

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

О. Г. ВАСИЛЬЄВ, С. І. ОЛЬШЕВСЬКИЙ, О. О. ЧЕРНО

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання курсової роботи
з дисципліни
"Системи керування промисловими
робототехнічними комплексами"**

Рекомендовано Методичною радою НУК



ВИДАВНИЦТВО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМ. АДМІРАЛА МАКАРОВА

2022

УДК 621.865.8(076)

В19

Автори: О. Г. Васильєв, канд. техн. наук, доцент;

С. І. Ольшевський, старший викладач;

О. О. Черно, д-р техн. наук, доцент

Рецензент Ю. П. Кондратенко, д-р техн. наук, професор

Рекомендовано Методичною радою НУК

Васильєв О. Г.

В19 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.

У методичних вказівках викладені основні вимоги до виконання та оформлення типової курсової роботи з дисципліни "Системи керування промисловими робототехнічними комплексами".

Призначено для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка", спеціалізація "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод".

УДК 621.865.8(076)

© Васильєв О. Г., Ольшевський С. І.,

Черно О. О., 2022

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2022

ЗМІСТ

Вступ	4
1 МЕТА І ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ (КР).....	6
1.1 Вимоги до обсягу та оформлення КР	7
2 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ ІЗ ПРИКЛАДАМИ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ.....	14
2.1 Розробка компоновки РТК.....	14
2.2 Типові схеми компонування роботизованих комплексів для операцій механообробки й холодного штампування.....	14
2.3 Приклад проектування РТК механообробки	19
2.4 Вибір промислового робота	20
3 СКЛАДАННЯ КІНЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МАНІПУЛЯТОРА	233
3.1 Розв’язання прямої задачі кінематики	24
3.2 Розв’язання зворотної задачі кінематики	288
4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ОДНОГО СТУПЕНЯ РУХЛИВОСТІ РОБОТА.....	33
4.1 Розрахунок потужності електродвигунів робота	33
4.2 Приклад розрахунку потужності приводу та вибір двигуна однієї (заданої) ланки маніпулятора	39
4.3 Вибір комплектного електропривода	41
4.4 Розробка структурної схеми системи керування	43
Постійна ЕРС двигуна, В/(об/хв).....	61
Еквівалентний опір якорного ланцюга двигуна, Ом	61
5 ПОБУДУВА ЦИКЛОГРАМИ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ РТК	66
5.1 Опис робототехнічного комплексу.....	66
5.2 Методика побудови циклограми функціонування роботизованого технологічного комплексу	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	72
Додаток А.....	74
Додаток Б	75
Додаток В	76
Додаток Г	77
Додаток Д.....	92
Додаток Е	109
Додаток Ж	122

ВСТУП

У даних методичних вказівках розглянуто етапи розробки роботизованого технологічного комплексу на прикладі виконання курсової роботи, що створює передумови до поглиблення знань і навичок з проектування та застосування засобів автоматизації у машинобудуванні.

Роботизований технологічний комплекс (РТК) – це сукупність одиниці технологічного обладнання, промислового робота і засобів оснащення, що може автономно працювати, виконуючи багаторазові цикли робочих операцій. Майже кожне сучасне підприємство використовує роботизовані технологічні комплекси та промислові роботи для автоматизованого виконання як допоміжних, так і основних технологічних операцій в умовах виробництва. Перевагами використання таких комплексів є швидке переналагодження на випуск нової продукції та її виробництво з мінімізацією впливу людського фактора. Роботизовані технологічні комплекси, об'єднані у гнучкі виробничі системи з керуванням на базі ЕОМ, відкривають шлях до впровадження прогресивної організації виробництва та здійснення виробничого процесу в повністю автоматизованому режимі з можливістю самостійно адаптуватись до змін режимів обробки та інших факторів, корегуючи параметри системи для отримання бажаних характеристик деталей та темпів виробництва. Окрім того, використання промислових роботів та роботизованих комплексів у багатьох випадках визначається неможливістю або ж недоцільністю виконання операцій людиною (в середовищах, небезпечних для життя, в умовах необхідності значних зусиль та монотонності праці).

Основою для виконання курсової роботи є курс лекцій і лабораторних робіт з дисципліни «Системи керування промисловими робототехнічними комплексами», рекомендована основна та допоміжна література з даної дисципліни, індивідуальне завдання, додаткові технічні матеріали, каталоги, проспекти провідних вітчизняних та закордонних організацій, які працюють у галузі автоматизації та роботизації механообробки. Додаткові матеріали рекомендуються викладачем індивідуально залежно від змісту конкретного завдання на курсову роботу.

У даній курсовій роботі робот призначений для обслуговування основного технологічного обладнання й виконує операції завантаження й розвантаження основного обладнання.

Методичні вказівки містять завдання до курсової роботи, яке включає 25 варіантів основного технологічного обладнання й 9 типів схем промислових роботів.

Завданням передбачається дослідження кінематики роботів методом матриць, динаміки роботів методом Лагранжа-Ейлера II роду, виконання силових розрахунків потужності привода, проєктування системи керування електропривода робота та розробка робототехнічного комплексу.

Курсова робота з дисципліни «Системи керування промисловими робототехнічними комплексами» покликана закріпити теоретичні знання студентів у галузі робототехніки та призначена для студентів, які не спеціалізуються в конструюванні роботів, але використовують їх у своїй галузі техніки.

В результаті вивчення дисципліни студент повинен

знати: основи робототехніки; структуру, призначення і конструкцію маніпуляторів і роботів; основи розрахунків основних параметрів маніпуляторів і роботів, розрахунків приводів маніпуляторів та їх систем керування;

вміти: розробляти робототехнологічні комплекси запропонованого класу, включаючи обґрунтування складу обладнання, його компонування у РТК.

1 МЕТА І ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ (КР)

Курсова робота (КР) з дисципліни "Системи керування промисловими робототехнічними комплексами" є етапом вивчення дисципліни студентами спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" спеціалізації "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" освітньої кваліфікації Магістр. Виконання КР забезпечить розуміння студентами питань використання роботів і роботизованих технологічних комплексів, ознайомлення з методикою вибору та проєктування РТК для вирішення технологічних задач виробництва.

Для виконання КР кожен студент отримує від керівника КР індивідуальне завдання з додатку В.

Вхідними даними до КР є:

- тип основного технологічного обладнання, максимальна маса оброблюваної деталі (додаток Г);
- тип роботизованого технологічного комплексу (РТК).

Вихідні дані вказуються в завданні на курсове проєктування, яке видається студентові викладачем.

Виконання та захист КР відбуваються протягом десятого семестру. На першому тижні навчання студентам видаються індивідуальні завдання, що скріплюються підписами самого студента та керівника КР.

Протягом семестру студенти виконують КР згідно з планом-графіком, розробленим на кафедрі. Виконання КР здійснюється студентами самостійно, а будь-які питання, що виникають, мають вирішуватися тільки за погодженням з керівником КР на консультаціях, графік яких розробляється на кафедрі та оголошується студентам. З метою забезпечення ритмічного та поетапного виконання КР на консультаціях проводяться два рубіжні контролю виконання розділів КР. Рубіжний контроль здійснюється керівником КР, а день проведення вказується у плані-графіку виконання КР. В результаті рубіжних контролів керівник КР виявляє стан виконання розділів КР і, в разі виявлення порушення плану-графіка виконання, може звернутися з доповідною запискою до завідуючого кафедрою та деканату.

Захист виконаної КР відбувається протягом останніх двох тижнів семестру згідно з попередньо розробленим графіком. До захисту КР допускаються студенти, які виконали та оформили їх відповідно до вимог, чинних у Національному університеті кораблебудування та даних методичних вказівок.

Вимоги до обсягу та оформлення КР

Структура КР відповідає індивідуальному завданню та містить такі розділи:

- титульний аркуш;
- завдання на курсове проєктування;
- зміст;
- вступ;
- основна частина;
- висновки;
- список використаної літератури;
- додатки (за необхідністю).

Пояснювальна записка до курсової роботи оформлюється згідно з вимогами державного стандарту ДСТУ 2.105-95.

Титульний аркуш

Титульний аркуш є першою сторінкою КР, яка не нумерується. Згідно з чинним стандартом на текстову конструкторську документацію (ГОСТ 2.105-95, ДСТУ 3008-95) титульний аркуш виконується за встановленим зразком, що наведений у додатку А.

Титульний аркуш містить:

- назву міністерства, якому підпорядковано навчальний заклад (Міністерство освіти і науки України);
- найменування вищого навчального закладу і кафедри, де виконано курсову роботу;
- назву роботи;
- код і найменування спеціальності та освітньої програми;
- прізвище та ініціали автора;
- науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові наукового керівника;
- місто і рік.

За титульним аркушем розташовується індивідуальне завдання до КР (додаток Б).

Зміст та заголовки КР

Зміст розташовують на початку роботи безпосередньо після індивідуального завдання до КР, починаючи з нової сторінки. До змісту вносять: вступ; послідовно перелічені назви та номери початкових сторінок усіх розділів, підрозділів, пунктів і підпунктів (якщо вони мають заголовки) роботи; висновки; список використаної літератури, назви додатків.

Зміст за нумерацією пояснювальної записки є третьою сторінкою.

Назви заголовків змісту повинні однозначно відповідати назвам заголовків пояснювальної записки за текстом.

Правила написання тексту

Оформлення тексту повинно відповідати вимогам стандарту України ДСТУ 3008-95.

При написанні тексту слід дотримуватися таких правил:

Розрахунково-пояснювальна записка повинна виконуватися на аркушах форматом А4 шрифтом «Times New Roman» – 14 pt, полуторним міжрядковим інтервалом. Поля: ліве поле – 25 мм, праве поле – 10 мм, верхнє поле – 15 мм, нижнє поле – 25 мм.

Абзацний відступ повинен бути однаковим упродовж усього тексту роботи та дорівнювати п'яти знакам – 1,25 см.

Текст основної частини поділяють на розділи, підрозділи, пункти та підпункти.

Заголовки структурних частин **«ЗМІСТ»**, **«ВСТУП»**, **«РОЗДІЛ»**, **«ВИСНОВКИ»**, **«СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ»**, друкують великими літерами по центру рядка напівжирним шрифтом. Заголовки підрозділів, пунктів та підпунктів слід починати з абзацного відступу та друкувати малими літерами, крім першої великої, напівжирним шрифтом. Крапку в кінці заголовка не ставлять. Якщо заголовок складається з двох або більше речень, їх розділяють крапкою. В кінці заголовка, надрукованого в підбір до тексту, ставиться крапка.

Переноси слів у заголовках розділів та підрозділів не допускаються. Не допускається розміщувати назву розділу, підрозділу, а також пункту та підпункту в нижній частині сторінки, якщо після неї розміщено менше 3-х рядків тексту.

Відстань між заголовком та текстом – 1 рядок.

Кожну структурну частину роботи треба починати з нової сторінки.

Структурним елементам пояснювальної записки номер не присвоюється, тобто частини ЗМІСТ, ВСТУП, ВИСНОВКИ і т. п. порядкового номера не мають.

Підрозділи нумерують у межах кожного розділу. Номер підрозділу складається з номера розділу та порядкового номера підрозділу, між якими ставлять крапку. Після номера крапку не ставлять. Потім у тому ж рядку наводять заголовок підрозділу.

Пункти нумерують у межах кожного підрозділу. Номер пункту складається з порядкових номерів розділу підрозділу, пункту, між якими ставлять крапку. В кінці номера крапку не ставлять, наприклад: «3.2.1» (перший пункт другого підрозділу третього розділу). Потім у тому ж рядку наводять заголовок пункту. Пункт може не мати заголовка.

Підпункти нумерують у межах кожного пункту за такими ж правилами, як пункти.

Усередині пунктів або підпунктів можуть бути наведені переліки перед яким ставлять двокрапку, а перед кожною позицією перерахування слід ставити дефіс. За необхідності, при деталізації перерахувань використовують малу літеру української абетки, за винятком г, є, і, ї, и, й, о, ч, ь, після якої ставиться дужка (перший рівень деталізації), наприклад: а)...; б)...; в)... . Для подальшої деталізації переліку слід використовувати арабські цифри з дужкою (другий рівень деталізації) наприклад: 1)...; 2)...; 3)...

Оформлення ілюстрацій

Ілюстрації позначають словом «Рисунок» і нумерують послідовно в межах розділу, за винятком ілюстрацій, поданих у додатках.

Номер ілюстрації повинен складатися з номера розділу і порядкового номера ілюстрації, між якими ставиться крапка. Наприклад: Рисунок 1.2 (другий рисунок першого розділу).

Ілюстрації повинні мати назву, яку розміщують під ілюстрацією. За необхідності між ілюстрацією та назвою розміщують пояснювальні дані.

В тексті ілюстрацію розміщують симетрично до тексту після першого посилання на неї або на наступній сторінці, якщо на даній вона не вміщується без повороту.

На всі ілюстрації в тексті пояснювальної записки мають бути посилання. Посилання виконують за формою: «...показано на рисунку 3.1» або в дужках за текстом (рисунок 3.1), на частину ілюстрації: «... показані на рисунку 3.2,б».

У випадку, коли ілюстрація складається з частин, їх позначають малими буквами українського алфавіту з дужкою (а), б)) під відповідною частиною. В такому випадку після найменування ілюстрації ставлять двокрапку і дають найменування кожної частини за формою:

а) – найменування першої частини; б) – найменування другої частини або за ходом найменування ілюстрації, беручи букви в дужки

Рисунок 1.2 – Розрахункові схеми процесів свердління (а)
та зенкерування (б)

Оформлення таблиць

Таблиці нумерують послідовно (за винятком таблиць, поданих у додатках) у межах розділу. Перед відповідним заголовком таблиці розміщують напис «Таблиця» із зазначеннями номера. Номер таблиці повинен складатися з номера розділу і порядкового номера таблиці, між якими ставиться крапка, наприклад: «Таблиця 1.2» (друга таблиця першого розділу). Якщо в розділі є лише одна таблиця, її нумерують за загальними правилами.

При перенесенні частини таблиці на інший аркуш (сторінку) слово «Таблиця» і номер її вказують один раз справа над першою частиною таблиці, над іншими частинами пишуть слова «Продовження таблиці» і вказують номер таблиці, наприклад: «Продовження таблиці 1.2».

Таблицю слід розташовувати безпосередньо після тексту, в якому вона згадується вперше, або на наступній сторінці. На всі таблиці мають бути посилання в роботі перед їх наведенням у тексті.

Таблиця повинна мати назву, яку друкують малими літерами (крім першої великої) і розміщують над таблицею без абзацного відступу. Назва має бути стислою та відповідати змістові таблиці.

Слово «Таблиця» та її назву вказують один раз зліва над першою частиною таблиці, над іншими частинами пишуть «Продовження таблиці» із зазначенням номера таблиці.

Оформлення формул

Формули (якщо їх більше однієї) нумерують у межах розділу. Номер формули складається з номера розділу і порядкового номера формули в розділі, між якими ставлять крапку. Номери формул пишуть біля правого поля аркуша на рівні відповідної формули в круглих дужках, наприклад: (3.1) (перша формула третього розділу).

При використанні формул необхідно дотримуватися певних правил.

Для набору формул рекомендується використання математичних редакторів Microsoft Equation (переважно), Math Type з наступними розмірами символів: звичайний – 14 пт, великий індекс – 10 пт, дрібний індекс – 7 пт, великий символ – 24 пт, дрібний символ – 12 пт.

Для редактора формул використовуються наступні параметри: великі, малі грецькі літери та символи – шрифт Symbol, інші – Times New Roman.

Найбільші, а також довгі і громіздкі формули, котрі мають у складі знаки суми, добутку, диференціювання, інтегрування, розмішують на окремих рядках. Це стосується також і всіх нумерованих формул. Для економії місця кілька коротких однотипних формул, відокремлених від тексту, можна подати в одному рядку, а не одну під одною. Невеликі і нескладні формули, що не мають самостійного значення, вписують всередині рядків тексту.

Пояснення значень символів і числових коефіцієнтів треба подавати безпосередньо під формулою в тій послідовності, в якій вони наведені у формулі. Значення кожного символу і числового коефіцієнта треба подавати з нового рядка. Перший рядок пояснення починають без абзацу словом «де» без двокрапки. Пояснення кожного символу необхідно починати з нового рядка.

Розділові знаки розставляють у розшифровці таким чином:

- між символом і текстом ставлять тире;
- одиниці вимірювань відокремлюють від тексту комою. Якщо необхідно навести числове значення величини, то його записують після розшифрування;
- перед наступним символом ставлять крапку з комою;
- у кінці останньої розшифровки ставлять крапку.

Модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики β ,

$$\frac{H \cdot m}{c^{-1}},$$

$$\beta = \frac{2M_{\kappa}}{\omega_{0n} \cdot S_{\kappa}}, \quad (3.1)$$

де S_{κ} – критичне ковзання, $S_{\kappa} = 0,26$;

M_{κ} – критичний момент електродвигуна, $M_{\kappa} = 214,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$,

$$\beta = \frac{2 \cdot 214,8}{104,7 \cdot 0,26} = 15,78 \frac{H \cdot m}{c^{-1}}.$$

Рівняння і формули треба виділяти з тексту вільними рядками. Вище і нижче кожної формули потрібно залишити не менше одного вільного рядка. Якщо рівняння не вміщується в один рядок, його слід перенести після знаку рівності (=) або після знаків плюс (+), мінус (–), множення. Нумерувати слід лише ті формули, на які є посилання в наступному тексті, інші нумерувати не рекомендується.

Загальне правило пунктуації в тексті з формулами таке: формула входить до речення як його рівноправний елемент. Тому в кінці формул і в тексті перед ними розділові знаки ставлять відповідно до правил пунктуації.

Двокрапку перед формулою ставлять лише у випадках, передбачених правилами пунктуації: а) у тексті перед формулою є узагальнююче слово; б) цього вимагає побудова тексту, що передусе формулі.

Розділовими знаками між формулами, котрі йдуть одна під одною і не відокремлені текстом, можуть бути кома або крапка з комою безпосередньо за формулою до її номера.

Оформлення додатків

Додатки слід позначати послідовно великими літерами української абетки, за винятком літер Г, Є, І, И, Ї, Й, О, Ч, Ь. Наприклад: Додаток А, Додаток Б і т. д.

За необхідності текст додатків може поділятися на розділи, підрозділи, пункти і підпункти, які слід нумерувати в межах кожного додатка. У цьому разі перед кожним номером ставлять позначення додатка (літеру) і крапку, наприклад, А.2 – другий розділ додатка А; Г.3.1 – підрозділ 3.1 додатка Г; Д.4.1.2 – пункт 4.1.2 додатка Д; Ж.1.3.3.4 – підпункт 1.3.3.4 додатка Ж.

Ілюстрації, таблиці, формули та рівняння, що є у тексті додатку, слід нумерувати в межах кожного додатку, наприклад, рисунок Г.3 – третій рисунок додатку Г; таблиця А.2 – друга таблиця додатку А; формула (А.1) – перша формула додатку А.

У тексті роботи на всі додатки повинні бути дані посилання.

У змісті курсової роботи наводять перелік усіх додатків, їх назви та відповідні сторінки.

Формулювання висновків до КР

Курсова робота повинна містити висновки. Останні викладаються на 1–2 сторінках формату А4 і повинні включати всі проміжні висновки по кожній частині курсової роботи.

Висновки оформляють з нової пронумерованої сторінки посередині рядка із заголовком **ВИСНОВКИ**.

Висновки є підсумковою частиною прийнятих рішень при виконанні курсової роботи. У висновках необхідно проаналізувати виконання поставлених завдань та досягнення мети курсової роботи.

Наводиться коротка характеристика виконання всіх розділів КР з формулюванням висновків до кожного розділу про те, який результат було досягнуто.

Оформлення списку використаної літератури

Бібліографічний опис джерел складають відповідно до чинних стандартів, зокрема ДСТУ ГОСТ 7.1.2006 та ДСТУ 3582-97.

Бібліографічний опис дається на мові джерела та складається з кількох розміщених у певній послідовності елементів. Існують відмінності щодо оформлення бібліографічного опису книги, збірника, періодичного видання тощо (наприклад, статті).

Посилання на джерела в тексті роботи розмішують у квадратних дужках після відповідної цитати, наприклад [12]. Тут «12» – це номер у списку літератури тієї публікації, на яку посилається автор.

2 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ ІЗ ПРИКЛАДАМИ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ

2.1 Розробка компоновки РТК

Робототехнологічний комплекс (РТК) – це автономно діюча сукупність технологічних засобів виробництва, що забезпечує повністю автоматичний цикл роботи всередині комплексу і його зв'язок із вхідними й вихідними потоками іншого виробництва, що включає в себе одиницю або групу технологічного напіваавтоматичного встаткування (наприклад, металорізальні верстати), промислові роботи, допоміжне устаткування.

На базі тих самих моделей верстатів можуть створюватися РТК різних компонувань, що комплектуються промисловими роботами з різними технічними і технологічними можливостями.

Найбільше поширення одержали РТК наступних компонувань:

- одноверстатні, що складаються із одного верстата, який обслуговується підвісним (розташованим над верстатом), підлоговим (розташованим поряд з верстатом) або вбудованим у верстаті промисловим роботом;
- багатоверстатні РТК лінійного й лінійно-паралельного компонування, що обслуговуються підвісними промисловими роботами;
- багатоверстатні РТК кругового компонування, що обслуговується підлоговим промисловим роботом.

За сферою застосування розрізняють наступні роботизовані комплекси: механообробки; холодного штампування; кування; лиття; пресування пластмас; термічної обробки й гальванопокриттів; зварювання; фарбування; транспортування; контролю й випробувань; зборки.

Типові компонування РТК наведені в літературі [8].

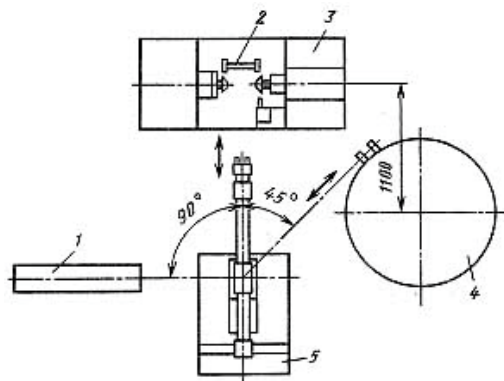
2.2 Типові схеми компонування роботизованих комплексів для операцій механообробки й холодного штампування

РТК механообробки

До складу РТК механообробки входять: верстат, промисловий робот, транспортні пристрої; накопичувачі. На рисунку 2.1 показане планування РТК для випадку, коли ПР обслуговує 1 верстат.

