

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

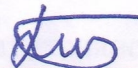
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри



I. С. Білюк

(підпис)

« 15 » 12 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код та назва спеціальності)

освітня програма Електромеханічні системи автоматизації та електропривод

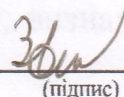
(назва освітньої програми)

на тему: Автоматизована система керування електропривода
маніпулятора у складі РТК механообробки

Виконав: студент групи 6371м

Заворотний Андрій Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

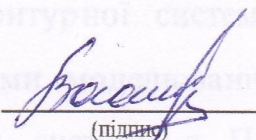

(підпис)

Керівник

доц. каф. автоматики, к.т.н.,

доцент Васильєв О.Г.

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

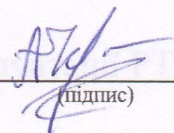

(підпис)

Рецензент

Завідувач кафедри КСУ, д.т.н., професор

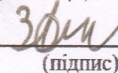
О.О.Черно

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


(підпис)

Засвідчую, що у цій кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент


(підпис)

м. Миколаїв – 2025 року

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра складається зі 111 сторінок: 101 сторінка пояснювальної записки, 5 розділів, 12 таблиць, 29 рисунків, 17 літературних джерел, 1 додаток на 10 сторінках.

Ключові слова: роботизований технологічний комплекс, промисловий маніпулятор, система керування, електропривод, кінематична модель, динамічні характеристики, механообробка.

Мета роботи – розробка та дослідження автоматизованої системи керування електропривода маніпулятора у складі РТК.

У розділі 1 проаналізовано структуру РТК, як об'єкт керування обрано маніпулятор Fanuc M-20iA, розглянуто його характеристики та побудовано кінематичну модель.

У розділі 2 обґрунтовано методологію дослідження та обрано метод імітаційного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink для аналізу динаміки системи.

У розділі 3 обрано та розраховано компоненти електроприводу: двигун постійного струму ПБВ-100L та комплектний привод ЭТУ2-2П, визначено їх параметри для подальшого моделювання.

У розділі 4 розроблено математичну модель двоконтурної системи керування та виконано синтез регуляторів. За результатами моделювання динамічних характеристик обрано оптимальну структуру системи з ПІ-регулятором та вхідним фільтром.

У розділі 5 проаналізовано небезпечні фактори при експлуатації РТК та запропоновано заходи із забезпечення охорони праці.

Додаток містить 10 слайдів мультимедійної презентації.

ABSTRACT

The master's qualification work consists of 111 pages: 101 pages of explanatory note, 5 sections, 12 tables, 29 figures, 17 literature sources, 1 appendix on 10 pages.

Keywords: robotic technological complex, industrial manipulator, control system, electric drive, kinematic model, dynamic characteristics, machining.

The purpose of the work is the development and research of an automated control system for the manipulator electric drive within an RTC.

Section 1 analyzes the structure of the RTC, the Fanuc M-20iA manipulator is selected as a control object, its characteristics are considered and a kinematic model is built.

In section 2, the research methodology is substantiated and the method of simulation modeling in the MATLAB/Simulink environment is selected for analyzing system dynamics.

In section 3, the electric drive components are selected and calculated: a PBV-100L DC motor and an ETU2-2P complete drive, their parameters are determined for further modeling.

In section 4, a mathematical model of a two-loop control system is developed and the synthesis of controllers is performed. Based on the results of modeling dynamic characteristics, the optimal system structure with a PI controller and an input filter is selected.

In section 5, hazardous factors during the operation of the RTC are analyzed and measures to ensure occupational safety are proposed.

The appendix contains 10 slides of a multimedia presentation.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	9
1.1 Огляд літератури та розробок за темою	9
1.2 Опис та класифікація РТК. Технічні характеристики верстата	15
1.2.1 Основні технічні характеристики робота Fanuc M-20iA.....	23
1.2.2 Кінематична схема робота	30
1.2.3 Рішення прямої задачі кінематики	32
1.3 Висновки до розділу 1.....	37
РОЗДІЛ 2 МЕТОДОЛОГІЯ МАГІСТЕРСЬКОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	38
2.1 Основи методології наукових досліджень	38
2.2 Структурна схема магістерського дослідження	43
2.3 Вибір методу розрахунку поставленої задачі	44
2.4 Висновки до розділу 2.....	47
РОЗДІЛ 3 ВИБІР ТИПУ ДВИГУНА ТА КОМПЛЕКТНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА	48
3.1 Вибір електродвигуна	49
3.2 Аналіз систем керування.....	52
3.3 Характеристики, опис та розрахунок комплектного електропривода ЭТУ2-2П	55
3.4 Висновки до розділу 3.....	66
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ДИНАМІКИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	67
4.1 Математичний опис системи керування електропривода.....	67
4.2 Синтез регуляторів системи керування.....	71
4.2.1 Налагодження регулятора струму	71
4.2.2 Налагодження П-регулятора швидкості.....	76
4.2.3 Налагодження ПІ-регулятора швидкості	77
4.2.4 Розрахунок параметрів ПІ-регулятора швидкості	79

4.2.5 Розрахунок параметрів ПІ-регулятора швидкості	81
4.3 Моделювання та аналіз динамічних характеристик САК.....	83
4.3.1 Моделювання динамічних характеристик САК	83
4.3.2 Аналіз динамічних характеристик САК.....	84
4.4 Висновки до розділу 4.....	87
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ РОБОТІ З ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯМ РОБОТОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ	88
5.1 Аналіз небезпек і шкідливого впливу на людину при експлуатації електрообладнання робототехнічних комплексів	89
5.2 Організаційні та технічні заходи по забезпеченню безпеки праці при експлуатації робототехнічних комплексів.....	92
5.3 Висновки до розділу 5.....	96
ВИСНОВКИ	98
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	100
ДОДАТОК А. Мультимедійна презентація.....	102

ВСТУП

Актуальність теми.

Інтенсивний розвиток сучасної промисловості характеризується впровадженням нової автоматизованої техніки, зокрема гнучких автоматизованих виробництв, де ключову роль відіграють роботизовані технологічні комплекси (РТК).

Актуальність їх застосування особливо зростає в умовах серійного та дрібносерійного типів виробництва, оскільки, за даними фахівців, саме на них припадає близько 60-80 % усієї продукції машинобудування. Це створює нагальну потребу в розробці ефективних та гнучких автоматизованих рішень.

Найбільш масовим напрямком використання РТК є саме сфера механообробки, де задіяна найбільша кількість технологічного обладнання (ТО) та працюючого персоналу. Центральним виконавчим елементом таких комплексів є промисловий маніпулятор, ефективність якого безпосередньо впливає на продуктивність та надійність усього виробничого циклу. Робота маніпулятора в умовах механообробки характеризується складними динамічними процесами, змінними навантаженнями та високими вимогами до точності позиціонування і швидкодії при виконанні технологічних операцій.

Існуючі системи керування електроприводами (ЕП) маніпуляторів часто не в змозі повною мірою компенсувати вплив нелінійних факторів та динамічних навантажень, що виникають під час руху. Це призводить до виникнення значних статичних та динамічних похибок, вібрацій, збільшення часу циклу виконання операцій, що знижує загальну ефективність РТК. Таким чином, виникає протиріччя між зростаючими вимогами до гнучкості та продуктивності виробництва і можливостями стандартних систем керування.

Отже, розробка та дослідження автоматизованої системи керування ЕП маніпулятора, яка б забезпечувала високу точність при значній швидкодії в умовах складних та змінних динамічних навантажень, є надзвичайно важливим та актуальним науково-технічним завданням. Його вирішення дозволить суттєво

підвищити якісні показники роботи РТК механообробки, покращити якість продукції та розширити технологічні можливості сучасного автоматизованого виробництва.

Мета і завдання дослідження.

Магістерська робота присвячена розробці та дослідженню системи керування електропривода маніпулятора у складі РТК механообробки.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати наступні завдання:

- провести аналіз технологічного процесу в РТК механообробки, охарактеризувати об'єкт керування – маніпулятор, та побудувати його кінематичну модель;
- обґрунтувати вибір електродвигуна постійного струму та комплектного тиристорного електропривода, виконати розрахунок параметрів їх силової частини та передатних коефіцієнтів;
- розробити математичну модель двоконтурної системи підпорядкованого регулювання та виконати синтез регуляторів струму і швидкості за критеріями модульного та симетричного оптимумів;
- провести комп'ютерне моделювання динамічних характеристик розробленої системи в середовищі MATLAB/Simulink, порівняти різні закони керування та обрати оптимальну структуру;
- проаналізувати потенційні виробничі небезпеки та розробити заходи з охорони праці при експлуатації електрообладнання РТК.

Об'єкт дослідження.

Динамічні процеси в системі керування електропривода маніпулятора у складі РТК механообробки.

Предмет дослідження:

Автоматизована система керування електропривода, її структура, параметри та динамічні характеристики, що визначають точність і швидкодію маніпулятора.

Методи дослідження.

Робота ґрунтується на методах теорії автоматичного керування та електропривода. Для аналізу динамічних характеристик системи застосовано комп'ютерне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink та аналітичні розрахунки в пакеті Mathcad. Оцінка ефективності системи проводилась на основі аналізу перехідних процесів.

Практичне значення одержаних результатів.

Практичне значення одержаних результатів мають математичні та імітаційні моделі систем керування, які є зручними інструментами для дослідження динамічних характеристик електропривода маніпулятора у складі РТК механообробки та аналізу алгоритмів керування.

РОЗДІЛ 1

ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

1.1 Огляд літератури та розробок за темою

Розвиток науки і техніки на сучасному рівні сприяє створенню нових технологій, розробці інтелектуальних систем та впровадженню комплексів нового покоління. Однією з основних тенденцій розвитку сучасної промисловості є впровадження в технологічний процес електромехатронних модулів і систем.

З урахуванням виробничої і побутової техносфери створюються інтелектуальні елементи автоматизації та роботизації, які володіють принципово якісними новими функціями незалежно від втручання в їхню роботу операторів. Водночас електромехатронний підхід полягає в перенесенні функціонального навантаження від механічних вузлів до інтелектуальних компонентів, які перепрограмуються в нову задачу і подальшу дію [8].

Завдяки принципам і концепціям складаються програмовані модулі автоматизованого формування, створюються математичні моделі динаміки технологічних машин і їх окремих функціональних частин. У результаті відкриваються нові методи досліджень параметрів, характеристик та впровадження в подальше виробництво інтелектуальних модульних систем, блоків, підсистем і комплексів.

Паралельно на базі створення електромехатронних систем та підсистем розвиваються перспективні методи їхнього діагностування, що сприяє визначенню дефектів та створенню сучасних автоматизованих конструкцій, які мають широкі можливості та взаємозаміну елементів.

На цей час в багатьох галузях промисловості електромехатронні системи замінюють традиційні механічні машини, які вже не відповідають сучасним якісним вимогам. Особливістю електромехатронного підходу є не розширення, а заміщення функцій, які традиційно виконуються механічними елементами системи, на електронні та комп'ютерні блоки.

Внесок у формуванні та розвитку механіки зробили Г. Галілей, І. Ньютон, Д. Максвелл, Ж. Лагранж, Х. Лоренц, Л. Ейлер, М. В. Остроградський, М. Є. Жуковський, Г. Р. Герц, І. В. Мещерський, К. Е. Ціолковський та багато інших [8].

Перше практичне застосування електродвигуна постійного струму розпочато в 1834 р. Автором винаходу є академік з електромеханіки Б. С. Якобі.

Наприкінці ХІХ ст., завдяки відкриттю в 1886 року Г. Феррарісом і Н. Теслою явища обертаючого магнітного поля, почалось створення багатофазних електродвигунів змінного струму. У 1888 р. Доливо-Добровольський запропонував і реалізував трифазну систему передачі електричної енергії змінного струму та розробив у 1889 р трифазний асинхронний двигун та трансформатор.

У той ж час, у 18-19 століттях почався інтенсивний розвиток автоматики, завдяки використанню енергії пари в Європі. Першим промисловим регулятором став поплавковий регулятор, запропонований росіянином І. Ползуновим у 1765 р. для парового котла. На цьому ж принципі відхилення регульованої величини від заданого значення в 1784 р. англійським механіком Дж. Ваттом був побудований відцентровий регулятор швидкості парової машини.

До засновників теорії автоматичного регулювання належить професор Петербурзького Практичного технологічного інституту І.А. Вишнеградського, що опублікував у 1876 р. і в 1878 р. дві класичні роботи "Про загальну теорію регуляторів" і "Про регулятори прямої дії", де вперше регулятор і робоча машина розглядалися як єдина динамічна система. Його роботи отримали подальший розвиток у працях словацького вченого А. Стодоли, австрійського математика А. Гурвіца. Приблизно в той же час в Англії питання теорії автоматичного регулювання розроблялися в роботі Дж. Максвела та математика Е. Рауса. Російський вчений А.М. Ляпунов в 1892 р. в роботі "Загальна задача про стійкість руху" заклав основи теорії стійкості нелінійних динамічних систем [11].

Так, у 30-ті роки з'являються нові, більш досконалі частотні методи дослідження, основним засновником яких вважають американського вченого Г. Найквіста. У 1946 р. Г. Боде ввів у практику логарифмічні частотні

характеристики. Істотний внесок в теорію стійкості нелінійних систем зробив румунський вчений В.-М. Попов (1959 р.).

Американець Е. Джурі та росіянин Я.З. Ципкін розробили основи теорії імпульсних систем. Російські учені Л.С. Понтрягін, А.М. Льотов, Н.Н. Красовський та американський вчений Р. Беллман були провідними у розробці теорії оптимального керування.

Вагомий внесок у розвиток теорії автоматичного керування внесли українські вчені В.М. Глушков, О.Г. Івахненко, О.І. Кухтенко та інші.

Були розроблені новітні автоматизовані людино-машинні системи, що одержали назву "Автоматизовані системи керування (управління)" – АСУ. На сьогодні існують три великі класи АСУ: "Автоматизовані системи управління підприємством" – АСУП; "Автоматизовані системи управління технологічними процесами" – АСУ ТП; "Системи автоматизованого проектування" – САПР [11].

Теорія автоматичного керування продовжує інтенсивно розвиватися, відповідаючи на все нові вимоги технічного прогресу. Серед сучасних напрямів – теорія робототехнічних систем, гнучких виробництв, багатовимірних екстремальних систем, інтелектуальних систем та ін.

Сучасний внесок у формування наукових основ теорії проектування та керування РТК, розробку елементної бази робототехніки та методів аналізу маніпуляційних систем вагомий внесок зробили О. Г. Васильєв, Г. Грулер, О. І. Лісовиченко, В. А. Мажара, П. П. Мельничук, С. І. Ольшевський, К. Б. Остапченко, І. І. Павленко, М. М. Поліщук, Б. Б. Самотокін, М. М. Ткач, Л. І. Цвіркун, О. О. Черно, Л. С. Ямпольський та багато інших.

У своїх працях Т. П. Павленко, В. М. Шавкун, О. С. Козлова розглядають основи та сучасні концепції електромехатронних систем [8], а Л.І. Цвіркун, Г. Грулер деталізують аспекти робототехніки та мехатроніки [10].

Фундаментальний внесок у теорію та практику автоматизації виробництва зробив Л.С. Ямпольський зі співавторами [14, 15], чиї роботи заклали основи системного підходу до створення гнучких комп'ютеризованих систем в Україні. Їхні дослідження детально охоплюють весь життєвий цикл таких систем: від

розробки математичних моделей та синтезу алгоритмів керування до проектування елементної бази (приводів, сенсорів) та методів комплексної інтеграції.

Комплексний опис та практичні аспекти побудови РТК детально представлено у навчальному посібнику І.І. Павленка та В.А. Мажари [7]. У цій праці системно викладено питання структури, функціонування та класифікації РТК, надано методики обґрунтування вибору їхніх компонентів та розрахунку основних вузлів, що є необхідною умовою для проектування ефективних виробничих осередків.

Практичні аспекти систем керування промисловими робототехнічними комплексами, включаючи розрахунки та лабораторні дослідження, викладені у методичних працях О.Г. Васильєва, С.І. Ольшевського та О.О. Черно [2, 3].

Теоретичною основою для розробки систем керування є роботи Б.І. Приймака, що розглядають лінійні системи в теорії автоматичного керування [11].

Огляд сучасних розробок.

Сучасний ринок промислової робототехніки є високорозвиненою та конкурентною галуззю, де декілька провідних світових виробників задають стандарти якості, надійності та інновацій. Вибір конкретної моделі маніпулятора є ключовим етапом при проектуванні РТК, оскільки від його характеристик безпосередньо залежить продуктивність, гнучкість та ефективність усього виробничого процесу.

Нижче наведено огляд деяких лідерів ринку, чиї рішення широко застосовуються для автоматизації процесів механообробки:

- **FANUC (Fuji Automatic Numerical Control)** – японська корпорація, яка є провідним світовим виробником промислових роботів (ПР) з понад 600 000 встановлених систем. Заснована в 1956 році, компанія спочатку спеціалізувалася на системах числового керування (NC), а перших роботів встановила на власних заводах у 1974 році. Значний успіх у роботизованій автоматизації прийшов до компанії у 2000-х роках.

Серед їхніх розробок – найуспішніша серія 6-осьових роботів *R-2000*, яка здобула для FANUC репутацію виробника надійних та потужних маніпуляторів для виконання операцій з переміщення матеріалів та точкового зварювання. Компанія також відома серією *Arc Mate* для дугового зварювання, високошвидкісними дельта-роботами та тим, що першою представила повну лінійку колаборативних роботів (коботів).

- **KUKA** – один з провідних німецьких виробників ПР, впізнаваних за фірмовим помаранчевим кольором. Історія компанії в робототехніці почалася в 1973 році з випуску моделі *Famulus* – першого у світі робота з шістьма осями з ЕП. Серед ключових інновацій KUKA – розробка в 1996 році першого контролера на базі ПК, який дозволив керувати роботом у реальному часі через інтерфейс Windows. У 2004 році компанія представила перший у світі колаборативний робот.

Сьогодні однією з найбільш продаваних лінійок продукції є серія *KR QUANTEC*, яка охоплює моделі з вантажопідйомністю від 90 до 300 кг. Найбільшим споживачем роботів KUKA є автомобільна промисловість, де вони використовуються для автоматизації точкового зварювання та операцій з переміщення матеріалів.

- **ABB** – швейцарсько-шведська корпорація, що є одним з провідних світових виробників інноваційних та надійних ПР. Свій шлях у робототехніці компанія (тоді відома як ASEA) розпочала в 1974 році з випуску *IRB 6* – першого у світі робота, керованого електричним мікрокомп'ютером. ABB належить першість у низці ключових розробок: *IRB 60* (1979) став першим роботом для точкового зварювання з ЕП, а *IRB 2000* (1986) – першим маніпулятором, що використовував двигуни змінного струму.

Вагомим внеском компанії стало створення програмного забезпечення *RobotStudio* (1998) для офлайн-симуляції, а також розробка потужних контролерів, як-от *IRC5*, здатних керувати кількома роботами одночасно. У 2015 році ABB представила *YuMi* – першого у світі дворукого колаборативного робота.

- **Kawasaki** – один із піонерів японської промислової робототехніки, що розпочав свою діяльність у 1968 році завдяки технічному партнерству з американською компанією Unimation.

Вже у 1969 році вони випустили *Kawasaki-Unimate 2000* – перший ПР, вироблений в Японії. Компанія здійснила перехід від гідравлічних до електричних роботів на початку 1980-х, а з 1986 року перейшла до повністю власної розробки маніпуляторів. Важливою віхою став випуск повністю цифрових контролерів (починаючи з серії *AD* у 1992 році) з власною мовою програмування “*AS*”.

Серед їхніх ключових продуктів – серія *Z*, що широко використовується для точкового зварювання в автомобільній промисловості, та серія *M* для роботи з великими вантажами. Компанія також розвиває напрямок колаборативної робототехніки, представивши дворукий SCARA-робот *duAro*.

- **Adept Technology** – американська компанія, що була одним із піонерів робототехніки в Силіконовій долині. Заснована в 1983 році, вона увійшла в історію вже в 1984, випустивши *AdeptOne* – перший у світі SCARA-робот з прямим приводом.

Компанія також зробила внесок у розвиток систем керування, реалізувавши у 1994 році можливість керування кількома роботами з одного контролера. Лінійка антропоморфних роботів *Viper* була представлена компанією у 2006 році. У 2015 році Adept Technology була придбана японською корпорацією OMRON, і її розробки стали частиною портфолію OMRON Robotics.

Отже, наведений огляд підтверджує, що сучасний ринок ПР є зрілою та високотехнологічною галуззю, де домінують кілька глобальних лідерів. Їхні розробки задають світові стандарти, що робить аналіз їхніх типових рішень, зокрема маніпуляторів компанії FANUC, необхідною умовою для розуміння актуальних завдань у сфері керування РТК.

1.2 Опис та класифікація РТК. Технічні характеристики верстата

У сучасному машино- та приладобудуванні спостерігається суттєве протиріччя між можливостями існуючих засобів автоматизації та особливостями окремих виробничих процесів, які традиційно вважаються ручними і пов'язані з підготовкою виробництва й обслуговуванням ТО, тобто таких, як завантаження і розвантаження робочих машин, міжопераційне живлення, підготовка впорядкованого середовища тощо.

Не потребуючи, як правило, високої кваліфікації робітників, ці процеси пов'язані з виконанням специфічно складних і одноманітних рухів руки людини. Таке положення зберігається у зв'язку з тим, що у міру розвитку машинобудування перш за все автоматизації підлягають найбільш складні й трудомісткі операції, пов'язані зі змінами форми і розмірів виробів.

В останній час у зв'язку із задачами комплексної автоматизації виробництва й освоєння нових галузей діяльності людини (оволодіння космічного простору й акваторії морського дна, робота у небезпечних і агресивних середовищах) велика увага приділяється автоматизації операцій маніпулювання – переміщення й орієнтації виробів та інструменту. Особливу роль у цьому плані відводиться новому класу технічних засобів із гнучкими технологічними властивостями – **промисловим роботам (ПР)** [15].

Однак ПР, будучи ключовим елементом, рідко функціонує ізольовано. Для повноцінного вирішення виробничих завдань його необхідно інтегрувати з ТО (верстатами, пресами), допоміжними пристроями (накопичувачами, конвеєрами) та системами керування. Саме така інтегрована система, що об'єднує один або декілька ПР з іншими елементами виробництва в єдину, злагоджену структуру, і отримала назву **роботизований технологічний комплекс (РТК)**.

Згідно з “ГОСТом 26228-85. Системы производственные гибкие” під РТК розуміють сукупність ТО, ПР та технологічного оснащення, які автономно функціонують і виконують багаторазові цикли.

Таким чином, узагальнюючи, можна сказати, що РТК – це автономно діюча сукупність технологічних засобів виробництва, функціонально об'єднаних для виконання багаторазових циклів у межах єдиного виробничого процесу. Він є системним вирішенням задачі комплексної автоматизації, де центральною ланкою виступає ПР, що автоматизує операції маніпулювання та пов'язує інші компоненти в єдиний процес.

До його складу входять такі основні компоненти, як **ТО, ПР та допоміжне обладнання (ДО).**

РТК можна класифікувати за трьома основними ознаками (рисунок 1.1):

- галузь застосування;
- тип структури;
- тип компонувань.

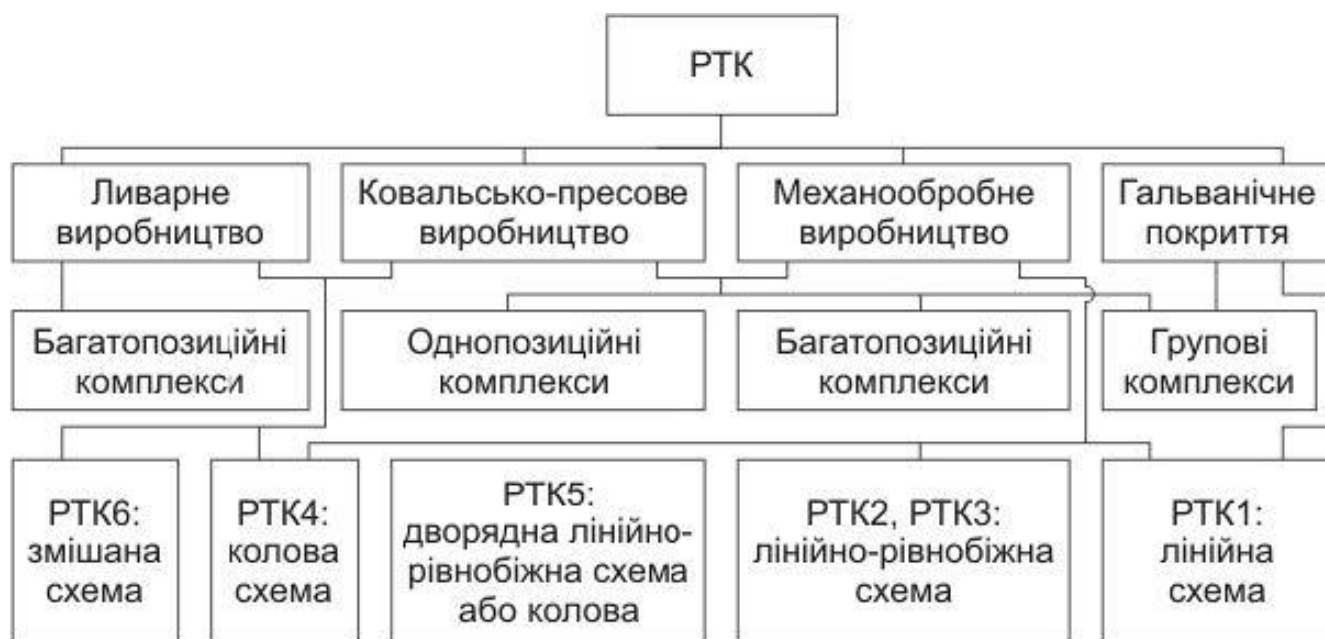


Рисунок 1.1 – Класифікація РТК

Першою ознакою РТК є галузь застосування, що характеризує вид виробничого процесу (метод обробки), де повинен функціонувати РТК.

Друга ознака характеризує тип структури комплексу, взаємодію ПР з ТО та ДО усередині комплексу.

Відповідно до структурної ознаки РТК бувають:

- однопозиційні (верстат-робот, прес-робот і т.д.), що включають один ПР у комплексі з ТО (рисунок 1.2, а, б);

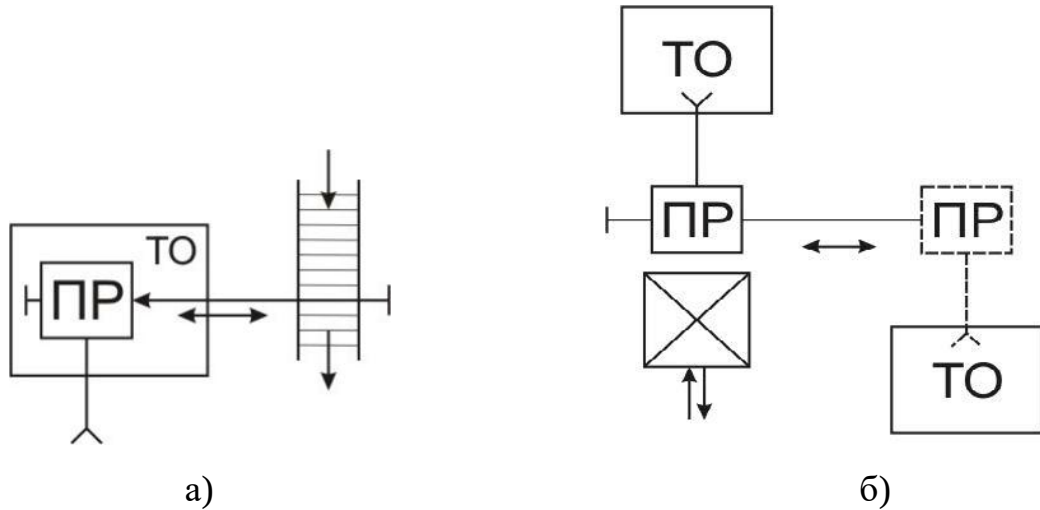


Рисунок 1.2 – Типи компонувань комплексів: РТК1 (а), РТК2 (б)

- групові, що включають один ПР, який обслуговує групу однотипного чи різнотипного ТО (рисунок 1.3, а, б);

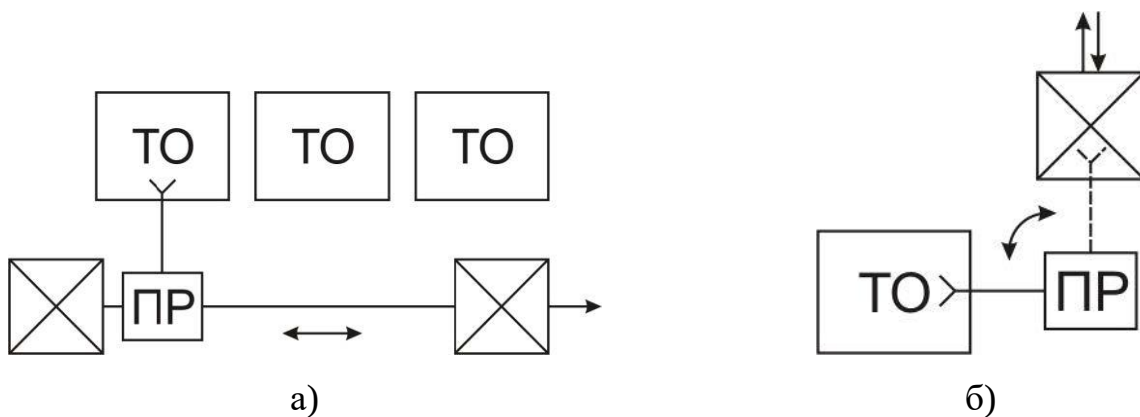


Рисунок 1.3 – Типи компонувань комплексів: РТК2 (а), РТК3 (б)

- багатопозиційні, що включають групу ПР, які виконують взаємозалежні чи взаємодоповнюючі функції (рисунок 1.4, а, б).

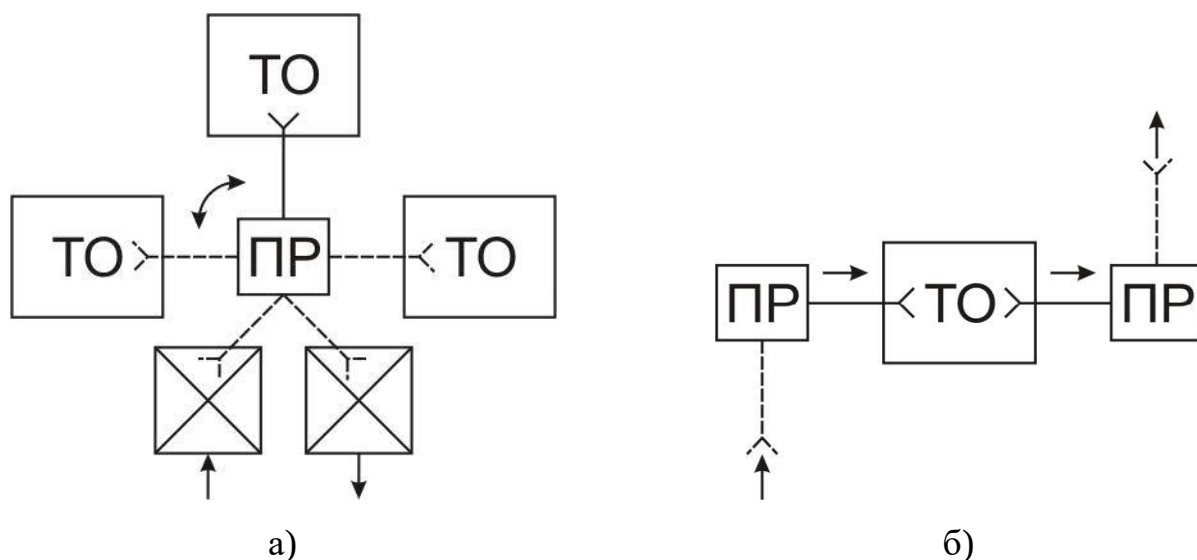


Рисунок 1.4 – Типи компоновки комплексів: РТК5 (а), РТК6 (б)

Для однопозиційних комплексів характерно співвідношення $\text{ПР} \leftrightarrow \text{ТО} = 1$; для групових – $\text{ПР} \leftrightarrow \Sigma \text{ТО} > 1$; для багатопозиційних – $\Sigma \text{ПР} \leftrightarrow \Sigma \text{ТО} \geq 1$.

Третьою відмітною ознакою класифікації комплексів є тип компоновки комплексу чи схема розташування обладнання (рис 1.5).

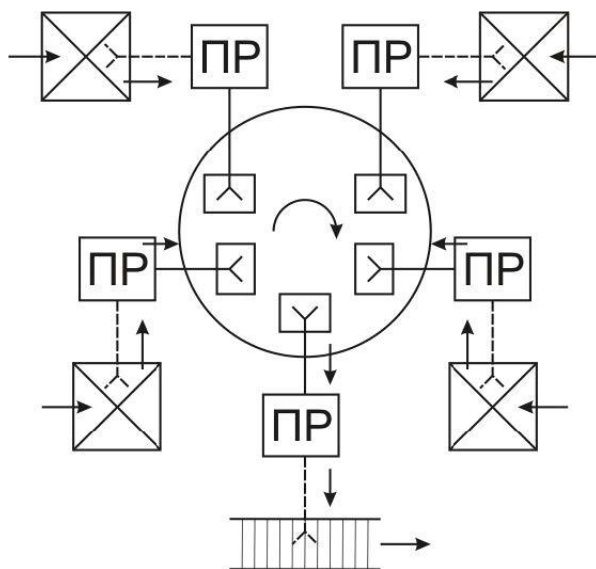


Рисунок 1.5 – Тип компоновки комплексів РТК6

Основні елементи РТК та їх графічні позначення представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Умовні позначення елементів РТК

Позначення	Найменування
	Промисловий робот
	Технологічне обладнання
	Допоміжне обладнання

Компонування комплексу залежить від конструктивно кінематичного виконання ПР, а саме: від типу основних координатних переміщень робота, що визначають характер його робочої зони.

Впровадження РТК у виробництво також сприяє підвищенню кваліфікації працюючих, престижності їх роботи, вдосконаленню організації виробництва, покращанню соціально-економічних умов роботи.

РТК використовуються для виконання різних технологічних операцій, із яких основними є:

- механічна обробка деталей;
- обробка деталей тиском;
- зварювання деталей;
- складальні операції;
- фарбування виробів;
- транспортування та упорядковане розміщення деталей;
- ливарне та термообробне виробництво;
- контроль якості виробів;
- пакування та ін.

Оскільки найбільш масовим є механообробне виробництво, де задіяна найбільша кількість працюючих, то, відповідно, і найбільша кількість РТК має місце в такому виробництві

Окрім основного ТО та ПР, залежно від особливостей технологічного процесу і ступеня автоматизації, до складу РТК можуть входити такі системи: транспортно-накопичувальна система (допоміжні пристрої); система вимірювання і контролю; система видалення стружки та ін [7].

Автоматична машина, що перепрограмовується та використовується у виробничому процесі для виконання рушійних функцій, аналогічних функціям людини, при переміщенні предметів виробництва та (чи) технологічного оснащення, **називається ПР**. Для виконання цих функцій ПР має маніпулятори.

Маніпулятор – пристрій, призначений для імітації рушійних та (чи) робочих функцій руки людини і керований оператором (біотехнічний маніпулятор) або діючий автоматично. До автоматичних маніпуляторів відносять автооператори – такі маніпулятори промислового призначення, що перепрограмовуються.

Предмети виробництва, які переміщуються у просторі маніпулятором, називаються об'єктами маніпулювання (ОМ). До них належать заготовки, деталі, складальні з'єднання, захватні пристрої (ЗП), допоміжний, вимірювальний або обробляючий інструмент тощо. До класу робіт можуть бути віднесені й маніпулятори з інтерактивним керуванням – інтерактивні роботи, поперемінно керовані оператором, які діють автоматично.

На відміну від біотехнічних маніпуляторів, ці роботи мають пристрої пам'яті для автоматичного виконання окремих дій. В залежності від форми участі оператора ПР можуть діяти в двох режимах: автоматизованому, коли автоматичні режими керування чергуються з біотехнічними; супервізорному, коли всі елементи заданого циклу операцій виконуються роботом автоматично по етапах, причому перехід від одного етапу до іншого здійснюється тільки з дозволу оператора завдяки подачі необхідної цілеспрямованої команди [14].

Класифікація ПР здійснюється за ознаками, суттєвими для розробки їхнього типу (рисунки 1.6).



Рисунок 1.6 – Класифікація ПР

За призначенням усі роботи поділяються на групи, з яких клас ПР складають роботи, призначені для автоматизації процесів та операцій в машинобудуванні.

Класифікація ПР за основними ознаками:

1. За характером виконуваних операцій:

- **Технологічні (виробничі):** Виконують основні операції техпроцесу (зварювання, фарбування, складання, механічна обробка тощо).

- **Допоміжні (підйомно-транспортні):** Обслуговують основне обладнання (встановлення/зняття заготовок, транспортно-складські роботи).

- **Універсальні:** Виконують різноманітні (основні й допоміжні) операції.

2. За ступенем спеціалізації:

- **Спеціальні:** Виконують окрему технологічну операцію або обслуговують конкретну модель обладнання.

- **Спеціалізовані (цільові):** Призначені для виконання операції одного виду (наприклад, зварювання) або обслуговування широкої номенклатури обладнання.

- **Багатоцільові:** Збігаються з універсальними ПР.

3. За галуззю застосування (видом виробництва):

- Ливарне, ковальсько-пресове, складання, зварювальне, термообробка, нанесення покриття, транспортно-складські роботи та ін. та механічна обробка.

4. За системами основних координатних переміщень:

- Декартова, полярна проста, полярна складна. (Також існують комбіновані системи).

5. За числом ступенів рухомості:

- З одним ступенем, з двома степенями та з n степенями.

6. За вантажопідйомністю:

- Надлегкі (до 1 кг), легкі (до 10 кг), середні (до 100 кг), важкі (до 1000 кг) та надважкі (понад 1000 кг).

7. За мобільністю:

- Стаціонарні та пересувні.

8. За типом силового привода:

- Електромеханічний, пневматичний, гідравлічний та комбінований.

9. За характером відпрацювання програми:

- **Жорсткопрограмовані:** Програма не змінюється в процесі роботи.

- **Адаптивні:** Можливе коректування програми на основі сенсорної інформації.

- **Гнучкопрограмовані (інтегральні):** Здатні формувати програму на підставі поставленої цілі та інформації про об'єкти навколишнього середовища.

10. За характером програмування швидкостей і дискретності переміщень (Тип СПК):

- **Позиційні:** Переміщення від точки до точки.
- **Контурні:** Переміщення по безперервній траєкторії.
- **Комбіновані.**

Ця комплексна класифікація дозволяє систематизувати існуюче різноманіття ПР і є основою для обґрунтованого вибору конкретної моделі відповідно до виробничих потреб [14].

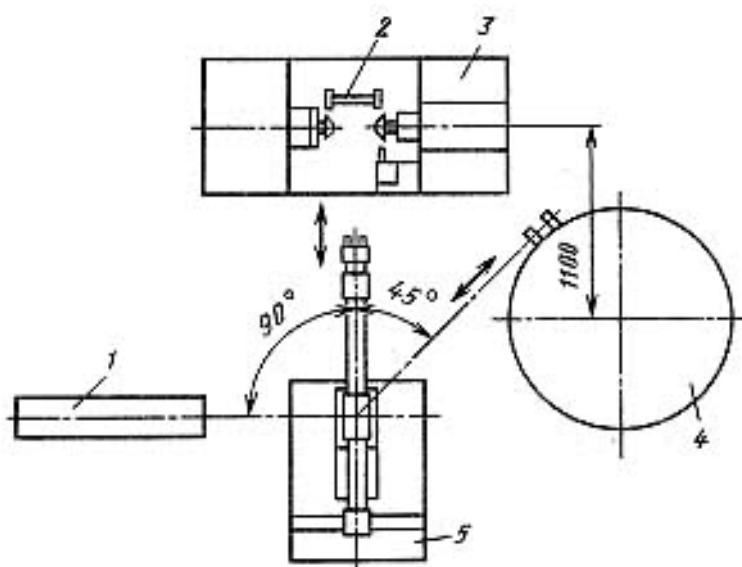
1.2.1 Основні технічні характеристики робота Fanuc M-20iA

Для завдань обслуговування металообробних верстатів, таких як завантаження-розвантаження заготовок і деталей, маніпулятор повинен відповідати низці вимог: мати достатню вантажопідйомність, робочу зону, що охоплює необхідні позиції, а також високу швидкість та точність позиціонування для мінімізації циклу обробки.

В роботі розглядається РТК механообробки на базі токарського патронного верстата СТІР-160.

До складу РТК механообробки входять: верстат, промисловий робот, транспортні пристрої; накопичувачі.

На рисунку 1.7 показане планування РТК для випадку, коли ПР обслуговує 1 верстат.



1 – лоток для передачі деталі на інший верстат; 2 – знімач; 3 – верстат;

4 – магазин-накопичувач, 5 – ПР

Рисунок 1.7 – Планування РТК механообробки

Технічні характеристики токарського патронного верстата СТПР-160 наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики токарського патронного верстата СТПР-160

Параметри	Значення
Найбільший діаметр і довжина обробки, мм	160x100
Найбільше переміщення супорта, Xx Z мм	340x220
Число керованих координат, в т.ч. одночасно	3
Швидкість швидких переміщень, мм/хв	20000
Кількість позицій інструментальної головки	6
Діапазон частот обертання шпинделя, хв^{-1}	20-1500
Потужність двигуна шпинделя, кВт	15
Габаритні розміри, мм	2915x1502x1888
Маса, кг	3150

З урахуванням маси заготівки (8 кг) і самого захватного пристрою (орієнтовно не менш 7 кг) потрібно вибрати ПР із номінальною вантажопідйомністю більше 15 кг.

Тому в якості базової моделі для даного дослідження було обрано **робот Fanuc M-20iA**, загальний вид якого наведено на рисунку 1.8.



Рисунок 1.8 – Загальний вид промислового робота Fanuc M-20iA

Ця модель є одним із поширених рішень у галузі автоматизації механообробки завдяки оптимальному поєднанню вантажопідйомності, робочої зони та динамічних характеристик, що робить її репрезентативним прикладом для

подальшого аналізу систем керування [2]. Розглянемо його основні технічні характеристики.

Промисловий робот Fanuc M-20iA – це універсальний шестиосьовий маніпулятор, розроблений для широкого спектра завдань, включаючи вантажно-розвантажувальні операції, обслуговування верстатів, пакування, збирання та інші процеси, що потребують високої швидкості та точності.

Ключовою інновацією серії M-20iA є унікальна конструкція з порожнистим верхнім плечем (J3) та зап'ястям (J4, J5, J6). Це дозволяє акуратно прокласти всі необхідні комунікації (електричні кабелі, пневматичні шланги) всередині руки робота, що кардинально вирішує проблеми їх зачеплення, розриву та тертя під час роботи. Такий дизайн значно спрощує інтеграцію робота у виробничі осередки, підвищує надійність системи та скорочує час простою.

Ключові особливості та переваги [16, 17]:

- **Інтегровані комунікації:** Порожниста конструкція руки (50 мм) та зап'ястя дозволяє уникнути зовнішнього прокладання кабелів, що підвищує надійність та довговічність.
- **Висока продуктивність:** Високі швидкості руху осей забезпечують мінімальний час циклу для операцій типу "pick and place".
- **Компактність:** Тонкий профіль руки та зап'ястя, а також невеликі габарити основи дозволяють використовувати робота в умовах обмеженого простору.
- **Гнучкість монтажу:** Робот може бути встановлений на підлозі, під стелею, на стіні або під кутом, що розширює можливості його інтеграції.
- **Надійність:** Використання герметичних підшипників, безщіткових двигунів змінного струму та редукторів типу RV забезпечує високу жорсткість конструкції, точність та тривалий термін служби без необхідності частого обслуговування.
- **Абсолютне позиціонування:** Завдяки абсолютним енкодерам робот не потребує виходу в нульову точку (homing) після ввімкнення живлення.

Модифікації серії M-20iA

Серія M-20iA є гнучкою платформою, що має кілька модифікацій для вирішення різних завдань [17]:

- М-20іА/20М – стандартна модель з вантажопідйомністю 20 кг та досяжністю 1813 мм.
- М-20іА/35М – модель зі збільшеною до 35 кг вантажопідйомністю для роботи з важчими об'єктами та оснащенням.
- М-20іА/10L – версія з подовженою рукою, що має досяжність 2009 мм при вантажопідйомності 10 кг.
- М-20іА/20Т "Toploader" – модель для монтажу на рейках над обладнанням, що забезпечує гнучкість у лінійних переміщеннях.

На рисунку 1.9 наведене планування робота Fanuc M-20іА.

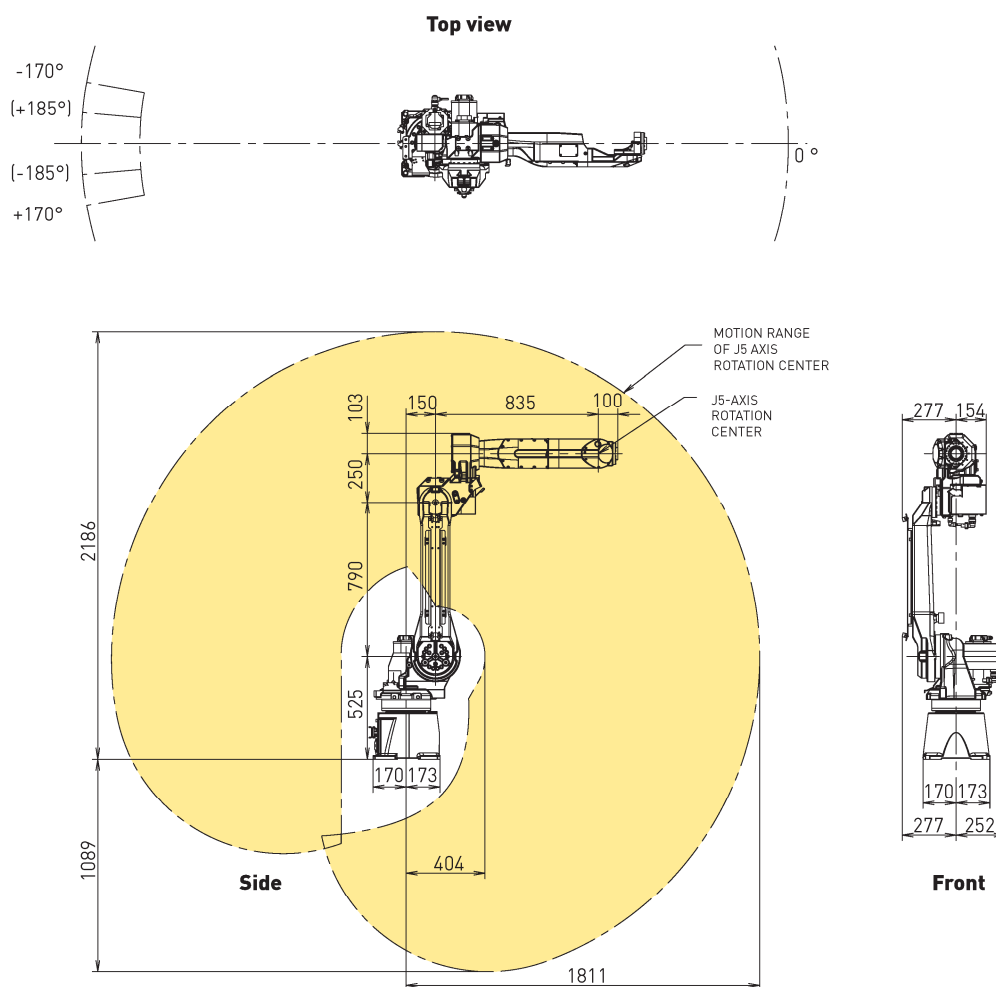


Рисунок 1.9 – Планування робота Fanuc M-20іА

Далі буде використовуватися стандартна модель М-20іА/20М (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики робота Fanuc M-20iA

Параметри		Значення
Основні характеристики		
Число ступенів рухливості		6
Вантажопідйомність (на зап'ясті), кг		20
Додаткове навантаження (на плечі J3)		12
Максимальна досяжність, мм		1811
Точність позиціонування (згідно ISO 9283), мм		±0,08
Радіус інтерференції, мм		321
Вага маніпулятора, кг		250
Характеристики осей		
Діапазон руху, °	J1	340/370
	J2	260
	J3	458
	J4	400
	J5	360
	J6	900
Максимальна швидкість, °/с	J1	195
	J2	175
	J3	180
	J4	360
	J5	360
	J6	550

Продовження таблиці 1.3

Параметри		Значення
Навантаження на зап'ястя		
Допустимий момент, Н·м	J4	44
	J5	44
	J6	22
Допустима інерція, кг·м ²	J4	1,04
	J5	1,04
	J6	0,28
Умови експлуатації		
Спосіб розміщення		Підлога, стеля, стіна, під кутом
Механічні гальма		На всіх осях
Температура навколишнього середовища, °C		Від 0 до 45
Вібрація, м/с ² (G)		4,9 або менше (0,5 або менше)
Допустима вологість	Нормальні умови	75 % або менше
	Короткочасні умови (до 1 місяця)	95 % або менше (без конденсату)
Ступінь захисту	Корпус	IP54 (опц. IP55)
	Зап'ястя та плече J3	IP67

Отже, наведені технічні характеристики кількісно визначають робочі можливості та обмеження маніпулятора. Ці параметри є прямим наслідком його конструктивного виконання та кінематичної будови [2, 16, 17].

1.2.2 Кінематична схема робота

Кінематичне дослідження ПР починається зі складання його кінематичної моделі, яка є основою для аналізу його рухів. Кінематична модель (або схема) являє собою графічне та математичне представлення взаємного розташування ланок маніпулятора, їхніх розмірів, а також типів і розподілу кінематичних пар, що фіксує його положення в просторі в певний момент часу.

Для математичного опису положення ланок і ОМ вводиться декілька систем координат. Основою для всіх розрахунків є опорна (або базова) система координат (ОСК), яку позначають як $O_0X_0Y_0Z_0$. Вона жорстко пов'язана з нерухомою основою (стійкою) маніпулятора і є абсолютною системою відліку для всіх рухів (рисунок 1.10).

