливість частих змін конструкції виробів і послідовності обробки, виготовлення виробів різноманітної номенклатури в кількості, що визначається потребами ринку; знижуються витрати, пов'язані зі зміною розташування обладнання, підвищується гнучкість виробництва.

Проведення подальших дослідних і дослідно-конструкторських робіт в цьому напрямку передбачає переважне використання машин і устаткування автоматичної дії, і пов'язані з розвитком нової концепції мехатронних обробних центрів/модулів, які мають можливість автоматичної зміни їх інструментальної компоновки і просторової конфігурації в реальному режимі роботи преривнопоточного виробництва. На рисунку 3 представлена компонуюча схема ділянки реконфігурованих виробництва.

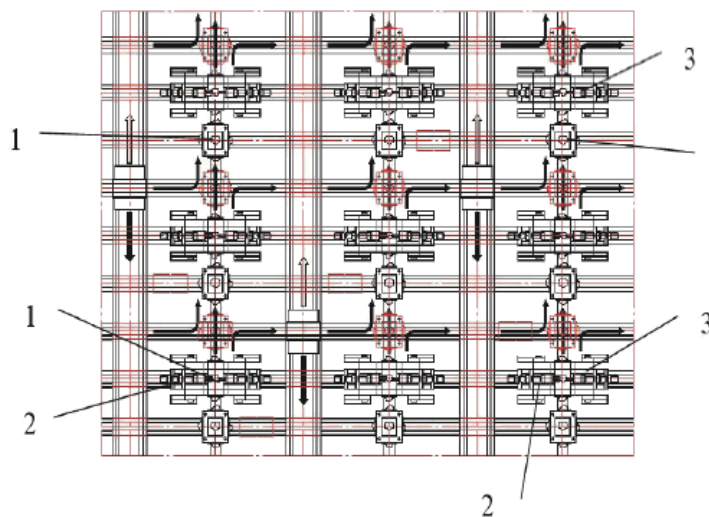


Рисунок 3 – Основні параметри ділянки реконфігурованого виробництва, реалізованого на базі компонуючих виробничих систем/модулів

Останній являє собою технологічно однорідне середовище (матричну площину), що включає перекомпоуєміє блочно-модульні елементи основного і допоміжного обладнання, що несуть опорні і будівельні конструкції, а також розміщені між ними шляху переміщень технологічних / транспортних потоків і комунікації обслуговування. Вузол 1, показаний на схемі, є носієм оброблюваних пристроїв або виконавчих механізмів і пристроїв і дозволяє здійснювати одночасну обробку всіх пристроїв, закріплених на бічних гранях (за допомогою

плит з Т-образними пазами і поворотноделітельних столів). При загальній кількості граней, що дорівнює 6, на корпусі носія 1 одночасно на всіх гранях деталі піддаються багатосторонній обробці з різних сторін багато інструментальних вузлами 2 і 3.

Сучасна концепція компонує систем реконфігурованих виробництва, що є наслідком інтеграції різних типів виробництва, надає широкі можливості для підвищення потужності/інтенсивності та адаптації виробництва, але вимагає точної координації (синхронізації) паралельних технологічних процесів/операцій в складі єдиної виробничої системи з метою її безперервної роботи. Для того щоб паралельні операції виконувалися в загальному операційному процесі узгоджено, забезпечуючи тим самим безперервну обробку і переміщення предметів праці від операції до операції подібно до потоку, необхідне дотримання двох основних умов відомих в теорії організації як принципи пропорційності (рівномірності) і тимчасової узгодженості (ритмічності) спільних дій.

Реалізація принципу пропорційності здійснюється в складній операційній системі шляхом дискретизації (рівномірного, кратного поділу) підлягає обробці обсягу матеріальних (інформаційних) ресурсів або робіт на рівні частки, які мають загальної для операційної системи розмірністю (наприклад, планово-облікова одиниця в машинобудуванні, або уніфікована одиниця вимірювання кількості інформації в обчислювальній системі – «біт» тощо).

Реалізація принципу узгодженості операцій в часі полягає в дискретизації операційного циклу на рівні за часом відрізки, які мають єдиної загальносистемної розмірністю званої тактом операційної системи. Таким чином, в складній операційній системі, що допускає використання декількох паралельно працюючих процесорів.

Рівномірний і ритмічне здійснення спільних дій (паралельних операцій) в організаційній науці (зокрема в організаційній системотехніці) прийнято називати вирівнюванням руху потоків матеріальних (інформаційних) ресурсів/ходу робіт або синхронізацією, а показник продуктивності операційної системи, вимірюваний як обсяг операцій, що виконується за один такт роботи системи системоквантами (в англійській термінології «pitch» – пітч).

Розраховується системоквантами/пітч виходячи з числа виробів, що розміщуються в одному транспортному контейнері готових виробів, або в декількох цілих контейнерах або їх частинах. Системоквантами/пітч – це твір часу виготовлення одного виробу на заданому ритмі ділянці на число готових виробів в транспортному контейнері. Дане число є основною плановою одиницею при складанні виробничого плану випуску виробів в TPS.

Синхронізація є найбільш ефективним методом системної організації паралельної безперервної роботи декількох виконавчих пристроїв в загальному процесі функціонування операційної системи, а також його адаптації до мінливих умов зовнішнього середовища. У свою чергу це вимагає застосування більш ефективних способів (наприклад, інтелектуальних методів і розподілених/асоціативних моделей) управління комплексіруемими виконавчими пристроями, паралельно працюючими в єдиній операційній системі, з метою чіткої координації їх спільної діяльності.

Висновки. Описані в роботі методологія і науковий інструментарій системних досліджень складають основу динаміки функціонування складних об'єктів і надають можливість організації ефективного управління високотехнологічним інтегрованим виробництвом, за допомогою автоматизації проектування структурно-компонувальних перетворень адаптивної виробничої системи і параметричного синтезу базових компонентів бізнес-процесів, що реалізуються на її гнучкою технологічній платформі.

Представлені принципи інтелектуалізації та управління роботизованим виробництвом можуть виявитися корисними для вдосконалення теорії та методології управління основною діяльністю на підприємствах, що використовують традиційні типи і методи поточного,

серійного й одиничного виробництва.

В умовах постійного вдосконалення комп'ютерних технологій і подальшого впровадження їх у виробничий процес є перспективне питання сьогодення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Невлюдов І.Ш. Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації. Частина 1: Підручник – Харків: ФОП Панов А.М., 2021.– 604 с.
2. Невлюдов І.Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації: Підручник для студентів вищих навчальних закладів. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2017. – 444 с.
3. Невлюдов І.Ш. Основи виробництва електронних апаратів. – Харків: Компанія СМІТ, 2005. – 592 с.
4. Невлюдов І.Ш. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. – 366 с.
5. Романенко В.Д. Методи автоматизації прогресивних технологій: Навч. посібник. – К .: Вища школа, 1995. – 517 с.

***Науковий керівник:** Аллахверанов Рауф Юсіфович, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри КІТАР, Харківського національного університета радіоелектроніки.*

ДОДАТОК Б
ДЕМОНСТРАЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ