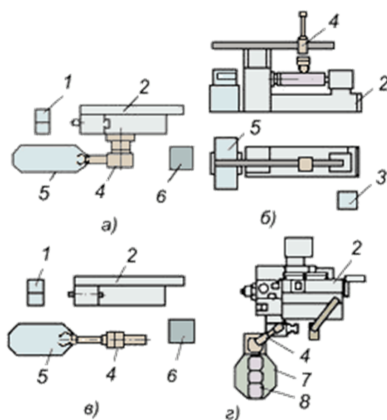
При обслуговуванні металообробного встаткування промислові роботи можуть виконувати наступні допоміжні операції: установку заготовок у робочій зоні верстата й зняття обробленої деталі з укладанням її на конвеєр в орієнтуючий магазин і т. п.; контроль розмірів заго-

товок і оброблених деталей; перевірку правильності базування й фіксації заготовок у затискних пристосуваннях верстатів; зміну захватних пристроїв, а також інструментальних комплектів [5].



1 – лоток для передачі деталі на інший верстат; 2 – знімач;
3 – верстат; 4 – магазин-накопичувач; 5 – ПР
Рисунок 2.1 – Планування РТК механообробки

На рисунку 2.2 показані приклади розташування промислових роботів у складі РТК.



а) – вбудований у верстат, б) – порталний, в) – установлений поруч із верстатом, г) – вбудований у ГПМ

Рисунок 2.2 – Розташування промислових роботів у РТК із одним верстатом

На рисунку 2.2,а) показаний промисловий робот 4, вбудований у металорізальний верстат із системою керування 3. Тактовий стіл 5 подає заготовку на фіксовану позицію. Промисловий робот знімає заготовку й установлює її в робочу зону верстата 2. Після обробки готова деталь знімається й установлюється роботом у ту ж позицію тактового стола. Потім система керування 1 промислового робота подає сигнал для переміщення тактового стола на один крок: готова деталь переміщається на іншу позицію, а на її місце надходить нова заготовка.

На рисунку 2.2,б) показаний порталний промисловий робот 4, установлений над верстатом 2 із системою керування 3. Накопичувач заготовок 6 розміщується поруч із верстатом. Для завантаження-розвантаження заготовок служить каретка, що переміщається по порталу.

На рисунку 2.2,в) показаний промисловий робот 4 для установки й зняття інструментів і готових виробів, установлений поруч із верстатом 2 і працюючий у циліндричній системі координат. Завантаження заготовок відбувається з використанням тактового стола 5 і промислового робота 4 у верстат 2. Верстат і промисловий робот мають свої системи керування відповідно 3 і 1.

На рисунку 2.2,г) показане застосування промислового робота в ГВМ для обробки корпусних деталей. Модуль складається зі стелажа 7 для нагромадження заготовок 8 і оброблених деталей і верстата 2, що працює без участі робітника. Промисловий робот 4 служить для установки заготовки зі стелажа в робочу зону верстата й обробленої деталі з робочої зони в стелаж 7.

РТК холодного штампування

Промисловий робот використовується тут, як і в операціях механообробки, насамперед для виконання операцій завантаження-розвантаження.

На робототехнічному комплексі при холодному листовому штампуванні виконуються наступні технологічні операції:

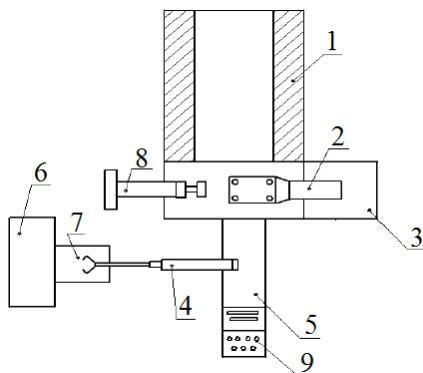
- подача верхньої заготовки зі стопи, покладеної в магазині, на рівень захвата її рукою робота;
- захват заготовки з вихідної позиції магазину й перенос її в робочу зону преса;
- укладання заготовки в штамп;
- штампування виробу;

- винос відштампованого виробу з робочої зони преса;
- скидання виробу в тару.

До складу робототехнічного комплексу входять:

- основне технологічне обладнання (преси – один або декілька);
- промислові роботи (один або декілька);
- пристрій подачі заготовок;
- тара для готових деталей;
- межопераційний пристрій;
- пристрій керування.

Типове компонування роботизованого технологічного комплексу в ковальсько-пресовому виробництві наведено на рисунку 2.3.



- 1 – прес; 2 – лоток, у напрямку якого йде деталь; 3 – тара під деталь;
 4 – промисловий робот; 5 – платформа робота; 6 – накопичувач, пристрій, що подає; 7 – місце позиціонування заготовки під схват робота;
 8 – пневмодув; 9 – система керування роботом

Рисунок 2.3 – Структура роботизованого модуля

для холодної листової штамповки з одним промисловим роботом

У такому компонуванні застосовуються преси з автоматичним видаленням відштампованої деталі в тару. Цей РТК має найбільшу продуктивність, тому що після установки деталі в штамп робот відразу ж продовжує переміщення за наступною заготовкою. Крім того, таке компонування зручне для оператора при заміні штампового оснащення й налагодженні роботизованої позиції [5].

Короткі відомості про ієрархічну структуру системи керування інтелектного робота

Організацію цілеспрямованої поведінки інтелектного робота забезпечує система керування, яка може бути представлена в першому наближенні у вигляді ієрархічної послідовності взаємозалежних підсистем, кожна з яких вирішує обмежену частину завдання, має певну самостійність, і її керуючі команди є одночасно виконавчими командами для підсистеми нижчого рівня [9].

На вхід системи керування надходить завдання – виконати конкретну технологічну операцію.

Стратегічний рівень. Основні завдання цього рівня – сприйняття значення завдання, перетворення його в послідовність елементарних дій з наступною конкретизацією кожної дії шляхом підстроювання його по параметрах.

Послідовність макрокоманд на виході стратегічного рівня системи можна представити, наприклад, у вигляді: $\theta_1(p_1); \theta_2(p_2); \dots \theta_k(p_k)$, де кожний символ θ_k ($k=1,2,\dots$) має сенс досить простого механічного тиску або дії, такої, як: взяти, принести й т. п., що активізує відповідну підсистему на виконавчому рівні, а параметри p_k конкретизують кожну дію, указуючи, наприклад, місце, швидкість, орієнтацію, спосіб захвата й т. п.

Технічний рівень. Завданням цього рівня є перетворення макрокоманд елементарних дій виконавчого механізму в закони погодженої зміни його узагальнених координат. За допомогою узагальненої координати, q_i ($i=1,2,\dots,N$), яка визначається як $q_i = \sigma : \varphi_i + (1 + \sigma_i) S_i$, знаходиться положення i -ї ланки маніпулятора робота відносно $(i-1)$ -ї ланки у виразі (1) $\sigma_i = 1$ для обертальної пари, $\sigma_i = 0$ для поступальної пари. У випадку поступальної пари S_i визначають поступальне переміщення i -ї ланки відносно $(i-1)$ -ї, а у випадку обертальної пари φ_i визначають кут повороту i -ї ланки відносно $(i-1)$ -ї.

Якщо рух у кожному зчленуванні забезпечується автономним приводом, то виходом тактичного рівня є вхідні керуючі сигнали цих приводів – бажані закони руху в рухливих з'єднаннях маніпулятора або необхідні моменти двигунів.

Це завдання вирішується, як правило, у два етапи. Оскільки схват – єдиний орган виконавчого механізму, безпосередньо взаємодіючий із зовнішнім середовищем, спочатку планується виконання кожної

макрооперації на рівні поведінки схвата. Потім вирішується завдання поділу запланованого командного руху на виконавчі наступні приводи.

Виконавчий рівень. Сукупність наступних приводів разом з виконавчим механізмом утворює останній – виконавчий рівень системи керування робота. Таким чином, завдання виконавчого рівня полягає в перетворенні вхідних командних сигналів у безпосереднє переміщення ланок виконавчого механізму.

2.3 Приклад проєктування РТК механообробки

Роботизований технологічний комплекс на базі токарського оброблюваного центру з ЧПК й промислового робота підлогового типу

Технічні характеристики основного технологічного обладнання.

Токарський оброблюваний центр 1715 (рисунок 2.4) призначений для комплексної обробки деталей типу тіл обертання [6].



Рисунок 2.4 – Токарський оброблюваний центр 1715

На верстаті можливе виконання операцій точіння, розточування, свердління, розгортання отворів співвісних осі шпинделя, а також тангенціальних; нарізування різьблень в отворах, фрезерування кінцевими, торцевими, тристоронніми й фасонними фрезами, шліцевої і зубофрезерної обробки.

Відомості про деталь-представника: деталь типу фланця з габаритними розмірами: $D = 146$ мм, $L = 90$ мм; маса заготовки – 3,4 кг.

Відповідно до маршрутної технології обробка фланця із двох сторін проводиться в одній операції на токарському двошпиндельному верстаті з ЧПК (обробному центрі). Машинний час першої установки $T'_m = 3,9$ хв; машинний час другої установки $T''_m = 4,7$ хв. На обох установках заготовка базується у трикулачковому патроні.

Технічні характеристики оброблюваного центру 1715 наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики оброблюваного центру 1715

Параметр	Значення
Найбільший діаметр оброблюваного виробу над станиною, мм	210
Найбільша довжина встановлюваного виробу в центрах, мм	500
Діаметр циліндричного отвору в шпинделі, мм	72
Найбільше переміщення по осі Y, мм	±50
Найбільша частота обертання стола шпинделя револьверної головки, хв. ⁻¹	6000
Швидкість прискорених переміщень, м/хв: по координатах X, Z; по координаті Y	20 10
Діапазон кругових подач шпинделя, хв. ⁻¹	0,01–20
Діапазон частот обертання шпинделя, хв. ⁻¹	45–4500
Потужність двигуна контршпинделя, кВт	5,5–7,5
Діапазон частот обертання контршпинделя, хв. ⁻¹	45–4500
Кількість позицій інструментальної головки	12
Максимальні розміри інструмента (діаметр/довжина), мм	80/150
Потужність головного привода (S1/S6 – 40 %), кВт	5,5–7,5
Габаритні розміри (без транспортера стружки), мм	1820×1735×2990
Маса, кг	3500

2.4 Вибір промислового робота

Основні вимоги, яким повинен відповідати промисловий робот (ПР), що працює у складі РТК[3]:

- забезпечення заданої вантажопідйомності;
- розміри робочої зони промислового робота повинні визначатися розмірами, формою і положенням робочих зон обслуговуваного устаткування;
- система керування промислового робота вибирається з урахуванням способу позиціонування робочого органу, кількості координат, що керуються, обсягу пам'яті;
- захватний пристрій ПР вибирається з урахуванням конструктивно-технологічних параметрів об'єкта маніпулювання.

Вантажопідйомність промислового робота повинна перевищувати масу об'єкта маніпулювання не менше ніж на 10 %.

Форми і розміри робочої зони мають бути такими, щоб завантаження і вивантаження заготовки з робочої зони основного і допоміжного устаткування здійснювалося безперешкодно.

Для обслуговування одного верстата вибираємо ПР підлогового типу, оснащений однопозиційним захватним пристроєм.

З урахуванням маси заготовки (3,4 кг) і самого захватного пристрою (орієнтовно не менш 5 кг) потрібно вибрати ПР із номінальною вантажопідйомністю 10 кг.

Для проєктованого РТК вибираємо ПР моделі Prab 4200 підлогової установки.

Технічна характеристика робота представлена в таблиці 2.2.

Промисловий робот Prab 4200 показаний на рисунку 2.5.

Таблиця 2.2 – Технічна характеристика робота

Найменування показника	Величина показника
Номінальна вантажопідйомність, кг	34
Число ступенів рухливості	4
Число рук/захватів на руку	1/1
Тип привода	Гідравлічний
Пристрій керування	Змінний кулачковий програмний барабан
Спосіб програмування переміщень	Навчання по першому циклу
Ємність пам'яті системи, число гнізд	576
Погрішність позиціонування, мм	0,7
Маса, кг	1300
Максимальний радіус зони обслуговування R , мм	2541
Лінійне переміщення r (зі швидкістю 1,0 м/с) мм	1060
Умовні переміщення, гради:	
φ (зі швидкістю 90 град/с);	270
θ (зі швидкістю 15 град/с);	20
α (зі швидкістю 45 град/с)	90

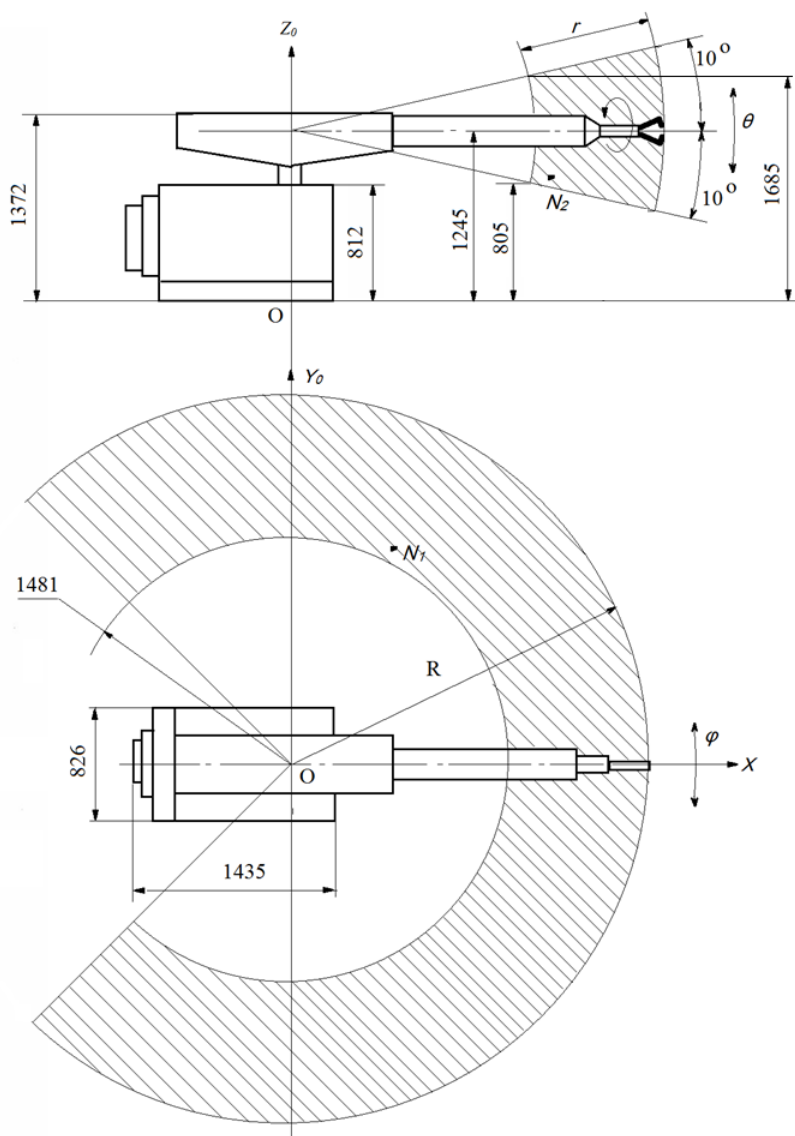


Рисунок 2.5 – Промисловий робот Prab 4200

3 СКЛАДАННЯ КІНЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МАНІПУЛЯТОРА

Кінематичне дослідження промислового робота (ПР) починається зі складання кінематичної моделі його маніпулятора.

Це схема маніпулятора, на якій показані взаємне розташування виконавчих ланок, їх розміри, а також типи й розподіл кінематичних пар, зафіксована в теперішній момент часу його руху.

Для визначення положення ланок і об'єкта маніпулювання повинні бути введені наступні системи координатних осей:

- опорна система O_0, X_0, Y_0, Z_0 , скріплена з нерухливою основою (її орієнтація показана на рисунку 3.1);

- локальні системи $O_i, X_i, Y_i, Z_i, (i = 1, 2, \dots, n)$, кожна з яких скріплена зі своєю i -ю ланкою; тобто система O_1, X_1, Y_1, Z_1 – з першою від основи ланкою, O_2, X_2, Y_2, Z_2 – із другою ланкою, і т. п.; система O_n, X_n, Y_n, Z_n – з останньою у кінематичному ланцюзі ланкою, що закінчуються схватом.

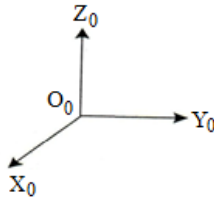


Рисунок 3.1 – Орієнтація опорної системи координатних осей, скріплена з нерухливою основою

Положення першої ланки щодо нерухливої основи визначається узагальненою координатою q_1 , другої ланки щодо першої – координатою q_2 , третьої ланки щодо другої – координатою q_3 і т. п. Якщо дві ланки зв'язані між собою поступальною кінематичною парою, то відповідна узагальнена координата буде лінійною, якщо обертальною парою – то кутовою [10, 13].

Усі системи координатних осей повинні бути правими. Це означає, що якщо дивитися з боку вектора осі Z_i , поворот осі X_i до осі Y_i повинен відбуватися проти годинникової стрілки.

Початок відліку O_i повинен бути сполучений із центром відповідної кінематичної пари. У випадку, якщо остання ланка, що несе схват,

здійснює поступальне переміщення, початок O_n системи осей $O_n X_n Y_n Z_n$ слід сполучити з полюсом М схвата.

Розташування ланок повинне відповідати позитивним значенням координат q_i . Позитивному напрямку лінійного переміщення відповідає зростання лінійної координати q_i .

Позитивному значенню кутового переміщення відповідає поворот ланки проти годинникової стрілки, якщо дивитися з боку вектора осі, навколо якої відбувається цей поворот.

Число ступенів рухливості робота (n) дорівнює числу кінематичних пар, або числу виконавчих ланок.

Розв'язання 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 [5, 9, 10, 13]. Потрібно знайти положення й орієнтацію захвата в системі координат 0 (стояка). Геометричні розміри ланок вважаються відомими.

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.

Необхідність у розв'язку такого завдання виникає у зв'язку з тим, що положення схвата не може бути обмірюване безпосередньо, у той час як відносні переміщення ланок визначаються, наприклад, за допомогою потенціометричних датчиків, тому потрібні відповідні обчислення. Це завдання вирішується однозначно.

Згідно з рисунком 2.5 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 .

- 3 i -ю ланкою зв'язується система осей O_i, X_i, Y_i, Z_i . 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.

2. Вісь $O_i X_i$ перпендикулярна одночасно осям $O_i Z_i$ та $O_{i-1} Z_{i-1}$. Вісь $O_i Y_i$ перпендикулярна осям $O_i Z_i$ і $O_i X_i$ і доповнює їх до правої тріади.

Перехід системи осей з i -ї системи в $(i-1)$ визначається матрицею переходу A_i , яка знаходиться по наступному виразу:

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

де θ_i – кут повороту системи осей $O_{i-1}, X_{i-1}, Y_{i-1}, Z_{i-1}$ навколо осі $O_{i-1} Z_{i-1}$, що забезпечує паралельність осей $O_{i-1} X_{i-1}$ і $O_i X_i$; α_i – кут повороту систем осей $(i-1)$ уздовж O_{i-1}, X_{i-1} ; a_i – перенос систем осей $(i-1)$ уздовж O_{i-1}, X_{i-1} до збігу центрів O_{i-1} і O_i ; d_i – перенос системи осей $(i-1)$ уздовж осі $O_{i-1} Z_{i-1}$ поки O_{i-1}, X_{i-1} і $O_i X_i$ не опиняться на одній прямій – до їхнього сполучення.

На рисунку 3.2 наведена кінематична схема робота з розбивкою осей координат.

Для одержання матриць переходів складаємо таблицю й заносимо в неї дані, які визначені виходячи з кінематичної схеми (рисунк 3.2). Дані заносимо в таблицю 3.1 у загальному вигляді.