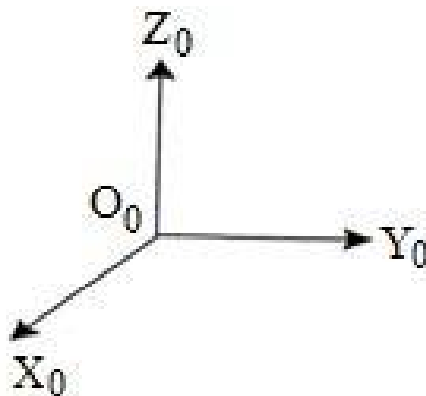


Рисунок 1.10 – Орієнтація ОСК осей, пов'язана з нерухливою основою

Крім базової, з кожною рухомою ланкою маніпулятора (від 1-ї до n -ї) пов'язують свою власну локальну систему координат $O_iX_iY_iZ_i$. Таким чином, положення першої ланки визначається відносно основи, другої – відносно першої, і так далі, аж до останньої ланки, що несе на собі схват [3, 14].

Щоб уніфікувати та спростити математичний опис переходу між сусідніми ланками, використовується спеціальний підхід, відомий як алгоритм Денавіта-Хартенберга (Д-Х). Цей метод дозволяє однозначно описати положення та

орієнтацію кожної локальної системи координат відносно попередньої за допомогою лише чотирьох параметрів.

Для побудови кінематичної схеми за методом Д-Х необхідно для кожної ланки i ($i = 1 \dots n$, n) задати систему координат $O_i X_i Y_i Z_i$, дотримуючись наступних правил [2, 3]:

1. Вісь Z_{i-1} спрямована уздовж осі i -го зчленування.

Вісь Z кожної системи координат прив'язується до осі руху. Тобто, для системи i , вісь Z_{i-1} проходить уздовж осі i -го шарніра (з'єднання ланок $i-1$ та i).

- Для обертального з'єднання вісь Z є віссю обертання.
- Для поступального з'єднання вісь Z є напрямком поступального руху.

2. Вісь X_i перпендикулярна осі Z_{i-1} і спрямована від неї.

Вісь X_i проходить уздовж спільного перпендикуляра до осей Z_{i-1} та Z_i і спрямована від осі Z_{i-1} до осі Z_i . Початок координат O_i розташовується в точці перетину осі Z_i з цим спільним перпендикуляром.

3. Вісь Y_i доповнює осі X_i і Z_i до правої системи координат.

Ця вісь завжди визначається за правилом правої руки (або векторним добутком $Y = Z \times X$) після того, як визначені напрямки осей Z та X .

4. Нульова (0-а) та кінцева (n -а) системи координат обираються довільно, але з дотриманням певних умов.

- Базова система (0-а): Вісь Z_0 спрямовується уздовж осі першого зчленування. Початок координат O_0 та напрямок осі X_0 можна обрати довільно, зазвичай їх обирають так, щоб у початковому положенні робота параметри першої ланки (наприклад, d_1 або θ_1) дорівнювали нулю.

- Система схвата (n -а): Оскільки вісь Z_{n+1} відсутня, її напрямок обирають виходячи з конструкції ЗП (наприклад, уздовж осі симетрії захвату). Вісь X_n повинна бути перпендикулярною до осі Z_{n-1} .

Після визначення всіх систем координат взаємне положення двох сусідніх ланок $i-1$ та i повністю описується за допомогою чотирьох параметрів Д-Х:

- a_i – довжина спільного перпендикуляра між осями Z_{i-1} та Z_i (відстань вздовж осі X_i).

- α_i – кут схрещування між осями Z_{i-1} та Z_i (кут повороту навколо осі X_i).
- d_i – зміщення вздовж осі Z_{i-1} (відстань від початку O_{i-1} до перетину спільного перпендикуляра з віссю Z_{i-1}).
- θ_i – кут повороту навколо осі Z_{i-1} (кут між осями X_{i-1} та X_i).

Для будь-якої кінематичної пари три з цих чотирьох параметрів є постійними конструктивними величинами, а один є змінною – узагальненою координатою q_i , що описує рух у шарнірі: для обертальної пари змінною величиною є кут θ_i , а для поступальної пари – переміщення d_i [3, 14].

При складанні кінематичної схеми вибраного ПР вибір систем координат проводиться за наступними правилами:

1. З нерухливою основою зв'язується система осей O, X, Y, Z .
2. З i -ю ланкою зв'язується система осей $O_i X_i Y_i Z_i$.
3. Вісь $O_i Z_i$ збігається з віссю зчленування ланок i й $(i-1)$. Для пар обертального типу вісь $O_i Z_i$ збігається з віссю відносного повороту. Для поступальних пар вісь $O_i Z_i$ спрямована паралельно відносному поступальному переміщенню.
4. Вісь $O_i X_i$ перпендикулярна одночасно осям $O_i Z_i$ и $O_{i-1} Z_{i-1}$. Вісь $O_i Y_i$ перпендикулярна осям $O_i Z_i$ і $O_i X_i$ і доповнює їх до правої тріади.

На рисунку 1.11 наведена кінематична схема робота Fanuc M-20iA з розбивкою осей координат.

1.2.3 Рішення прямої задачі кінематики

Пряму задачу кінематики можна сформулювати так – задана кінематична схема маніпулятора і відомі значення узагальнених координат, що визначають положення всіх ланок маніпулятора одна відносно одної. Потрібно знайти положення й орієнтацію захвата в системі координат O (стояка).

Рішення прямої задачі кінематики проводиться на технічному керуючому рівні. Суть її полягає у визначенні координат схвата в робочому просторі при відомих значеннях узагальнених координат q_i для всіх ланок маніпулятора, тобто

необхідно визначити положення й орієнтацію схвата, якщо відомі (обмірювані) відносні переміщення ланок [2].

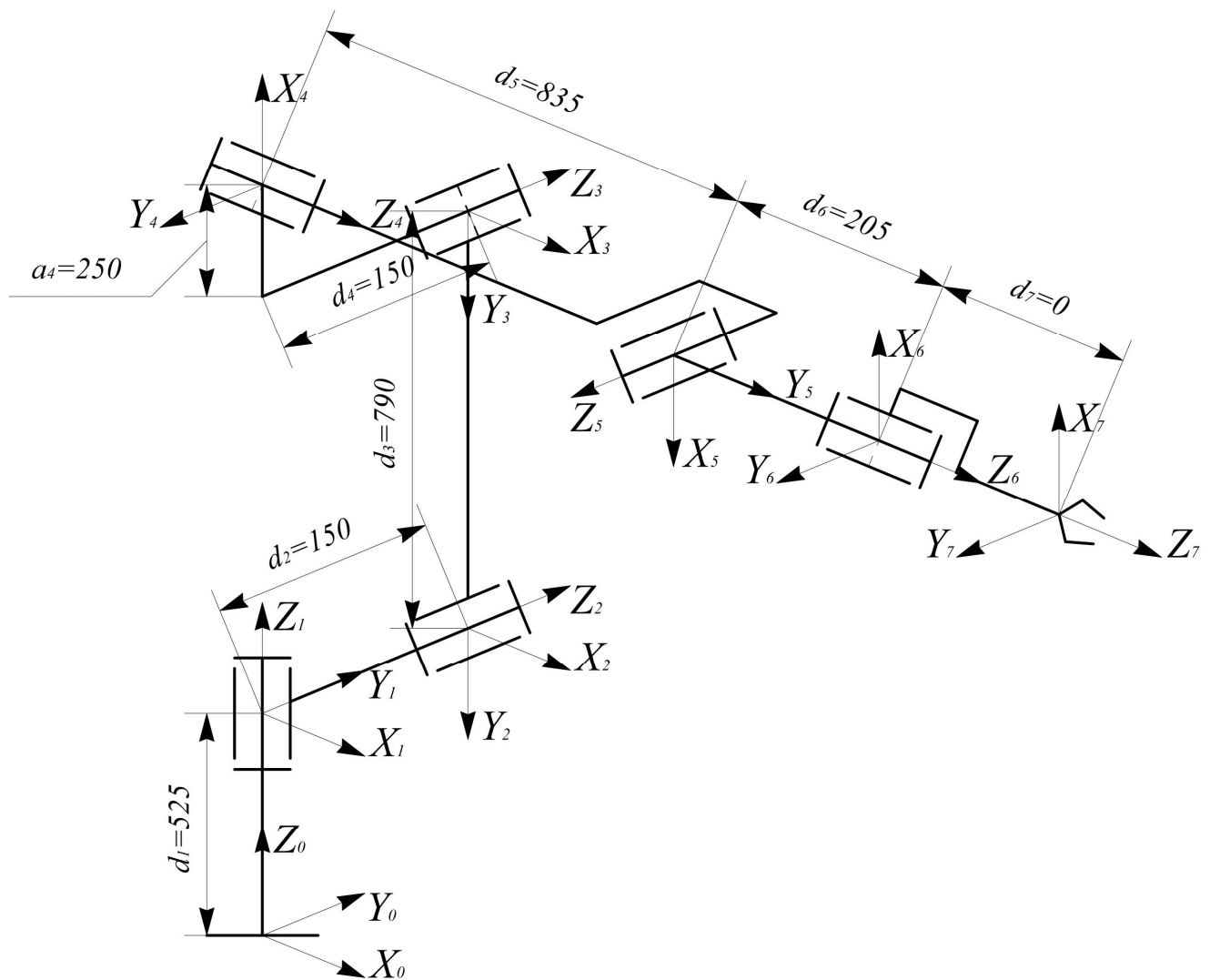


Рисунок 1.11 – Кінематична схема робота

Перехід системи осей з i -ї системи в $(i-1)$ визначається матрицею переходу A_i , яку визначають за виразом:

$$A_i = \begin{vmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \cdot \sin(\theta_i) & a_i \cdot \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) \cdot \cos(\theta_i) & a_i \cdot \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (1.1)$$

Для одержання матриць переходів складаємо таблицю й заносимо в неї дані, які визначені виходячи з кінематичної схеми (рисунк 1.11). Дані заносимо в таблицю 1.4 в загальному вигляді.

Таблиця 1.4 – Параметри кінематичної схеми робота

Номер матриці	Кутова координата θ_i	Лінійна координата d_i	Відстань переносу a_i	Кут закручування α_i	Нова система координат
1	—	d_1	—	—	$X_1Y_1Z_1$
2	—	d_2	—	90°	$X_2Y_2Z_2$
3	—	d_3	—	—	$X_3Y_3Z_3$
4	90°	d_4	a_4	90°	$X_4Y_4Z_4$
5	180°	d_5	—	90°	$X_5Y_5Z_5$
6	180°	d_6	—	-90°	$X_6Y_6Z_6$
7	—	d_7	—	—	$X_7Y_7Z_7$

Враховуючи дані таблиці 1.4 і використовуючи вирази (1.1) одержуємо наступні матриці переходів:

$$A_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 525 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (1.2)$$

$$A_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_2) & -\sin(\alpha_2) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_2) & \cos(\alpha_2) & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (1.3)$$

$$A_3 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 790 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (1.4)$$

$$A_4 = \begin{vmatrix} \cos(\theta_4) & 0 & \sin(\alpha_4) \cdot \sin(\theta_4) & 0 \\ \sin(\theta_4) & \cos(\alpha_4) \cdot \cos(\theta_4) & 0 & a_4 \cdot \sin(\theta_4) \\ 0 & \sin(\alpha_4) & \cos(\alpha_4) & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 250 \\ 0 & 1 & 0 & 150 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (1.5)$$

$$A_5 = \begin{vmatrix} \cos(\theta_5) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_5) \cdot \cos(\theta_5) & -\sin(\alpha_5) \cdot \cos(\theta_5) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_5) & \cos(\alpha_5) & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 835 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (1.6)$$

$$A_6 = \begin{vmatrix} \cos(\theta_6) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_6) \cdot \cos(\theta_6) & -\sin(\alpha_6) \cdot \cos(\theta_6) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_6) & \cos(\alpha_6) & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 205 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (1.7)$$

$$A_7 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (1.8)$$

Положення й орієнтацію захвата в нерухливій системі координат $OX_0Y_0Z_0$ визначає результуюча матриця A :

$$A = \prod_{i=1}^n A_i = \begin{vmatrix} a & r \\ 000 & 1 \end{vmatrix}, \quad (1.9)$$

де i – номер матриці переходу;

n – кількість матриць переходу, $n = 7$;

a – матриця напрямних косинусів положення осей системи $O_nX_nY_nZ_n$ щодо нерухливої системи $OX_0Y_0Z_0$;

r – радіус-вектор положення ЗП в нерухливій системі координат.

Радіус-вектор положення ЗП в нерухливій системі координат r ,

$$r = (X_1Y_1Z_1). \quad (1.10)$$

Після перетворень і з урахуванням виразів (1.9), (1.10), отримаємо розраховану результуючу матрицю.

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 0 & -1 & 835 \\ 0 & 1 & 0 & -1145 \\ 1 & 0 & 0 & 925 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (1.11)$$

В результаті отримана проекція точки M з координатами $r = (X_M; Y_M; Z_M)$ в осях нерухомої системи координат $O_0X_0Y_0Z_0$:

$$X_M = 835 \text{ мм};$$

$$Y_M = -1145 \text{ мм};$$

$$Z_M = 925 \text{ мм.}$$

1.3 Висновки до розділу 1

- проведено аналіз сучасного ринку промислової робототехніки та розглянуто ключових світових виробників;
- розглянуто поняття, структуру, головні завдання та наведено детальну класифікацію РТК і ПР;
- в якості об'єкта дослідження обрано ПР Fanuc M-20iA, наведено його детальний опис, ключові особливості та основні технічні характеристики;
- побудовано кінематичну схему маніпулятора за методом Денавіта-Хартенберга та виконано розв'язання прямої задачі кінематики для визначення положення й орієнтації ЗП.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ МАГІСТЕРСЬКОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Основи методології наукових досліджень

Наука – це процес творчої діяльності по отриманню нового знання, і результат цієї діяльності у вигляді цілісної системи знань, сформульованих на основі певних принципів.

Наука передбачає процес отримання нового знання і результат цього процесу (систему об'єктивних знань, що адекватно відображають реальність). Вона наділена суттєвими ознаками, що принципово відрізняють її від інших можливостей пізнання світу.

Тоді можемо визначити, що **наукове дослідження** – це цілеспрямоване пізнання, результати якого виступають у вигляді системи понять, законів і теорій.

Мета, безпосередні завдання науково-теоретичного дослідження полягають у тому, щоб знайти загальне у ряду одиничних явищ, розкрити закони, за якими виникають, функціонують, розвиваються такого роду явища, тобто проникнути в їхню глибинну сутність.

Основні засоби науково-теоретичного дослідження:

- сукупність наукових методів, всебічно обґрунтованих та зведених в єдину систему;
- сукупність понять, строго визначених термінів, пов'язаних між собою і утворюють характерну мову науки.

Результати наукових досліджень втілюються в наукових працях (статтях, монографіях, підручниках, дисертаціях і т. д.) і лише потім після їх всебічної оцінки використовуються в практиці, враховуються в процесі практичного пізнання і в знятому, узагальненому вигляді включаються в керівні документи [1].

Об'єкт наукового дослідження – це сфера діяльності суб'єкта або сукупність зв'язків, відносин, якостей досліджуваного явища чи процесу, або загальна сфера пошуку у вирішенні поставленої проблеми.

Предмет дослідження – це поняття, під яким розуміють конкретизацію напрямку дослідження у вибраній проблематиці, тобто виділення в ній деякого аспекту чи ракурсу, який узагальнено об'єднує певну сукупність властивостей об'єкта, для встановлення конкретних меж у процесі дослідження.

Між поняттями “об'єкт” і “предмет” у науковому дослідженні наявна взаємозалежність, як між цілим (загальним) та його складовими (конкретним), де ціле сприймається як об'єкт, а його певна конкретна частина – як предмет [13].

Характеризуючи наукове дослідження, зазвичай вказують на наступні його відмітні ознаки:

- це обов'язково цілеспрямований процес, досягнення усвідомлено поставленої мети, чітко сформульованих завдань;
- це процес, спрямований на пошук нового, на творчість, на відкриття невідомого, на висунення оригінальних ідей, на нове освітлення розглянутих питань;
- воно характеризується систематичністю: тут упорядковані, приведені у систему і сам процес дослідження, і його результати;
- йому властива строга доказовість, послідовне обґрунтування зроблених узагальнень і висновків.

Основні засоби науково-теоретичного дослідження:

- сукупність наукових методів, всебічно обґрунтованих та зведених в єдину систему;
- сукупність понять, строго визначених термінів, пов'язаних між собою і утворюють характерну мову науки.

Діяльність людей в будь-якій її формі (наукова, практична і т.д.) визначається цілим рядом факторів. Кінцевий її результат залежить не тільки від того, хто діє (суб'єкт) або на що вона спрямована (об'єкт), але і від того, як відбувається даний процес, які способи, прийоми, засоби при цьому застосовуються. Це і є проблеми методу [1].

Метод – це підхід, засіб або прийом теоретичного та експериментального дослідження або практичного втілення явища чи процесу. Залежно від ступеню

складності проблеми дослідження змінюються методи його проведення і види експерименту.

Методи, які застосовують у науковому дослідженні, залежать не лише від самого предмету, а й від рівня дослідження. Виділяють емпіричний і теоретичний рівні.

Метод науки являє собою організацію процесу дослідження в структурі наукової та пізнавальної діяльності, що передбачає конкретний науковий пошук, зокрема: постановка та формулювання проблеми, побудова гіпотези, емпірична, теоретична та експериментальна перевірка гіпотези, підсумки та прогнозування наступних етапів дослідження обраної теми наукового дослідження.

Науковий пошук має декілька рівнів, серед яких виділяють (рисунок 2.1):



Рисунок 2.1 – Рівні науково-дослідної роботи

Інформаційний (проблемно-пошуковий) рівень – виявлення та усвідомлення інформації про наявні знання в галузі обраної проблематики.

Критичний рівень – виявлення рівня розробленості обраної теми наукового дослідження.

Аналітико-синтетичний рівень – занурення у проблематику обраної теми наукового дослідження та узагальнення отриманих знань.

Науково-дослідний рівень – теоретико-експериментальна розробленість обраної теми наукового дослідження.

Прогностичний рівень – узагальнюючий рівень із визначенням перспектив у подальшому вивченні обраної теми наукового дослідження.

До теоретичних методів наукового дослідження зазвичай відносять категорії, які наведено на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Категорії теоретичних методів наукового дослідження

Індукція (ймовірні знання) – це форма наукового пізнання, логіка якого розгортається від конкретного до загального, тобто загальне положення виводять логічним шляхом з одиничних суджень.

Дедукція (ймовірні знання) – це форма наукового пізнання, логіка якого розгортається від загального до конкретного.

Аналіз тісно пов'язаний з дедукцією і являє собою метод наукового пізнання, за логікою якого ціле розкладають на частини, що є складовими цього цілого.

Синтез – це метод наукового пізнання, що сприяє відновленню цілісності досліджуваного об'єкта, явища чи процесу в розмаїтті проявів. Цей метод тісно пов'язаний з індукцією у різних практичних проявах системного дослідження.

Абстрагування – метод наукового пізнання, що полягає в уявному виділенні конкретних ознак та властивостей об'єкта, явища або процесу. Завдяки

абстрагуванню стає можливим з всієї сукупності їхніх ознак і властивостей виокремити загальні та найбільш важливі.

Конкретизація – це рух від абстрактного до конкретного з метою виокремлення функціональних зв'язків між складовими частинами досліджуваного об'єкта, явища чи процесу.

Моделювання – це спосіб наукового пізнання, сутність якого полягає у дослідженні моделі об'єкта пізнання на основі абстрактно-логічного мислення за принципами наочності та об'єктивності.

Порівняння – це метод зіставлення досліджуваних об'єктів, явищ чи процесів і виявлення їх подібності та відмінності.

Класифікація полягає в упорядкуванні досліджуваних об'єктів, явищ або процесів, а також їхніх складових на групи, типи, класи, види за певними ознаками.

Отримана за допомогою емпіричних методів наукового дослідження інформація є основою для подальшого теоретичного осмислення пізнавальних процесів.

Складові емпіричних методів дослідження зображені на рисунку 2.3:



Рисунок 2.3 – Категорії емпіричних методів наукового дослідження

Кожен з наведених методів є певною мірою важливим у випадку проведення наукових досліджень, хоча в конкретному дослідженні використовуються лише окремі з них. Найчастіше серед них, особливо в

економічних, природничих і технічних науках, використовують спостереження, експеримент і, звичайно, аналіз результатів.

Під **спостереженням** розуміють цілеспрямоване і систематичне сприйняття об'єкту, явища чи процесу, виходячи з певного завдання і мети дослідження. Залежно від тривалості вирізняють спостереження: короткочасні і довгочасні, безперервні і дискретні, тобто такі, які неодноразово повторюють через певні проміжки часу.

Експеримент – це цілеспрямоване вивчення об'єкту (явища, процесу) дослідження з метою виявлення невідомих його властивостей чи якостей або перевірки правильності теоретичних положень, які визначаються певною науковою ідеєю. Розрізняють два види експериментів:

- експерименти, за допомогою яких емпірично перевіряють вірність певної гіпотези чи теорії;
- експерименти пошукового характеру, в ході яких відбувається відбір необхідної емпіричної інформації для вирішення поставленої проблеми [13].

2.2 Структурна схема магістерського дослідження

Проведення магістерського дослідження ґрунтується на послідовному та логічно взаємопов'язаному виконанні етапів, що забезпечує комплексний підхід до вирішення поставленої науково-технічної задачі.

Загальна структура роботи відповідає класичній схемі наукового дослідження, яка включає постановку проблеми, теоретичний аналіз, розробку моделі, експериментальне дослідження та формулювання висновків.

Це все можна поділити на конкретні етапи:

1. Обґрунтування актуальності та формулювання проблеми
2. Формулювання мети та завдань дослідження
3. Огляд літератури та аналіз існуючих підходів
4. Визначення об'єкта, предмета та методів дослідження
5. Розробка загальної концепції та структури системи

6. Математичне та комп'ютерне моделювання
7. Аналіз і оцінювання результатів моделювання
8. Оцінка практичної значущості та безпеки
9. Формулювання висновків і оцінка одержаних результатів.

Спочатку визначається сутність проблеми, її наукове й практичне значення, обґрунтовується потреба у вирішенні поставленого завдання.

Потім чітко встановлюється мета роботи та визначається комплекс завдань, виконання яких дозволить її досягти та проводиться аналіз попередніх досліджень і технічних рішень, що обумовлюють необхідність подальшого розвитку теми.

Уточнюється, що саме досліджується, який аспект є головним, та якими методами здійснюється пізнання (теоретичними, експериментальними, аналітичними тощо).

Створюється узагальнена модель об'єкта дослідження, визначається структура системи та принципи її функціонування, а після цього будуються математичні моделі, виконується імітаційне моделювання процесів для перевірки правильності теоретичних положень.

Далі виконується перевірка отриманих результатів, визначаються основні показники ефективності, проводиться порівняння з відомими методами.

На заключному етапі узагальнюються результати дослідження, визначається їхнє практичне значення, та іде оцінка одержаних результатів.

2.3 Вибір методу розрахунку поставленої задачі

Дана магістерська робота не передбачає проведення експериментальних досліджень, має теоретичний характер, тому основним методом для відображення отриманих результатів є **моделювання**.

Побудова моделі, тобто моделювання, лежить в основі будь-якої науки. Моделі бувають дослідницькі і робочі (автопілот, протез, лялька, карта тощо).

Модель будують лише для імітації досліджуваного об'єкта, причому здебільшого лише для частини його властивостей. Це стосується як дослідницьких, так і робочих моделей.

Під класифікацією моделей розуміють їх поділ на види, групи, класи на підставі певних ознак (наприклад, функціональних можливостей, повноти охоплення предметної області, точності відображення об'єкта управління і т.д.), хоча чіткої межі між окремими ознаками не існує. Головні відмінні риси, притаманні різним моделям, можна простежити за класифікаційною схемою, що відображена на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Схема класифікації моделей

Згідно з наведеною класифікацією, для розв'язання поставлених завдань у даній роботі використовується **ідеальна логіко-математична модель**.

Логіко-математичні (формальні) моделі – це моделі які є втіленням уявних моделей в систему математичних співвідношень (рівнянь і нерівностей, логічних виразів, таблиць, матриць, схем тощо).

Відзначимо, що створенню будь-якої моделі в уяві людини завжди передуює відповідна уявна модель.

За цільовим призначенням моделі поділяють на теоретико-аналітичні і прикладні. Перші призначені для науково-теоретичного дослідження різних процесів, а другі – для розв'язування конкретних задач на різних рівнях.

За характером часової залежності моделі поділяють на статичні й динамічні. У статичних моделях усі залежності охоплюють один період часу, а в динамічних моделях описується процес зміни об'єкта чи процесу в часі.

Стосовно даного дослідження, розроблена модель належить до класу **теоретико-аналітичних**, та водночас вона є **динамічною**,

Такий комплексний вибір обумовлений тим, що об'єкт дослідження – динамічні процеси в системі керування ЕП – описується за допомогою формалізованої системи математичних рівнянь, що відображають його поведінку в часі [13].

У наш час, у зв'язку з появою і доступністю користувачам персональних комп'ютерів потужних математичних систем, які увібрали у себе новітні досягнення інженерної думки, з'явилися й нові можливості проведення аналізу і синтезу технічних систем. Серед нових обчислювальних засобів аналізу технічних систем однією з найбільш пристосованих для розв'язування інженерних задач є математична комп'ютерна система MATLAB.

Особливо зручним для проведення моделювання процесів в динамічних системах є пакет візуального програмування Simulink, який дозволяє моделювати процеси у складних (у тому числі нелінійних) неперервних і дискретних динамічних системах, оминаючи процес написання програм, шляхом складання у середовищі Simulink блок-схеми системи з окремих готових візуально оформлених блоків і з'єднання їх між собою у визначеному порядку.