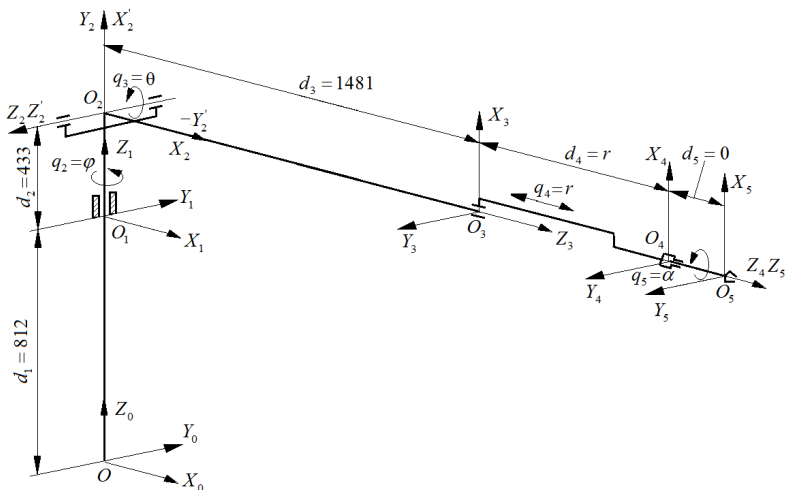


Рисунок 3.2 – Кінематична схема робота

Таблиця 3.1 – Параметри кінематичної схеми робота

Номер матриці	Узагальнена координата q_i	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	φ	φ	d_2	–	90	$X_2Y_2Z_2$
3	θ	$\theta+90$	–	–		$X_2'Y_2'Z_2'$
4	–	–	d_3	–	90	$X_3Y_3Z_3$
5	R	–	R	–	–	$X_4Y_4Z_4$
6	α	α	d_5	–	–	$X_5Y_5Z_5$

Враховуючи дані таблиці 3.1 і використовуючи вирази (3.1), одержуємо наступні матриці переходів:

$$A_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (3.2)$$

$$A_2 = \begin{vmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & 0 & -\cos\varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (3.3)$$

$$A_3 = \begin{vmatrix} \cos(\theta+90) & -\sin(\theta+90) & 0 & 0 \\ \sin(\theta+90) & \cos(\theta+90) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\sin\theta & -\cos\theta & 0 & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (3.4)$$

$$A_4 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (3.5)$$

$$A_5 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (3.6)$$

$$A_6 = \begin{vmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (3.7)$$

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

$$A = \prod_{i=1}^n A_i, \quad (3.8)$$

де i – номер матриці переходу; n – кількість матриць переходу; у розглянутому випадку $n = 6$. Перемножування по виразу (3.8) з урахуванням (3.2)–(3.7) проводилося на комп'ютері (програма Matcad 6.0) і матриця A вийшла громіздкою. Однак у загальному вигляді матрицю A можна представити в R вигляді:

$$A = \begin{vmatrix} a & r \\ 000 & 1 \end{vmatrix}, \quad (3.9)$$

де a – матриця напрямних косинусів положення осей системи $O_nX_nY_nZ_n$ щодо нерухливої системи $OX_0Y_0Z_0$; r – радіус-вектор положення схватного пристрою в нерухливій системі координат

$$r = (X_1Y_1Z_1). \quad (3.10)$$

Тоді після перетворень і з урахуванням виразів (3.9), (3.10), а також того, що координата a не впливає на розташування маніпулятора в просторі, одержуємо вирази проєкцій на осі координат:

$$X = (1481 + r) \cos \varphi \cos \theta; \quad (3.11)$$

$$Y = (1481 + r) \sin \varphi \cos \theta; \quad (3.12)$$

$$Z = 1245 + (1481 + r) \sin \theta. \quad (3.13)$$

У виразах (3.11)–(3.13) r , θ , φ – узагальнені координати, значення яких лежать у наступних межах:

$$0 \leq r = 1060 \text{ мм}; \quad -135^\circ \leq \varphi \leq 135^\circ; \quad -10^\circ \leq \theta \leq 10^\circ. \quad (3.14)$$

Задаємося значеннями узагальнених координат враховуючи умови (3.14):

$$r = 1060 \text{ мм}; \quad \varphi = 135^\circ \quad \theta = 10^\circ. \quad (3.15)$$

За виразами (3.11)–(3.13) при заданих значеннях узагальнених координат (3.15) одержуємо проєкції радіус-вектора на осі координат:

$$X_M = (1481 + 1060) \cos 135^\circ \cos 10^\circ = -1769,5 \text{ мм}; \quad (3.16)$$

$$Y_M = (1481 + 1060) \sin 135^\circ \cos 10^\circ = 1769,5 \text{ мм}; \quad (3.17)$$

$$Z_M = 1245 + (1481 + 1060) \sin 10^\circ = 1686,2 \text{ мм}. \quad (3.18)$$

На рисунку 2.5 зображені осі нерухливої системи координат $OX_0Y_0Z_0$, а також проєкції т. М координати, що має координати (3.16)–(3.18).

3.2 Розв’язання зворотної задачі кінематики

Для вирішення зворотної задачі кінематики спочатку розв’язують пряму задачу кінематики для заданої кінематичної схеми маніпулятора у загальному вигляді.

Зворотну задачу кінематики можна сформулювати так: задана кінематична схема маніпулятора і відомі положення й орієнтація захвата в системі координат основи. Потрібно розрахувати значення узагальнених координат, що забезпечать задане положення та орієнтацію захвата [9, 10, 13].

Вирішення зворотної задачі полягає в наступному: по заданому положенню схвата визначити узагальнені координати виконавчого механізму, що є рішенням нелінійної системи алгебраїчних рівнянь. Рішення зворотної задачі кінематики, як і прямої задачі, проводиться на тактичному рівні.

Для маніпуляторів деяких типів вдається записати явні вирази, що дозволяють обчислити значення коренів q_i . У загальному випадку для цієї мети доводиться використовувати ітеративні алгоритми (повторювані

багаторазово). Характерною рисою рішення зворотних задач кінематики є багатозначність.

Нехай нам необхідно вирішити задачу переміщення схвата з точки M у точку N (рисунок 2.5). Дані точки мають наступні координати:

$$M(X_M, Y_M, Z_M) \text{ або } M(-1769,5; 1769,5; 1686,2);$$

$$N(X_n, Y_n, Z_n) \text{ або } N(600; 1500; 1050).$$

Положення робота характеризується вектором узагальнених координат $q = q_1; q_2; q_3; q_4$ або інакше можна записати $\bar{q} = (\varphi; \theta; r; \alpha)$. Вирази, що описують проєкції захватного пристрою на осі координат, були знайдені при рішенні прямої задачі кінематики – вирази (3.11)–(3.13).

У кожен теперішній момент часу можна визначити складові вектора помилки неузгодженості $\varepsilon = (\varepsilon_x; \varepsilon_y; \varepsilon_z)$:

$$\varepsilon_x = \Delta X = X_n - X; \quad (3.19)$$

$$\varepsilon_y = \Delta Y = Y_n - Y; \quad (3.20)$$

$$\varepsilon_z = \Delta Z = Z_n - Z. \quad (3.21)$$

Використовуючи вирази (3.19)–(3.21), сформулюємо критерій якості керування

$$I(\bar{q}) = \frac{1}{2} [(X_n - X)^2 + (Y_n - Y)^2 + (Z_n - Z)^2], \quad (3.22)$$

мінімальне значення якого $I = 0$ буде відповідати переміщенню в цільову точку N . Тобто необхідно визначити такий вектор $\bar{q}$, для якого критерій $I(\bar{q})$ обертається в нуль. Будемо використовувати градієнтний метод оптимізації, заснований на тому, що функція $I(\bar{q})$ досягає екстремума тільки при таких значеннях $\bar{q}$, для яких частки похідні від функції $I(\bar{q})$ по всіх узагальнених координатах окремо одночасно обертаються в нуль, тобто для яких градієнт функції

$$\nabla \bar{q} I(\bar{q}) = \left(\frac{\partial I(\bar{q})}{\partial \varphi}, \frac{\partial I(\bar{q})}{\partial \theta}, \frac{\partial I(\bar{q})}{\partial r}, \frac{\partial I(\bar{q})}{\partial \alpha} \right) \quad (3.23)$$

$$\nabla \bar{q} I(\bar{q}) = 0.$$

Представимо рівняння (3.23) у рівноважній формі $\bar{q} = \bar{q} - \gamma \nabla \bar{q} l(\bar{q})$, де γ – деякий скаляр, і будемо шукати оптимальний вектор $\bar{q} = \bar{q}^*$ за допомогою послідовних наближень:

$$\bar{q}[n] = \bar{q}[n-1] - \gamma[n] \nabla \bar{q} l(\bar{q}[n-1]). \quad (3.24)$$

Значення $\gamma[n]$ визначає величину чергового кроку. При виконанні необхідних умов збіжності виявляється, що $\lim \bar{q}[n] = \bar{q}^*$.

Таким чином, вирішуючи зворотну задачу (3.24), знайдемо необхідний вектор $\bar{q}^*$ для цільової точки N .

Для нашого випадку алгоритм (3.24) буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \varphi[n] = & \gamma[n-1] - \varphi \left\{ (X_n - X[n-1]) \frac{\partial X[n-1]}{\partial \varphi} + (Y_n - Y[n-1]) \frac{\partial Y[n-1]}{\partial \varphi} + \right. \\ & \left. + (Z_n - Z[n-1]) \frac{\partial Z[n-1]}{\partial \varphi} \right\}; \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} \theta[n] = & \gamma[n-1] - \theta \left\{ (X_n - X[n-1]) \frac{\partial X[n-1]}{\partial \theta} + (Y_n - Y[n-1]) \frac{\partial Y[n-1]}{\partial \theta} + \right. \\ & \left. + (Z_n - Z[n-1]) \frac{\partial Z[n-1]}{\partial \theta} \right\}; \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} r[n] = & \gamma[n-1] - r \left\{ (X_n - X[n-1]) \frac{\partial X[n-1]}{\partial r} + (Y_n - Y[n-1]) \frac{\partial Y[n-1]}{\partial r} + \right. \\ & \left. + (Z_n - Z[n-1]) \frac{\partial Z[n-1]}{\partial r} \right\} \end{aligned} \quad (3.27)$$

$\alpha[n] = \alpha$, тому що α не впливає на переміщення захвата по координатах X_0, Y_0, Z_0 . Визначимо часткові похідні, що входять до виразів (3.25)–(3.27), враховуючи (3.11)–(3.13):

$$\frac{\partial X[n-1]}{\partial \varphi} = -(1,481 + r[n-1]) \sin \varphi[n-1] \cos \theta[n-1]; \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial Y[n-1]}{\partial \varphi} = (1,481 + r[n-1])\sin \varphi[n-1]\cos \theta[n-1]; \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial Z[n-1]}{\partial \varphi} = 0; \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial X[n-1]}{\partial \theta} = -(1,481 + r[n-1])\cos \varphi[n-1]\sin \theta[n-1]; \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial Y[n-1]}{\partial \theta} = -(1,481 + r[n-1])\sin \varphi[n-1]\sin \theta[n-1]; \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial Z[n-1]}{\partial \theta} = (1,481 + r[n-1])\cos \theta[n-1]; \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial X[n-1]}{\partial r} = \cos \varphi[n-1]\cos \theta[n-1]; \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial Y[n-1]}{\partial r} = \sin \varphi[n-1]\cos \theta[n-1]; \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial Z[n-1]}{\partial r} = \sin \theta[n-1]. \quad (3.36)$$

Складемо програму по алгоритмах (3.25)–(3.27), враховуючи вирази часткових похідних (3.28)–(3.36) і припустивши, що скаляр $\gamma[n]$ не залежить від номера кроку й інших параметрів. Ухвалюємо $\gamma_1 = \gamma_2 = 0,09$ (для виразів (3.25) і (3.26)), $\gamma_3 = 0,25$ (для виразу (3.27)).

Нам необхідно розв'язати задачу переміщення схвата з т. $M(-1,7695; 1,7695; 1,6862)$ у т. $N(0,6; 1,5; 1,05)$. Отже, початкові дані для програми:

$$\begin{aligned} X_M &= -1,7695m; & Y_N &= 1,5m; \\ \varphi_M &= 135^\circ; & Z_M &= 1,6862m; \\ X_N &= 0,6m; & r_M &= 1,06m; \\ Y_M &= 1,7695m; & Z_N &= 1,05m. \\ \theta_M &= 10^\circ; \end{aligned}$$

Розрахунки проведені за допомогою ЕОМ.

Графіки зміни координат наведено на рисунку 3.3.

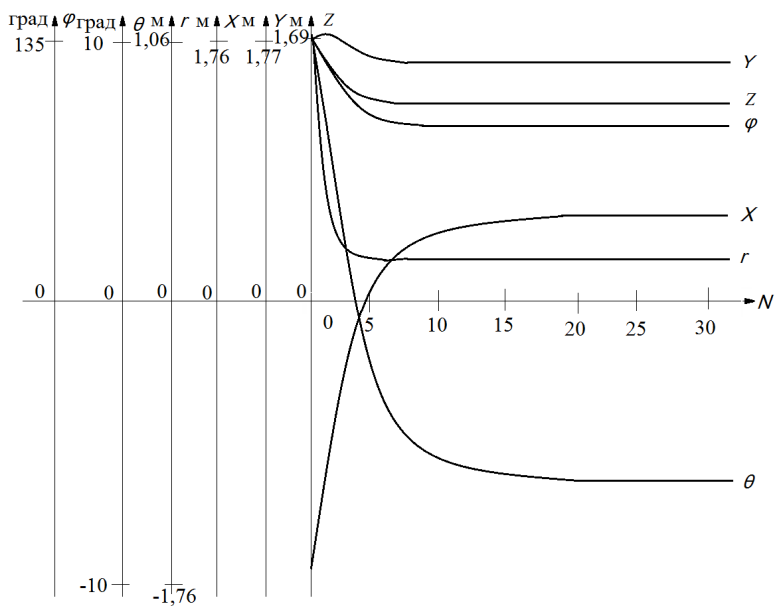


Рисунок 3.3 – Графіки зміни координат

РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ОДНОГО СТУПЕНЯ РУХЛИВОСТІ РОБОТА

Розрахунок потужності електродвигунів робота

У технічному завданні на проєктування задані наступні параметри: m – вантажопідйомність маніпулятора або маса припустимого навантаження, кг; r – максимальний радіус дії, м; $\varphi_{1,2}, S$ – максимальні переміщення вантажу по координатах, рад, м; $\omega_{1,2}, v$ – номінальна швидкість переміщення вантажу по координаті, рад/с (м/с) [1].

Потужність двигуна **обертального ступеня** рухливості N_B , Вт,

$$N_B = \frac{\omega}{\eta} (M_H + M_H), \quad (4.1)$$

де η – ККД передач, що зв'язують двигун з виконавчою ланкою; M_H – момент невідновженості, що виникає від невідновжених мас (включаючи припустиме навантаження) щодо осі обертання, Н·м; M_H – динамічний (інерційний) момент, що виникає в періоди розгону й гальмування, Н·м.

Динамічний момент M_H , Н·м,

$$M_H = J_H \cdot \varepsilon, \quad (4.2)$$

де J_H – момент інерції обертювих частин маніпулятора, кг·м²; ε – кутове прискорення, рад/с².

Для оцінки динамічного моменту зробимо наступні допущення: закон зміни швидкості по координаті – трапецеїдальний, тобто розгін і гальмування відбуваються з постійним прискоренням; довжина шляху розгону $\varphi_p(S_p)$ дорівнює довжині шляху гальмування $\varphi_T(S_T)$ і становить деяку частину загального шляху переміщення $\varphi(S)$:

$$\varphi_p = \varphi_T \cdot K_1.$$

Коефіцієнт K_1 визначимо, виходячи з наступного. При заданій швидкості (ω, v) переміщень по ступеню рухливості швидкодія буде тим більше, чим менше K_1 . Але занадто мале значення K_1 викличе більші динамічні перевантаження на механізми привода, що приведе до передчасного виходу з ладу ПР. Задамося припустимим значенням

перевантажень, рівним 1,5. При цьому максимальне прискорення допустимого навантаження та елементів конструкції ПР не перевищить $g / 2$ або 5 м/с^2 .

Для привода ПР із лінійним переміщенням на 1 м зі швидкістю 1 м/с довжина шляху розгону S_p , м,

$$S_p = \frac{a}{2} \left(\frac{v}{a} \right)^2 = 0,1 \text{ м.}$$

$$K_1 \frac{S_p}{S} = 0,1.$$

Цим значенням K_1 будемо користуватися надалі при орієнтовних розрахунках потужності.

Прискорення ε , виражене через параметри, задані в технічному завданні, має вигляд

$$\varepsilon = \frac{\omega^2}{2K_1\varphi}. \quad (4.3)$$

Момент інерції J_H , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$,

$$J_H = J_r + J_M = K_2 \cdot J_r, \quad (4.4)$$

де $J_r = mr^2$ – момент інерції від маси корисного вантажу на максимальному радіусі обертання; J_M – момент інерції обертових частин маніпулятора при максимальному радіусі переносу; K_2 – коефіцієнт конструкції.

За результатами розрахунків для існуючих конструкцій роботів «Unimate», «Універсал-50», «Універсал-15.01», «МП-9С» коефіцієнт $K_2 = 1,8 \dots 2,3$.

Прийmemo $K_2 = 2$. Підставляючи значення величин з формул (4.3) і (4.4) у формулу (4.2), одержимо вираз для динамічного моменту

$$M_H = \frac{K_2 mr^2 \omega^2}{2K_1 \varphi}. \quad (4.5)$$

Момент невірноваженості M_H , Н·м,

$$M_H = K_3 mgr \sin \alpha, \quad (4.6)$$

де $K_3 = \frac{M_H}{mgr}$ – коефіцієнт конструкції, що враховує момент невідношеності рухливих частин щодо осі обертання; α – кут нахилу площини обертання до горизонтальної площини.

Підставляючи формули (4.5), (4.6) у формулу (4.1), одержимо вирази для розрахунку потужності привода обертальних ступенів рухливості

$$N_B = \frac{\omega mr}{\eta} \left(\frac{K_2}{2K_1} \frac{r\omega^2}{\varphi} + K_3 g \sin \alpha \right). \quad (4.7)$$

Для механізму **обертання руки** щодо вертикальної осі кут $\alpha = 0$. При значеннях $K_1 = 0,1$, та $K_2 = 2$ одержимо потужність P_{BZ} , Вт:

$$N_{BZ} = \frac{10mr^2\omega^3}{\eta\varphi} \cdot K$$

Потужність **прямолінійного руху** N_{Π} , Вт,

$$N_{\Pi} = \frac{v}{\eta} (P_{\Pi} + P_H), \quad (4.9)$$

де P_{Π} – інерційна сила, що діє на привод у період розгону та уповільнення, Н; P_H – сила, що діє на привод від неурівноважених мас (у тому числі вантажу, що переноситься), Н.

Розрахункова схема механізму радіального переміщення руки робота наведена на рисунку 4.1.

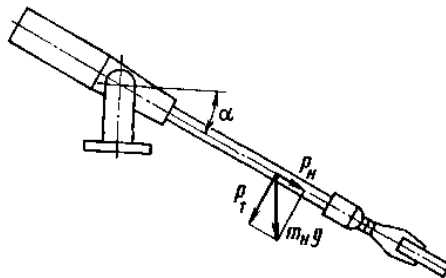


Рисунок 4.1 – Розрахункова схема механізму радіального переміщення

$$P_{\Pi} = K_4 m a, \quad (4.10)$$

де K_4 – коефіцієнт конструкції, що враховує масу рухливих частин маніпулятора, $K_4 = \frac{m_H}{m}$. Тут m_H – загальна маса частин, що переміщаються.

Вирази для лінійного прискорення a та інерційної сили P_H :

$$a = \frac{v^2}{2K_1S}; \quad P_H = K_4 \frac{mv^2}{2K_1S}. \quad (4.11)$$

Сила P_H виникає від маси рухливих частин маніпулятора. Найгірший варіант навантаження привода виникає при максимальному куті уклону α :

$$P_H = m_H g \sin \alpha = K_4 m g \sin \alpha.$$

Потужність прямолінійного руху

$$N_H = \frac{K_4 v m}{\eta} \left(\frac{1}{2K_1} - \frac{v^2}{S} + g \sin \alpha \right). \quad (4.12)$$

Для приводів з **горизонтальним переміщенням** $\alpha=0$, наприклад для маніпуляторів, що працюють у циліндричній системі координат.

Тоді при $K_1 = 0,1$ і $K_4 = 2$

$$N_{Hx} = \frac{10mv^2}{\eta S}. \quad (4.13)$$

Для приводів з **вертикальним переміщенням** $\alpha = 1,57$ рад, переміщення по OZ дорівнює

$$N_{Hz} = \frac{10K_4mv}{\eta} \left(\frac{v^2}{2S} + 1 \right). \quad (4.14)$$

Якщо для привода використовується високошвидкісний двигун, то виникає проблема вибору передаточного числа механізму, що зв'яже двигун з виконавчою ланкою. У тому випадку, якщо в приводі переважають невідновжені навантаження, передаточне число

$$i = \frac{M_H}{M_d \eta},$$

де M_d – момент на валу двигуна.

В тому випадку, якщо в приводі значну роль відіграють динамічні навантаження, з'являється можливість варіювати передаточне число в широких межах. При цьому зі збільшенням i швидко зменшується приведений до вала двигуна момент інерції навантаження J_H , отже, зменшується час розгону до номінальної частоти обертання ω_d й гальмування до нуля. Разом із цим зменшується номінальна швидкість усталеного руху виконавчої ланки. При зменшенні i швидкість усталеного руху росте, але час розгону й гальмування збільшується. У зв'язку із цим виникає задача вибору оптимального i , при якому час переміщення вантажу за ступенем рухливості був би мінімальним. Для вирішення цієї задачі необхідно знати повний час переміщення вантажу.

Розглянемо спочатку обертальний ступінь рухливості. Час повороту виконавчої ланки на деякий кут

$$t_\phi = \left[(i^2 J_d + J_H) \omega_d^2 + \phi i^3 M_{дин} \eta \right] / M_{дин} \omega_d i^2 \eta, \quad (4.15)$$

де J_d – момент інерції обертових частин двигуна з урахуванням наведеного до вала двигуна моменту інерції редуктора; J_H – момент інерції навантаження, тобто момент інерції виконавчої ланки плюс момент інерції корисного навантаження; ω_d – кутова швидкість вала двигуна; $M_{дин}$ – динамічна складова моменту на валу двигуна.

Приймаючи у формулі (4.15) як змінну величину i , можна знайти таке її значення, при якому t_ϕ буде мінімальним. Оптимальне по швидкодії передаточне число редуктора, що зв'язує двигун з виконавчою ланкою,

$$i_{opt} = \sqrt[3]{2 \omega_d^2 J_H / \phi M_{дин} \eta}. \quad (4.16)$$

Формула (4.16) слухна тільки для трапецеїдального закону переміщення, характерного для приводів, у яких приведений момент інерції навантаження перевищує власний момент інерції двигуна. Тому при розрахунках по формулі (4.16) слід перевіряти відношення

$$J_{H,пр} / J_H,$$

де $J_{H,пр}$ – момент інерції привода.

У тому випадку, якщо воно менше одиниці, підраховувати передаточне число слід по формулі

$$i = \sqrt{J_H / J_D} . \quad (4.17)$$

Оскільки в процесі роботи ПР виконують різноманітні цикли, то передаточне число необхідно розраховувати не за конкретним значенням переміщення, а за середнім арифметичним усіх переміщень, що складають цикл. Моменти інерції в кожному із цих переміщень також можуть різнитися. Якщо відомий деякий типовий цикл роботи ПР, то оптимальне передаточне число

$$i = \sqrt[3]{2\omega_D^2 \sum_{k=1}^n J_{Hk} / \left(\sum_{k=1}^n \Phi_k M_{\text{дин}} \eta \right)} , \quad (4.18)$$

де J_{Hk} , Φ_k – відповідно момент інерції навантаження й кут повороту k -го переміщення в типовому циклі, що складається з n послідовних переміщень.

Ясно, що спеціалізація ПР може впливати на конструкцію передавального механізму. Так, ПР, призначений для точкового зварювання, що характеризується множинним позиціонуванням у точках, що знаходяться на близькій відстані один від одного, повинен мати інше передаточне число, чим, наприклад ПР, який працює на завантаженні-розвантаженні верстатів.

Для поступальних прямолінійних механізмів задача зводиться до підбору швидкості v переміщення виконавчої ланки. У цьому випадку час переміщення руки ПР по прямолінійних координатах у випадку трапецеїдального закону переміщення, якщо $J_{H.пр} > J_D$,

$$t_s = \left[(J_D j^2 + m_H) \omega_D^2 + S j^3 M_{\text{дин}} \eta \right] / M_{\text{дин}} \omega_D j^2 n . \quad (4.19)$$

Оптимальне по швидкодії $j = \omega_D / v$ знайдемо, диференціюючи по j (4.19) і прирівнюючи похідну до нуля. Тоді

$$j = \sqrt[3]{2\omega_D^2 m / S M_{\text{дин}} \eta} , \quad (4.20)$$

або

$$v = \sqrt[3]{S M_{\text{дин}} \omega_D \eta / 2 m_H} . \quad (4.21)$$

По формулі (4.21) можна підрахувати оптимальну лінійну швидкість виконавчої ланки, що дозволить вибрати потрібні параметри

передавального механізму: діаметр зубчастого колеса в рейковій передачі, хід гвинта у гвинтовій передачі і т. п.

Коротка методична схема розрахунків енергетичних параметрів привода наступна.

1. Орієнтовний розрахунок за даними технічного завдання потужності двигуна [формули (4.7)–(4.9), (4.12)–(4.14)].

2. Вибір по каталогах підходящих за потужностями двигунів з різними ω_d і M_d .

3. Розрахунки оптимальних за швидкістю передаточних чисел для кожного двигуна [формули (4.16)–(4.18), (4.20) і (4.21)].

4. Вибір двигуна, що забезпечує найменший час відпрацювання типового циклу переміщень і найбільш компакту конструкцію.

Формули (4.15) і (4.19) можуть бути використані для наближених розрахунків циклограм роботи ПР.

4.2 Приклад розрахунку потужності приводу та вибір двигуна однієї (заданої) ланки маніпулятора

Визначимо маси ланок робота:

Повна маса – 1300 кг, з них:

Основа – 780 кг;

1 ланка – 120 кг;

2 ланка – 250 кг;

3 ланка – 150 кг;

4 ланка – 0 кг.

Вантажопідйомність – 34 кг.

Розраховувати будемо привод маніпулятора по координаті θ , тоді навантаження на цей привод складе:

$$m_n = m_1 + m_2 + m_3 + m_4;$$

$$m_n = 250 + 150 + 0 + 34 = 434 \text{ кг.}$$

Для обертальної (поворотної) координати потужність привода розраховується по формулі

$$N_g = \frac{\omega}{\eta} (M_n + M_n), \quad (4.22)$$

де M_n – момент невірноваженості, який виникає від невірноважених мас, включаючи переносимий вантаж, щодо осі обертання;

M_n – динамічний момент, який виникає в період розгону й гальмування;

η – ККД передачі, яка зв'язує двигун з виконавчим механізмом.

Динамічний момент:

$$M_n = J_n \varepsilon, \quad (4.23)$$

де J_n – номінальний момент інерції обертових частин маніпулятора;
 ε – кутове прискорення.

Момент інерції

$$J_n = J_r + J_m = K_2 J_r = K_2 m r^2, \quad (4.24)$$

де J_r – момент інерції від максимального переносимого корисного вантажу на максимальному радіусі дії; J_m – момент інерції обертових частин маніпулятора на максимальному радіусі переносу; K_2 – коефіцієнт конструкції, який вибирається в межах $1,8 \div 2,3$.

Кутове прискорення

$$\varepsilon = \frac{\omega^2}{2K_1 \varphi}, \quad (4.25)$$

де ω – кутова швидкість; K_1 – коефіцієнт, що впливає на швидкодію;
 φ – координата, для якої розраховується потужність.

Момент невідновженості

$$M_n = K_3 m_n g r \sin \alpha, \quad (4.26)$$

де K_3 – коефіцієнт конструкції, який урахує момент невідновженості рухливих частин щодо осі обертання; α – кут нахилу площини обертання до горизонталі.

Підставляючи (4.23)–(4.26) в (4.27), одержуємо остаточний вираз потужності для розрахунків обертальної координати

$$N_e = \frac{\omega m_n}{\eta} \left(\frac{K_2}{r K_1} \cdot \frac{r \omega^2}{\varphi} + K_3 g \sin \alpha \right). \quad (4.27)$$

Для нашого випадку вибираємо $\alpha = 1,57$ рад; $K_3 = 1$ (тобто вважаємо, що механізм маніпулятора врівноважений без вантажу); $K_2 = 2$; $K_1 = 0,1$.
Враховуючи також, що $\varphi = \theta$, потужність привода

$$N_g = \frac{10m_n r \omega}{\eta} \left(\frac{r \omega^2}{\theta} + 1 \right). \quad (4.28)$$

Враховуючи дані таблиці 2, а також прийнявши $\eta = 0,7$, по виразу (4.28) одержуємо

$$N_g = \frac{10 \cdot 434 \cdot 2,541 \cdot 0,26}{0,7} \left(\frac{2,541(0,26)^2}{0,25} + 1 \right) \approx 6,1 \text{ кВт.}$$

Одержали розрахункову потужність двигуна. При наступному виборі двигуна необхідно враховувати наступну умову $N_g \succ N_g$.

На підставі проведених розрахунків потужності двигуна приймаємо двигун типу ПФВ 160S, параметри якого наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Технічні дані електродвигуна ПФВ 160S

Найменування параметра	Позначення	Величина
Номінальна потужність, кВт	N_n	7,5
Номінальний момент, Н·м	M_n	143,2
Номінальна частота обертання, об/хв	n	500
Номінальна напруга, В	U_n	58
Номінальний струм, А	I_n	182
Тривалий момент у загальмованому стані, Н·м		157
Максимальний момент при пуску, Н·м		490
Момент при максимальній частоті обертання, Н·м		110
Максимальний момент при макс. частоті обертання, Н·м		290
Максимальна частота обертання в тривалому режимі, об/хв		1000
Момент інерції якоря, м ²	J	0,194
Опір обмотки якоря при 15 °С, Ом	$R_{я}$	0,0292
Індуктивність обмотки якоря, мГн	$L_{я}$	0,27
Електромеханічна постійна часу, мс	T_m	9,9
Електромагнітна постійна часу, мс	T_e	9,25
Постійна ЕРС, В хв/об	C_g'	0,094
Маса двигуна з тахогенератором, кг		162

Вибір комплектного електропривода

На сучасному етапі при проектуванні електрообладнання металорізальних верстатів та промислових роботів одним з найбільш раціональних способів є використання комплектних ЕП, що задовольняють заданим технологічним вимогам. Для керування електродвигунами постійного струму випускаються комплектні вітчизняні серійні електроприводи ЕТ6С, ЕТУ 3601 (БТУ3601), ЕТ6-3, ЕТЗИ, ЕТУ2-2П, ЕТА (тиристорні трифазні з двоконтурною системою підпорядкованого регулювання і ряд інших).

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

Для приводів роботів також можна використовувати двигуни для широко регульованих приводів серії ПБСТ, серводвигуни серії РІ, РС, ЗРІ, призначені для електроприводів подачі металорізальних верстатів з ЧПК, для привода промислових роботів та маніпуляторів.

Для обраного типу електродвигунів вибраний комплектний електропривод типу ЕТУ2-2П, технічні дані якого наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Технічні дані електропривода

Тип ЕП	Електродвигун				Потужність трансформатора, кВА
	Тип двигуна	Потужність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	
ЕТУ2-2П	ПФВ	7,5	58	500	5

Опис та робота комплектного електропривода ЕТУ2-2П

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

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

В електроприводах 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 електроприводів через мережні реактори (без трансформатора).

В електроприводах із високомоментними двигунами застосовуються згладжувачий реактор на струм, відповідний номінальному струму двигуна.

Структура умовної позначки:

ЭТУ2 – Х₁П;

ЭТУ – електропривод постійного струму тиристорний уніфікований;
2 – номер розробки;

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

П – подачі.

Функціональна схема швидкодіючого реверсивного електропривода ЭТУ2-2П наведена на рисунку Ж.1 (у додатку Ж).

Електропривод складається з блоку перетворювача ТПЯ БС 3202.П, електродвигуна постійного струму М1 з вбудованим тахогенератором BR1 та трансформатором Т1, блоку запобіжників U1, задавача швидкості R1, пускової апаратури. В ланцюзі якоря двигуна М1 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 Т1 при напрузі ОЗМ1 110 В (при напрузі ОЗМ1 220 В блок U2 підключається до двох фаз силової вторинної обмотки Т1).

4.4 Розробка структурної схеми системи керування

Система керування електропривода являє собою двоконтурну систему керування частоти обертання вала двигуна з підлеглим струмовим контуром [2, 12].

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

Заданий струм і вихідний сигнал датчика провідності вентилів ДП. Сигнал заданого напрямку струму на вхід ЛПІ надходить з виходу нелінійної ланки НЛ. Ланки НЛ і ФПЕ з резистором R47 утворюють пристрій

лінеаризації характеристик електропривода 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.

4.4.1 Приклад розрахунку параметрів елементів системи керування

Технічні дані трансформатора і параметри згладжувального дроселя наведені в таблицях 4.3 і 4.4 відповідно.

Таблиця 4.3 – Технічні дані трансформатора

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

Таблиця 4.4 – Параметри згладжувального дроселя

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

Відповідно до функціональної схеми ЕТУ2-2П, розраховуємо наступні параметри.

Індуктивність фаз трансформатора $L_{\text{ф.тр}}$, Гн,

$$L_{\text{ф.тр}} = \frac{1}{\omega_0} \cdot \sqrt{Z_{\text{ф.тр}}^2 - R_{\text{ф.тр}}^2}, \quad (4.36)$$

де ω_0 – кутова синхронна частота, с^{-1} ;

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

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

Кутова синхронна частота ω_0 , с^{-1} ,

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{м}}, \quad (4.37)$$

де $f_{\text{м}}$ – частота живильної мережі, $f_{\text{с}} = 50$ Гц,

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314,159 \text{ с}^{-1}.$$

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

$$Z_{\text{ф.тр}} = \frac{U_{\text{л}} \cdot e_{\text{к.з}}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{\text{тр.ном}}}, \quad (4.38)$$

де $U_{\text{л}}$ – лінійна напруга обмотки трансформатора, $U_{\text{л}} = 380$ В (таблиця 4.3); $e_{\text{к.з}}$ – напруга короткого замикання трансформатора, $e_{\text{к.з}} = 4\%$ (таблиця 4.3); $I_{\text{тр.ном}}$ – номінальний струм трансформатора, А.

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

$$I_{\text{тр.ном}} = \frac{S_{\text{т}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л2}}}, \quad (4.39)$$

де $S_{\text{т}}$ – повна потужність трансформатора, $S_{\text{т}} = 5000$ В·А (таблиця 4.3);

$U_{\text{л}}$ – лінійна напруга вторинної обмотки трансформатора, $U_{\text{л2}} = 104$ В.

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

Тоді повний опір фаз трансформатора за формулою (4.38)

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

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

$$R_{\phi.\text{тр}} = R_{\phi} = \frac{P_{\text{к.з.}}}{3 \cdot I_{\text{тр.ном}}^2}, \quad (4.40)$$

де $P_{\text{к.з.}}$ – потужність короткого замикання трансформатора $P_{\text{к.з.}} = 115$ Вт (таблиця 4.3).

$$R_{\phi.\text{тр}} = R_{\phi} = \frac{115}{3 \cdot 27,757^2} = 0,05 \text{ Ом.}$$

Індуктивність фаз трансформатора за формулою (4.10)

$$L_{\phi.\text{тр}} = \frac{1}{314,159} \cdot \sqrt{0,316^2 - 0,05^2} = 0,001 \text{ Гн.}$$

Еквівалентний активний опір якірного ланцюга двигуна $R_{\text{е}}$, Ом,

$$R_{\text{е}} = R_{\text{н}} + 2R_{\phi 75} + \frac{m \cdot \omega_0 \cdot L_{\phi.\text{тр}}}{\pi}, \quad (4.41)$$

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,

$$R_{\text{н}} = R_{\text{я}75} + R_{\text{др}75}, \quad (4.42)$$

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

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

$$R_{\text{я}75} = R_{\text{я}} \cdot [1 + \alpha \cdot (75 - t)], \quad (4.43)$$

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

$$R_{\text{я}75} = 3,6 \cdot [1 + 0,004 \cdot (75 - 15)] = 4,46 \text{ Ом.}$$

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

$$R_{\text{др}75} = R_{\text{др}} \cdot [1 + \alpha \cdot (75 - t)], \quad (4.44)$$

де $R_{\text{др}}$ – Активний опір згладжувального дроселя,
 $R_{\text{др}} = 0,0083$ Ом (таблиця 4.4).

$$R_{\text{др}75} = 0,0083 \cdot [1 + 0,004 \cdot (75 - 15)] = 0,01 \text{ Ом.}$$

Тоді активний опір ланцюга навантаження випрямленого струму за формулою (4.40)

$$R_{\text{н}} = 4,46 + 0,01 = 4,47 \text{ Ом.}$$

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

$$R_{\phi 75} = R_{\phi \text{тр}} \cdot [1 + \alpha \cdot (75 - t)] \quad (4.45)$$

$$R_{\phi 75} = 0,05 \cdot [1 + 0,004 \cdot (75 - 15)] = 0,062 \text{ Ом.}$$

Еквівалентний активний опір якірного ланцюга за формулою (4.41)

$$R_{\text{е}} = 4,47 + 2 \cdot 0,062 + \frac{6 \cdot 314,159 \cdot 0,001}{\pi} = 4,36 \text{ Ом.}$$

Еквівалентна індуктивність якірного ланцюга $L_{\text{е}}$, Гн,

$$L_{\text{е}} = L_{\text{я}} + L_{\text{др}} + L_{\phi \text{тр}}, \quad (4.46)$$

$$L_{\text{е}} = 0,03 + 0,001 + 0,001 = 0,042 \text{ Гн.}$$

де $L_{\text{я}}$ – індуктивність обмотки якоря, $L_{\text{я}} = 0,03$ Гн;

$L_{\text{др}}$ – індуктивність дроселя якірного ланцюга, $L_{\text{др}} = 0,001$ Гн (таблиця 4.4).

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

$$R_{\Sigma \text{тг}} = \frac{U_{\text{тг.м}}}{U_{3.м}} \cdot R_{\text{зад}}, \quad (4.47)$$

де $U_{\text{тг.м}}$ – максимальне значення напруги тахогенератора, відповідно максимальному (або номінальному) значенню швидкості двигуна;

$U_{3.м}$ – максимальне значення напруги задаючого сигналу, відповідно максимальному (або номінальному) значенню швидкості двигуна, $U_{3.м} = 10 \text{ В}$.

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

Максимальне значення напруги тахогенератора, відповідно максимальному значенню швидкості двигуна $U_{\text{тг.м}}$, В,

$$U_{\text{тг.м}} = S_{\text{тг}} \cdot n_{\text{max}}, \quad (4.48)$$

де $S_{\text{тг}}$ – крутизна тахогенератора, $S_{\text{тг}} = 0,02 \text{ В} \cdot \text{хв}$;

$n_{\max}$ – максимальна частота обертання обраного двигуна в тривалому режимі, $n_{\max} = 3600$ об/хв.

$$U_{\text{т.м}} = 0,02 \cdot 3600 = 72 \text{ В.}$$

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

$$R_{\text{зад}} = R_4 + R_{10}, \quad (4.49)$$

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

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

Тоді сумарний опір у ланцюгу тахогенератора за формулою (4.47)

$$R_{\Sigma\text{тг}} = \frac{72}{10} \cdot 5,4 = 38,9 \text{ кОм.}$$

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

$$T_e = \frac{L_e}{R_e}; \quad (4.50)$$

$$T_e = \frac{0,042}{4,6} = 9,1 \cdot 10^{-3} = 0,009 \text{ с.}$$

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

$$T_m = \frac{J_{\Sigma} \cdot R_e}{c_{\text{дв}}^2}, \quad (4.51)$$

де J_{Σ} – сумарний приведений до вала двигуна момент інерції, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$c_{\text{дв}}$ – постійна двигуна, В·с.

Сумарний приведений до вала двигуна момент інерції J_{Σ} , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$,

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + J'_{\text{мех}}, \quad (4.52)$$

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

$J'_{\text{мех}}$ – момент інерції механізму.

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

Постійна двигуна $c_{ДВ}$, В·с,

$$c_{ДВ} = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{н}} \cdot R_{\text{я}} \cdot \beta_t}{\omega_{\text{н}}}, \quad (4.53)$$

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

$\omega_{\text{н}}$ – номінальна кутова частота обертання двигуна, с^{-1} .

Номінальна кутова частота обертання двигуна $\omega_{\text{н}}$, с^{-1} ,

$$\omega_{\text{н}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{н}}}{60}, \quad (4.54)$$

$$\omega_{\text{н}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3600}{60} = 376,8 \text{ с}^{-1}.$$

Тоді постійна двигуна $c_{ДВ}$, за формулою (4.43)

$$c_{ДВ} = \frac{110 - 7,2 \cdot 3,6 \cdot 1,24}{376,8} = 31,85 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

Тоді електромеханічна постійна часу за формулою (4.51)

$$T_{\text{м}} = \frac{2,703 \cdot 4,6}{31,85^2} = 0,012 \text{ с}.$$

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.

4.4.2 Розробка структурної схеми системи керування

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

В структурній схемі системи керування електропривода (рисунок 4.2) 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.

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

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

$$W_{\text{е.дв}}(p) = \frac{1/R_{\text{е}}}{T_{\text{е}}p + 1}, \quad (4.55)$$

$$W_{\text{е.дв}}(p) = \frac{1/4,6}{0,009p + 1} = \frac{0,217}{0,009p + 1},$$

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

$$W_{\text{м.дв}}(p) = \frac{R_{\text{е}}}{T_{\text{м}}c_{\text{дв}}p}, \quad (4.56)$$

$$W_{\text{м.дв}}(p) = \frac{4,6}{0,012 \cdot 31,85 \cdot p} = \frac{4,6}{0,38p}.$$

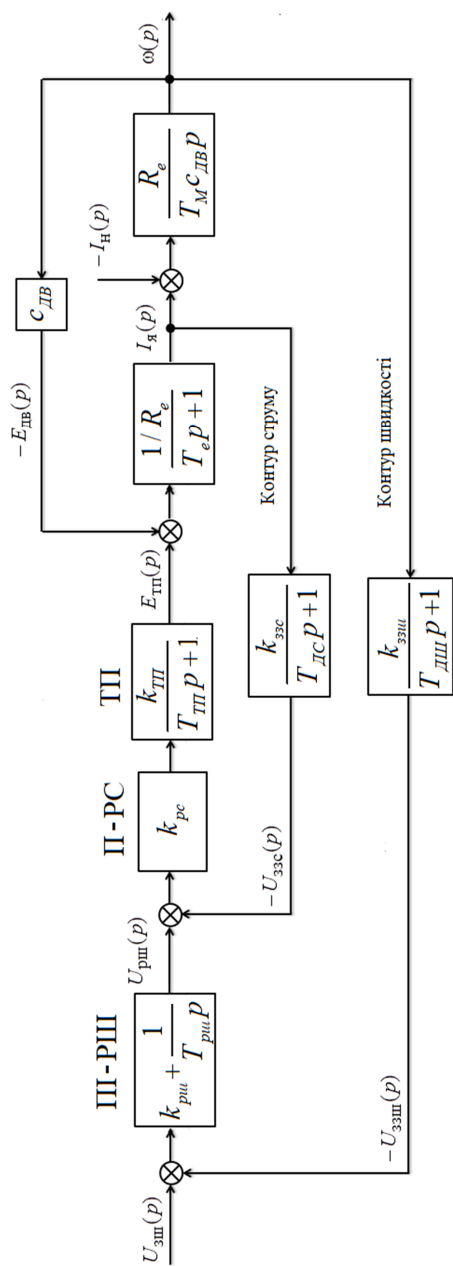


Рисунок 4.2 – Структурна схема системи керування електропривода

Розрахунок параметрів регулятора та елементів контуру регулювання струму виконується відповідно до схеми контуру струму (рисунок 4.3).

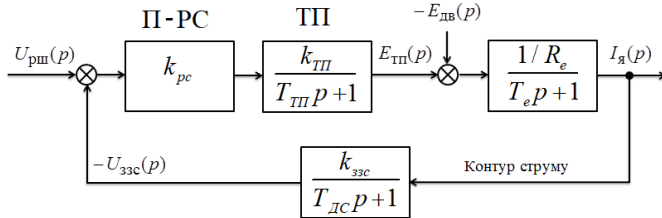


Рисунок 4.3 – Схема контуру струму

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 $W_{ззс}(p)$,

$$W_{ззс}(p) = \frac{k_{ззс}}{T_{дс}p + 1}, \quad (4.57)$$

де $k_{ззс}$ – передавальний коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом;

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

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

$$k_{ззс} = \frac{U_{ззс}}{I_{\max}}, \quad (4.58)$$

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

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

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

$$I_{\max} = 2 \cdot I_{\text{н}}, \quad (4.59)$$

де $I_{\text{н}}$ – номінальний струм двигуна, $I_{\text{н}} = 7,2$ А.

$$I_{\max} = 2 \cdot 7,2 = 14,4 \text{ А},$$

що відповідає режиму роботи в номінальних обертах. При зменшенні обертів нижче ω_n величина $I_{\max}$ буде коректуватися вузлом залежного струмообмеження ВЗСО (у бік збільшення).