Така процедура одержала назву візуального програмування. Візуальне програмування суттєво спрощує процес створення обчислювальної програми, не потребує знань мов програмування, дозволяє наочно подати структуру модельованої системи і робить процес моделювання вельми наочним і легко корегованим [5].

Для дослідження динаміки системи керування та аналізу перехідних процесів буде використано середовище імітаційного моделювання MATLAB/Simulink. У свою чергу, для виконання попередніх аналітичних розрахунків та визначення вихідних параметрів для моделі буде використано програмний пакет Mathcad.

2.4 Висновки до розділу 2

- проаналізовано основи методології наукових досліджень, включаючи ключові поняття, рівні та класифікацію теоретичних і емпіричних методів;
- визначено логічну структуру та послідовність етапів проведення магістерського дослідження, від постановки проблеми до формулювання висновків;
- обґрунтовано вибір моделювання як основного методу для аналізу динаміки системи керування та визначено програмні засоби для його реалізації.

РОЗДІЛ 3

ВИБІР ТИПУ ДВИГУНА ТА КОМПЛЕКТНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

ЕП кожної осі промислового маніпулятора є ключовим виконавчим елементом, який забезпечує перетворення електричної енергії в механічний рух та реалізує задані траєкторії з необхідною точністю та динамікою. Робота ЕП маніпулятора у складі РТК характеризується специфічними та значно жорсткішими вимогами порівняно з приводами загальнопромислових механізмів.

Основні вимоги до ЕП осей маніпулятора включають:

- високою динамікою: частими пусками, реверсами та гальмуваннями з великими прискореннями для мінімізації часу циклу виконання операцій;
- широким діапазоном регулювання швидкості: від майже нульових швидкостей при точному позиціонуванні до максимальних швидкостей при транспортних переміщеннях;
- змінним навантаженням: момент інерції, приведений до вала двигуна, суттєво змінюється залежно від конфігурації ланок маніпулятора та маси ОМ;
- високими вимогами до точності позиціонування: для забезпечення коректного завантаження-розвантаження верстата та виконання технологічних операцій.

Для реалізації сервозадач застосовують регульовані ЕП змінного та постійного струму. Приводи змінного струму, зокрема синхронні та асинхронні, забезпечують високі динамічні показники, однак їх системи керування базуються на реалізації складних, нелінійних векторних алгоритмів.

Водночас високомоментні двигуни постійного струму (ДПС) є класичною основою для побудови високоточних систем керування. Їхня ключова перевага – прямий зв'язок між струмом якоря та електромагнітним моментом, що значно спрощує синтез регуляторів. Лінійність математичної моделі ДПС дозволяє реалізувати прозору та ефективну структуру підпорядкованого регулювання координат (контурів струму та швидкості), принципи якої є фундаментальними для всіх типів сервоприводів.

Таким чином, поєднання високих регулювальних властивостей та простоти реалізації точного керування моментом визначає доцільність застосування системи ЕП на базі високомоментного ДПС.

3.1 Вибір електродвигуна

Вибір конкретної моделі електродвигуна здійснюється на основі розрахунку потужності, яку двигун повинен розвивати для забезпечення заданих динамічних характеристик приводу осі маніпулятора. Розрахунок проводиться для однієї з найбільш навантажених обертальних осей, що дозволяє продемонструвати загальну методику.

Потужність привода обертальної координати N_B (Вт) визначається за формулою:

$$N_B = \frac{10 \cdot m_H \cdot r \cdot \omega}{\eta} \cdot \left(\frac{r \cdot \omega^2}{\theta} + 1 \right) =$$

$$= \frac{10 \cdot 120 \cdot 1,811 \cdot 0,26}{0,7} \cdot \left(\frac{1,811 \cdot 0,26^2}{0,25} + 1 \right) \approx 1,2 \text{ кВт}, \quad (3.1)$$

де m_H – навантаження на привод, $m_H = 120$ кг;

r – максимальний радіус зони обслуговування, $r = 1,811$ м;

ω – кутова швидкість, $\omega = 0,26$ рад/с;

η – ККД передачі, яка зв'язує двигун з виконавчим механізмом, $\eta = 0,7$.

Для надійної роботи системи та забезпечення необхідного запасу потужності, номінальна потужність двигуна N_H повинна перевищувати розрахункове значення N_B .

На підставі проведених розрахунків потужності двигуна приймаємо двигун типу ПБВ-100L, параметри якого наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні дані електродвигуна ПБВ-100L

Параметри	Позначення	Величина
Номінальна потужність, кВт	N_n	2,2
Номінальний момент, Н·м	M_n	35
Номінальна швидкість, об/хв	n_n	2000
Номінальна напруга, В	U_n	53
Номінальний струм, А	I_n	50
Момент інерції якоря, кг·м ²	J	0,188
Опір обмотки якоря при 15°C, Ом	$R_{\text{я}}$	0,0574
Індуктивність обмотки якоря, мГн	$L_{\text{я}}$	0,422
Електромеханічна постійна часу, мс	T_m	14,2
Електромагнітна постійна часу, мс	T_e	7,35
Висота осі обертання, мм	h_d	100
Довжина, мм	l_d	652
Маса, кг	m_d	88

Високомоментні двигуни постійного струму ПБВ призначені для ЕП подач металорізальних верстатів. Використання в конструкції таких двигунів високоенергетичних постійних магнітів у порівнянні з електромагнітним збудженням забезпечує високі значення кутового прискорення в перехідних режимах роботи; рівномірний хід при малих частотах обертання; здатність витримати велике перевантаження по струму без розмагнічування магнітної системи; відносно велику теплову постійну часу й можливість установки двигунів у механізмах подачі верстатів безпосередньо на ходовий гвинт [2].

Двигуни серії ПБВ можна зчленовувати із приводом за допомогою муфти або зубчастої передачі. Осьове навантаження на вільний кінець вала не повинне перевищувати 70 % невикористаного припустимого радіального навантаження.

Вони також комплектуються температурним перетворювачем, що забезпечує подачу сигналу в ланцюг керування при неприпустимому нагріванні ізоляції якоря й індикатором положення типу ПМБ.

Крім того, у них застосовують гальма серії ЭТДВ, напруга живлення постійного струму яких дорівнює 24 В.

Структура умовного позначення двигунів серії ПБВ розкриває їхні основні конструктивні особливості. Для обраної моделі ПБВ-100L розшифровка має такий вигляд:

П – двигун постійного струму;

Б – ступінь захисту IP44;

В – високомоментний;

100 – висота осі обертання, мм;

L – позначення довжини.

У комплект кожного ДПС серії П входить тахогенератор типу ТС-1М (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Технічні дані тахогенератора типу ТС-1М для двигунів серії ПБВ

Параметри	Значення
Крутизна вихідної характеристики, В/(об/хв)	0,02
Номінальна частота обертання, об/хв	4000
Опір навантаження, кОм, не менше	4
Нелінійність вихідної напруги, %	2
Несиметрія вихідної напруги, %	1
Пульсація вихідної напруги, %	2
Індуктивність обмотки якоря, мГн	0,6
Опір обмотки якоря при 15°C, Ом	138

3.2 Аналіз систем керування

Сучасні ЕП високої точності регулювання і високої швидкодії вимагають використання замкнених систем. Тільки вони можуть реалізувати в ЕП два основних принципи:

- величина, яка регулюється на виході ЕП (швидкість, момент, прискорення тощо) повинна по можливості точніше повторювати керуючий (вхідний) сигнал;
- величина, яка регулюється на виході ЕП, по можливості не повинна залежати від збурюючих дій на ЕП. Такими збурюючими діями можуть бути напруга живлення, температура, момент навантаження і т.д.

Таким чином основним принципом регулювання в ЕП є принцип зворотного зв'язку, який дозволяє здійснити контроль якості регулювання за відхиленням керуючого параметра від заданого.

Структурну схему ЕП, що реалізує принцип зворотного зв'язку, можна представити у вигляді сукупності силових і керуючих елементів (рисунок 3.1) [6]:

- силові елементи перетворюють, регулюють і підводять до виконавчого органу механізму основний потік енергії. До них відносяться керовані перетворювачі енергії, електродвигуни, передаточні механізми;
- керуючі елементи формують, перетворюють і підводять сигнали керування до силових елементів.

Керуючі елементи можна розділити на дві групи:

- елементи систем керування вентилями, які перетворюють сигнал керування з виходу системи автоматичного регулювання у відкриваючі імпульси;
- елементи систем автоматичного регулювання, які формують задаючі та керуючі дії і визначають статичні і динамічні властивості автоматизованого ЕП.

За функціональним призначенням керуючі елементи другої групи поділяють на:

- регулятори, які вираховують різницю сигналів задавача і зворотного зв'язку (розузгодження) і на її основі формують керуючу дію, яка приводить регульовану координату до заданого значення;

- датчики, що перетворюють керуючу координату в електричний сигнал, який використовується як сигнал зворотного зв'язку;
- задавальні елементи, що визначають технологічну програму роботи автоматизованого ЕП;
- узгоджуючі елементи, які узгоджують вихідні і вхідні координати елементів системи за родом струму, виглядом, рівнем сигналів тощо.

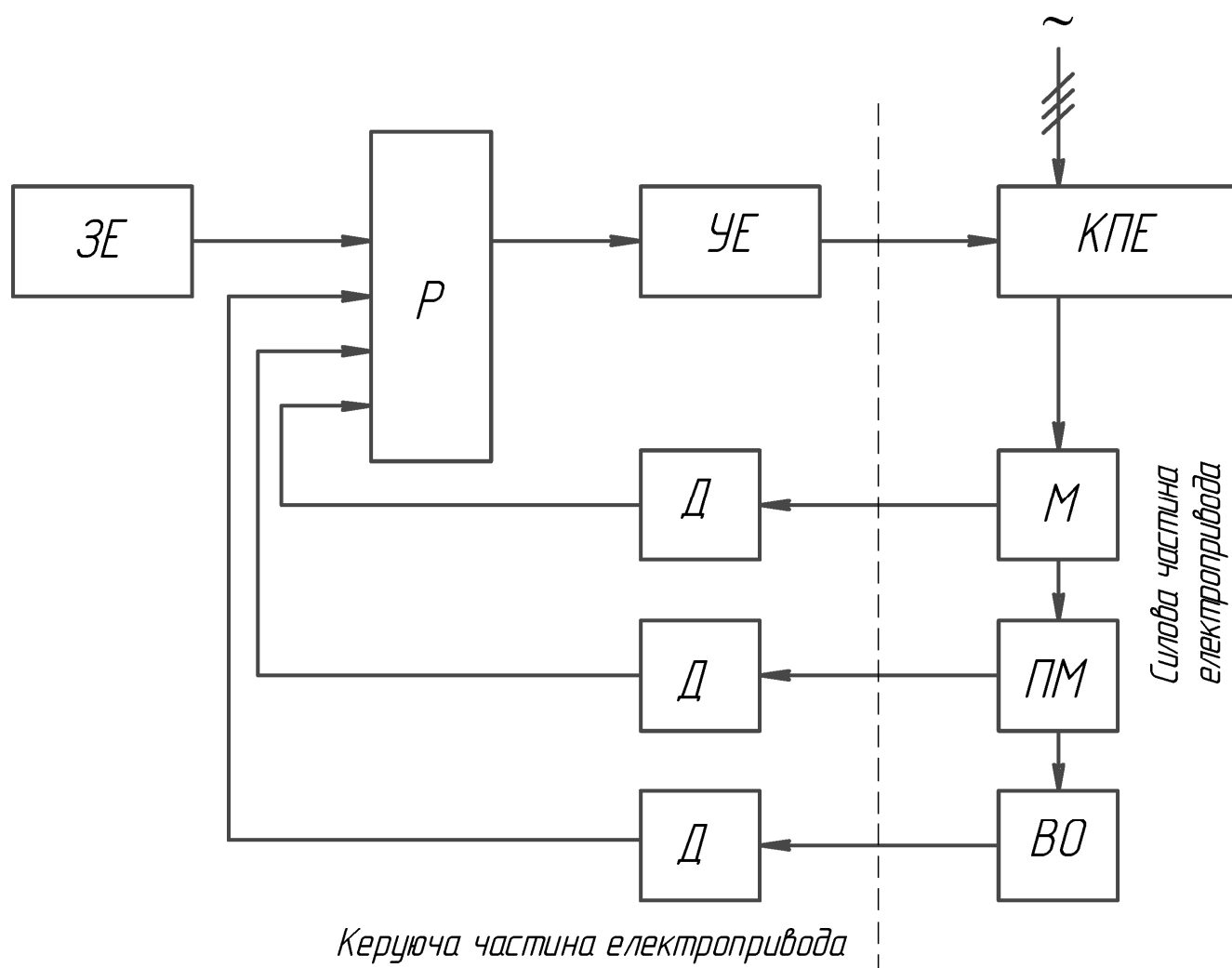


Рисунок 3.1 – Структурна схема автоматизованого ЕП

ЗЕ – задавальний елемент; Р – регулятор; УЕ – узгоджуючий елемент;
 КПЕ – керований перетворювач енергії; Д – датчик; М – електродвигун;
 ПМ – передавальний механізм; ВО – виконавчий орган робочої машини

В регульованому ЕП зі зворотними зв'язками використовують три структури побудови систем керування:

- з проміжним підсумовуючим елементом;
- з незалежним керуванням;
- з підпорядкованим керуванням.

Система ЕП з підпорядкованим керуванням координат (рисунок 3.2) є найпоширенішою. Об'єктом регулювання цієї системи є електромеханічна система, яка поділена на елементи з передаточними функціями $W_1(p)$, $W_2(p)$, ..., $W_n(p)$ і вихідними координатами $x_1, x_2, \dots, x_n$. В системі передбачено n регуляторів з передаточними функціями $W_{P1}(p)$, $W_{P2}(p)$, ..., $W_{Pn}(p)$.

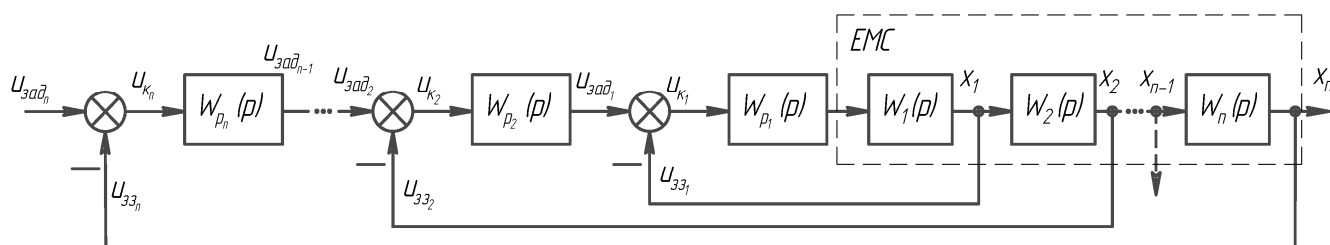


Рисунок 3.2 – Структура схеми підпорядкованого ЕП

Внутрішній контур керування утворюється першим регулятором з передаточною функцією $W_{P1}(p)$, ланкою $W_1(p)$ і зворотним зв'язком u_{331} за координатою x_1 . Наступний контур керування утворюється другим регулятором з передаточною функцією $W_{P2}(p)$, ланкою $W_2(p)$ і зворотним зв'язком u_{332} за координатою x_2 і так далі.

Отже, задаючий вплив для будь-якого внутрішнього контуру u_{Ki-1} є вихідною величиною регулятора відповідного зовнішнього контуру u_{3Adi} . Тому керування вихідною координатою внутрішнього контуру підпорядковане вихідній координаті зовнішнього контуру. Звідси і назва системи, що розглядається.

Важливими перевагами такої структури є простота налаштування на необхідну якість регулювання координат і можливість простими засобами обмежити будь-яку координату системи. Для цього достатньо обмежити її при

завданні. Недоліком є зменшення швидкодії, що залежить від кількості контурів[6].

Для керування електродвигунами постійного струму випускаються комплектні вітчизняні серійні ЕП ЕТ6С, ЕТУ 3601 (БТУ3601), ЕТ6-3, ЕТЗІ, ЕТУ2-2П, ЕТА (тиристорні трифазні з двоконтурною системою підпорядкованого регулювання і ряд інших).

Комплектні ЕП комплектуються високомоментними двигунами серії: МТ, ДК-1, Д-101, ПБВ, ПФВ.

З урахуванням необхідності реалізації реверсивного, швидкодіючого привода для задачі керування маніпулятором, а також сумісності з обраним двигуном серії ПБВ, для подальшого аналізу та розрахунків вибирається комплектний ЕП типу ЕТУ2-2П.

3.3 Характеристики, опис та розрахунок комплектного електропривода ЕТУ2-2П

Технічні дані комплектного ЕП типу ЕТУ2-2П наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Технічні дані електропривода ЕТУ2-2П

Тип ЕП	Електродвигун				Потужність трансформатора, кВА
	Тип двигуна	Потужність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв.	
ЕТУ2-2П	ПБВ	2,2	58	500	5

Електропривод ЕТУ2-2П призначений для реверсивних швидкодіючих ширококорегуючих приводів з однозонним регулюванням швидкості, у тому числі для механізмів. Дані ЕП можуть працювати, як внутрішній контур, у САК зі зворотним зв'язком по положенні із замиканням через систему ЧПК.

Дані ЕП призначені для приводів подач верстатів із ЧПК і роботів із тривалими моментами 1,7 – 47 Н·м.

В ЕП подачі ЕТУ2-2П силова частина підключається до мережі через трансформатор. Номінальна випрямлена напруга блоку перетворювача БС 115 В чи 230 В, при номінальному струмі (25,50 і 100) А, до мереж 220, 230 В, припустиме підключення ЕП через мережні реактори (без трансформатора) [2].

В ЕП із високомоментними двигунами застосовуються згладжуючий реактор на струм, відповідний номінальному струму двигуна.

Структура умовної позначки:

ЕТУ2 – Х₁П;

ЕТУ – ЕП постійного струму тиристорний уніфікований;

2 – номер розробки;

Х₁ – виконання по реверсу: 1 – нереверсивний, 2 – реверсивний;

П – подачі.

Функціональна схема швидкодіючого реверсивного електропривода ЕТУ2-2П приведена на рисунку 3.3.

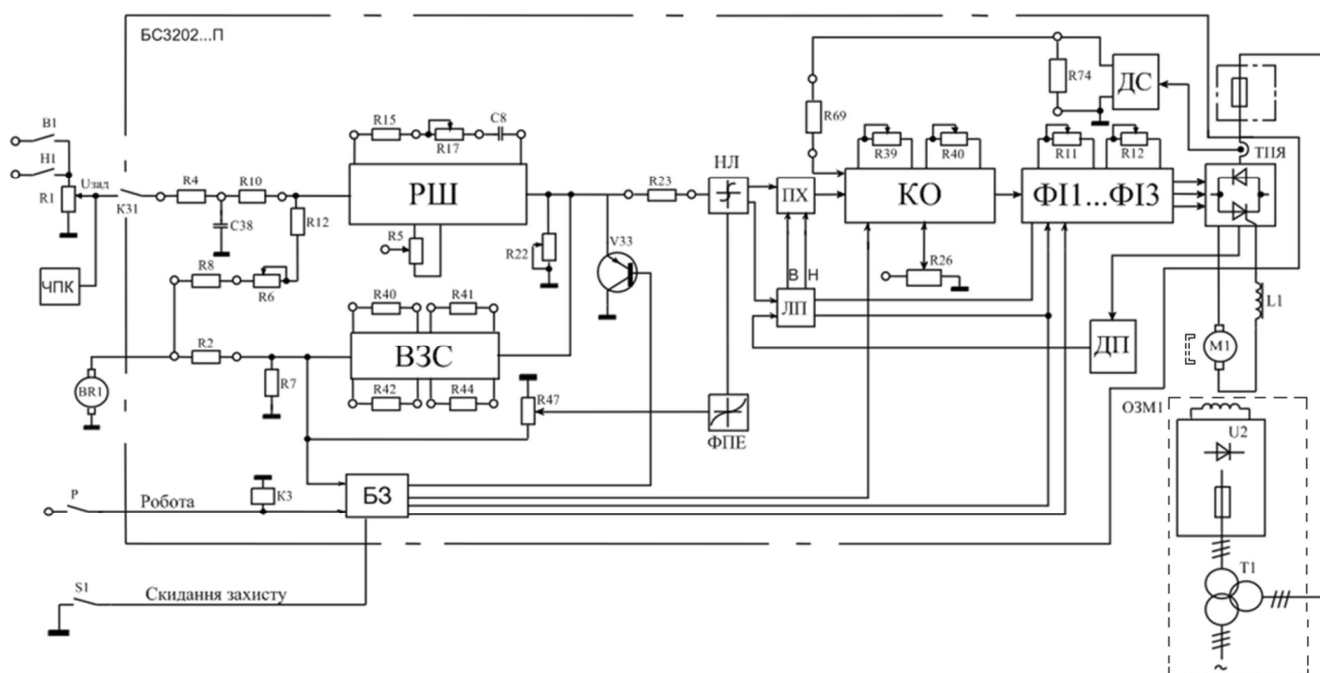


Рисунок 3.3 – Функціональна схема реверсивного електропривода ЕТУ2-2П

ЕП складається з блоку перетворювача ТПЯ БС 3202.П, електродвигуна постійного струму М1 з вбудованим тахогенератором ВР1 та трансформатором

T1, блоку запобіжників U1, задатчика швидкості R1, пускової апаратури. В ланцюзі якоря двигуна M1 вмикається дросель L1.

У випадку використання електродвигуна з електромагнітним збудженням для живлення обмотки збудження ОЗМ1 використовується блок збудника U2, що підключається до третьої обмотки трансформатора T1 при напрузі ОЗМ1 110 В (при напрузі ОЗМ1 220 В блок U2 підключається до двох фаз силової вторинної обмотки T1) [2].

Система керування ЕП представляє собою двоконтурну систему керування частоти обертання валу двигуна з підлеглим струмовим контуром. Вона складається з пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора швидкості РШ, а керуючий орган КО зі зворотним зв'язком по струму виконує роль пропорційного регулятора струму.

Керування тиристорами ТПЯ виконується від трьохканальної СІФУ, що містить формувач імпульсів ФІ1...ФІ3. Введення керуючого сигналу у ФІ1...ФІ3, а також його зсув ($\alpha_{\text{нач}}$) і обмеження вузлів ($\alpha_{\text{хв}}$, $\alpha_{\text{макс}}$) здійснюється за допомогою змінних резисторів R26, R40, R39 відповідно керуючим органом КО. Переключення імпульсів керування з комплекту тиристорів "В" на комплект тиристорів "Н" перетворювача ТПЯ виконується блоком логічного пристрою ЛП, що працює у функції сигналу.

Заданий струм і вихідний сигнал датчика провідності вентилів ДП. Сигнал заданого напрямку струму на вхід ЛП надходить з виходу нелінійної ланки НЛ. Ланки НЛ і ФПЕ з резистором R47 утворюють пристрій лінеаризації характеристик ЕП в режимі переривчастого струму (РПС).

Для узгодження реверсивного сигналу НЛ і нереверсивної регулювальної характеристики КО служить перемикач характеристик ПХ, керований ЛП (ключі "В" і "Н").

Струмообмеження в даній системі регулювання забезпечується за рахунок обмеження вихідної напруги регулятора РШ резистором R22, що визначає максимальну уставку струму привода. Вузол залежного струмообмеження ВЗС

забезпечує зниження уставки струмообмеження у функції швидкості. Сигнал на вхід ВЗС надходить з тахогенератора BR1 через дільник R2, R7.

Блок захисту здійснює блокування виходу регулятора РШ і зняття керуючих імпульсів при вмиканні і спрацьовуванні захистів.

Блокування виходу РШ транзистором VT33 здійснюється у функції зміни швидкості тахогенератора і включення контакту "Робота" при рівності нулю сигналів завдання швидкості і тахогенератора вихід РШ шунтується VT33.

При цьому з БЗ на керуючий орган КО надходить сигнал, що переводить кути в $\alpha_{\text{макс}}$. Даний сигнал надходить на КО з БЗ і при спрацьовуванні одного з видів захисту [2].

Для подальшого аналізу та моделювання динамічних характеристик системи керування необхідно визначити параметри її ключових елементів. Розрахунок буде проведено на основі наведеної функціональної схеми (рисунок 3.3) та паспортних даних обраного обладнання.

До складу силового ланцюга ЕП, крім самого перетворювача, входять силовий трансформатор та згладжувальний дросель, параметри яких суттєво впливають на динаміку системи.

Технічні данні трансформатора наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Технічні дані трансформатора ТС - 6,3 04

Тип трансформатора	S_T , кВА	Напруга обмоток, В		Втрати холостого ходу $P_{x.x}$, Вт	Втрати короткого замикання $P_{к.з}$, Вт	Напруга короткого замикання $e_{к.з}$, %	Струм холостого ходу $I_{x.x}$, %
		1	2				
ТС - 6,3 04	5	380	104	75	115	4	15

Параметри згладжувального дроселя наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Параметри згладжувального дроселя ДСА 564

Номінальний струм I_n , А	Тип дроселя	Активний опір згладжувального дроселя $R_{др}$, Ом	Індуктивність дроселя $L_{др}$, мГн
25	ДСА 564	0,0083	0,001

Відповідно до функціональної схеми ЕТУ2-2П (рисунок 3.3), розраховуємо наступні параметри.

Індуктивність фаз трансформатора $L_{ф.тр}$, мГн,

$$L_{ф.тр} = \frac{1}{\omega_0} \cdot \sqrt{Z_{ф.тр}^2 - R_{ф.тр}^2}, \quad (3.2)$$

де ω_0 – кутова синхронна частота, рад/с;

$Z_{ф.тр}$ – повний опір фаз трансформатора, Ом;

$R_{ф.тр}$ – фазний активний опір трансформатора, Ом.