Передавальний коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом за формулою (4.58)

$$k_{\text{ззс}} = \frac{10}{14,4} = 0,69 \text{ В/А.}$$

Тоді передатна функція зворотного зв'язку за струмом за формулою (4.57)

$$W_{\text{ззс}}(p) = \frac{0,69}{0,34 \cdot 10^{-3} p + 1}.$$

Коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача k_{π}

$$k_{\pi} = \frac{E_{0\pi}}{U_{\text{к.мах}}}, \quad (4.60)$$

де $E_{0\pi}$ – значення випрямленої ЕРС ТП при цілком відкритих тиристорах, В;

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

Значення випрямленої ЕРС ТП при цілком відкритих тиристорах $E_{0\pi}$, В,

$$E_{0\pi} = U_{\max} + R_{\text{еп}} \cdot I_{\text{тр.ном}},$$

$$E_{0\pi} = 112 + 0,72 \cdot 27,757 = 131,976.$$

Тоді коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача за формулою (4.60)

$$k_{\pi} = \frac{131,976}{10} = 13,2.$$

Постійна часу тиристорного перетворювача T_{π} , с,

$$T_{\pi} = \frac{1}{p \cdot f_{\text{мер}}}, \quad (4.61)$$

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

Для практичних розрахунків передатну функцію ТП можна уявити у вигляді інерційної ланки $W_n(p)$,

$$W_n(p) = \frac{k_n}{T_n p + 1}, \quad (4.62)$$

$$W_n(p) = \frac{13,2}{0,003p + 1}.$$

Налагодження регулятора струму

Схема П-регулятора струму представлена на рисунку 4.4.

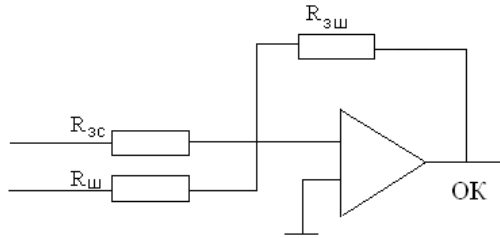


Рисунок 4.4 – Схема П-регулятора струму

Знаходимо опір резистора від'ємного зворотного зв'язку $R_{зс}$ та опір шунта $R_{ш}$, Ом,

$$R_{зс} = \frac{T_{PC}}{R_{ш}};$$

$$R_{ш} = \frac{k_{ш} k_{дс} R_{зс} = 2,486 \cdot 10^3}{k_{зс}},$$

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

$k_{ш}$ – коефіцієнт передачі шунта.

При протіканні через шунт номінального струму шунта $I_{нш}$ з шунта знімається напруга 75 мВ, тому

$$k_{ш} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{I_{нш}} \quad \text{В/А.}$$

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

$$k_{ш} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{40} = 1,875 \cdot 10^{-3} \text{ В/А};$$

$$k_{дс} = \frac{10}{75 \cdot 10^{-3}} = 133,33 \text{ В/А};$$

$$R_{зс} = 2,486 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$R_{ш} = \frac{1,875 \cdot 10^{-3} \cdot 133,33 \cdot 2,486 \cdot 10^3}{0,69} = 621,5 \text{ Ом}.$$

Коефіцієнт передачі регулятора струму k_{PC} ,

$$k_{PC} = \frac{R_e \cdot T_e}{2 \cdot T_{\mu} \cdot k_{ш} \cdot k_{зс}}, \quad (4.63)$$

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

Мала постійна часу T_{μ} , с,

$$T_{\mu} = T_{п} + T_{дс}, \quad (4.64)$$

$$T_{\mu} = 33,3 \cdot 10^{-3} + 0,34 \cdot 10^{-3} = 33,64 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$k_{PC} = \frac{4,6 \cdot 0,009}{2 \cdot 33,64 \cdot 10^{-3} \cdot 13,2 \cdot 0,69} = 0,067.$$

Розрахунок параметрів регулятора та елементів контуру швидкості виконується відповідно до схеми контуру швидкості (рисунок 4.5).

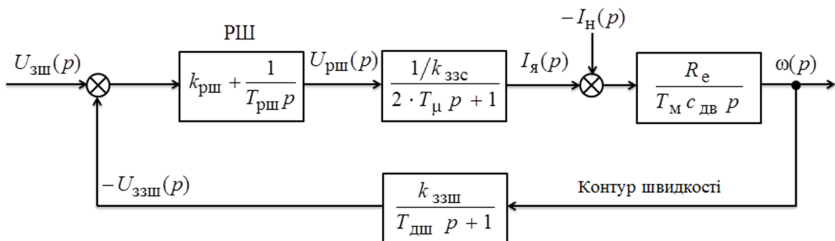


Рисунок 4.5 – Схема контуру швидкості

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

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

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

де $k_{\text{м}} = \frac{R_{\text{е}}}{c_{\text{дв}}}$; $k_{\text{м}} = \frac{4,6}{31,85} = 0,144$ [27].

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

$$W_{\text{ззш}}(p) = \frac{k_{\text{ззш}}}{T_{\text{дш}} p + 1}, \quad (4.65)$$

де $k_{\text{ззш}}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю, В·с;

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

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

$$k_{\text{ззш}} = \frac{U_{\text{ззш}}}{\omega_{\text{max}}}, \quad (4.66)$$

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

ω_{max} – максимальна кутова швидкість двигуна

$$\omega_{\text{max}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{max}}}{30}, \quad \omega_{\text{max}} = \frac{3,14 \cdot 3600}{30} = 376,8 \text{ рад/с},$$

$$k_{\text{ззш}} = \frac{10}{376,8} = 0,026 \text{ В·с}.$$

Передатна функція зворотного зв'язку за швидкістю за формулою (4.65)

$$W_{\text{ззш}}(p) = \frac{0,026}{0,00034 p + 1}.$$

Об'єкт регулювання характеризується великою постійною часу $T_{\text{м}}$, для компенсації якої можна застосувати П- або ПІ-регулятори швидкості.

Системи підпорядкованого регулювання з П-регулятором швидкості є інтегрованими однократно. Вони мають достатньо високу швидкість і мале перерегулювання перехідних процесів, проте мають значний статизм. Такі системи електропривода не спроможні забезпечити великий діапазон регулювання швидкості.

Системи з ПІ-регулятором швидкості називають інтегрованими дворазово. Вони забезпечують широкий діапазон регулювання і практично нульову статичну помилку при збуренні по моменті опору. При налагодженні на симетричний оптимум регулятори характеризуються перерегулюванням 43 %. Зменшити перерегулювання можна шляхом включення на вхід СК фільтра (аперіодична ланка).

Налагодження П-регулятора швидкості. Передатна функція контуру швидкості з П-регулятором $W_{PKШ}(p)$,

$$W_{PKШ}(p) = k_{рш} \cdot \frac{1/k_{ззс}}{T_{мш}p + 1} \cdot \frac{k_{ззш} \cdot k_m}{T_m p},$$

де $k_{рш}$ – коефіцієнт передачі регулятора швидкості;

$T_{мш}$ – еквівалентна постійна часу контуру швидкості, с.

Корекція контуру здійснюється за рахунок зміни коефіцієнта передачі П-регулятора швидкості $k_{рш}$,

$$k_{рш} = \frac{J_{\Sigma пр} \cdot k_{ззс}}{2 \cdot T_{мш} \cdot c_{дв} \cdot k_{ззш}}, \quad (4.67)$$

де $J_{\Sigma пр}$ – сумарний момент інерції привода $J_{\Sigma пр}$, кг·м².

Сумарний момент інерції привода $J_{\Sigma пр}$, кг·м²,

$$J_{\Sigma пр} = J_{мех} + J_{дв},$$

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

Еквівалентна постійна часу контуру швидкості $T_{мш}$, с,

$$T_{мш} = 2 \cdot T_{\mu} + T_{дш}, \quad (4.68)$$

$$T_{мш} = 2 \cdot 33,64 \cdot 10^{-3} + 0,34 \cdot 10^{-3} = 67,9 \cdot 10^{-3} = 0,0679 \text{ с}.$$

Коефіцієнт передачі регулятора швидкості за формулою (4.67)

$$k_{\text{рш}} = \frac{2,703 \cdot 0,69}{2 \cdot 0,0679 \cdot 31,85 \cdot 0,026} = 16.$$

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

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

$$W_{\text{окш}}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\text{мш}} p \cdot (T_{\text{мш}} p + 1)},$$

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

Налагодження ПІ-регулятора швидкості. Передатна функція розімкнутого контуру швидкості з ПІ-регулятором $W_{\text{ркш}}(p)$,

$$W_{\text{ркш}}(p) = k_{\text{рш1}} \cdot \frac{1 + T_{\text{рш}} p}{T_{\text{рш}} p} \cdot \frac{1}{k_{\text{ззс}}} \cdot \frac{1}{T_{\text{мш}} p + 1} \cdot \frac{k_{\text{ззш}} \cdot k_{\text{м}}}{T_{\text{м}} p}, \quad (4.69)$$

де $k_{\text{рш1}}$ – коефіцієнт передачі регулятора швидкості.

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

$$k_{\text{рш}} = \frac{T_{\text{м}} \cdot c_{\text{дв}} \cdot k_{\text{ззс}}}{2 \cdot T_{\text{мш}} \cdot R_{\text{с}} \cdot k_{\text{ззш}}}, \quad (4.70)$$

$$k_{\text{рш}} = \frac{0,012 \cdot 31,85 \cdot 0,69}{2 \cdot 0,0679 \cdot 4,6 \cdot 0,026} = 16.$$

При стандартному налагодженні на симетричний оптимум визначимо параметри ПІ-регулятора:

$$T_{\text{рш}} = 4 \cdot T_{\text{мш}}, \quad (4.71)$$

$$T_{\text{рш}} = 4 \cdot 0,0679 = 0,27 \text{ с};$$

$$T_{\text{рш}} = \frac{T_{\text{рш}}}{k_{\text{рш1}}}, \quad (4.72)$$

$$T_{\text{рш}} = \frac{0,27}{16,23} = 0,0166 \text{ с.}$$

Підставивши значення $k_{\text{рш}}$ і $T_{\text{рш}}$ в (4.67), отримаємо передатну функцію регулятора швидкості, оптимізовану на симетричний оптимум $W_{\text{рш}}(p)$,

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

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

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

$$W_{\text{рш}}(p) = k_{\text{рш}} \cdot \frac{1 + T_{\text{рш}} p}{T_{\text{рш}} p} = k_{\text{рш}} + \frac{1}{T_{\text{рш}} p}, \quad (4.73)$$

$$W_{\text{рш}}(p) = 16,23 + \frac{1}{0,0166 p}.$$

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

$$W_{\text{ф}}(p) = \frac{1}{1 + 4 \cdot T_{\text{мш}} p}, \quad (4.74)$$

$$W_{\text{ф}}(p) = \frac{1}{1 + 4 \cdot 0,0679 p} = \frac{1}{1 + 0,27 p}.$$

Розрахунок параметрів ПІ-регулятора швидкості

Для розрахунку параметрів регулятора (рисунок 4.6) задаємось величиною напруги, що знімається з тахогенератора (на практиці залежить від обраного тахогенератора) $U_{\text{тг}}$, В, $U_{\text{тг}} = 10$ В.

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

$$k_{\text{тг}} = \frac{U_{\text{тг}}}{\omega_H}, \quad (4.75)$$

$$k_{\text{тг}} = \frac{10}{376,8} = 0,027 \text{ В} \cdot \text{с.}$$

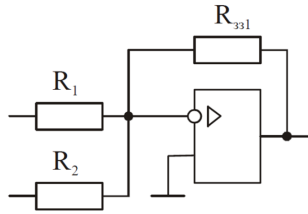


Рисунок 4.6 – П-регулятор швидкості

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

$$R_{331} = k_{\text{рш}} \cdot R_1, \quad (4.76)$$

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

$$R_{331} = 16,23 \cdot 10^4 = 162,3 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Опір резистора R_2 , Ом,

$$R_2 = \frac{k_{\text{ПТ}} \cdot R_1}{k_{33\text{ш}}}, \quad (4.77)$$

$$R_2 = \frac{0,027 \cdot 10^4}{0,026} = 10,4 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Розрахунок параметрів ПІ-регулятора швидкості. Схема ПІ-регулятора швидкості показана на рисунку 4.7.

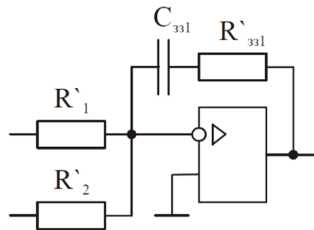


Рисунок 4.7 – ПІ-регулятор швидкості

Для розрахунку параметрів регулятора (рисунк 4.9) задаємось величиною ємності c_{331} , Ф,

$$c_{331} = 10^{-6} \text{ Ф,}$$

звідки знаходимо R'_{331} , Ом,

$$R_{331} = \frac{T_{пш1}}{c_{331}}, \quad (4.78)$$

$$R_{331} = \frac{0,27}{10^{-6}} = 27 \cdot 10^4 \text{ Ом.}$$

Знаходимо опір вхідних резисторів R_1 та R_2 , Ом,

$$R_1 = \frac{T_{пш1}}{c_{331}}, \quad (4.79)$$

$$R_1 = \frac{0,0166}{10^{-6}} = 16,6 \cdot 10^3 \text{ Ом;}$$

$$R_2 = \frac{k_{тг} \cdot R_1}{k_{33ш}}, \quad (4.80)$$

$$R_2 = \frac{0,027 \cdot 16,6 \cdot 10^3}{0,026} = 17,2 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Початкові дані для розрахунку перехідних процесів зведено у таблицю 4.5.

Таблиця 4.5 – Початкові дані для розрахунку перехідних процесів

Постійна ЕРС двигуна, В/(об/хв)	$c_{дв} = 31,85$
Еквівалентний опір якірного ланцюга двигуна, Ом	$R_e = 4,6$
Електромеханічна постійна часу якірного ланцюга, с	$T_M = 0,012$
Електромагнітна постійна часу якірного ланцюга, с	$T_e = 0,009$
Постійна часу тиристорного перетворювача, с	$T_{п} = 33,3 \cdot 10^{-3}$
Коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача	$k_{п} = 13,2$
Коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора швидкості	$k_{ппрш} = 16$
Коефіцієнт підсилення П-регулятора швидкості	$k_{прш} = 16$
Коефіцієнт підсилення П-регулятора струму	$k_{рс} = 0,067$
Передатний коефіцієнт датчика струму, В/А	$k_{ззс} = 0,69$
Передатний коефіцієнт датчика швидкості, В·с	$k_{ззш} = 0,026$
Постійна часу датчика швидкості, с	$T_{дш} = 0,34 \cdot 10^{-3}$
Постійна часу датчика струму, с	$T_C = 0,34 \cdot 10^{-3}$
Постійна часу ПІ-регулятора швидкості, с	$T_{рш} = 0,0166$
Еквівалентна постійна часу контуру швидкості, с	$T_{μш} = 0,0679$

Передатні функції:

ПІ-регулятора швидкості
$$W_{PKШ}(p) = k_{vш} + \frac{1}{T_{vш} p} ;$$

П-регулятора швидкості
$$W_{ПШ}(p) = K_{ПШ} ;$$

П-регулятора струму
$$W_{PC}(p) = K_{PC} ;$$

тиристорного
перетворювача
$$W_{ТП}(p) = \frac{K_{П}}{T_{П} p + 1} ;$$

4.4.3 Моделювання та аналіз динамічних характеристик САК

Для дослідження динамічних характеристик СКЕП, представленої на рисунку 4.2, 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 4.8 показана схема замкненої системи з ПІ-регулятором швидкості. На рисунку 4.9 показана схема замкненої системи з П-регулятором швидкості. На рисунку 4.10 показана схема замкнутої системи з ПІ-регулятором швидкості і фільтром на вході в систему.

На основі даних схем був проведений аналіз динамічних властивостей системи автоматичного керування при зміні законів керування при розрахункових параметрах які представлені в таблиці 4.5.

Результати аналізу перехідних процесів за швидкістю показані на рисунку 4.11, а для перехідних процесів за струмом на рисунку 4.12.

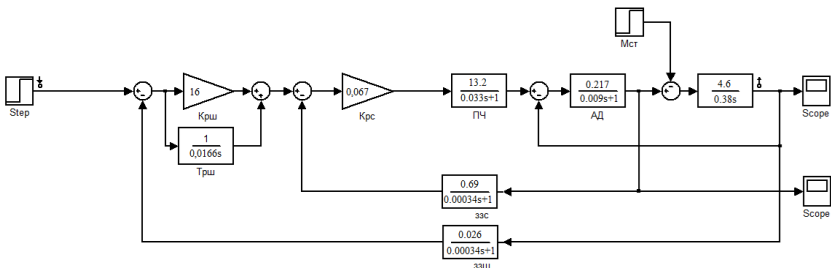


Рисунок 4.8 – Структурна схема системи з ПІ-регулятором швидкості

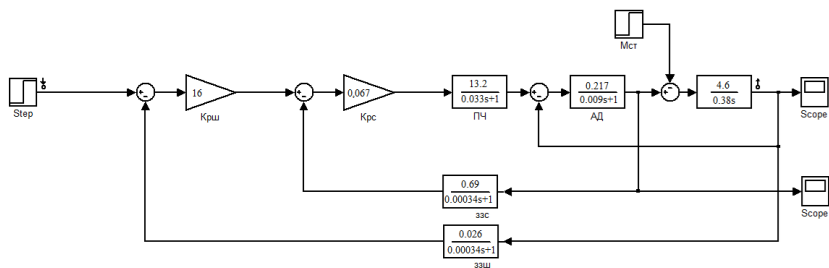


Рисунок 4.9 – Структурна схема системи з П-регулятором швидкості

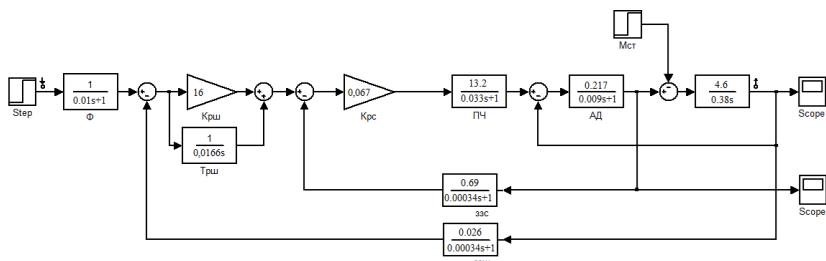


Рисунок 4.10 – Структурна схема системи з ПІ-регулятором швидкості і фільтром

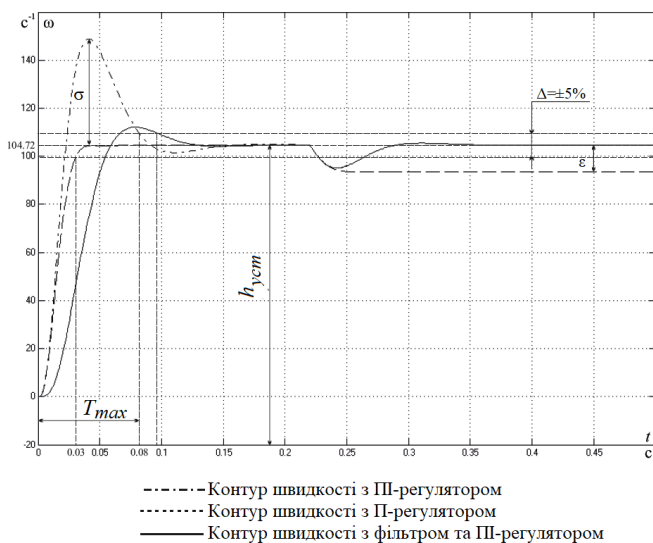


Рисунок 4.11 – Перехідні процеси по швидкості

Основні показники якості регулювання зведені в таблицю 4.6.

Таблиця 4.6 – Основні показники якості регулювання

Тип регулятора	$h_{уст}, c^{-1}$	h_{max}, c^{-1}	$\sigma, \%$	T_{max}, c	$\epsilon_{ст}, \%$	N
ПІ-регулятор	104,72	148,81	42,1	0,08	0	1
П-регулятор	104,72	104,72	0	0,03	11,5	0
ПІ-регулятор та фільтр на вході	104,72	112,05	7	0,096	0	1

По графіках 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.

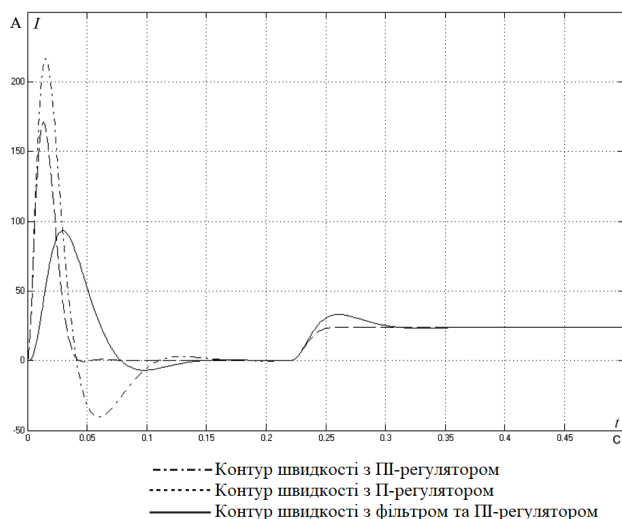


Рисунок 4.12 – Перехідні процеси по струму

Отримані наступні результати дослідження:

– при застосуванні пропорційно-інтегрального закону регулювання (ПІ-регулятор) перерегулювання склало $\sigma = 42,1 \%$, час перехідного

процесу (по входу кривої в п'ятивідсоткову зону щодо значення, що встановилося) $T_{\max} = 0,08$ с;

- при застосуванні пропорційного закону регулювання (П-регулятор) перерегулювання відсутнє, час перехідного процесу зменшився до $T_{\max} = 0,03$ с, але при цьому виникла статична похибка $\varepsilon = 11,5$ %;

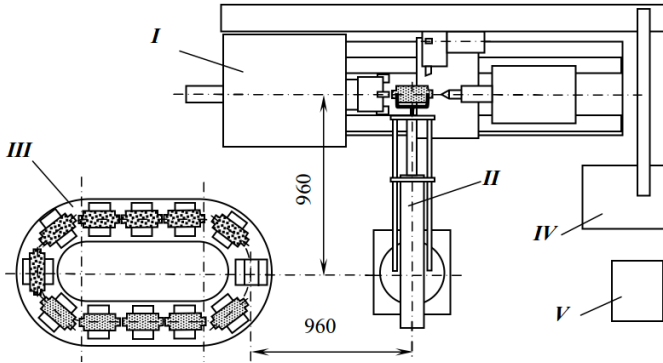
- при введенні аперіодичної ланки (як фільтра) на вхід системи керування з ПІ-регулятором, перерегулювання склало $\sigma = 7$ %, час перехідного процесу $T_{\max} = 0,096$ с, коливальність $N = 1$, статична похибка відсутня $\varepsilon = 0$. При такій структурі системи керування максимальні відхилення струму не перевищують максимально допустимих значень.