Кутова синхронна частота ω_0 , рад/с,

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_m, \quad (3.3)$$

де f_m – частота живильної мережі, $f_m = 50$ Гц.

$$\omega_0 = 2 \cdot 3,142 \cdot 50 = 314,159 \text{ рад/с.}$$

Повний опір фаз трансформатора $Z_{ф.тр}$, Ом,

$$Z_{ф.тр} = \frac{U_{л} \cdot e_{к.з}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{тр.ном}}, \quad (3.4)$$

де $U_{\text{л}}$ – лінійна напруга обмотки трансформатора, $U_{\text{л}} = 380$ В (таблиця 3.4);
 $e_{\text{к.з}}$ – напруга короткого замикання трансформатора, $e_{\text{к.з}} = 4$ % (таблиця 3.4);
 $I_{\text{тр.ном}}$ – номінальний струм трансформатора, А.

Номінальний струм трансформатора $I_{\text{тр.ном}}$, А,

$$I_{\text{тр.ном}} = \frac{S_{\text{т}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л2}}}, \quad (3.5)$$

де $S_{\text{т}}$ – повна потужність трансформатора, $S_{\text{т}} = 5000$ В·А (таблиця 3.4);
 $U_{\text{л2}}$ – лінійна напруга вторинної обмотки трансформатора, $U_{\text{л2}} = 104$ В (таблиця 3.4).

$$I_{\text{тр.ном}} = \frac{5000}{\sqrt{3} \cdot 104} = 27,757 \text{ А.}$$

Отримаємо повний опір фаз трансформатора за формулою (3.4):

$$Z_{\text{ф.тр}} = \frac{380 \cdot 4}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 27,757} = 0,316 \text{ Ом.}$$

Фазний активний опір трансформатора $R_{\text{ф.тр}}$, Ом,

$$R_{\text{ф.тр}} = R_{\text{ф}} = \frac{P_{\text{к.з}}}{3 \cdot I_{\text{тр.ном}}^2}, \quad (3.6)$$

де $P_{\text{к.з}}$ – потужність короткого замикання трансформатора, $P_{\text{к.з}} = 115$ Вт (таблиця 3.4).

$$R_{\phi.\text{тр}} = R_{\phi} = \frac{115}{3 \cdot 27,757^2} = 0,0498 \text{ Ом.}$$

Отримаємо індуктивність фаз трансформатора за формулою (3.2):

$$L_{\phi.\text{тр}} = \frac{1}{314,159} \cdot \sqrt{0,316^2 - 0,0498^2} = 0,001 \text{ мГн.}$$

Еквівалентний активний опір якріного ланцюга двигуна R_{ϵ} , Ом,

$$R_{\epsilon} = R_{\text{н}} + 2 \cdot R_{\phi 75} + \frac{m \cdot \omega_0 \cdot L_{\phi.\text{тр}}}{\pi}, \quad (3.7)$$

де $R_{\text{н}}$ – активний опір ланцюга навантаження випрямленого струму, Ом;

$R_{\phi 75}$ – фазний активний опір, наведений до температури 75°C;

m – число пульсацій за період, $m = 6$.

Активний опір ланцюга навантаження випрямленого струму $R_{\text{н}}$, Ом,

$$R_{\text{н}} = R_{\text{я}75} + R_{\text{др}75}, \quad (3.8)$$

де $R_{\text{я}75}$ – активний опір якоря двигуна, наведений до температури 75°C, Ом;

$R_{\text{др}75}$ – активний опір дроселя, наведений до температури 75°C, Ом.

Активний опір якоря двигуна, наведений до температури 75°C $R_{\text{я}75}$, Ом,

$$R_{\text{я}75} = R_{\text{я}} \cdot (1 + \alpha \cdot (75 - t)), \quad (3.9)$$

де $R_{\text{я}}$ – опір обмотки якоря при 15°C, $R_{\text{я}} = 0,0574$ (таблиця 3.1);

α – температурний коефіцієнт опору міді, $\alpha = 0,004$;

$t = 15^\circ\text{C}$.

$$R_{я75} = 0,0574 \cdot (1 + 0,004 \cdot (75 - 15)) = 0,0712 \text{ Ом.}$$

Активний опір дроселя, наведений до температури 75°C $R_{др75}$, Ом,

$$R_{др75} = R_{др} \cdot (1 + \alpha \cdot (75 - t)), \quad (3.10)$$

де $R_{др}$ – активний опір згладжувального дроселя, $R_{др} = 0,0083$ Ом (таблиця 3.5).

$$R_{др75} = 0,0083 \cdot (1 + 0,004 \cdot (75 - 15)) = 0,0103 \text{ Ом.}$$

Отримаємо активний опір ланцюга навантаження випрямленого струму за формулою (3.8):

$$R_{н} = 0,0712 + 0,0103 = 0,0815 \text{ Ом.}$$

Фазний активний опір, наведений до температури 75°C $R_{ф75}$, Ом,

$$R_{ф75} = R_{ф.тр} \cdot (1 + \alpha \cdot (75 - t)), \quad (3.11)$$

$$R_{ф75} = 0,0498 \cdot (1 + 0,004 \cdot (75 - 15)) = 0,0617 \text{ Ом.}$$

Отримаємо еквівалентний активний опір якірного ланцюга двигуна за формулою (3.7):

$$R_{\epsilon} = 0,0815 + 2 \cdot 0,0617 + \frac{6 \cdot 314,152 \cdot 0,001}{3,142} = 0,801 \text{ Ом.}$$

Еквівалентна індуктивність якірного ланцюга L_{ϵ} , мГн,

$$L_e = L_y + L_{др} + L_{ф.тр}, \quad (3.12)$$

де L_y – індуктивність обмотки якоря, $L_y = 0,422$ мГн (таблиця 3.1);

$L_{др}$ – індуктивність дроселя якірного ланцюга, $L_{др} = 0,001$ мГн (таблиця 3.5).

$$L_e = 0,422 + 0,001 + 0,001 = 0,424 \text{ мГн.}$$

Сумарний опір в ланцюгу тахогенератора $R_{\Sigma ТГ}$, кОм,

$$R_{\Sigma ТГ} = \frac{U_{ТГ.М}}{U_{з.М}} \cdot R_{зад}, \quad (3.13)$$

де $U_{ТГ.М}$ – максимальне значення напруги тахогенератора, відповідно максимальному (або номінальному) значенню швидкості двигуна, В;

$U_{з.М}$ – максимальне значення напруги задаючого сигналу, відповідно максимальному (або номінальному) значенню швидкості двигуна, $U_{з.М} = 10$ В;

$R_{зад}$ – опір у ланцюгу задання швидкості, кОм.

Максимальне значення напруги тахогенератора, відповідно максимальному (або номінальному) значенню швидкості двигуна $U_{ТГ.М}$, В,

$$U_{ТГ.М} = S_{ТГ} \cdot n_{\max}, \quad (3.14)$$

де $S_{ТГ}$ – крутизна тахогенератора, $S_{ТГ} = 0,02$ В·хв (таблиця 3.2);

$n_{\max}$ – максимальна частота обертання обраного двигуна в тривалому режимі, $n_{\max} = 2000$ об/хв.

$$U_{ТГ.М} = 0,02 \cdot 2000 = 40 \text{ В.}$$

Опір у ланцюгу задання швидкості $R_{зад}$, кОм

$$R_{\text{зад}} = R_4 + R_{10}, \quad (3.15)$$

де R_4, R_{10} – резистори у ланцюгу задання швидкості, у діапазоні регулювання швидкості менш 1:1000 можливо, $R_4 = R_{10} = 2,7$ кОм.

$$R_{\text{зад}} = 2,7 + 2,7 = 5,4 \text{ кОм.}$$

Отримаємо сумарний опір в ланцюгу тахогенератора за формулою (3.13):

$$R_{\Sigma\text{тг}} = \frac{40}{10} \cdot 5,4 = 21,6 \text{ кОм.}$$

Електромагнітна постійна часу двигуна з механізмом та еквівалентним навантаженням якірного ланцюга привода T_e , с,

$$T_e = \frac{L_e}{R_e}, \quad (3.16)$$

$$T_e = \frac{0,424}{0,801} = 0,529 \text{ с.}$$

Електромеханічна постійна часу двигуна з механізмом та еквівалентним навантаженням якірного ланцюга привода T_m , с,

$$T_m = \frac{J'_\Sigma \cdot R_e}{C_{\text{дв}}^2}, \quad (3.17)$$

де J'_Σ – сумарний приведений до валу двигуна момент інерції, кг·м²;
 $C_{\text{дв}}$ – постійна двигуна, В·с.

Сумарний приведений до валу двигуна момент інерції J'_Σ , кг·м²,

$$J'_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + J'_{\text{мех}}, \quad (3.18)$$

де $J_{\text{дв}}$ – момент інерції якоря двигуна, $J_{\text{дв}} = 2,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;

$J'_{\text{мех}}$ – момент інерції механізму, $J'_{\text{мех}} = 3,096 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

$$J'_{\Sigma} = 2,7 + 3,096 \cdot 10^{-3} = 2,703 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Постійна двигуна $c_{\text{дв}}$, В·с,

$$c_{\text{дв}} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} \cdot R_{\text{я}} \cdot \beta_t}{\omega_{\text{н}}}, \quad (3.19)$$

де β_t – температурний коефіцієнт, $\beta_t = 1,24$;

$\omega_{\text{н}}$ – номінальна кутова частота обертання двигуна, рад/с.

Номінальна кутова частота обертання двигуна $\omega_{\text{н}}$, рад/с,

$$\omega_{\text{н}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{н}}}{60}, \quad (3.20)$$

$$\omega_{\text{н}} = \frac{2 \cdot 3,142 \cdot 2000}{60} = 209,44 \text{ рад/с}.$$

Отримаємо постійну двигуна за формулою (3.19):

$$c_{\text{дв}} = \frac{53 - 50 \cdot 0,0574 \cdot 1,24}{209,44} = 23,606 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

Отримаємо електромеханічну постійну часу двигуна з механізмом та еквівалентним навантаженням якірного ланцюга привода за формулою (3.17):

$$T_m = \frac{2,703 \cdot 0,801}{23,606^2} = 0,00389 \text{ с.}$$

Необхідно враховувати, що значення встановлюваних елементів, отримані розрахунковим шляхом, не можуть урахувати таких факторів, як розкид параметрів трансформатора, двигуна, дроселя, механізму, сполучних проводів, встановлюваних на платі керування, погрішностей при налагодженні і т. п. Тому більш точним способом є експериментальний [2].

3.4 Висновки до розділу 3

- обґрунтовано доцільність застосування системи ЕП на базі високомоментного ДПС для вирішення поставлених задач;
- на основі розрахункових вимог обрано електродвигун типу ПБВ-100L, наведено його технічні характеристики та параметри комплектного тахогенератора;
- проаналізовано переваги системи підпорядкованого регулювання та обрано сумісний комплектний ЕП типу ЭТУ2-2П;
- розглянуто функціональну схему обраного ЕП та розраховано параметри його силових елементів і основні електромеханічні та електромагнітні постійні часу для подальшого моделювання.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ДИНАМІКИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

4.1 Математичний опис системи керування електропривода

Система керування ЕП представляє собою двоконтурну систему керування частоти обертання вала двигуна з підлеглим струмовим контуром.

В структурній схемі системи керування ЕП (рисунок 4.1) вихідний сигнал регулятора швидкості, включений у зовнішній контур, є задаючим для регулятора струму, включеного у внутрішній контур. Налаштування регуляторів відбувається незалежно і послідовно від внутрішнього контуру до зовнішнього [2].

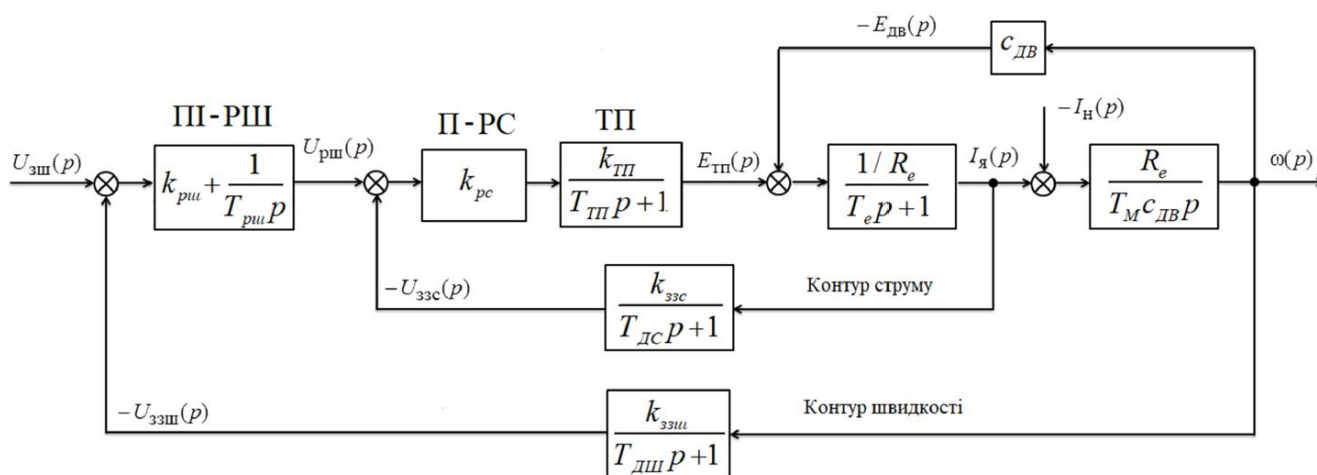


Рисунок 4.1 – Структурна схема системи керування ЕП

Структурна схема складається з пропорційно-інтегрального регулятора швидкості, пропорційного регулятора струму, тиристорного перетворювача, ДПС та датчиків зворотного зв'язку.

Передатна функція двигуна складається з електромагнітної частини з передатною функцією $W_{e.дв}(p)$,

$$W_{\text{е.дв}}(p) = \frac{1/R_e}{T_e p + 1}, \quad (4.1)$$

$$W_{\text{е.дв}}(p) = \frac{1/0,801}{0,529p + 1} = \frac{1,248}{0,529p + 1},$$

та з електромеханічної частини з передатною функцією $W_{\text{м.дв}}(p)$,

$$W_{\text{м.дв}}(p) = \frac{R_e}{T_m \cdot c_{\text{дв}} p}, \quad (4.2)$$

$$W_{\text{м.дв}}(p) = \frac{0,801}{0,00389 \cdot 23,606 p} = \frac{0,801}{0,0917 p}.$$

Розрахунок параметрів регулятора та елементів контуру регулювання струму виконується відповідно до схеми контуру струму (рисунок 4.2).

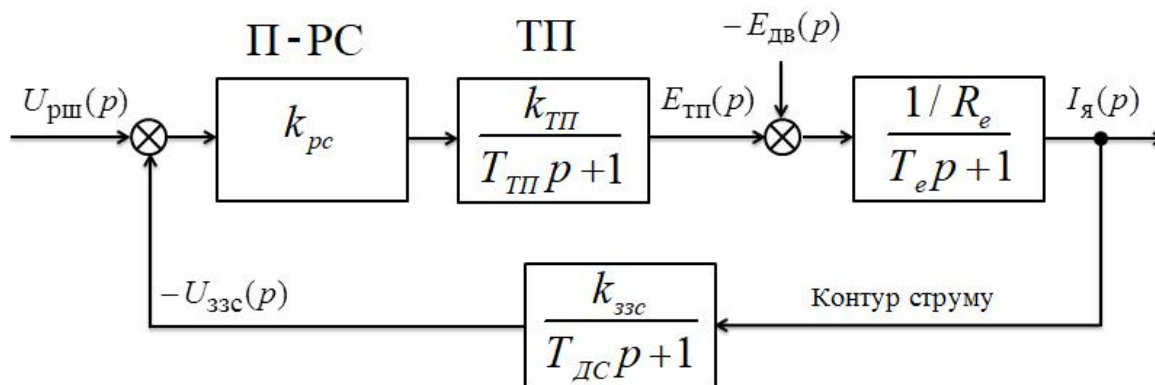


Рисунок 4.2 – Схема контуру струму

Контур струму складається з об'єкта регулювання – ланцюга якоря двигуна, силового перетворювача і регулятора струму. Контур замикається зворотним зв'язком по величині напруги, що знімається з датчика струму в ланцюзі якоря.

Передатна функція зворотного зв'язку за струмом $W_{\text{ззс}}(p)$,

$$W_{33c}(p) = \frac{k_{33c}}{T_{dc}p + 1}, \quad (4.3)$$

де k_{33c} – передавальний коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом;

T_{dc} – стала часу фільтра датчика струму, $T_{dc} = 0,34 \cdot 10^{-3}$ с.

Передавальний коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом, В/А.

$$k_{33c} = \frac{U_{33c}}{I_{\max}}, \quad (4.4)$$

де U_{33c} – напруга зворотного зв'язку за струмом, $U_{33c} = 10$ В;

$I_{\max}$ – максимально припустимий струм двигуна при перехідних процесах, А.

Максимально припустимий струм двигуна при перехідних процесах $I_{\max}$, А,

$$I_{\max} = 2 \cdot I_n, \quad (4.5)$$

де I_n – номінальний струм двигуна, $I_n = 50$ А (таблиця 3.1).

$$I_{\max} = 2 \cdot 50 = 100 \text{ А},$$

що відповідає режиму роботи в номінальних обертах. При зменшенні обертів нижче величина буде коректуватися вузлом залежного струмообмеження ВЗСО (у бік збільшення).

Отримаємо передавальний коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом за формулою (4.4):

$$k_{33c} = \frac{10}{100} = 0,1$$

Отримуємо передатну функцію зворотного зв'язку за струмом згідно з формулою (4.3):

$$W_{ззс}(p) = \frac{0,1}{0,34 \cdot 10^{-3} p + 1}.$$

Коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача $k_{тп}$,

$$k_{тп} = \frac{E_{0п}}{U_{к.мах}}, \quad (4.6)$$

де $E_{0п}$ – значення випрямленої ЕРС ТП при цілком відкритих тиристорах, В.

$U_{к.мах}$ – напруга керування на вході ТП, що відповідає максимальній ЕРС на виході, $U_{к.мах} = 10$ В.

Значення випрямленої ЕРС ТП при цілком відкритих тиристорах $E_{0п}$, В.

$$E_{0п} = U_{мах} + R_{еп} \cdot I_{тр.ном}, \quad (4.7)$$

$$E_{0п} = 106 + 0,72 \cdot 27,757 = 125,985 \text{ В.}$$

Отримаємо коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача за формулою (4.6):

$$k_{тп} = \frac{125,985}{10} = 12,598.$$

Постійна часу тиристорного перетворювача $T_{тп}$, с.

$$T_{тп} = \frac{1}{p \cdot f_m}, \quad (4.8)$$

$$T_{\text{тп}} = \frac{1}{6 \cdot 50} = 3,33 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Для практичних розрахунків передатну функцію ТП можна уявити у вигляді інерційної ланки $W_{\text{тп}}(p)$,

$$W_{\text{тп}}(p) = \frac{k_{\text{тп}}}{T_{\text{тп}}p + 1}, \quad (4.9)$$

$$W_{\text{тп}}(p) = \frac{12,598}{3,33 \cdot 10^{-3}p + 1}$$

4.2 Синтез регуляторів системи керування

4.2.1 Налагодження регулятора струму

Схема П-регулятора струму представлена на рисунку 4.3.

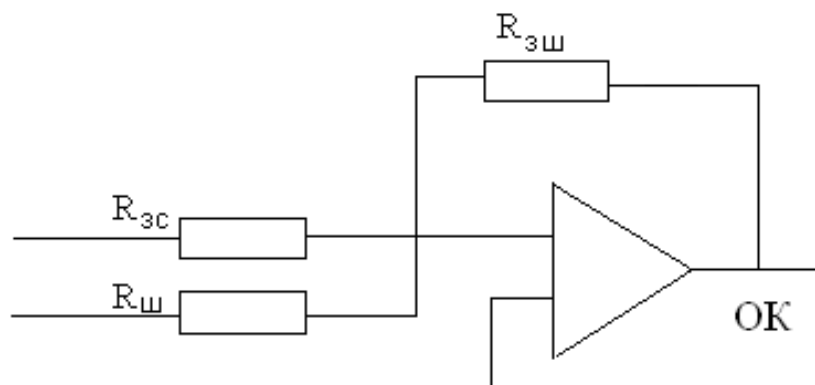


Рисунок 4.3 – Схема П-регулятора струму

Знаходимо опір шунта $R_{\text{ш}}$, Ом,

$$R_{\text{ш}} = \frac{k_{\text{ш}} \cdot k_{\text{дс}} \cdot R_{\text{зс}}}{k_{\text{зс}}}, \quad (4.10)$$

де $k_{ш}$ – коефіцієнт передачі шунта;

$k_{дс}$ – коефіцієнт передачі датчика струму якоря;

$R_{зс}$ – опір резистора від’ємного зворотного зв’язку, $R_{зс} = 2,486 \cdot 10^3$ Ом.

При протіканні номінального струму падіння напруги на шунті становить 75 мВ, тому коефіцієнт передачі шунта $k_{ш}$, В/А,

$$k_{ш} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{I_{нш}}, \quad (4.11)$$

де $I_{нш}$ – номінальний струм шунта, А.

Обираємо номінальний струм шунта $I_{нш}$ з ряду 10, 20, 40, 100, 200 А по номінальному струму тиристорного перетворювача, отримаємо $I_{нш} = 40$ А.

$$k_{ш} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{40} = 0,00188.$$

Коефіцієнт передачі датчика струму якоря $k_{дс}$,

$$k_{дс} = \frac{10}{75 \cdot 10^{-3}} = 133,333, \quad (4.12)$$

Отримаємо опір шунта за формулою (4.10):

$$R_{ш} = \frac{0,00188 \cdot 133,333 \cdot 2,486 \cdot 10^3}{0,1} = 6214,984 \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт передачі регулятора струму $k_{прс}$,

$$k_{\text{прс}} = \frac{R_{\epsilon} \cdot T_{\epsilon}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{ззс}}}, \quad (4.13)$$

де T_{μ} – мала постійна часу, яку називають некомпенсованою малою постійною часу, с.

Мала постійна часу, яку називають некомпенсованою малою постійною часу T_{μ} , с,

$$T_{\mu} = T_{\text{тп}} + T_{\text{дс}}, \quad (4.14)$$

$$T_{\mu} = 0,00333 + 0,34 \cdot 10^{-3} = 0,00367 \text{ с.}$$

Отримаємо коефіцієнт передачі регулятора струму за формулою (4.13):

$$k_{\text{прс}} = \frac{0,801 \cdot 0,529}{2 \cdot 0,00367 \cdot 12,598 \cdot 0,1} = 45,809.$$

Постійна часу регулятора струму $T_{\text{прс}}$, с:

$$T_{\text{прс}} = \frac{T_{\epsilon}}{k_{\text{прс}}}, \quad (4.15)$$

$$T_{\text{прс}} = \frac{0,529}{45,809} = 0,0116 \text{ с.}$$

Розрахунок параметрів регулятора та елементів контуру швидкості виконується відповідно до схеми контуру швидкості (рисунок 4.4).

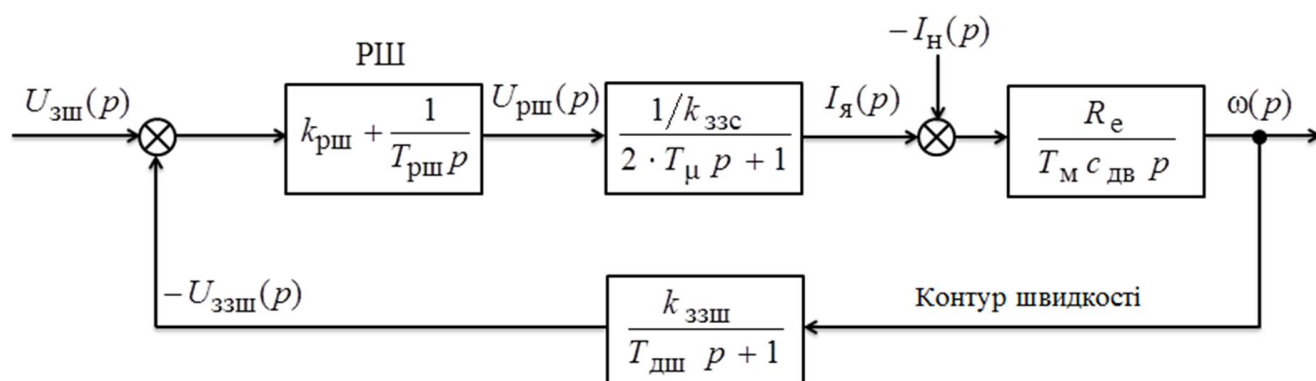


Рисунок 4.4 – Схема контуру швидкості

Об'єктом регулювання зовнішнього контуру швидкості є замкнутий контур струму і ланка, що описує механічний опір двигуна.

Передатна функція об'єкту регулювання контуру швидкості $W_{оркш}(p)$,

$$W_{оркш}(p) = \frac{1/k_{ззс}}{2 \cdot T_{\mu} p + 1} \cdot \frac{k_{\mu}}{T_{\mu} p}, \quad (4.16)$$

де $k_{\mu} = \frac{R_e}{c_{дв}},$

$$k_{\mu} = \frac{0,801}{23,606} = 0,0339.$$

Отримаємо передатну функцію об'єкту регулювання контуру швидкості за формулою (4.16):

$$W_{оркш}(p) = \frac{10}{0,00735 p + 1} \cdot \frac{0,0339}{0,00389 p}.$$

Передатна функція зворотного зв'язку за швидкістю $W_{ззш}(p)$:

$$W_{ззш}(p) = \frac{k_{ззш}}{T_{дш} p + 1}, \quad (4.17)$$

де $k_{ззш}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю;

$T_{дш}$ – стала часу фільтра датчика швидкості, $T_{дш} = 0,34 \cdot 10^{-3}$ с.

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю $k_{ззш}$, В·с,

$$k_{ззш} = \frac{U_{ззш}}{\omega_{\max}}, \quad (4.18)$$

де $U_{ззш}$ – напруга зворотного зв'язку за максимальною швидкістю, $U_{ззш} = 10$ В;

$\omega_{\max}$ – максимальна кутова швидкість двигуна, рад/с.

$$\omega_{\max} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\max}}{60}, \quad (4.19)$$

$$\omega_{\max} = \frac{2 \cdot 3,142 \cdot 2000}{60} = 209,44 \text{ рад/с.}$$

Отримаємо коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю за формулою (4.18):

$$k_{ззш} = \frac{10}{209,44} = 0,0477 \text{ В·с.}$$

Отримаємо передатну функцію зворотного зв'язку за швидкістю за формулою (4.17):

$$W_{ззш}(p) = \frac{0,0477}{0,34 \cdot 10^{-3} p + 1}.$$

Об'єкт регулювання характеризується великою постійною часу T_m , для компенсації якої можна застосувати П- або ПІ-регулятори швидкості. Системи підпорядкованого регулювання з ПІ-регулятором швидкості є інтегрованими однократно. Вони мають достатньо високу швидкодію і мале перерегулювання

перехідних процесів, проте мають значний статизм. Такі системи ЕП не спроможні забезпечити великий діапазон регулювання швидкості.

4.2.2 Налагодження П-регулятора швидкості

Передатна функція контуру швидкості з П-регулятором $W_{\text{прш}}(p)$,

$$W_{\text{прш}}(p) = k_{\text{прш}} \cdot \frac{1/k_{\text{ззс}}}{T_{\mu\text{ш}}p + 1} \cdot \frac{k_{\text{ззш}} \cdot k_{\text{м}}}{T_{\text{м}}p}, \quad (4.20)$$

де $k_{\text{прш}}$ – коефіцієнт передачі регулятора швидкості;

$T_{\mu\text{ш}}$ – еквівалентна стала часу контуру швидкості, с.

Коефіцієнт передачі регулятора швидкості $k_{\text{прш}}$,

$$k_{\text{прш}} = \frac{J'_{\Sigma\text{пр}} \cdot k_{\text{ззс}}}{2 \cdot T_{\mu\text{ш}} \cdot c_{\text{дв}} \cdot k_{\text{ззш}}}, \quad (4.21)$$

де $J'_{\Sigma\text{пр}}$ – сумарний момент інерції привода, кг·м².

$T_{\mu\text{ш}}$ – еквівалентна постійна часу контуру швидкості, с.

Сумарний момент інерції привода, $J'_{\Sigma\text{пр}}$ кг·м²,

$$J'_{\Sigma\text{пр}} = J'_{\text{мех}} + J_{\text{дв}}, \quad (4.22)$$

$$J'_{\Sigma\text{пр}} = 0,031 + 2,7 = 2,703 \text{ кг·м}^2.$$

Еквівалентна постійна часу контуру швидкості $T_{\mu\text{ш}}$, с,

$$T_{\mu\text{ш}} = 2 \cdot T_{\mu} + T_{\text{дш}}, \quad (4.23)$$

$$T_{\mu\text{ш}} = 2 \cdot 0,00367 + 0,34 \cdot 10^{-3} = 0,00769 \text{ с.}$$

Отримаємо коефіцієнт передачі регулятора швидкості за формулою (4.21):

$$k_{\text{прш}} = \frac{2,703 \cdot 0,1}{2 \cdot 0,00769 \cdot 23,606 \cdot 0,0477} = 15,6.$$

Визначення коефіцієнта $k_{\text{прш}}$ за формулою характеризує налагодження контуру по модульному (технічному) оптимуму з коефіцієнтом демпфування перехідного процесу $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2}$.

Отримаємо передатну функцію контуру швидкості з П-регулятором за формулою (4.20):

$$W_{\text{прш}}(p) = 15,6 \cdot \frac{10}{0,00769p + 1} \cdot \frac{0,00162}{0,00389p}.$$

Перехідна функція оптимізованого контуру швидкості $W_{\text{окш}}(p)$:

$$W_{\text{окш}}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu\text{ш}} p \cdot (T_{\mu\text{ш}} p + 1)}, \quad (4.24)$$

$$W_{\text{окш}}(p) = \frac{1}{0,0154p \cdot (0,00769p + 1)}.$$

тобто перехідний процес визначає тільки малу постійну часу $T_{\mu\text{ш}}$.

4.2.3 Налагодження ПІ-регулятора швидкості

Передатна функція розімкнутого контуру швидкості з ПІ-регулятором $W_{\text{пірш}}(p)$,

$$W_{\text{пiрш}}(p) = k_{\text{пiрш}} \cdot \frac{1 + T'_{\text{рш}} p}{T'_{\text{рш}} p} \cdot \frac{1}{k_{\text{ззс}}} \cdot \frac{1}{T_{\text{мш}} p + 1} \cdot \frac{k_{\text{ззш}} \cdot k_{\text{м}}}{T_{\text{м}} p}, \quad (4.25)$$

де $k_{\text{пiрш}}$ – коефіцієнт передачі регулятора швидкості;

$T'_{\text{рш}} = 4 \cdot T_{\text{мш}}$ при стандартному налагодженні на симетричний оптимум,

$$T'_{\text{рш}} = 4 \cdot 0,00769 = 0,0307 \text{ с.}$$

Коефіцієнт передачі регулятора швидкості $k_{\text{пiрш}}$,

$$k_{\text{пiрш}} = \frac{T_{\text{м}} \cdot c_{\text{дв}} \cdot k_{\text{ззс}}}{2 \cdot T_{\text{мш}} \cdot R_{\text{е}} \cdot k_{\text{ззш}}}, \quad (4.26)$$

$$k_{\text{пiрш}} = \frac{0,00389 \cdot 23,606 \cdot 0,1}{2 \cdot 0,00769 \cdot 0,801 \cdot 0,0477} = 15,6.$$

Отримаємо передатну функцію розімкнутого контуру швидкості з ПІ-регулятором за формулою (4.25):

$$W_{\text{пiрш}}(p) = 15,6 \cdot \frac{1 + 0,0307 p}{0,0307 p} \cdot \frac{1}{0,1} \cdot \frac{1}{0,00769 p + 1} \cdot \frac{0,00162}{0,00389 p}.$$

Підставивши значення $k_{\text{пiрш}}$ і $T'_{\text{рш}}$ в (4.25), отримаємо передатну функцію регулятора швидкості, оптимізовану на симетричний оптимум $W_{\text{орш}}(p)$,

$$W_{\text{орш}}(p) = \frac{1 + 4 \cdot T_{\text{мш}} p}{8 \cdot T_{\text{мш}}^2 p^2 \cdot (1 + T_{\text{мш}} p)}, \quad (4.27)$$

$$W_{\text{орш}}(p) = \frac{1 + 0,0307 p}{0,000473 p^2 \cdot (1 + 0,00769 p)},$$

тобто регулятор компенсував велику постійну часу T_m , і динамічні властивості контуру визначаються тільки по малій постійній часу $T_{\mu\text{ш}}$.

Передатна функція ПІ-регулятора швидкості, оптимізована на симетричний оптимум $W_{\text{опірш}}(p)$,

$$W_{\text{опірш}}(p) = k_{\text{пірш}} \cdot \frac{1 + T'_{\text{рш}} p}{T'_{\text{рш}} p} = k_{\text{пірш}} + \frac{1}{T_{\text{рш}} p}, \quad (4.28)$$

$$W_{\text{опірш}}(p) = 15,6 + \frac{1}{0,00197 p}.$$

Передатна функція фільтра на вході системи керування з ПІ-регулятором швидкості $W_{\phi}(p)$,

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{1 + 4 \cdot T_{\mu\text{ш}} p}, \quad (4.29)$$

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{1 + 0,0307 p}.$$

4.2.4 Розрахунок параметрів ПІ-регулятора швидкості

Для розрахунку параметрів регулятора (рисунок 4.5) задаємось величиною напруги, що знімається з тахогенератора (на практиці залежить від обраного тахогенератора), $U_{\text{тг}}$ В, отримаємо $U_{\text{тг}} = 10$ В.

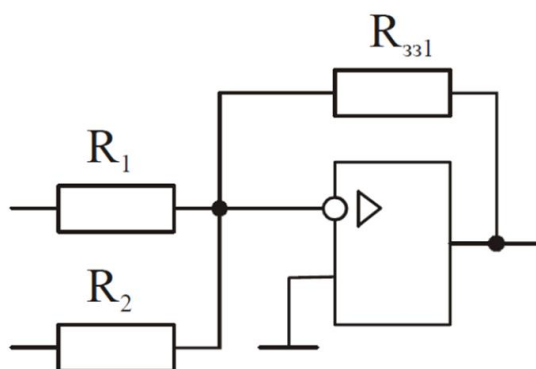


Рисунок 4.5 – П-регулятор швидкості

Коефіцієнт передачі тахогенератора $k_{\text{тг}}$, В·с,

$$k_{\text{тг}} = \frac{U_{\text{тг}}}{\omega_{\text{н}}}, \quad (4.30)$$

$$k_{\text{тг}} = \frac{10}{209,44} = 0,0477 \text{ В·с.}$$

Опір резистора від'ємного зворотного зв'язку R_{331} , Ом,

$$R_{331} = k_{\text{пш}} \cdot R_1, \quad (4.31)$$

де R_1 – вхідний резистор регулятора швидкості, $R_1 = 10^4$ Ом.

$$R_{331} = 15,6 \cdot 10^4 = 1,56 \cdot 10^5 \text{ Ом.}$$

Опір резистора R_2 , Ом,

$$R_2 = \frac{k_{\text{тг}} \cdot R_1}{k_{33\text{ш}}}, \quad (4.32)$$

$$R_2 = \frac{0,0477 \cdot 10^4}{0,0477} = 1 \cdot 10^4 \text{ Ом.}$$

4.2.5 Розрахунок параметрів ІІІ-регулятора швидкості

Схема ІІІ-регулятора швидкості показана на рисунку 4.6.

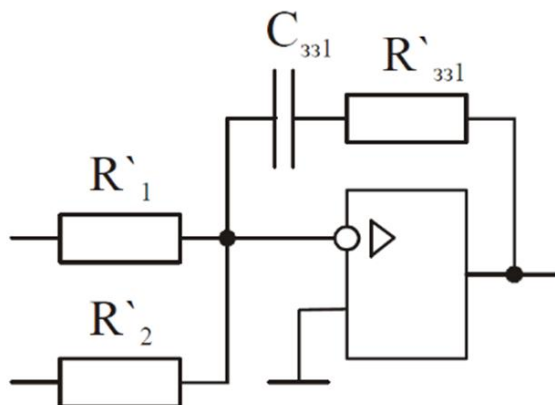


Рисунок 4.6 – ІІІ-регулятор швидкості

Для розрахунку параметрів регулятора (рисунки 4.7) задаємося величиною ємності C_{331} Ф,

$$C_{331} = 10^{-6} \text{ Ф.}$$

звідки знаходимо R'_{331} , Ом,

$$R'_{331} = \frac{T'_{рш}}{C_{331}}, \quad (4.33)$$

$$R'_{331} = \frac{0,0307}{10^{-6}} = 3,0747 \cdot 10^4 \text{ Ом.}$$

Опір вхідних резисторів R'_1 та R'_2 , Ом:

$$R'_1 = \frac{T_{рш}}{C_{331}}, \quad (4.34)$$

$$R'_1 = \frac{0,00197}{10^{-6}} = 1970 \text{ Ом;}$$

$$R'_2 = \frac{k_{\text{тг}} \cdot R'_1}{k_{\text{ззш}}}, \quad (4.35)$$

$$R'_2 = \frac{0,0477 \cdot 1970}{0,0477} = 1970 \text{ Ом.}$$

Початкові дані та передатні функції для розрахунку перехідних процесів зведено у таблицях 4.1 та 4.2 відповідно.

Таблиця 4.1 – Початкові дані для розрахунку перехідних процесів

Параметри	Значення
Постійна ЕРС двигуна, В/(об/хв)	$c_{\text{дв}} = 23,606$
Еквівалентний опір якірного ланцюга двигуна, Ом	$R_{\text{е}} = 0,801$
Електромеханічна постійна часу якірного ланцюга, с	$T_{\text{м}} = 0,00389$
Електромагнітна постійна часу якірного ланцюга, с	$T_{\text{е}} = 0,529$
Постійна часу тиристорного перетворювача, с	$T_{\text{тп}} = 0,00333$
Коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача	$k_{\text{тп}} = 12,598$
Коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора швидкості	$k_{\text{пірш}} = 15,6$
Коефіцієнт підсилення П-регулятора швидкості	$k_{\text{прш}} = 15,6$
Коефіцієнт підсилення П-регулятора струму	$k_{\text{прс}} = 45,809$
Передатний коефіцієнт датчика струму, В/А	$k_{\text{ззс}} = 0,1$
Передатний коефіцієнт датчика швидкості, В·с	$k_{\text{ззш}} = 0,0477$
Постійна часу датчика швидкості, с	$T_{\text{дш}} = 0,34 \cdot 10^{-3}$
Постійна часу датчика струму, с	$T_{\text{дс}} = 0,34 \cdot 10^{-3}$
Постійна часу ПІ-регулятора швидкості, с	$T_{\text{рш}} = 0,00197$
Еквівалентна постійна часу контуру швидкості, с	$T_{\text{мш}} = 0,00769$

Таблиця 4.2 – Передатні функції для розрахунку перехідних процесів

Назва	Формула
ПІ-регулятор швидкості	$W_{\text{пірш}}(p) = k_{\text{пірш}} + \frac{1}{T_{\text{рш}} p}$
П-регулятор швидкості	$W_{\text{прш}}(p) = k_{\text{прш}}$
П-регулятор струму	$W_{\text{прс}}(p) = k_{\text{прс}}$
Тиристорний перетворювач	$W_{\text{прс}}(p) = \frac{k_{\text{тп}}}{T_{\text{тп}} p + 1}$

4.3 Моделювання та аналіз динамічних характеристик САК

4.3.1 Моделювання динамічних характеристик САК

Для дослідження динамічних характеристик системи керування електропривода, представленої на рисунку 4.1, відповідно до математичного опису, моделюємо систему керування з використанням пакета Simulink програми MatLab. Були розроблені структурні схеми динамічних моделей системи з різними законами керування.

На рисунку 4.7 показана схема замкненої системи з ПІ-регулятором швидкості.

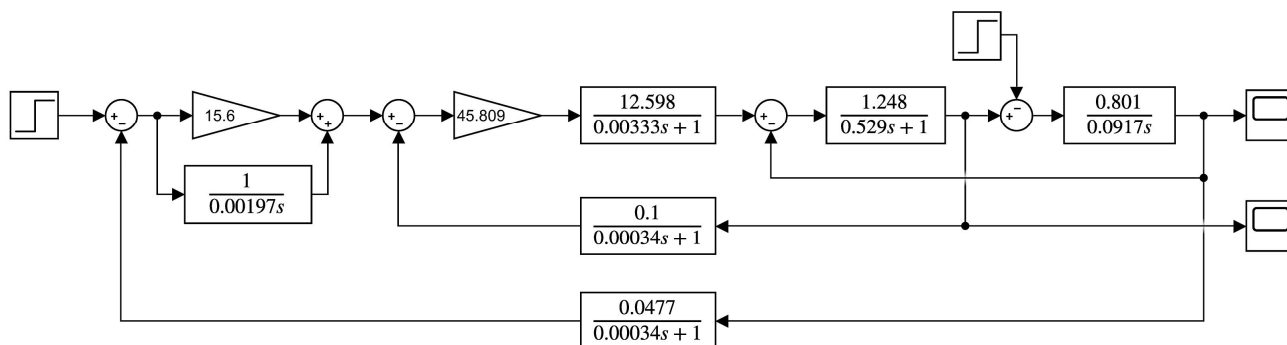


Рисунок 4.7 – Структурна схема системи з ПІ-регулятором швидкості

На рисунку 4.8 показана схема замкненої системи з П-регулятором швидкості.

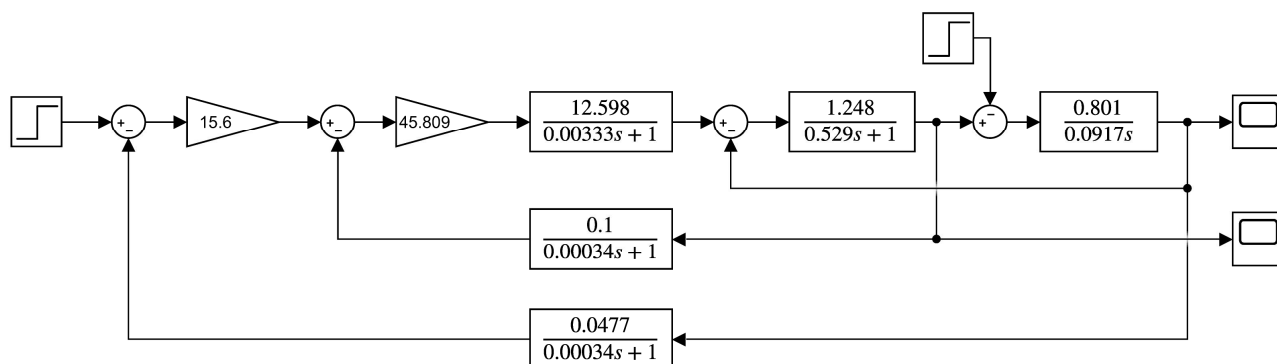


Рисунок 4.8 – Структурна схема системи з П-регулятором швидкості

На рисунку 4.9 показана схема замкнутої системи з ПІ-регулятором швидкості і фільтром на вході в систему.

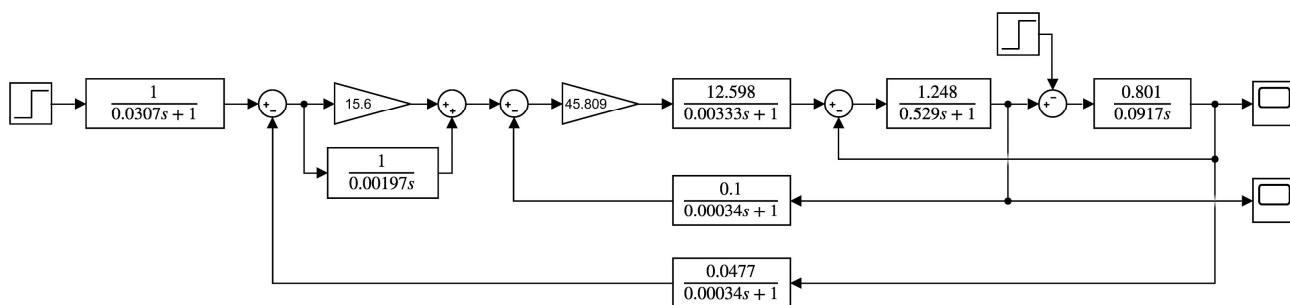


Рисунок 4.9 – Структурна схема системи з ПІ-регулятором швидкості і фільтром

4.3.2 Аналіз динамічних характеристик САК

На основі даних схем був проведений аналіз динамічних властивостей системи автоматичного керування (САК) при зміні законів керування при розрахункових параметрах які представлені в таблиці 4.1.

Результати аналізу перехідних процесів за швидкістю показані на рисунку 4.10, а для перехідних процесів за струмом на рисунку 4.11.

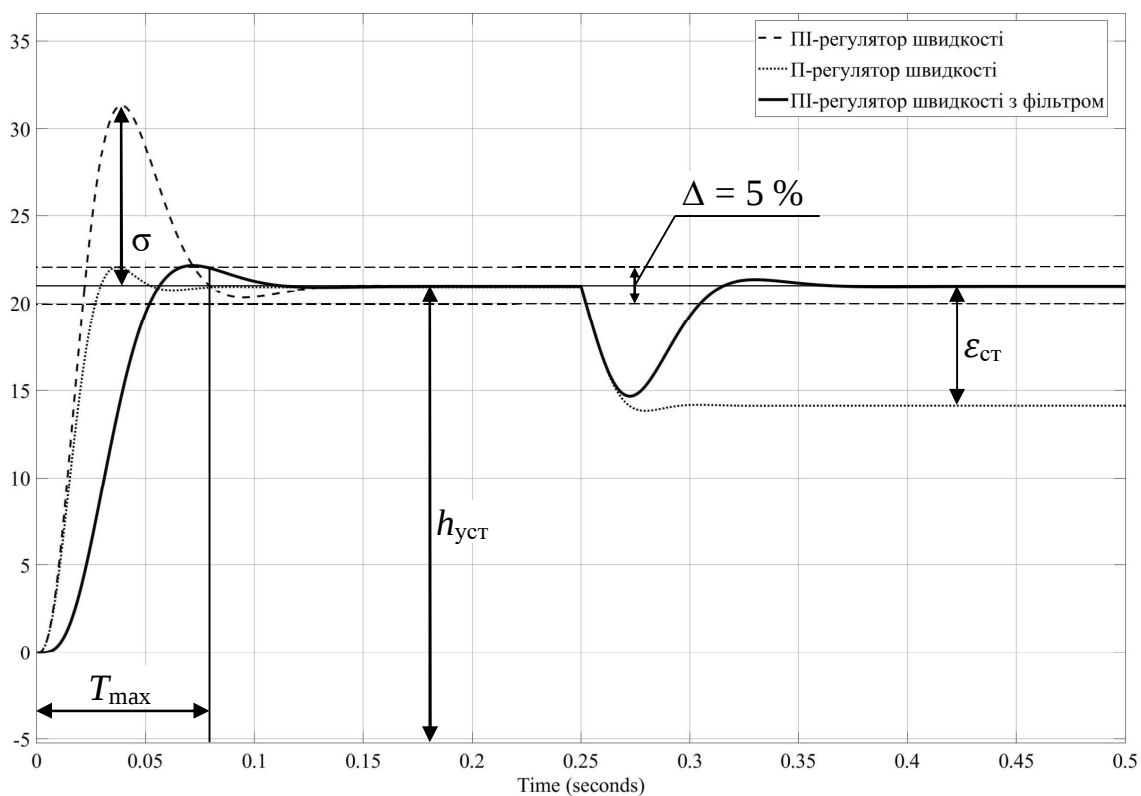


Рисунок 4.10 – Перехідні процеси по швидкості

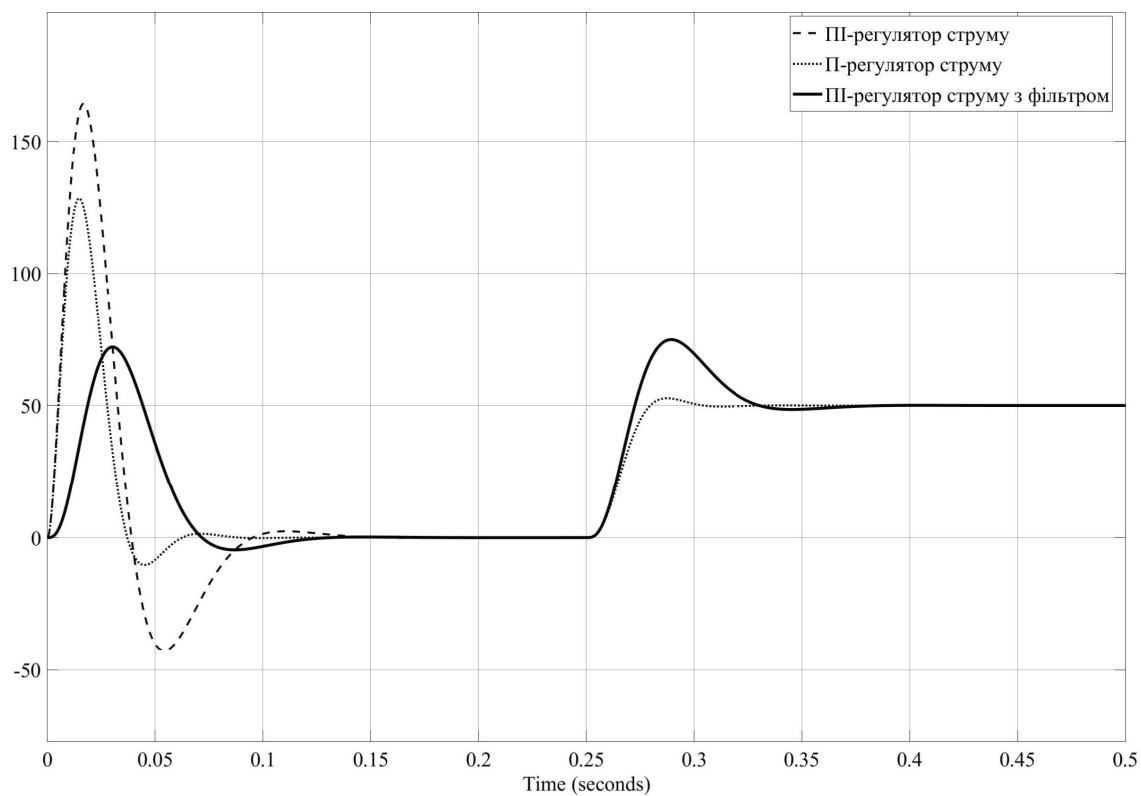


Рисунок 4.11 – Перехідні процеси по струму

Основні показники якості регулювання зведені в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Основні показники якості регулювання

Тип регулятора	$h_{уст}, c^{-1}$	h_{max}, c^{-1}	$\sigma, \%$	T_{max}, c	$\varepsilon_{ст}, \%$	N
ПІ-регулятор	21	31,3	49,4	0,0725	0	1
П-регулятор	21	22,1	5,48	0,0401	32,49	1
ПІ-регулятор та фільтр на вході	21	22,2	5,69	0,0794	0	1

За графіками змодельованих перехідних процесів системи ми бачимо, що найкращих показників перехідних процесів можна отримати, включивши ПІ-регулятор, налагоджений на симетричний оптимум, у контур регулювання швидкості. При цьому, високе значення перерегулювання, характерне для цього налагодження, зменшується шляхом включення на вхід системи керування фільтра.