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

5 ПОБУДУВА ЦИКЛОГРАМИ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ РТК

5.1 Опис робототехнічного комплексу

Розглянемо для прикладу однопозиційний робототехнічний комплекс (РТК) токарської обробки (рисунок 5.1)



I – токарно-патронний напівавтомат; II – промисловий робот;

III – тактивий стіл; IV – пристрій керування верстатом;

V – пристрій керування роботом

Рисунок 5.1 – Компонувальна схема РТК

на базі ПР підлогового типу

Однопозиційний РТК на базі токарно-патронного напівавтомата із числовим програмним керуванням моделі 16 ДО20Ф3 служить для обробки деталей типу валів (D до 120 мм; L до 500 мм; m до 10 кг) і фланців (D до 150 мм; L до 110 мм; m до 5 кг). Завантаження-розвантаження й переустановка деталей виконується однозахватним промисловим роботом (ПР) моделі М20П40.01, що має наступні параметри:

- вантажопідйомність – 20 кг;
- вертикальний хід – 500 мм;
- горизонтальний хід – 1100 мм;
- поворот – 300 град;
- швидкість лінійна – до 1,0 м/с;
- швидкість кутова – 120 град/с;
- погрішність позиціонування – ± 1 мм.

Методика побудови циклограми функціонування роботизованого технологічного комплексу

Для наочного опису роботи й оптимізації робочого циклу автоматизованих пристроїв і систем машин у часі складаються циклограми, що відображають моменти початку й закінчення роботи окремих пристроїв і механізмів або початку й закінчення робочих і холостих операцій (ходів), а також їх взаємного розташування в часі (циклі) [15].

Циклограма – це графічне зображення послідовності роботи пристрою або технічної системи в часі. Увесь цикл роботи розбивається на такти. Тактами називаються періоди, протягом яких у системі змінюється положення вихідних елементів виконавчих пристроїв і механізмів. Кожна зміна стану автоматизованого пристрою або системи є початком нового такту.

Циклограма послідовності роботи механізмів і вузлів устаткування, що входить до складу технологічного комплексу, є практично алгоритмом його роботи й служить вихідною інформацією для створення систем керування всією ділянкою. Головна особливість циклограм послідовності полягає в тому, що вона не тимчасова, а потактова. Кожний такт циклограми відображає нове накладення механізмів автоматичної системи, при цьому дотримується сувора послідовність їх спрацьовування від такту до такту. Метою побудови циклограм є скорочення робочого циклу шляхом максимального суміщення часу робочих t_p і холостих t_x ходів основного й допоміжного устаткування автоматизованої технологічної системи. За допомогою циклограм можна координувати роботу як окремих вузлів і механізмів верстата або допоміжного устаткування, так і сукупності верстатів і допоміжного устаткування автоматизованої системи.

Для автоматизації робочого циклу машини слід застосовувати механізми робочих і холостих ходів, а також автоматизованого пристрою керування не тільки виконання робочих процесів, але й допоміжних рухів – завантаження заготовок і знімання оброблених деталей, закріплення й звільнення їх у процесі обробки, поворот, фіксацію, транспортування і т. д.

Для роботизованих технологічних комплексів (РТК) циклограма повинна містити в собі в обраній послідовності всі основні й допоміжні операції (переходи) виготовлення виробу, а також умовні операції (переходи) для можливих змін технологічного маршруту. Для побудови циклограм функціонування РТК необхідно:

1) проаналізувати компоновання РТК і визначити всі рухи (переходи) виконавчих пристроїв основного й допоміжного устаткування (верстата, робота, накопичувача), необхідні для виконання заданого циклу обробки деталі;

2) визначити й скласти перелік усіх механізмів основного й допоміжного устаткування, що бере участь у формуванні заданого циклу;

3) задати вихідні положення виконавчих пристроїв механізмів верстата, робота, транспортера-накопичувача і т. п.;

4) скласти послідовність рухів виконавчих пристроїв устаткування (механізмів) за цикл у вигляді таблиці;

5) визначити час t_i виконання кожного руху виконавчих пристроїв, використовуючи формули:

$$t_i = \frac{\alpha_i}{\omega_i} \text{ або } t_i = \frac{l_i}{v_i},$$

де α_i – відповідні кути повороту виконавчих пристроїв механізмів, град;

l_i – лінійні переміщення виконавчих пристроїв механізмів, мм;

ω_i , v_i – відповідно паспортні швидкості кутового, град/с, і лінійного, мм/с, переміщення виконавчих пристроїв механізмів по відповідній координаті.

До складу РТК також входить горизонтальний магазин-накопичувач замкнутого типу (тактовий стіл) для деталей і заготовок місткістю 12–24 заготовки. Команду на пуск верстата подає ПР.

На рисунку 5.2 показана схема побудови типового алгоритму керування однопозиційним РТК.

Для виконання заданого циклу обробки деталі за два установи необхідні наступні рухи (переходи):

- завантаження заготовки в патрон верстата;
- затиск заготовки в патроні;
- відвід руки промислового робота;
- обробка деталі (установ 1);
- переустановка деталі в патроні верстата, відвід руки робота;
- обробка деталі (установ 2);
- розвантаження деталі з патрона верстата на тактовий стіл, переміщення тактового стола на один крок (на одну позицію).

У формуванні заданого циклу беруть участь відповідні механізми, у тому числі наступні:

- механізми верстата для забезпечення затиску деталі (патрон), обертання деталі, подачі супорта, повороту різцевої головки, переміщення огороження;
- механізми промислового робота для підйому руки, повороту руки щодо вертикальної осі, висування руки, затиску захвата, ротації захвата щодо горизонтальної осі, повороту захвата щодо вертикальної осі;
- механізми тактового стола для переміщення деталі (заготовки) на один крок (одну позицію).



Рисунок 5.2 – Схема побудови типового алгоритму керування однопозиційним РТК

У вихідному положенні обладнання та його механізмів:

- патрон верстата розкритий, огороження відкрито;
- супорт у нульовій (вихідній) позиції, у різцевій голівці встановлений необхідний комплект інструментів для обробки заданої деталі, тобто для виконання заданого циклу обробки, лінія центрів верстата вище рівня розташування заготовок на тактовому столі;

– захват (рука) робота розжатий; вісь деталі, що спочатку затискається у захваті, орієнтована горизонтально; рука утягнена й повернена до тактового стола; захват перебуває на рівні розташування заготовок на тактовому столі; заготовка розташована на тактовому столі в призмах проти захвата промислового робота.

Для побудови циклограми функціонування РТК необхідно розрахувати витрати часу на виконання окремих елементів циклу обробки деталі.

Розрахунки витрати часу зведені в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Розрахунки часу елементів циклу роботи РТК

№ п/п	Обладнання	Рух (операція)	Елемент операції	Розрахункова формула	Розрахунковий час, с
1	2	3	4	5	6
1	Промисловий робот	Завантаження заготовки:	Висування руки	$t = l_1/v_1$	$t = 0,96/0,4 = 2,4$
2			Захват заготовки	–	$t = 0,2$
3			Підйом руки	$t = l_2/v_2$	$t = 0,4/0,5 = 0,8$
4			Повернення руки	$t = l_1/v_1$	$t = 0,96/0,4 = 2,4$
5			Поворот руки	$t = \alpha_1/\omega_1$	$t = 90/120 = 0,75$
6			Висування руки	$t = l_3/v_1$	$t = 0,96/0,4 = 2,4$
7			Розтиск заготовки	–	$t = 0,2$
8			$t_{\Sigma} = \sum t_i$		$t_{\Sigma} = 9,15$
9		Відвід руки із зони обробки		$t = l_4/v_1$	$t = 0,36/0,4 = 0,9$
10		Підвід руки в зону обробки		$t = l_4/v_1$	$t = 0,36/0,4 = 0,9$
11	Промисловий робот	Переустановлювання заготовки	Захват деталі	–	$t = 0,2$
12			Ротация захвата	$t = \alpha_2/\omega_2$	$t = 180/120 = 1,5$
13			Разжим деталі	–	$t = 0,2$
14			$t_{\Sigma} = \sum t_i$		$t_{\Sigma} = 1,9$
15		Розвантаження деталі	Захват деталі	–	$t = 0,2$
16			Повернення руки	$t = l_3/v_1$	$t = 0,96/0,4 = 2,4$
17			Поворот руки	$t = \alpha_1/\omega_1$	$t = 90/120 = 0,75$
18			Висування руки	$t = l_1/v_1$	$t = 0,96/0,4 = 2,4$
19			Опускання руки	$t = l_2/v_2$	$t = 0,4/0,5 = 0,8$
20			Розтиск деталі	–	$t = 0,2$
21			$t_{\Sigma} = \sum t_i$		$t_{\Sigma} = 6,75$
22	Верстат	Затиск заготовки в патроні		–	1,8
23		Розтиск заготовки в патроні		–	1,5
24		Обробка (1-й установ)		–	65
25		Обробка (2-й установ)		–	72
26		Переміщення огорожі		$t = l_4/v_3$	$t = 0,6/0,5 = 1,2$
27		$t_{\Sigma} = \sum t_i$			$t_{\Sigma} = 147,2$
28	Тактовий стіл	Поворот на одну позицію		–	2,5

Відповідно до послідовності рухів механізмів устаткування РТК за цикл обробки деталі за два установи заготовки побудована циклограма його функціонування (рисунок 5.3).

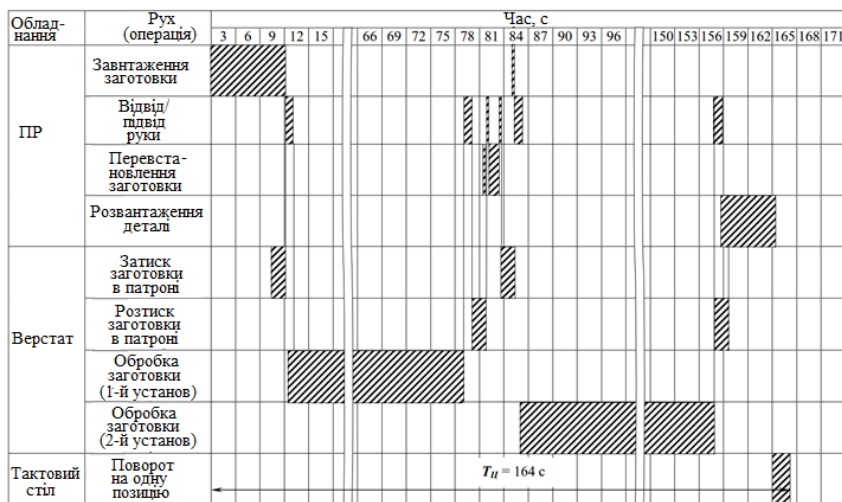


Рисунок 5.3 – Циклограма функціонування однопозиційного РТК

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. **Аншин, С. С.** Проектирование и разработка промышленных роботов [Текст] / С. С. Аншин, А. В. Бабич, А. Г. Баранов и др. ; под общ. ред. Я. А. Шифрина, П. Н. Белянина. – М. : Машиностроение, 1989. – 272 с.
2. **Башарин, А. В.** Управление электроприводами [Текст] / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л. : Энергия, 1982. – 440 с.
3. **Белянин, П. Н.** Робототехнические системы для машиностроения [Текст] / П. Н. Белянин. – М. : Машиностроение, 1986. – 256 с.
4. **Булгаков, А. П.** Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление. Серия «Библиотека инженера» [Текст] / А. П. Булгаков, В. А. Воробьев. – М. : Сокол-пресс, 2007. – 488 с.
5. **Бурдаков, С. Ф.** Проектирование манипуляторов, промышленных роботов и роботизированных комплексов [Текст] : учебное пособие / С. Ф. Бурдаков, В. А. Дьяченко, А. Н. Тимофеев. – М. : Высш. школа, 1986. – 264 с.
6. **Давыдова, М. В.** Технические характеристики металлообрабатывающих станков с ЧПУ: Фрезерные станки, обрабатывающие центра сверлильно-фрезерно-расточной группы [Текст] : справочное пособие / М. В. Давыдова, А. М. Михалев, Ю. И. Моисеев. – Курган : Изд-во КГУ, 2010. – 128 с.
7. **Зенкевич, С. А.** Основы управления манипуляционными роботами [Текст] / С. А. Зенкевич, А. С. Ющенко : учебное пособие для вузов. – 2-е изд. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 480 с.
8. **Козырев, Ю. Г.** Применение промышленных роботов [Текст] : учебное пособие / Ю. Г. Козырев. – М. : КноРус, 2011. – 488 с.
9. **Кондратенко, Ю. П.** Методические указания к лабораторным работам по курсу "Основы проектирования роботов" [Текст] / Ю. П. Кондратенко, С. Ю. Голубев. – Николаев : НКИ, 1987. – 43 с.
10. Механика промышленных роботов. В 3 кн. [Текст] / Под ред. К. В. Фролова, Е. И. Воробьева. Кн. 1. Кинематика и динамика / Е. И. Воробьев, С. А. Попов, Г. И. Шевелева. – М. : Высш. шк., 1988. – 304 с.
11. **Моисеев, Ю. И.** Применение промышленных роботов для загрузки металлообрабатывающего оборудования [Текст] : учебное пособие / Ю. И. Моисеев. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2013. – 170 с.
12. **Терехов, В. М.** Системы управления электроприводов [Текст] : учебник для вузов / В. М. Терехов, О. И. Осипов ; под ред. В. М. Терехова. – 2-е изд., стер. – М. : Издательский центр "Академия", 2006. – 304 с.

13. **Фу, К.** Робототехника [Текст] / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли. – М. : Мир, 1989. – 624 с.

14. **Шахинпур, М.** Курс робототехники [Текст] / М. Шахинпур. – М. : Мир, 1990. – 527 с.

15. **Юревич, Е. И.** Основы робототехники [Текст] / Е. И. Юревич. Изд. 2-е. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 420 с.

16. **Кривошеин, Ю. А.** Описание работы технологических комплексов с помощью циклограмм [Текст] : учебное пособие / Ю. А. Кривошеин, Ю. С. Филиппов. – Уч.-изд. : Саратовский государственный технический университет, 2009.

Національний університет кораблебудування

імені адмірала Макарова

кафедра автоматики

(повна назва кафедри)

КУРСОВИЙ ПРОЄКТ (РОБОТА)

з дисципліни "Системи керування промисловими робототехнічними
комплексами"

(назва дисципліни)

на тему: "Розробка промислового робототехнічного
комплексу"

Студента (ки) _____ курсу _____
групи

Галузь знань 14 «Електрична
інженерія»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(прізвище та ініціали)

Керівник К. Т. Н., доцент
Васильєв О.Г.

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

Кількість балів: _____ Оцінка: ECTS _____

Члени комісії

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

м. Миколаїв _____ 20__ рік

ДОДАТОК Б

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут
автоматики і електротехніки
Кафедра автоматики

ЗАВДАННЯ

на курсову роботу з дисципліни
«Системи керування промисловими робототехнічними комплексами»

Студент _____,
(прізвище, ім'я, по батькові)

група № _____.

Варіант № _____.

1. Тема проєкту: Проєктування промислового робототехнічного комплексу.

2. Завдання: За вихідними даними до основного технологічного обладнання згідно з варіантом (додаток В) потрібно:

- 2.1. Розробити компоновку РТК.
- 2.2. Вибрати промисловий робот для роботизованого технологічного комплексу.
- 2.3. Провести кінематичний аналіз промислового робота.
- 2.4. Провести динамічне дослідження промислового робота.
- 2.5. Виконати силовий розрахунок потужності приводів та вибрати тип електродвигунів.
- 2.6. Вибрати комплектний електропривод.
- 2.7. Спроектувати та дослідити систему керування електропривода робота.
- 2.8. Побудувати циклограму роботи обладнання РТК.

Вихідні дані

Тип обладнання	
Маса деталі, кг	
Тип РТК	

Термін виконання курсового проєкту

« ____ » _____ 202 р.

Керівник курсового проєкту

(підпис)

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 202 р.

(підпис)

ДОДАТОК В

Варіанти завдання

Варіант	Тип обладнання		Макс. маса деталі і кг	Модель промислового робота									
				TUR 15	TUR 30	Kawasaki FS10E	Adept Viper	Fanuc	Toshiba	Kuka KP	Melfa	IRB	
				Вантажопідйомність роботів, кг									
				15	30	10	2-20	2-40	5	5-60	3-12	7-20	
1	Верстати	60НТ	6										
2		600VT	4										
3		16A20БФ3	10										
4		МК6510Ф4	5										
5		1715	7										
6		SLT-400/1000	12										
7		СТПР-160	8										
8		FBL –h	15										
9		16Б16Г1	20										
10		СА500СФ3	9										
11		МП3-700	18										
12		HMC500	16										
13		ИР500	14										
14		ГФ3571Р	11										
15		ВМ133-40	13										
				Зусилля, що розвивається обладнанням, МН									
16	Преси	Однокривошипні закр. простої дії	5	0,16, 0,25, 0,4									
17		Однокривошипні двойної дії	7	0,63, 1,0									
18		Гідравлічні	10	1,0, 1,6									
19		Чеканочні	12	1,0, 1,6, 2,5, 4,0, 6,3									
20		Гвинтові	6	0,25, 0,4, 0,63, 1,0									
21		Кривошипні	15	2,0, 2,5, 3,0, 3,5									
22		Молоти штамп.	20	50, 75, 100									
23		Преси обрізні	30	2,0, 3,0, 4,0									
24		Радіально- ковальські маш.	50	–									
25		Правильні	8	0,16–1,6									

Номенклатура технологічного обладнання. Верстати [6]

Горизонтальний токарський верстат 160НТ

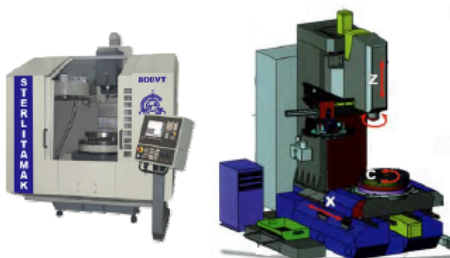


Верстат горизонтальний токарський моделі 160НТ призначений для токарської обробки деталей типу диск із різних конструкційних матеріалів в умовах одиничного й дрібносерійного виробництва. Жорсткість верстата забезпечує високий ступінь точності обробки деталей. На верстаті може виконуватися обробка штучних заготовок, деталей із прутка.

Технічні характеристики

Параметр	Значення
Найбільший діаметр обробки, мм	200
Найбільша довжина обробки, мм	120
Найбільший діаметр прутка, мм	50
Найбільший поздовжній хід (Z), мм	250
Найбільший поперечний хід (X), мм	200
Діапазон частот обертання шпинделя, хв^{-1} (цанговий патрон)	5–6000
Найбільший крутний момент, $\text{Н} \cdot \text{м}$	114
Дискретність переміщень по осях, мм	0,001
Діапазон робочих подач, мм/хв	1–15000
Точність позиціонування по всіх осях, мм	0,01
Точність позиціонування по всіх осях, мм	$\pm 0,005$
Кількість позицій револьверної головки, шт.	8
Час зміни інструмента, с	0,5
Точність позиціонування	$\pm 4''$
Повторюваність позиціонування	$\pm 1,6''$
Потужність привода головного руху, кВт	12/18,5
Система ЧПК	SIEMENS SINUMERIK 802Dsl
Габаритні розміри, мм	3225×2600×2080
Маса, кг	5000

Вертикальний токарський фрезерно-розточний верстат 600VT



Верстати призначені для комплексної обробки деталей з різних конструкційних матеріалів в умовах серійного виробництва. Виконують операції гостріння, розточування, свердління, зенкерування, розгортання, нарізання різьблення мітчиками й фрезами, фрезерування. Верстати оснащені системою ЧПК SIEMENS SINUMERIK 840D.

Технічні характеристики

Параметр	Значення
Діаметр робочої поверхні стола, мм	630
Найбільша відстань від торця шпинделя до робочої поверхні стола, мм	800
Діапазон частот обертання шпинделя, хв^{-1}	0–12000
Найбільші переміщення по осях, мм:	
переміщення обертового стола (X);	500
вертикальне переміщення шпиндельної бабки (Z)	600
Найбільша частота обертання стола (C), хв^{-1}	400
Діапазон робочих подач по координатах, мм/хв	1–15000
Точність позиціонування по всіх осях, мм	0,01
Прискорені ходи по всіх осях, м/хв	15...25
Ємність інструментального магазину, шт.	20
Час зміни інструмента, с	7
Максимальна частота обертання, хв^{-1}	12000
Потужність привода головного руху, кВт	19
Найбільший діаметр інструмента, встановлюваного в магазині (без пропуску гнізд), мм	125
Габаритні розміри, мм	2000×2720 ×3690
Маса, кг	7500

Токарський верстат 16A20БФ3



Верстат призначений для токарської обробки зовнішніх і внутрішніх поверхонь деталей типу тіл обертання зі східчастим і криволінійним профілем. Прецизійна термokonстантна шпиндельна бабка дозволяє обробляти деталі із пруткового матеріалу. Клас точності верстата – П за ДСТ 8-82. На замовлення верстат може оснащуватися системою ЧПК й електроприводами різних виробників: NC-210, Siemens, Fagor, Heidenhain, FANUC.