Отримані наступні результати дослідження:

1. При застосуванні пропорційно-інтегрального закону регулювання (ПІ-регулятор) перерегулювання склало $\sigma = 49,4 \%$, час перехідного процесу (за входом кривої в п'ятивідсоткову зону щодо встановленого значення) $T_{max} = 0,0725$ с, статична похибка відсутня.
2. При застосуванні пропорційного закону регулювання (П-регулятор) перерегулювання становило $\sigma = 5,48 \%$, час перехідного процесу зменшився до $T_{max} = 0,0401$ с, але при цьому виникла велика статична похибка $\varepsilon = 32,49 \%$.
3. При введенні аперіодичної ланки (у якості фільтра) на вхід системи керування з ПІ-регулятором перерегулювання склало $\sigma = 5,69 \%$, час перехідного процесу $T_{max} = 0,0794$ с, коливальність $N = 1$, статична похибка відсутня. При такій структурі системи керування максимальні відхилення струму відповідають допустимим значенням.

Враховуючи отримані результати дослідження, остаточно для системи керування була обрана схема з ПІ-регулятором та фільтром на вході в систему.

4.4 Висновки до розділу 4

- розроблено математичний опис та побудовано структурну схему двоконтурної системи підпорядкованого регулювання ЕП;
- виконано розрахунок та налагодження параметрів регуляторів контурів струму (П-регулятор) та швидкості (П- та ПІ-регулятори) за критеріями модульного та симетричного оптимумів відповідно;
- проведено комп'ютерне моделювання динамічних характеристик системи в середовищі MATLAB/Simulink для трьох конфігурацій: з П-регулятором швидкості, з ПІ-регулятором швидкості та з ПІ-регулятором і вхідним фільтром;
- на основі аналізу перехідних процесів встановлено, що система з ПІ-регулятором та вхідним фільтром забезпечує найкращі показники якості регулювання (відсутність статичної похибки, перерегулювання $\sigma = 5,69 \%$, час перехідного процесу $T_{\max} = 0,0794$ с).

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ РОБОТІ З ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯМ РОБОТОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

В умовах сучасного промислового виробництва, яке характеризується постійним ускладненням технологічних процесів та впровадженням високоавтоматизованого обладнання, питання забезпечення безпеки людини стає одним із ключових пріоритетів. Охорона праці є невід'ємною складовою будь-якої виробничої діяльності, адже її головна мета – збереження життя, здоров'я та працездатності працівників.

Охорона праці – система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці.

Важливість охорони праці важко переоцінити, особливо з огляду на невтішну статистику виробничого травматизму.

За статистикою, в Україні щоденно на виробництві травмуються 80-85 осіб, із них 10 % стають інвалідами і до 2 % гине. У країнах Євросоюзу від нещасних випадків та професійних захворювань потерпають щорічно близько 10 млн осіб, з яких майже 8 000 гине, а в цілому, по всіх країнах земної кулі кожні 3 хвилини гине людина, а кожні 2 секунди травмуються 8 осіб.

Електротравми в загальному виробничому травматизмі складають біля 1 %, а в смертельному – 15-20 % і більше. Це свідчить про зміщення виду електротравм у бік тяжких, що є однією з особливостей електротравматизму [4].

Ці цифри підкреслюють, що ігнорування вимог безпеки призводить не лише до значних економічних збитків, а й до непоправних людських втрат. Особливої актуальності питання охорони праці набувають при експлуатації складних систем, якими є РТК.

5.1 Аналіз небезпек і шкідливого впливу на людину при експлуатації електрообладнання робототехнічних комплексів

Експлуатація РТК механообробки пов'язана з комплексним впливом небезпечних та шкідливих виробничих факторів на обслуговуючий персонал.

Ключовим елементом, що забезпечує функціонування всього комплексу, є його електрообладнання, яке виступає як джерелом живлення для приводів маніпулятора та верстата, так і системою керування. Ця центральна роль робить електрообладнання первинним джерелом більшості потенційних загроз.

Для всебічного аналізу всі ризики можна розділити на кілька основних груп, що відрізняються за характером та наслідками впливу.

1. Небезпека ураження електричним струмом (Електричний удар)

Це первинна та найбільш небезпечна загроза, пов'язана з експлуатацією будь-якого електрообладнання.

Ураження електричним струмом, або електричний удар – це збудження живих тканин організму електричним струмом, що протікає через нього, яке проявляється в мимовільних судорожних скороченнях різних м'язів тіла.

Електричний удар є наслідком протікання струму через тіло людини; при цьому під загрозою ураження опиняється весь організм через порушення нормальної роботи різних його органів і систем, у тому числі серця, легенів, центральної нервової системи та ін [9].

Електричний удар, навіть якщо він не призводить до смерті, може викликати серйозні розлади в організмі, які проявляються відразу після впливу струму або через кілька годин, днів і навіть місяців.

Так, у результаті електричного удару, тобто проходження струму через тіло людини, що супроводжується мимовільними судорожними скороченнями м'язів, можуть виникнути або загостритися серцево-судинні захворювання – аритмія серця, стенокардія, підвищення або зниження артеріального тиску тощо, а також нервові хвороби – невроз, ендокринні порушення та ін.

Нерідко в потерпілих виникає неуважність, слабшають пам'ять і увага. Якщо подібних яскраво виражених захворювань не настає, то й у цьому випадку вважається, що електричний удар різко послаблює опірність організму до хвороб, у першу чергу до серцево-судинних і нервових, які можуть виникнути в людини пізніше з інших причин [9].

2. Пожежна та вибухонебезпека

Електрообладнання, що працює з високими потужностями, може виступати джерелом запалювання, а виробниче середовище цеху механообробки часто насичене горючими матеріалами.

Причини, що викликають пожежі та вибухи при експлуатації електроустановок РТК:

- струми короткого замикання та перевантаження, що викликають недопустиме нагрівання провідників і запалення ізоляційних конструкцій;
- іскріння в електричних апаратах і машинах, а також іскріння в результаті електричних розрядів і ударів блискавки;
- нагрів контактних з'єднань до високої температури через їхній підвищений електричний опір;

Коротке замикання являє собою найбільшу пожежну небезпеку. Струми короткого замикання в багато разів перевищують номінальні струми проводів і струмовідних частин і досягають сотень і тисяч ампер.

Такі струми можуть не тільки перегріти, але й запалити ізоляцію, розплавити струмовідні частини та проводи [10].

Специфіка ризику в РТК механообробки полягає в постійній наявності горючого середовища: мастильно-охолоджувальних рідин, гідравлічних мастил, горючого пилу (при обробці певних металів), а також полімерної ізоляції кабелів.

3. Вплив шкідливих фізичних факторів

Електрообладнання РТК, особливо його силові компоненти (трансформатори, електродвигуни, частотні перетворювачі, кабелі), також є джерелом **електромагнітних полів (ЕМП)** промислової частоти.

У результаті дії ЕМП на людину можливі гострі та хронічні форми порушення фізіологічних функцій організму. Ці порушення виникають в результаті дії електричної складової ЕМП на нервову систему, а також на структуру кори головного та спинного мозку, серцево-судинної системи.

Отже, електромагнітне випромінювання як хвороботворний чинник слід розглядати на підставі клінічних та експериментальних матеріалів. Сумісну дію цих випромінювань широкого діапазону можна класифікувати як окрему радіохвильову хворобу [4].

Шум – це коливання звукової хвилі в звуковому діапазоні, що характеризується змінною частотою і амплітудою, непостійні в часі, які не несуть корисної інформації людині.

В умовах РТК основними джерелами шуму є саме електрообладнання: високочастотний шум ("свист") від роботи перетворювачів частоти та сервоприводів, аеродинамічний шум від вентиляторів охолодження в шафах керування та механічний шум від електродвигунів [4].

Несприятливий вплив шуму на працюючу людину призводить до зниження продуктивності праці, створюються передумови для виникнення нещасних випадків та аварій. Все це визначає велике економічне і оздоровче значення заходів по боротьбі з шумом.

Вібрація – це механічні коливання, що призводять до розладу життєвих функцій людини, шкідливо впливають на роботу обладнання та руйнують будівельні конструкції.

Вібрація характеризується частотою коливань (Гц), амплітудою (А), зміщенням точки коливання від положення рівноваги (мм), коливальною або віброшвидкістю (V , м/с) та віброприскоренням (a , м/с²) [4].

Залежно від способу передачі вібрації тілу людини розрізняють:

- локальну (місцеву), що передається людині через руки;
- загальну, що передається на тіло людини через опорні поверхні тіла.

Джерела вібрації в РТК:

- Електродвигуни та приводи: Дисбаланс роторів потужних електродвигунів шпинделя верстата або приводів маніпулятора, особливо при високих швидкостях обертання та різких прискореннях/гальмуваннях, створює значні вібраційні навантаження.
- Рухомі маси: Динамічні навантаження від швидкого переміщення важких ланок маніпулятора, керованого сервоприводами, генерують низькочастотну вібрацію, що передається через фундамент на робочу зону оператора.
- Допоміжне обладнання: Робота насосів, компресорів та вентиляторів також є джерелом вібрації.

Для оператора РТК найбільш характерною є загальна вібрація, що передається через підлогу. Її вплив призводить до захворювань опорно-рухового апарату, нервової та серцево-судинної систем.

5.2 Організаційні та технічні заходи по забезпеченню безпеки праці при експлуатації робототехнічних комплексів

Вимоги до організації РТК та діляниць регламентуються ГОСТ 12.2.072–98 (Дата останньої актуалізації тексту 01.01.2021). Основні з них наведено нижче.

Загальні вимоги:

1. Розміщення ТО та ПР у складі РТК або діляниць повинно забезпечувати вільний, зручний та безпечний доступ обслуговуючого персоналу при програмуванні, налагодженні та ремонті.

2. Планувальну схему РТК і дільниць необхідно розробляти з урахуванням геометричних характеристик робочої зони ПР, діючих норм технологічного проектування відповідних виробництв і конструктивних особливостей ПР, та згідно з вибраним варіантом функціонування РТК, що забезпечує реалізацію розробленого технологічного процесу.
3. При організації РТК і дільниць необхідно передбачити комплексну механізацію та автоматизацію виробничого процесу, в тому числі супровідних допоміжних робіт (транспортування заготовок та деталей, завантаження ними накопичувачів, орієнтація деталей в положеннях, призначених для захоплення захватом робота, видалення стружки та бруду з робочої зони і т. ін.), залишаючи за оператором, в основному, функції керування і контролю за роботою комплексу або дільниці.
4. РТК або дільниця повинна бути оснащена блокуючими пристроями, які забезпечують вимикання комплексу чи дільниці, або окремих його частин у випадку порушення технологічного процесу, відмови обладнання, виходу параметрів енергоносіїв за допустимі межі.
5. РТК або дільниці з декількома пультами керування повинні бути оснащені блокуваннями, уникаючи можливість паралельного керування одним обладнанням від різних пультів.
6. У випадку застосування в складі РТК або дільниці ПР закордонних моделей необхідно колірне оформлення їхніх складових частин та символів органів керування привести у відповідність з вимогами до ДСТУ EN ISO 7010:2019 (актуальна заміна ГОСТу 12.4.026-76 та ГОСТу 12.4.040-78) [7].

Вимоги до безпеки експлуатації РТК:

Безпека експлуатації РТК значною мірою, залежить від організації огорожень, до яких висуваються наступні вимоги:

1. Огороджуючі пристрої (світлозахист, ультразвуковий захист, стаціонарні огороження, ін.) повинні виключати можливість випадкового попадання людини в небезпечну зону роботизованої технологічної дільниці, комплексу чи робочого простору ПР.

2. Робочий простір ПР необхідно позначати суцільними лініями шириною 50-100 мм, що нанесені на площу підлоги фарбою жовтого кольору, стійкою до витирання.
3. Вхід у зону огороження має бути заблокований системою керування. Блокувальні пристрої повинні забезпечувати припинення руху ПР при вході людини в цю зону.
4. У випадку переміщення ПР ОМ над проходами, проїздами та робочими місцями, необхідно облаштовувати під зоною руху виконавчих пристроїв ПР захисні сітки або інші пристрої, які не допускають травмування людини при випадковому падінні ОМ [7].

Вимоги до організації робочих місць:

1. Пульт керування РТК чи дільницею, як правило, повинний бути розміщений за межами зони огороження. При цьому оператору має бути забезпечено можливість огляду елементів робочого місця, робочого простору ПР та простору за його межами за ДСТУ 7299:2013 (актуальна заміна ГОСТу 22269-76).
2. На пульті керування повинна бути забезпечена освітленість не менше 400 лк. Яскравість світлових елементів та символів на панелі пульта керування має забезпечувати їх правильне сприйняття та виключати осліплення операторів.
3. Роботизовані технологічні дільниці великої довжини необхідно оснащувати додатковими органами аварійного відключення, розташованими на відстані не більше 4 м один від одного [7].

1. Заходи захисту від ураження електричним струмом

Захист людей від ураження електричним струмом забезпечується не лише конструкцією електроустановок, але й різними технічними способами і засобами.

Для захисту від ураження електричним струмом у нормальному режимі або у випадку пошкодження ізоляції повинні бути застосовані окремо або в сполученні такі технічні способи захисту [9]:

- захисне заземлення;

- занулення;
- захисне вимикання;
- електричне розділення мереж;
- застосування малої напруги;
- вирівнювання потенціалів;
- ізоляція струмовідних частин;
- використання огорож, блокувань, засобів попередження про небезпеку.

Крім того, для захисту від ураження працівників електричним струмом застосовуються такі технічні засоби захисту, як стаціонарні захисні пристрої, електрозахисні засоби, засоби захисту від впливу електромагнітних полів, засоби індивідуального та колективного захисту.

2. Заходи пожежної та вибухобезпеки

Для запобігання пожежам, джерелом яких може стати електрообладнання, необхідно вживати заходи, що унеможливають як виникнення джерела запалювання, так і поширення вогню.

- Захист від струмів короткого замикання та перевантаження: Застосування автоматичних вимикачів та плавких запобіжників, які відповідають навантаженню та характеристикам мережі.
- Контроль стану електрообладнання: Регулярні перевірки стану ізоляції, затяжки контактних з'єднань для унеможливлення іскріння та перегріву.
- Правильне виконання електромонтажних робіт: Прокладання кабелів та проводів відповідно до вимог правил улаштування електроустановок (ПУЕ), що виключає їх механічне пошкодження та перегрів.
- Організація робочого місця: Своєчасне прибирання горючих матеріалів (промаслене ганчір'я, розлиті мастила, горючий пил) із зони роботи РТК.

Засобами пожежогасіння, які найбільш придатні для ліквідації пожежі в електроустановках, вважаються вуглекислотні, вуглекислотно-брометиллові та порошкові ручні вогнегасники і пересувні установки [10].

3. Заходи захисту від шкідливих фізичних факторів та механічних небезпек

До числа заходів зменшення впливу на працівників ЕМП належать: організаційні, інженерно-технічні та лікарсько-профілактичні.

Організаційні заходи здійснюють органи санітарного нагляду. Вони проводять санітарний нагляд за об'єктами, в яких використовуються джерела електромагнітних випромінювань. Крім того, ще на стадії проектування об'єктів потребує забезпечення таке розташування джерел ЕМП, яке б зводило до мінімуму їх вплив на працюючих [4].

Для зниження впливу ЕМП застосовують: захист відстанню, тобто раціональне розміщення робочого місця оператора на безпечній відстані від джерел ЕМП (силових шаф, трансформаторів) та екранування – використання спеціальних екранів або розміщення обладнання в екранованих корпусах.

Існують такі способи боротьби з шумом механічного походження та вібрацією [4]:

- зменшення шуму та вібрації безпосередньо в джерелах їх виникнення, застосовуючи обладнання, що не утворює шуму та проводячи своєчасне обслуговування та ремонт елементів, що створюють шум та ін.;
- зменшення шуму та вібрації на шляхах їх розповсюдження заходами звуко- та віброізоляції, а також вібро- та звукопоглинання;
- зменшення шкідливої дії шуму та вібрації, застосовуючи індивідуальні засоби захисту та запроваджуючи раціональні режими праці та відпочинку.

5.3 Висновки до розділу 5

- проведено аналіз потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що виникають при експлуатації електрообладнання РТК, зокрема, розглянуто ризики ураження електричним струмом, пожежної небезпеки, а також впливу шкідливих фізичних факторів;
- наведено комплекс організаційних та технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки праці, включаючи вимоги до розміщення обладнання,

організації огорожень та робочих місць, а також конкретні методи захисту від ураження електричним струмом, пожеж та впливу шкідливих фізичних факторів.

ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній роботі магістра розроблено та досліджено автоматизовану систему керування ЕП маніпулятора у складі РТК механообробки.

Основні результати роботи можна сформулювати наступним чином:

- проведено аналіз сучасного стану РТК механообробки та огляд існуючих систем керування. Як об'єкт керування обрано промисловий маніпулятор Fanuc M-20iA, для якого побудовано кінематичну модель та розв'язано пряму задачу кінематики;
- на основі аналізу вимог до приводів маніпуляторів обґрунтовано вибір електродвигуна постійного струму типу ПБВ-100L та комплектного тиристорного електропривода ЭТУ2-2П, для яких розраховано необхідні параметри;
- розроблено математичний опис та побудовано структурну схему двоконтурної системи підпорядкованого регулювання. Виконано синтез П-регулятора для контуру струму та П- і ПІ-регуляторів для контуру швидкості на основі модульного та симетричного оптимумів;
- проведено дослідження динамічних властивостей розробленої системи керування в середовищі MATLAB/Simulink, в результаті якого отримано наступні результати:

1. при застосуванні пропорційно-інтегрального закону регулювання (ПІ-регулятор) перерегулювання склало $\sigma = 49,4 \%$, що є неприйнятним для точних систем позиціонування, при часі перехідного процесу $T_{\max} = 0,0725$ с;

2. при застосуванні пропорційного закону регулювання (П-регулятор) перерегулювання зменшилось до $\sigma = 5,48 \%$, але виникла велика статична похибка $\varepsilon = 32,49 \%$;

3. при введенні аперіодичної ланки (фільтра) на вхід системи керування з ПІ-регулятором вдалося досягти оптимальних показників: перерегулювання

склало $\sigma = 5,69 \%$, час перехідного процесу $T_{\max} = 0,0794$ с, при повній відсутності статичної похибки.

- на основі аналізу отриманих даних було обрано систему керування із застосуванням ПІ-регулятора швидкості та фільтра на вході, яка забезпечує високу точність та швидкодію. Таким чином, основна мета роботи виконана;
- проведено аналіз потенційно небезпечних та шкідливих факторів при експлуатації електрообладнання РТК та запропоновано комплекс організаційно-технічних заходів щодо забезпечення безпеки праці.

Результати магістерської роботи, що виносяться на захист, опубліковані у збірнику Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених "Автоматика та електротехніка АЕ-2025"». – Миколаїв : НУК, 2025. – (04-05 грудня 2025 р.).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. **Бірта Г.О.** Методологія і організація наукових досліджень. [текст] : навч. посіб. / Г. О. Бірта, Ю.Г. Бургу– К. : «Центр учбової літератури», 2014. – 142 с.
3. **Васильєв, О.Г.** Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни "Системи керування промисловими робототехнічними комплексами" / О.Г. Васильєв, С.І. Ольшевський, О.О. Черно. – Миколаїв : НУК, 2022. – 128 с.
3. **Васильєв, О.Г.** Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Системи керування промисловими робототехнічними комплексами" / О.Г. Васильєв, С.І. Ольшевський. – Миколаїв : НУК, 2019. – 64 с.
4. **Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О.** Основи охорони праці: Підруч. для студ. вищих навч. закладів. За ред М.П. Гандзюка – К. Каравела, 2004. – 408 с.
5. **Гераїмчук М.Д., Лазарєв Ю.Ф., Толочко Т.О.** Моделювання систем у середовищі MATLAB-SIMULINK: Комп'ютерний практикум. – К.:, 2006. – 175с.
6. **Голодний І.М.,** Регульований електропривод: Підручник / Голодний І.М., Лавріненко Ю.М., Козирський В.В., Червінський Л.С., Абдураманов Д.А., Торопов А.В., Санченко О.В.; За ред. І.М. Голодного. – К.: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. – 509 с.: іл.
7. **Павленко І.І., Мажара В.А.** Роботизовані технологічні комплекси: Навчальний посібник. – Кіровоград: КНТУ, 2010. – 392 с.
8. **Павленко Т.П.** Сучасні електромехатронні комплекси і системи : Підручник / Т. П. Павленко, В. М. Шавкун, О. С. Козлова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 265 с.
9. **Панченко С.В.** Електробезпека: Підручник / С.В. Панченко, О.І. Акімов, М.М. Бабаєв та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2018. – 295 с., рис. 80, табл. 20.
10. **Панченко С.В.** Основи безпечної експлуатації електроустановок: Підручник / С.В. Панченко, О.І. Акімов, М.М. Бабаєв та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2021. – 149 с., рис. 3, табл. 5.

11. **Приймак Б.І.** Теорія автоматичного керування. Лінійні системи [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Б. І. Приймак. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 310 с.

12. **Цвіркун Л.І.** Робототехніка та мехатроніка: навч. посіб. / Л.І. Цвіркун, Г. Грулер ; під заг. ред. Л.І. Цвіркуна ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 3-тє вид., переробл. і доповн. – Дніпро: НГУ, 2017. – 224 с.

13. **Юринець В.Є.** Методологія наукових досліджень : навч. посібник / В. Є. Юринець. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2011. – 178 с.

14. **Ямпольський Л.С.** Гнучкі комп'ютеризовані системи: проектування, моделювання і управління: Підручник / Л.С. Ямпольський, П.П. Мельничук, Б.Б. Самотокін, М.М. Поліщук, М.М. Ткач, К.Б. Остапченко, О.І. Лісовиченко.- Житомир: ЖДТУ, 2005. – 680 с.: 362 іл.

15. **Ямпольський Л.С.** Елементи робототехнічних пристроїв і модулі ГВС: Підручник / Л.С. Ямпольський, М.М. Поліщук, М.М. Ткач; За заг. ред. Л.С. Ямпольського. – К. : Вища шк., 1992. – 431 с.: іл.

16. FANUC Robotics M-20iA Series. [Електронний ресурс]: Режим доступу <https://www.irsrobotics.com/wp-content/uploads/2024/01/M-20iA-Series.pdf> (дата звернення: 09.10.2025)

17. FANUC Robotics S.A., M-20iA Series. [Електронний ресурс]: Режим доступу https://prokcsmmedia.blob.core.windows.net/sys-master-images/h48/h4e/8814498414622/GB83102441_6674.pdf (дата звернення: 09.10.2025)

ДОДАТОК А

Мультимедійна презентація

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Заворотний Андрій Олегович

Кваліфікаційна робота магістра на тему:

"Автоматизована система керування електропривода маніпулятора у
складі РТК механообробки"

Керівник роботи – Васильєв О.Г.

Слайд 1 мультимедійної презентації

АКТУАЛЬНІСТЬ, МЕТА І ЗАДАЧІ РОБОТИ

Актуальність теми. В даній кваліфікаційній роботі магістра досліджується автоматизована система керування електропривода маніпулятора у складі РТК механообробки.

Розробка та дослідження автоматизованої системи керування ЕП маніпулятора, яка б забезпечувала високу точність при значній швидкодії в умовах складних та змінних динамічних навантажень, є надзвичайно важливим та актуальним науково-технічним завданням.

Мета і завдання дослідження. Мета магістерської роботи полягає в оцінюванні динамічних властивостей та підвищенні точності системи електропривода промислового робота у складі РТК механообробки шляхом розробки та дослідження автоматизованої системи підпорядкованого регулювання.

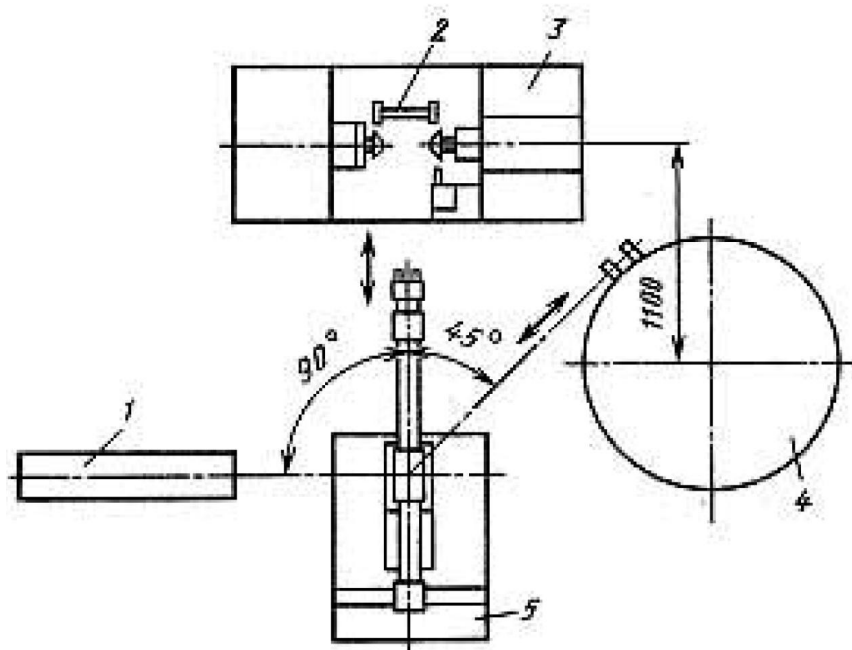
Для досягнення мети вирішені наступні **завдання дослідження**:

- проведений аналіз існуючих засобів та систем керування електродвигунами постійного струму і на базі цього аналізу обраний найбільш підходящий тип електродвигуна ПБВ100L, а для керування ним вибраний перетворювач ЕТУ2-2П;
- розглянута функціональна схема системи керування;
- складений математичний опис системи керування і розроблена її структурна схема та розраховані її параметри;
- по отриманій структурній схемі проведений аналіз динамічних властивостей розрахункової системи керування;
- проведене теоретичне і комп'ютерне дослідження значень основних показників якості роботи САК;
- в математичній програмі Simulink пакету Matlab проведене моделювання системи керування;
- одержані та проаналізовані графіки перехідних процесів за струмом і швидкістю для різних законів керування;
- визначені заходи щодо безпечної експлуатації електрообладнання промислового робота.

Об'єкт дослідження - процеси, що відбуваються у найбільш навантаженому електроприводі промислового робота.

Слайд 2 мультимедійної презентації

ПЛАНУВАННЯ РТК МЕХАНООБРОБКИ

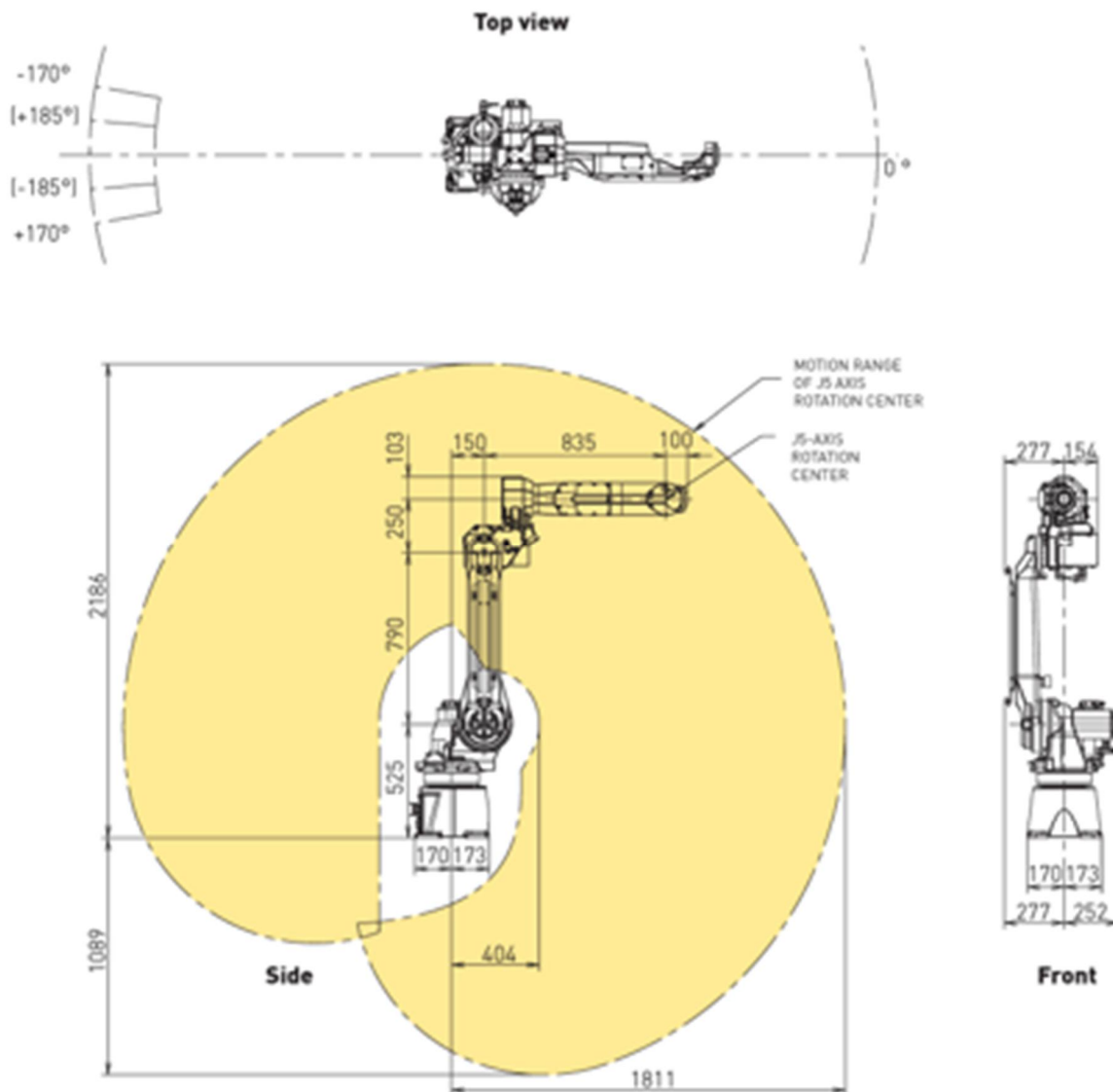


1 – лоток для передачі деталі на інший верстат; 2 – знімач; 3 – верстат;
4 – магазин-накопичувач, 5 – ПР



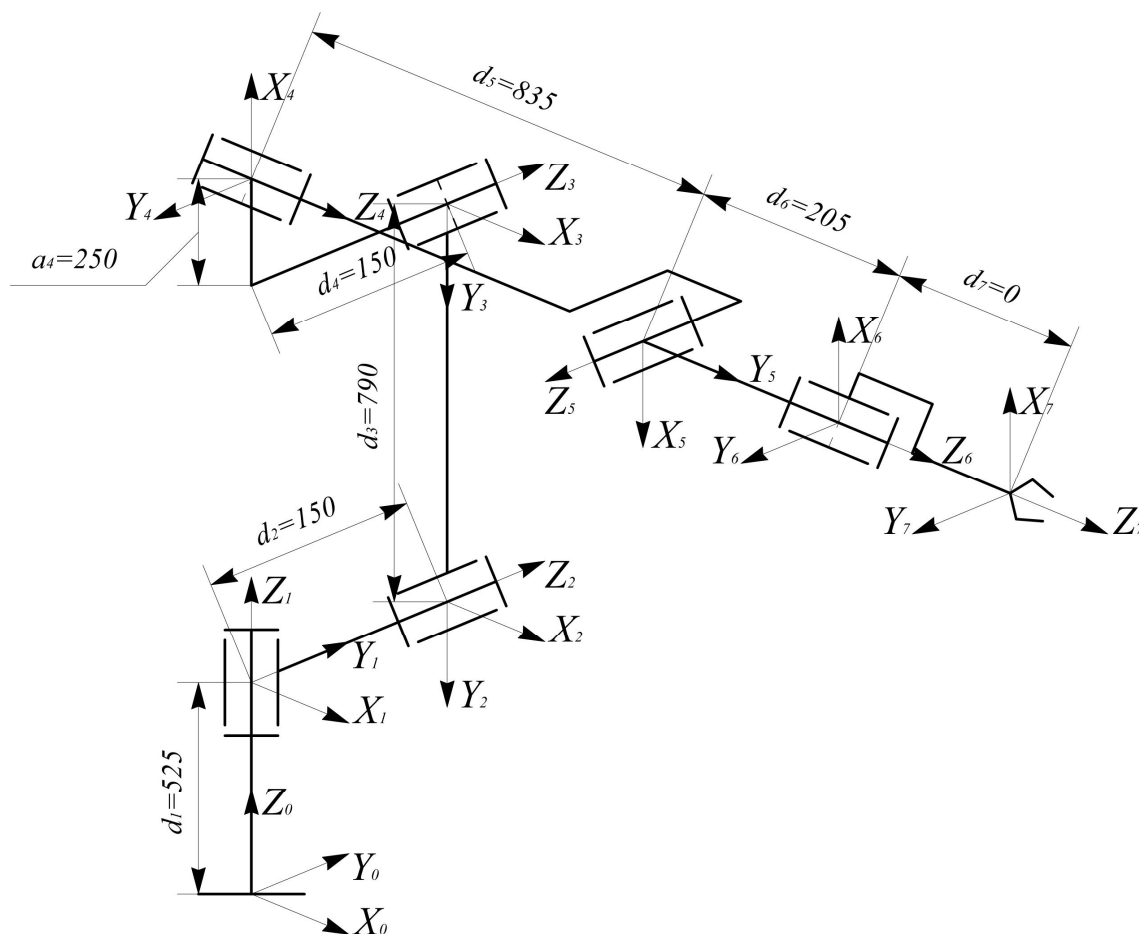
Загальний вид промислового робота Fanuc M-20iA

ПЛАНУВАННЯ РОБОЧОЇ ЗОНИ РОБОТА FANUC M-201A



Основні характеристики	
Параметри	Значення
Число ступенів рухливості	6
Вантажопідйомність (на зап'ясті), кг	20
Додаткове навантаження (на плечі J3)	12
Максимальна досяжність, мм	1811
Точність позиціонування (згідно ISO 9283), мм	±0,08
Радіус інтерференції, мм	321
Вага маніпулятора, кг	250

КІНЕМАТИЧНА СХЕМА РОБОТА ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРЯМОЇ ЗАДАЧІ КІНЕМАТИКИ



Номер матриці	Кутова координата θ_i	Лінійна координата d_i	Відстань переносу a_i	Кут закручування α_i	Нова система координат
1	—	d_1	—	—	$X_1Y_1Z_1$
2	—	d_2	—	90°	$X_2Y_2Z_2$
3	—	d_3	—	—	$X_3Y_3Z_3$
4	90°	d_4	a_4	90°	$X_4Y_4Z_4$
5	180°	d_5	—	90°	$X_5Y_5Z_5$
6	180°	d_6	—	-90°	$X_6Y_6Z_6$
7	—	d_7	—	—	$X_7Y_7Z_7$

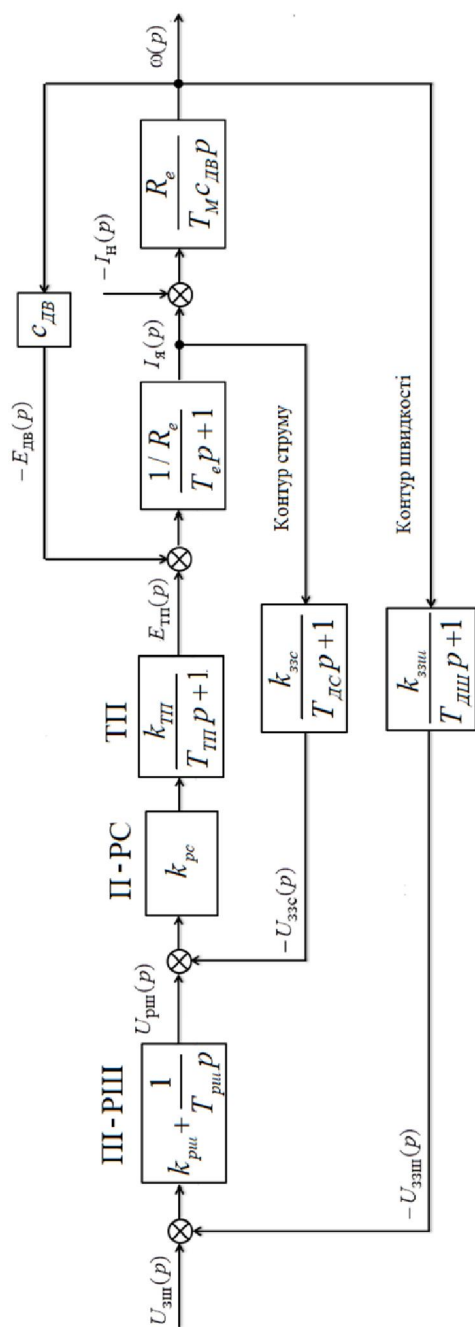
Координати захватного пристрою у просторі:

$$X_M = 835 \text{ мм};$$

$$Y_M = -1145 \text{ мм};$$

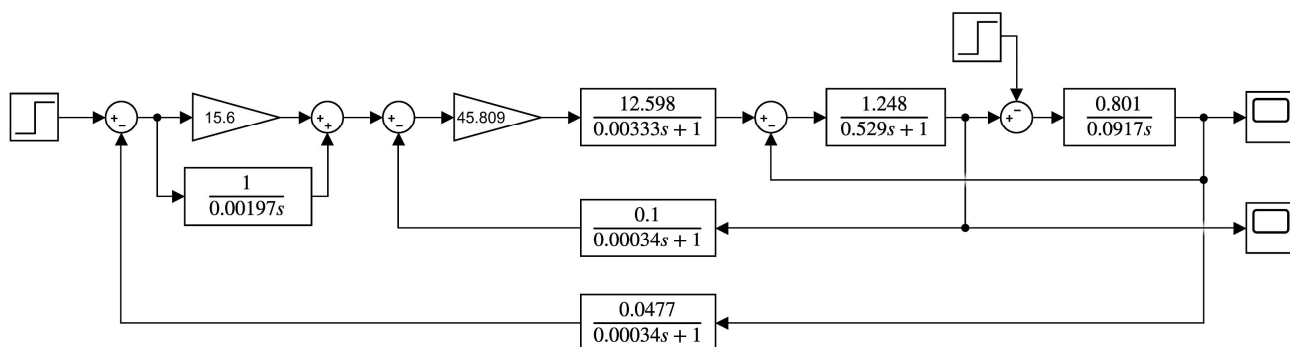
$$Z_M = 925 \text{ мм}.$$

СТРУКТУРНА СХЕМА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕП

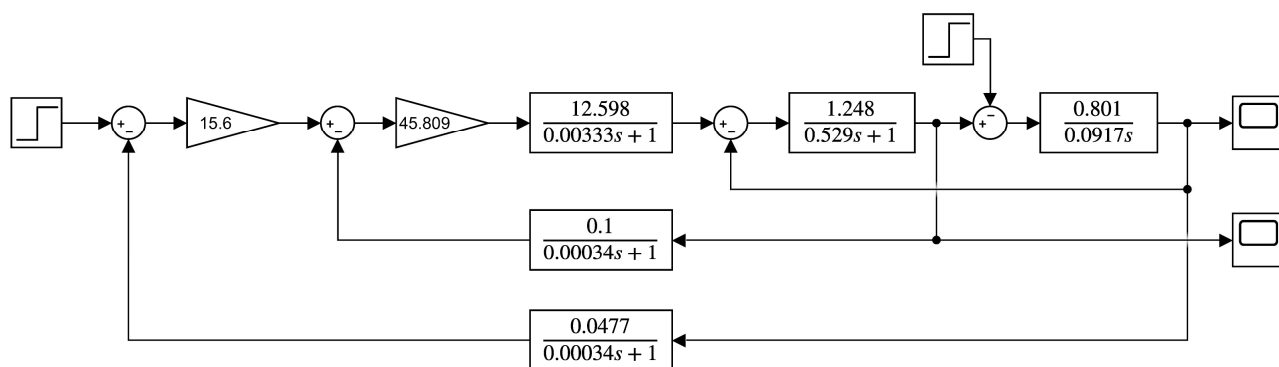


Слайд 7 мультимедійної презентації

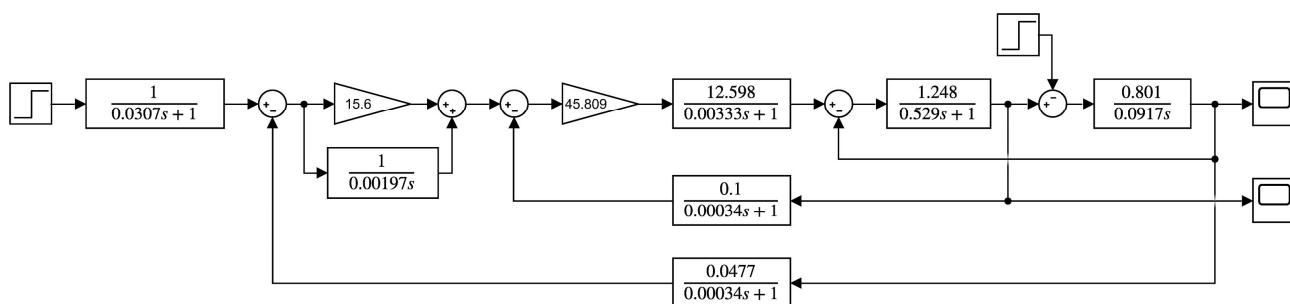
ДИНАМІЧНІ РОЗРАХУНКОВІ МОДЕЛІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ



Розрахункова динамічна модель системи керування з ПІ-регулятором швидкості

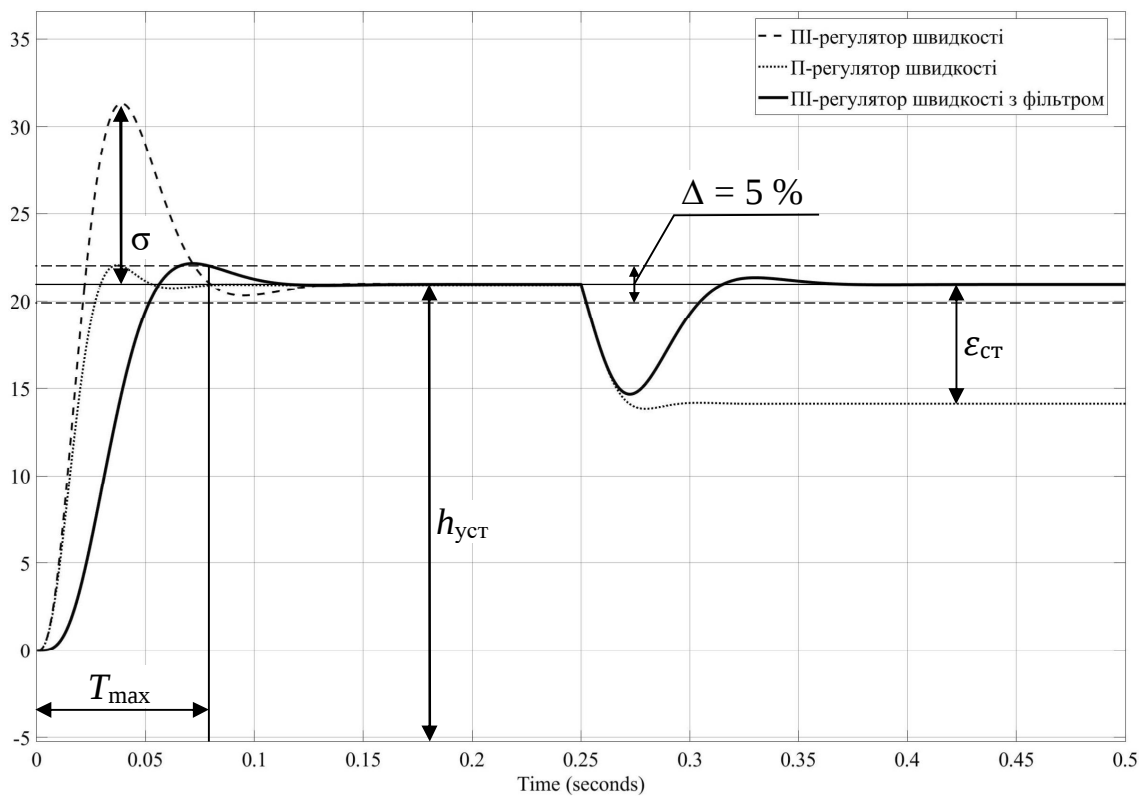


Розрахункова динамічна модель системи керування з ПІ-регулятором швидкості

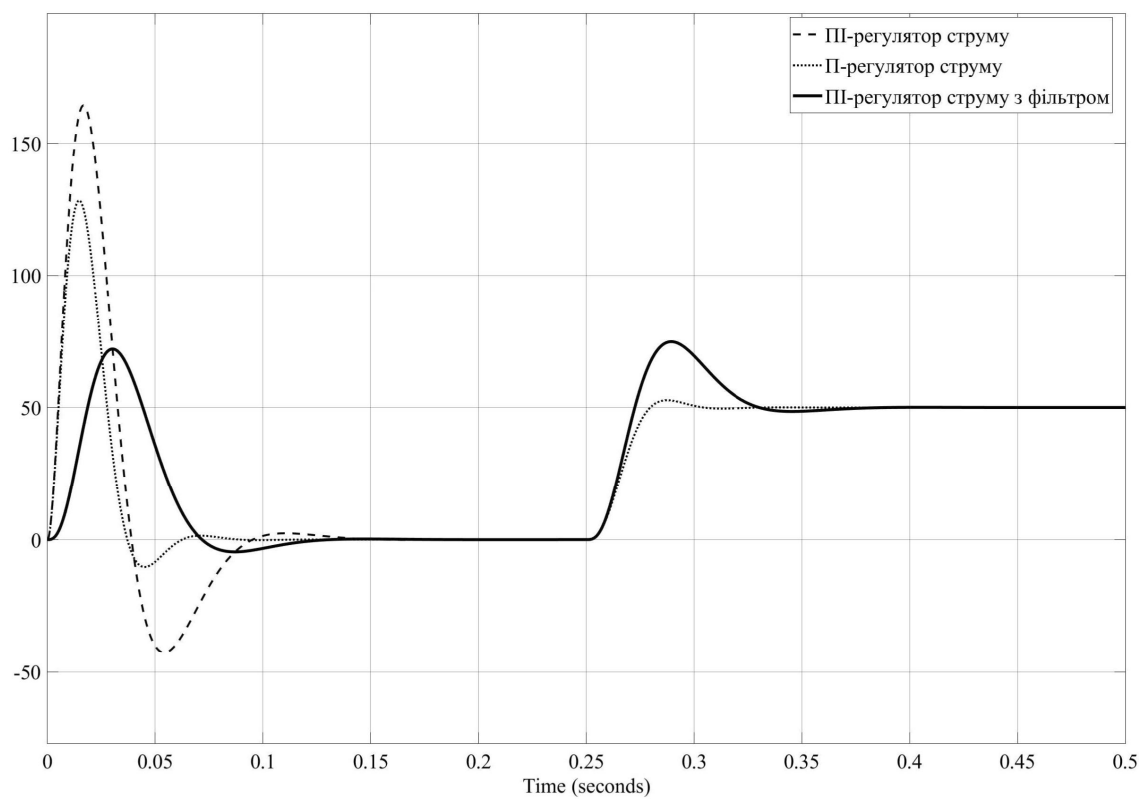


Розрахункова динамічна модель системи керування з ПІ-регулятором швидкості та фільтром на вході в систему

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ САК



Перехідні процеси по швидкості



Перехідні процеси по струму

Слайд 9 мультимедійної презентації

ВИСНОВКИ

Основні результати роботи можна сформулювати наступним чином:

- проведено аналіз сучасного стану РТК механообробки та огляд існуючих систем керування. Як об'єкт керування обрано промисловий маніпулятор Fanuc M-20iA, для якого побудовано кінематичну модель та розв'язано пряму задачу кінематики;
- на основі аналізу вимог до приводів маніпуляторів обґрунтовано вибір електродвигуна постійного струму типу ПБВ-100L та комплектного тиристорного електропривода ЭТУ2-2П, для яких розраховано необхідні параметри;
- розроблено математичний опис та побудовано структурну схему двоконтурної системи підпорядкованого регулювання. Виконано синтез П-регулятора для контуру струму та П- і ПІ-регуляторів для контуру швидкості на основі модульного та симетричного оптимумів;
- проведено дослідження динамічних властивостей розробленої системи керування в середовищі MATLAB/Simulink, в результаті якого отримано наступні результати:
 - при застосуванні пропорційно-інтегрального закону регулювання (ПІ-регулятор) перерегулювання склало $\sigma = 49,4 \%$, що є неприйнятним для точних систем позиціонування, при часі перехідного процесу $T_{\max} = 0,0725 \text{ с}$;
 - при застосуванні пропорційного закону регулювання (П-регулятор) перерегулювання зменшилось до $\sigma = 5,48 \%$, але виникла статична похибка $\varepsilon = 32,49 \%$;
 - при введенні аперіодичної ланки (фільтра) на вхід системи керування з ПІ-регулятором вдалося досягти оптимальних показників: перерегулювання склало $\sigma = 5,69 \%$, час перехідного процесу $T_{\max} = 0,0794 \text{ с}$, при повній відсутності статичної похибки.
- на основі аналізу отриманих даних було обрано систему керування із застосуванням ПІ-регулятора швидкості та фільтра на вході, яка забезпечує високу точність та швидкодію. Таким чином, основна мета роботи виконана;
- проведено аналіз потенційно небезпечних та шкідливих факторів при експлуатації електрообладнання РТК та запропоновано комплекс організаційно-технічних заходів щодо забезпечення безпеки праці.

Результати магістерської роботи, що виносяться на захист, опубліковані у збірнику Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених "Автоматика та електротехніка АЕ-2025"». – Миколаїв : НУК, 2025. – (04-05 грудня 2025 р.).

Слайд 10 мультимедійної презентації