Технічні характеристики

Параметр	Значення
Найбільший діаметр оброблюваного виробу над станиною/над супортом, мм	320/200
Найбільша довжина встановлюваного виробу в центрах, мм	1000 (1500, 2000)
Діаметр циліндричного отвору в шпинделі, мм	72
Найбільший хід супорта, мм: поперечний/прокольний	210/905 (1305, 1905)
Максимальна рекомендована швидкість робочої подачі, мм/хв: – поздовжньої/поперечної	2000/1000
Кількість керованих координат, у т. ч. одночасно	2/2
Точність позиціонування, мм	0,01
Діапазон частот обертання шпинделя, хв ⁻¹	10–3500
Максимальна швидкість швидких переміщень, м/хв: продольних/поперечних	15/7,5
Кількість позицій інструментальної головки	8
Потужність привода головного руху, кВт	11
Сумарна споживана потужність, кВт	21,4
Габаритні розміри (з транспортером стружковидалення), мм	5160×2260 ×1650
Маса, кг	4000

Токарський верстат МК6510Ф4



Верстат призначений для прецизійної обробки деталей з кольорових металів і сплавів, чавуну й сталі, у тому числі деталей некруглого перетину.

На додаток до токарських робіт може проводитися обробка деталей обертним інструментом з виконанням фрезерних, свердлильних, розточувальних і т. п. робіт.

Клас точності напівавтомата за ДСТ 8-82-А.

Технічні характеристики

Параметр	Значення
Найбільший діаметр оброблюваного виробу в кулачковому патроні, мм	160
Найбільша довжина встановлюваного виробу в центрах, мм	1000 (1500, 2000)
Діаметр циліндричного отвору в шпинделі, мм	72
Найбільший хід супорта, мм: по осі X/по осі Z	500/200
Потужність привода головного руху, кВт	10
Кількість керованих осей координат	3
Дискретність завдання переміщень по осях, мм	0,0001
Діапазон частот обертання шпинделя, хв^{-1}	30–7000
Межі робочих подач супорта	0,01–0,3
Радіальне биття зовнішньої та внутрішньої поверхонь, що базують, торцеве биття опорної поверхні шпинделя, мкм, не більш	1
Прямолінійність і паралельність траєкторії переміщення поздовжнього супорта щодо осі шпинделя, мкм: в вертикальній площині; в горизонтальній площині	3 1,5
Діапазон частот обертання розточувальної головки, хв^{-1}	10–6000
Габаритні розміри (без електрошафи), мм	1100×1250×1500
Маса, кг	2500

Токарський оброблюваний центр 1715



Призначений для комплексної обробки деталей типу тіл обертання.

На верстаті можливе виконання операцій точіння, розточування, свердління, розгортання отворів співвісних осі шпинделя, а також тангенціальних; нарізування різьблень в отворах, фрезерування кінцевими, торцевими, тристоронніми й фасонними фрезами, шліцевої і зубофрезерної обробки

Технічні характеристики

Параметр	Значення
Найбільший діаметр оброблюваного виробу над станиною, мм	210
Найбільша довжина встановлюваного виробу в центрах, мм	500
Діаметр циліндричного отвору в шпинделі, мм	72
Найбільше переміщення по осі Y, мм	±50
Найбільша частота обертання стола шпинделя револьверної головки, хв ⁻¹	6000
Швидкість прискорених переміщень, м/хв: по координатах X, Z; по координаті Y	20 10
Діапазон кругових подач шпинделя, хв ⁻¹	0,01–20
Діапазон частот обертання шпинделя, хв ⁻¹	45–4500
Потужність двигуна контршпинделя, кВт	5,5–7,5
Діапазон частот обертання контршпинделя, хв ⁻¹	45–4500
Кількість позицій інструментальної головки	12
Максимальні розміри інструмента (діаметр/довжина), мм	80/150
Потужність головного привода (S1/S6–40 %), кВт	5,5–7,5
Габаритні розміри (без транспортера стружки), мм	1820×1735 ×2990
Маса, кг	3500

Багатоцільовий токарський верстат SLT-400/1000



Багатоцільовий токарський верстат з ЧПУ SLT-400/1000 дозволяє робити обробку в патроні, у центрах і на планшайбі деталей різної конфігурації з легких матеріалів і важкооброблюваних сталей і сплавів із забезпеченням високої продуктивності й точності по двом координатам (X , Z).

Технічні характеристики

Параметр	Значення
Найбільший діаметр оброблюваного виробу над станиною, мм	535
Найбільший діаметр оброблюваного виробу над супортом, мм	380
Кут нахилу супорта до станини, град	60
Відстань між точкою центру задньої бабки й носовою частиною шпинделя, мм	1240
Максимальна довжина оброблюваної деталі, мм	1015
Діаметр циліндричного отвору в шпинделі, мм	82
Приводний електродвигун	Alpha 18 Fanuc
Номинальна потужність двигуна/потужність при 50 % первантаженні не більш 30 хв, кВт	18,5/22
Діапазон частот обертання шпинделя, хв^{-1}	35–3500
Кількість діапазонів переключення шпинделя	2
Кількість позицій інструментальної головки	12
Довжина переміщень по осі X , мм	230
Довжина переміщень по осі Z , мм	1115
Величина швидкого переміщення по осі X /по осі Z , м/хв	15/20
Максимальна рекомендована швидкість подачі X/Z , м/хв	10/10
Електродвигун привода подач по осі X/Z	Alpha 12 Fanuc
Габаритні розміри, мм	3690×1750 ×1850
Маса, кг	9000

Верстат токарський патронний СТПР-160



Верстати призначені для виконання токарської патронної обробки деталей зі сталі й кольорових сплавів.

На верстатах можна проводити обробку циліндричних, конічних, фасонних і торцевих поверхонь, свердління центральних отворів і нарізування зовнішнього й внутрішнього різьблення різцем.

Технічні характеристики

Параметр	Значення
Найбільший діаметр і довжина обробки, мм	160 × 100
Найбільше переміщення супорта, $X \times Z$ мм	340 × 220
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	2915 × 1502 × 1888
Маса, кг	3150

Токарські верстати з горизонтальною основою FBL–h



Верстати серії Fbl-h розроблені для високопродуктивної обробки широкої номенклатури матеріалів. Верстати ефективні при виконанні як чорнової, так і чистової обробки з точністю до 7 квалітету.

Найбільш ефективно використання верстатів у середньо- і багатосерійному виробництві при обробці деталей, що мають велику кількість складних, криволінійних поверхонь.

Технічні характеристики

Параметр	Значення
Найбільший діаметр оброблюваного виробу над станиною, мм	190
Відстань між центрами, м	1,5
Швидкість обертання шпинделя, хв ⁻¹	100–5000
Поздовжнє переміщення супорта, м	1,68
Поперечне переміщення супорта, мм	260
Кількість позицій інструментальної головки	8
Час зміни інструмента, с	0,42
Потужність двигуна шпинделя, кВт	11
Швидкість прискорених переміщень, м/хв	15
Габаритні розміри, мм	3530×1935 ×2022
Маса, кг	3430

Токарський верстат 16Б16Т1



Патронно-центровий верстат із числовим програмним керуванням 16Б16Т1 оснащено 8/ 6-позиційною інструментальною головою. Верстат призначений для токарської обробки деталей типу тіл обертання із прямолінійним, скідчастим і криволінійним профілем, у тому числі, для нарізування різьблень у напівавтоматичному режимі в патроні й центрах; використовується в дрібносерійному й серійному виробництві. Система ЧПК забезпечує введення програм обробки як з пульта оператора, так і із зовнішнього електронного носія. Клас точності – П.

Технічні характеристики

Параметр	Значення
Найбільший діаметр оброблюваного виробу над станиною, мм	400
Найбільший діаметр оброблюваного виробу над супортом, мм	125
Довжина оброблюваної деталі, мм	750
Найбільший робочий хід супорта, мм: поздовжнього/поперечного	700/210
Частота обертання шпинделя, хв^{-1}	20–3200
Величина програмованих подач, мм/об: поздовжніх/поперечних	0,01–20/0,001–10
Швидкість швидких переміщень, м/хв: поздовжніх/поперечних	10/5
Кількість керованих осей координат	2
Дискретність переміщень, мм: поздовжніх/поперечних	0,001/0,0005
Потужність головного двигуна, кВт	7,5
Габаритні розміри верстата, мм	3200 × 1370 × 1740
Маса, кг	2880

Універсальний токарський верстат з ЧПК мод. CA500СФЗ



Верстат призначений для виконання різноманітних токарських робіт у патроні й у центрах, для обробки деталей із прямо-лінійним, східчастим і криволінійним профілем, у тому числі для нарізування метричної, модульної та дюймової різьблень.

Система ЧПК – фірми «FANUC», «SIEMENS», «Балт-Система» або інших фірм.

Клас точності – П.

Технічні характеристики

Параметр	Значення
Діаметр циліндричного отвору в шпинделі, мм	55
Найбільший діаметр оброблюваного виробу над станиною, мм	500
Найбільший діаметр оброблюваного виробу над супортом, мм	250
Максимальна довжина оброблюваної деталі (в центрах), мм	850, 1350, 1850
Максимальний діаметр оброблюваної деталі, мм: над станиною/над супортом	350/250
Діапазон частот обертання шпинделя, хв^{-1}	20–3500
Межі робочих подач супорта, мм/хв	1–4000
Швидкість швидких переміщень, м/хв: поздовжніх/поперечних	10/5
Дискретність завдання переміщень по осях, мкм: поздовжніх/поперечних	1
Потужність головного двигуна, кВт	15
Габаритні розміри, мм	3170 × 1845 × 1915
Маса, кг	2400

Вертикальний обробний центр МЦ3-700



Вертикальні обробні центри призначені для комплексної високошвидкісної обробки деталей з різних матеріалів, у тому числі, що мають складну геометричну форму, й тонкостінних деталей, що мають складний профіль.

Вони можуть виконувати операції свердління, прямолінійного, контурного й об'ємного фрезерування, розточування, нарізування й фрезерування різьблення.

Клас точності по ГОСТ 8-82 А.

Технічні характеристики

Параметр	Значення
Найбільший діаметр свердління, мм	25
Найбільший діаметр розточування, мм	120
Найбільший діаметр торцевої фрези, мм	125
Найбільший виліт інструмента, мм	280
Потужність головного двигуна, кВт	30
Діапазон частот обертання шпинделя, хв^{-1}	60–12000
Кількість керованих осей координат, в т. ч. одночасно	3/3
Найбільші переміщення по координатах $X/Y/Z$, мм	710/530/530
Найбільший поворот по координатах B'/C' , мм	—
Швидкість швидких переміщень по осях X, Y, Z , мм/хв	30
Швидкість швидких переміщень по осях B, C , хв^{-1}	—
Межі подач переміщень по осях X, Y, Z , мм/хв	50–10000
Межі подач переміщень по осях B, C	—
Кількість позицій інструментальної головки	24 (2×12)
Маса, кг	7400

Горизонтальний обробний центр HMC500



Верстати серії HMC можуть використовуватися в різних галузях промисловості:

автомобілебудуванні,
верстатобудуванні,
аерокосмічній галузі й інших.

На цих верстатах виконують чорнову, напівчистову й чистову обробку заготовок, що містять безліч оброблюваних поверхонь, а також виконують різноманітні технологічні переходи: фрезерування площин, уступів, канавок, вікон, колодязів; свердління, зенкерування, розгортання, розточування різних отворів; спеціальне розточування отворів інструментом з тонким регулюванням на розмір та ін.

Технічні характеристики

Параметр	Значення
Переміщення по осях $X \times Y \times Z$, мм	610 × 510 × 61
Відстань від осі шпинделя до поверхні стола, мм	140–750
Розміри стола, мм	500 × 500
Час зміни палети, с	8
Кількість палет	2
Швидке переміщення по осях, мм/хв	32000
Робоча подача, мм/хв	18000
Швидкість обертання шпинделя, хв^{-1}	15000
Двигун шпинделя, кВт	15
Ємність інструментального магазину	40
Максимальний діаметр інструмента, мм	90
Час зміни інструмента, с	3
Точність позиціонування, мм	0,004
Точність позиціонування, мм	3145 × 2522 × 3890
Маса верстата, кг	9320

Обробний центр з ЧПК IP500



IP-500 – багатоопераційний горизонтальний обробний центр – свердлильно-фрезерно-розточувальної верстат із числовим програмним керуванням (ЧПК), автоматичною зміною інструмента (АІІ) і зміною оброблюваних деталей призначений для високопродуктивної обробки корпусних деталей масою до 700 кг із конструкційних матеріалів від легких сплавів до високоміцних сталей.

Верстат дозволяє робити свердління, зенкерування, розгортання, розточування точних отворів, зв'язаних координатами, фрезерування по контуру з лінійною й круговою інтерполяцією, нарізування різьблення мітчиками.

Технічні характеристики

Параметр	Значення
Вид	Горизонтальний
Розміри поверхні стола, мм	500 × 500
Переміщення по осях $X \times Y \times Z$, мм	800/500/500
Максимальна швидкість холостого ходу, м/хв	15
Дискретність завдання переміщення, мм	0,001
Діапазон частот обертання шпинделя, хв^{-1}	21–4500
Потужність головного двигуна, кВт	22
Ємність інструментального магазину	30
Система ЧПК	Sinumerik 840D

Вертикально-фрезерувальний верстат ГФ3571Р



Верстат призначений для багато-операційної обробки деталей складної конфігурації зі сталі, чавуну, кольорових і легких металів, а також інших матеріалів. Поряд із фрезерними операціями на верстатах можна проводити точне свердління, розточування, зенкерування й розгортання отворів.

Верстати оснащено 3–4-координатним пристроєм ЧПК та електроприводами подач, що стежать, що дозволяє робити обробку складних криволінійних поверхонь.

Клас точності П.

Технічні характеристики

Параметр	Значення
Розміри поверхні стола, мм	400×1600
Найбільше переміщення стола, мм:	
поздовжнє (координата X);	1010
поперечне (координата Y);	400
вертикальне (координата Z)	250
Переміщення повзуна (координата Z), мм	260
Швидкість швидких переміщень по осях X, Y, Z , мм/хв	7000
Межі подач переміщень по осях X, Y, Z , мм/хв	3–7000
Діапазон частот обертання шпинделя, хв^{-1}	50–2500
Потужність головного двигуна, кВт	11
Ємність інструментального магазину	12
Найбільший діаметр інструмента, мм	125
Час зміни інструмента, с	20
Кількість одночасно керованих координат: при лінійній/круговій/лінійно-круговій інтерполяції	3/3/3
Габаритні розміри, мм	3100×3135×2850
Маса верстата з електро- та гідروобладнанням, кг	6300

Вертикально-фрезерувальний верстат BM133-40



Верстат призначений для різноманітної фрезерної обробки деталей і заготовок із чорних і кольорових металів і їх сплавів, а також обробки свердлінням і розточуванням в умовах серійного й дрібносерійного виробництва. Наявність кругового стола (4-а координата) дозволяє вести обробку складних поверхонь.

Верстат оснащений електроприводом і ПЧПК фірми SIEMENS мод. SINUMERIC 810D. Клас точності по ГОСТ 8-82 П.

Технічні характеристики

Параметр	Значення
Діаметр планшайби поворотного стола, мм	255
Найбільше переміщення стола, мм:	
поздовжнє (координата X);	330
поперечне (координата Y);	330
вертикальне (координата Z)	330
Точність позиціонування, град/с мм	11,1
Розміри поверхні стола, мм	700×350×175
Максимальна частота обертання планшайби, хв^{-1}	
Діапазон частот обертання шпинделя, хв^{-1}	50–2500
Потужність головного двигуна, кВт	3,8
Ємність інструментального магазину	16
Тип хвостовика інструмента інструмента, с	ISO 738811 (ГОСТ 25827)
Найбільша довжина інструмента, мм	300
Габаритні розміри, мм	2030×2240×2150
Маса верстата, кг	2200

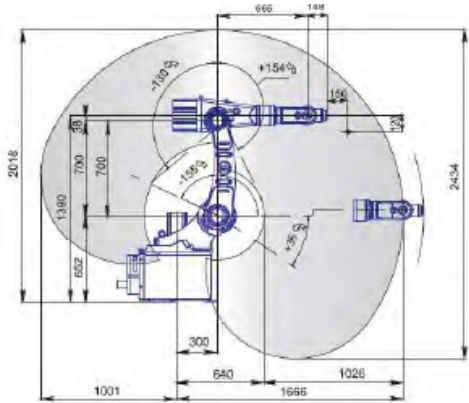
ДОДАТОК Д

Номенклатура та технічні характеристики промислових роботів [11]

Вари- ант	Модель ПР	Вантажо- підйомність, кг	Застосування
1	TUR 15	15	Нанесення клеїв і герметиків; складування й транспортування вантажів; обслуговування верстатів
2	TUR 30	30	
3	Kawasaki FS10E	10	Зборка, обслуговування верстатів, пакування, нанесення сполук
4	Adept Viper s650	2,5	Зборка, переміщення матеріалів, пакування, обслуговування верстатів
5	Adept Viper s1300	5	
6	Adept Viper s1700	20	
7	Fanuc M-10iA	10	Завантаження/розвантаження верстатів; механічна обробка різних матеріалів; лиття пластмас;
8	Fanuc 430ia/2	2	Піднімання вантажу й переміщення на відстань до 3,7 м
9	FanucFH 430ia/4	4	
10	FanucFH M10ia/6	6	
11	FanucM10ia	10	
12	FanucM20ia	20	
13	Fanuc420ia	40	
14	Toshiba TV 800	5	Завантаження/вивантаження й зборка верстатів
15	Kuka KP 5 sixx R850	5	Зварювання металоконструкцій, шта- белювання, укладання, навантаження й розвантаження машин, механічна обробка (шліфування, полірування, 3D фрезерування, штампування)
16	Kuka KP 16-2	16	
17	Kuka KP 30-3	30	
18	Kuka KP 60-3	60	
19	Melfa RV-2A	2	Складні монтажні роботи, швидке маніпулювання електронними деталлями і їх монтаж
20	Melfa RV-3AJ	3	
21	Melfa RV-6S	6	
22	Melfa RV-12SL	12	
23	IRB 2400L	7	Обслуговування верстатів, шліфування, полірування, зняття заусенців, обрізка
24	IRB 2400-10	12	
25	IRB 2400-16	20	

TUR 15

Технологічний універсальний ангулярного типу застосовується в наступних технологічних процесах: контактне зварювання, дугове, лазерне зварювання; нанесення клеїв і герметиків; складування й транспортування вантажів; лазерне й плазмове різання.



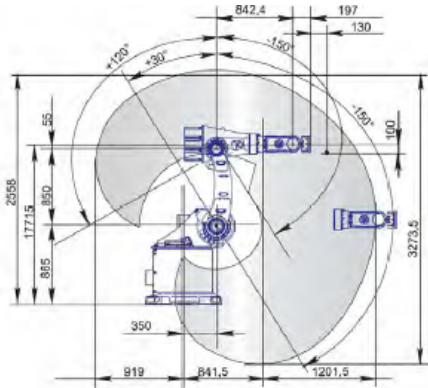
Технічні характеристики

Модель ПР	TUR 15
Число ступенів рухливості	6
Номінальна вантажопідйомність, кг	15
Додаткове навантаження при номінальній вантажопідйомності, кг	10
Максимальні переміщення, градусів:	
Вісь 1	±185
Вісь 2	+40/–150
Вісь 3	+150/–130
Вісь 4	±350
Вісь 5	±130
Вісь 6	±350
Максимальні швидкості переміщення, градусів/с:	
Вісь 1	156
Вісь 2	156
Вісь 3	156
Вісь 4	330
Вісь 5	330
Вісь 6	615
Точність позиціонування, мм	±0,1
Спосіб розміщення	підлоговий
Маса, кг	260

Країна-виробник: ТОВ «Волзький машинобудівний завод» (Росія).

TUR 30

Технологічний універсальний ангулярного типу застосовується в наступних технологічних процесах: контактне зварювання, дугове, лазерне зварювання; нанесення клеїв і герметиків; складування й транспортування вантажів; лазерне й плазмове різання.



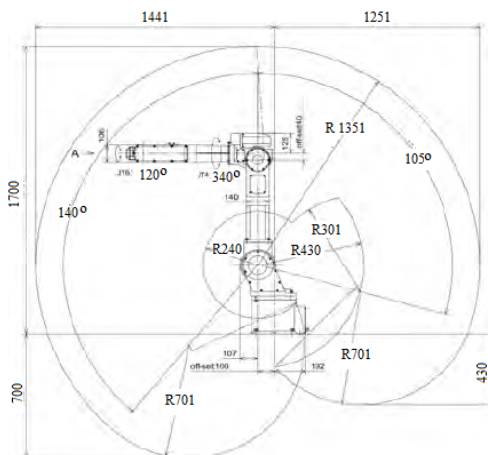
Технічні характеристики

Модель ПР	TUR 30
Число ступенів рухливості	6
Номінальна вантажопідйомність, кг	30
Додаткове навантаження при номінальній вантажопідйомності, кг	30
Максимальні переміщення, градусів:	
Вісь 1	±180
Вісь 2	+30/-150
Вісь 3	±150
Вісь 4	±350
Вісь 5	±130
Вісь 6	±350
Максимальні швидкості переміщення, градусів/с:	
Вісь 1	130
Вісь 2	110
Вісь 3	130
Вісь 4	300
Вісь 5	300
Вісь 6	350
Точність позиціонування, мм	±0,1
Спосіб розміщення	Підлоговий
Маса, кг	700

Країна-виробник: ТОВ «Волзький машинобудівний завод» (Росія).

Kawasaki FS10E

Для технологій палетування, зборки, обслуговування верстатів, нанесення сполук.



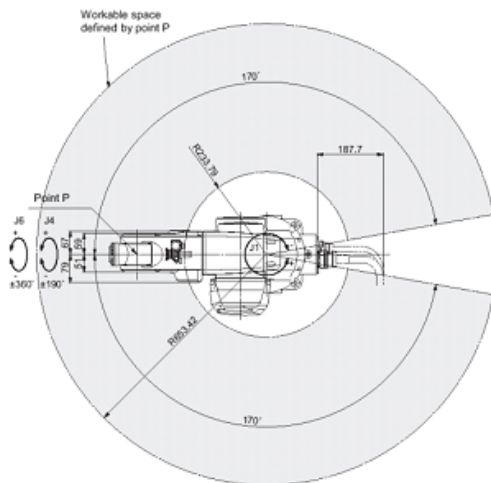
Технічні характеристики

Модель ПР Kawasaki	FS10E
Число ступенів рухливості	6
Номінальна вантажопідйомність, кг	6
Максимальний виліт руки, мм	1550
Діапазон переміщень, градусів:	
JT1	±160
JT2	+140/−105
JT3	+120/−155
JT4	±270
JT5	±145
JT6	±360
Максимальна швидкість, градусів/с:	
JT1	200
JT2	140
JT3	200
JT4	360
JT5	360
JT6	600
Максимальна лінійна швидкість переміщення, мм/с	9200
Точність позиціонування, мм	±0,1
Спосіб розміщення	Підлоговий
Маса, кг	170

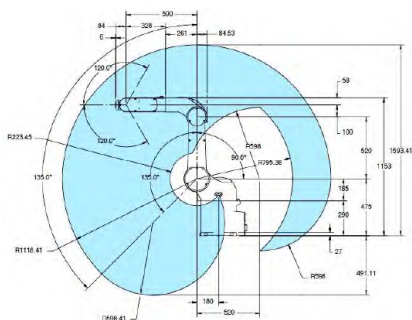
Країна-виробник: Японія.

Adept Viper s650, s1300, s1700

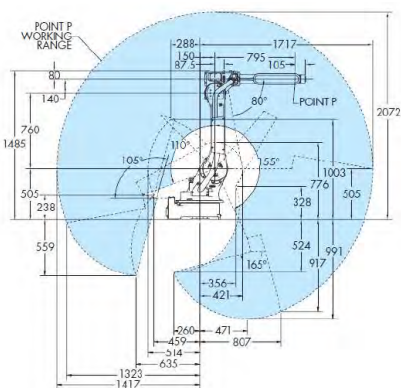
Універсальний, для виконання зборки, переміщення матеріалів, пакування, обслуговування верстатів і багатьох інших операцій, що вимагають швидкості й точності.



s650



s1300



s1700

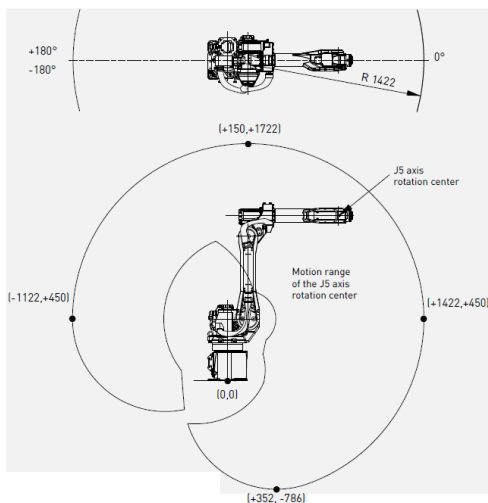
Технічні характеристики

Модель ПР Adept Viper	s650	s1300	s1700
Число ступенів рухливості	6		
Номінальна вантажопідйомність, кг	2,5	5	20
Максимальний виліт руки, мм	653	1298	1717
Діапазон переміщень, градусів:			
Вісь 1	±170		±180
Вісь 2	+45/-190	+45/-180	+65/-200
Вісь 3	+256/-29	+10/+255	+30/+260
Вісь 4	±190	±185	±200
Вісь 5	±120		±140
Вісь 6	±360		±360
Максимальна швидкість, градусів/с:			
Вісь 1	328	225	170
Вісь 2	300	169	170
Вісь 3	375	188	175
Вісь 4	375		355
Вісь 5	375		345
Вісь 6	600		525
Точність позиціонування, мм	±0,02	±0,07	±0,06
Маса, кг	28	78	280
Спосіб розміщення	Підлоговий, настільний, настінний		

Країна-виробник: США.

Fanuc M-10iA

Завантаження/розвантаження верстатів; обробка різних матеріалів; лиття пластмас; проклеювання й нанесення герметиків; різання, шліфування й полірування.



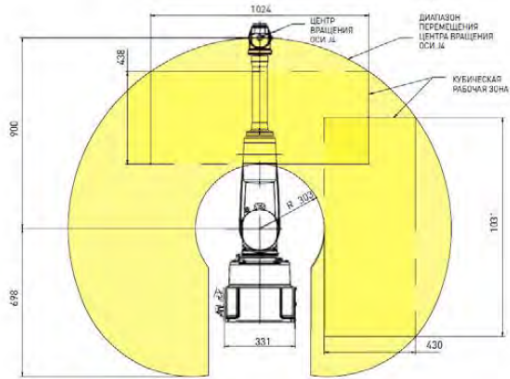
Технічні характеристики

Модель ПР Fanuc	M-10iA
Число ступенів рухливості	6
Номінальна вантажопідйомність, кг	10
Максимальний виліт руки, мм	1422
Діапазон переміщень, градусів:	
JT1	±340/±360
JT2	±250
JT3	±445
JT4	±400
JT5	±280
JT6	±720
Максимальна швидкість, градусів/с:	
JT1	225
JT2	205
JT3	225
JT4	420
JT5	420
JT6	700
Точність позиціонування, мм	±0,03
Спосіб розміщення	Підлоговий
Маса, кг	130

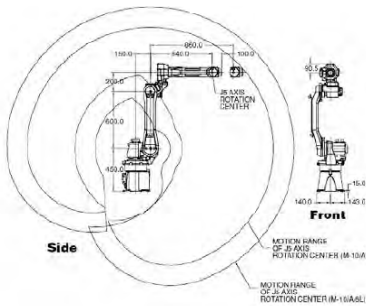
Країна-виробник: Японія.

Fanuc 430iA/2FH/4FH, M10iA/6, M20iA, M 420iA

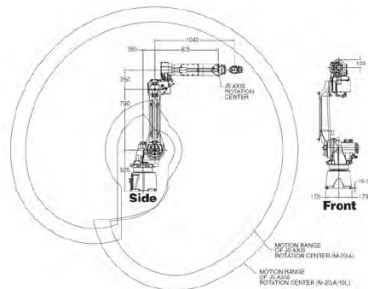
Fanuc – вантажопідійомний робот для піднімання вантажу до 1200 кг й переміщення на відстань до 3,7 м – ідеальний у якості навантажувача, тому що працює без участі людини, що практично зводить до нуля небезпеку травматизму.



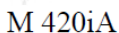
430iA/2FH/4FH



M10iA, M10iA/6



M20iA

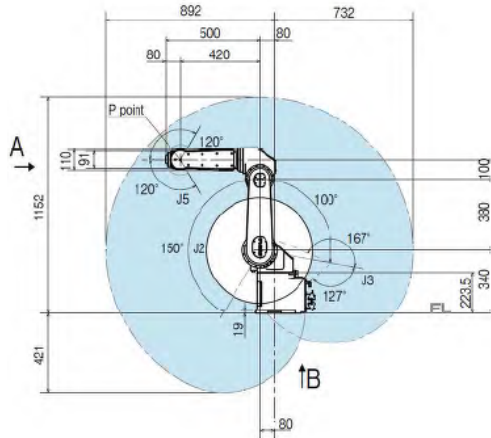


Модель ІР Fanuc	430iA/2 FH	430iA/4 FH	M10iA/6	M10iA	M20iA	420iA
Число ступенів рухливості	5	5	6	6	6	4
Номінальна вантажопідйомність, кг	2	4	6	10	20	40
Діапазон переміщень, градусів:						
JT1	360	360	360	360	370	320
JT2	230	230	250	250	260	115
JT3	383	383	445	445	458	540
JT4	300	300	380	380	400	540
JT5	540	540	380	380	360	–
JT6	–	–	600	600	550	–
Максимальна швидкість, градусів/с:						
JT1	300	300	210	210	195	180
JT2	320	320	190	190	175	200
JT3	320	320	210	210	180	200
JT4	360	360	400	400	360	350
JT5	1200	2000	400	400	360	–
JT6	–	–	600	600	550	–
Точність позиціонування, мм	±0,5	±0,5	±0,1	±0,08	±0,08	±0,5
Маса, кг	55	55	135	130	250	620
Спосіб розміщення	Підлоговий, настінний					Підлоговий

100

Toshiba TV 800

Для завантаження/вивантаження й зборки верстатів.



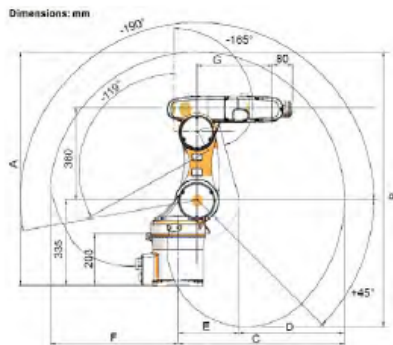
Технічні характеристики

Модель ПР Toshiba	TV 800
Число ступенів рухливості	6
Номінальна вантажопідйомність, кг	5
Максимальний виліт руки, мм	892
Максимальні переміщення, градусів:	
Вісь 1	±170
Вісь 2	+150/–100
Вісь 3	+167/–127
Вісь 4	±190
Вісь 5	±120
Вісь 6	±360
Максимальні швидкості переміщення, градусів/с:	
Вісь 1	237
Вісь 2	240
Вісь 3	288
Вісь 4	350,5
Вісь 5	484
Вісь 6	576
Точність позиціонування, мм	±0,2
Комбінована швидкість переміщення, мм/з	8060
Час циклу переміщення (25–300–25 мм), с	0,4...0,5
Спосіб розміщення	Підлоговий
Маса, кг	48

Країна-виробник: Японія

Kuka KP 5 sixx R850/ KP 16-2/30-3/60-3

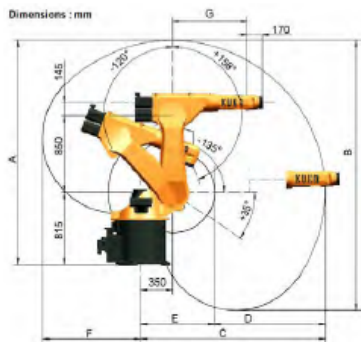
Області застосування промислових роботів KUKA: електродугове зварювання металоконструкцій, точкове зварювання, штабелювання, укладання, , навантаження й розвантаження машин, механічна обробка (шліфування, полірування, 3Д фрезерування) і т. п.



KP 5 sixx R850



KP 16-2



KP 30-3, KP 60-3

Робочий простір маніпулятора роботів Kuka, мм

Модель	A	B	C	D	E	F	G
KP 5 sixx R850	1115	1453	855	614	242	705	405
KP 16-2	2026	2412	1611	1081	530	1027	670
KP 30-3, KP 60-3	2498	3003	2033	1218	815	1084	820

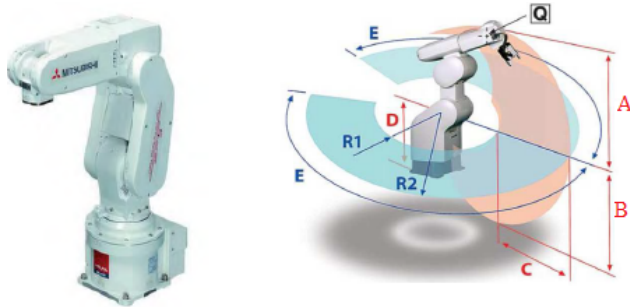
Технічні характеристики

Модель ПР Kuka	КР 5 sixx R850	КР 16-2	КР 30-3	КР 60-3
Число ступенів рухливості	6			
Номінальна вантажопідйомність, кг	5	16	30	60
Максимальний виліт руки, мм	855	1611	2033	2033
Діапазон переміщень, градусів:				
JT1	±170	±185	±185	
JT2	+45/-90	+35/-155	+35/-135	
JT3	+165/-119	+154/-130	+158/-120	
JT4	±190	±350	±350	
JT5	±120	±130	±119	
JT6	±358	±350	±350	
Максимальна швидкість, градусів/с:				
JT1	250	156	140	128
JT2	250	156	126	102
JT3	250	156	140	128
JT4	410	330	260	260
JT5	410	330	245	245
JT6	660	615	322	322
Точність позиціонування, мм	±0,03	±0,05	±0,06	
Маса, кг	29	235	665	665
Спосіб розміщення	Підлоговий, настінний			

Країна-виробник: Німеччина.

Melfa RV-2A/3AJ/6S/12SL

Швидкі й прецизійні роботи MELFA для складних монтажних робіт, для дуже швидкого маніпулювання електронними деталями і їх монтажу.



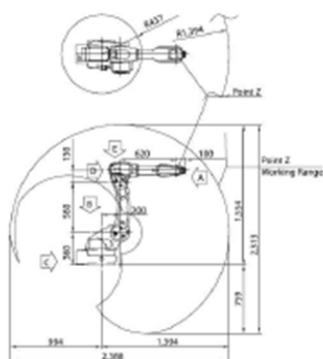
Технічні характеристики

Модель ПР Melfa	RV-2A	RV-3AJ	RV-6S	RV-12SL
Число ступенів рухливості	6	5	6	6
Номінальна вантажопідйомність, кг	2	3	6	12
Максимальний виліт руки, мм	706	715	781	1482
Радіус дії (від точки Q):				
A, мм	521	530	611	1235
B, мм	459	457	529	1035
C, мм	348	308	437	928
D, мм	350	350	350	450
E, градусів	160	160	170	170
R1, мм	273	322	258	457
R2, мм	621	630	696	1385
Максимальна лінійна швидкість переміщення, мм/с:				
JT1	135			
JT2	110			
JT3	140			
JT4	200			
JT5	200			
JT6	300			
Точність позиціонування, мм	±0,04	±0,04	±0,02	±0,05
Максимальна лінійна швидкість переміщення, мм/с	3500	3500	9300	9500
Час циклу переміщення (25–300–25 мм), с	1,3	1,25	0,4	0,7
Маса, кг	37	33	58	98

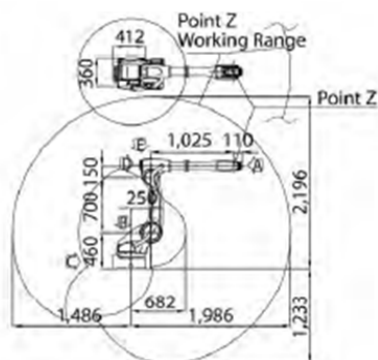
Країна-виробник: Японія.

Hyundai HA006

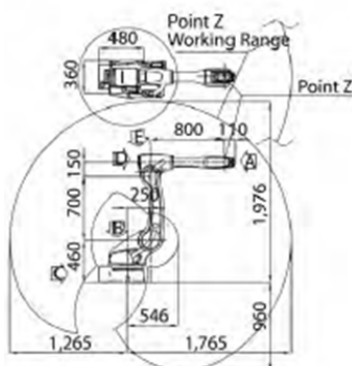
Універсальний, зварювальний для дугового зварювання.



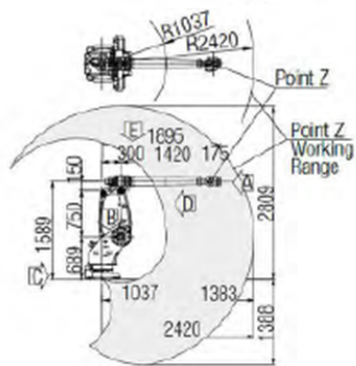
HA06L



HA010L



HA020L



HR030L

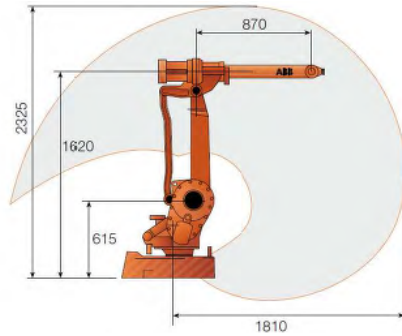
Технічні характеристики

Модель ПР Hyundai	HA06	HA010L	HA020L	HR030L
Число ступенів рухливості	6			
Номінальна вантажопідйомність, кг	6	10	20	30
Максимальний виліт руки, мм	1394	1986	1765	2420
Діапазон переміщень, градусів:				
Вісь 1	±180			
Вісь 2	+150/-90	+160/-105	+150/-110	+150/-77
Вісь 3	+200/-160	+240/-165	+250/-155	+134/-135
Вісь 4	±180 ±360			
Вісь 5	±135 ±127			
Вісь 6	±360			
Максимальна швидкість, градусів/с:				
Вісь 1	170			140
Вісь 2	170	165		150
Вісь 3	170	175	170	150
Вісь 4	335	350	335	210
Вісь 5	335	350	335	210
Вісь 6	500	600		300
Точність позиціонування, мм	±0,05	±0,08		±0,07
Маса, кг	155	245	240	670
Спосіб розміщення	Підлоговий ,настільний, настінний			

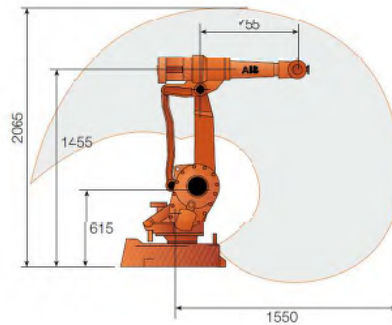
Країна-виробник: Корея.

ABB IRB 2400L/2400-10/2400-16

Області застосування промислових роботів IRB: обслуговування верстатів, шліфування, полірування, зняття заусенців, обрізка.



IRB 2400L



IRB 2400-10/2400-16

Технічні характеристики

Модель ПР АBB IRB	IRB 2400L	IRB 2400-10	IRB 2400-116
Число ступенів рухливості	6	6	6
Номінальна вантажопідйомність, кг	7	12	20
Максимальний виліт руки, мм	18010	1550	1550
Діапазон переміщень, градусів:			
JT1	360		
JT2	210		
JT3	125		
JT4	370	400	400
JT5	230	240	240
JT6	800		
Максимальна лінійна швидкість переміщення, мм/с:			
JT1	150		
JT2	150		
JT3	150		
JT4	360		
JT5	360		
JT6	450		
Точність позиціонування, мм	±0,03–0,07		
Маса, кг	380		

Країна-виробник: Швейцарія, Швеція.

Двигуни постійного струму. Загальні технічні вимоги. Технічні дані

Високомоментні двигуни знаходять широке застосування в тиристорних і транзисторних електроприводах і, насамперед, у приводах подач металорізальних верстатів.

По стійкості до зовнішніх впливів електроприводи призначаються для роботи на висоті над рівнем моря не більше 1000м, при температурі навколишнього повітря для електропривода і тахогенератора від 5 до 400 °С, при максимальній відносній вологості повітря 80 % при температурі 300 °С, у невибуховонебезпечному навколишньому середовищу, що не містить агресивних газів і парів у концентраціях, що руйнують метали й ізоляцію, у закритих стаціонарних помешканнях при відсутності безпосереднього впливу сонячної радіації. Двигуни повинні витримувати вібрацію до 60 Гц при прискоренні не більш 9,81 м/с².

Тривалий момент двигунів у загальмованому стані $M_{mp,0}$, Н·м, при швидкості, рівній нулю, відповідає значенням наступного ряду: 0,35; 0,47; 0,7; 1,0; 1,3; 1,7; 2,3(2,1); 3,5; 4,7; 7,0; 10; 13; 17; 23(21); 35; 47; 70; 100; 130; 170. У залежності від призначення двигуна припускаються наступні максимальні частоти обертання (таблиця Е.1):

Таблиця Е.1 – Частота обертання в залежності від призначення двигуна

$M_{mp,0}$, Н·м	n_{max} , об/хв	
	I	II
0,35–7	2000	3000
10–100	1500	2000
100–170	1000	2000

Момент перетворення на максимальній частоті повинен бути не більше 0,5 $M_{mp,0}$ на протязі 1 хвилини. Електроприводи повинні забезпечувати момент, рівний по $M_{mp,0}$, у режимі S1 у діапазоні частоти обертання від 0 до 0,25 n_{max} .

Високомоментні двигуни повинні витримувати перевантаження на протязі 0,2 секунди в залежності від обертів (таблиця Е.2):

Таблиця Е.2 – Залежність величини перевантаження від обертів двигуна

Оберти двигуна	Величина перевантаження
Від 0 до $0,25 n_{\max}$	(4–6) $M_{\text{пр.0}}$
Від 0,25 до $0,5 n_{\max}$	(3–4) $M_{\text{пр.0}}$
Від 0,5 до $n_{\max}$	(1–3) $M_{\text{пр.0}}$

Високомоментні двигуни для узгодження із системою керування постачаються тахогенератором інтегрального виконання, датчиками шляху, електромагнітним гальмом і тепловим захистом.

Високомоментні електродвигуни постійного струму серії ПБВ

Високомоментні двигуни постійного струму ПБВ призначені для електроприводів 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.

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.

Приклад позначення високомоментного електродвигуна постійного струму: ПБВ112:

П – двигун постійного струму;

Б – ступінь захисту IP44;

В – високомоментний;

112 – висота осі обертання, мм.

У комплект кожного ДПС серії П входить тахогенератор типу ТС-ІМ (таблиця Е.3).

Таблиця Е.3 – Технічні дані тахогенератора типу ТС-1М для двигунів серії ПБВ

Параметр	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, Гн	0,6
Опір обмотки якоря при 15 °С, Ом	138

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

У двигунах серії ПБВ застосовують гальма серії ЕТДВ, напруга живлення постійного струму яких рівна 24 В.

Двигуни серії ПБВ

Таблиця Е.4 – Технічні дані високомоментних електродвигунів постійного струму серії ПБВ

Параметр	Тип електродвигуна										
	ПБВ-100М	ПБВ-100L	ПБВ-112S	ПБВ-112M	ПБВ-112L	ПБВ-132M	ПБВ-132L	ПБВ-160М	ПБВ-160L	ПФВ-160S	ПФВ-160М
Номінальний момент, Н·м	7,16	10,5	14	17,5	21	35	47,7	76,4	105	143,2	175
Номінальна швидкість, об/хв	1000	1000	750	600	500	600	600	500	500	500	600
Номінальна потужність, кВт	0,75	1,1	1,1	1,1	1,1	2,2	3,0	4,0	5,5	7,5	11,0
Номінальна напруга, В	52	56	44	47	50	53	70	66	78,5	58	82
Номінальний струм, А	18	24	31,5	29	28	50	50	78,5	90	182	180
Максимальний момент, Н·м	70	100	130	170	210	350	470	490	510	490	510
Максимальна швидкість, об/хв	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1000	1000	1000	1000
Момент інерції якоря, кг·м ² *	0,01/0,0112	0,013/0,0142	0,035/0,0366	0,042/0,0433	0,049/0,0504	0,188/0,1901	0,238/0,2401	0,242/0,2464	0,298/0,3024	0,194/0,1984	0,242/0,246
Максимальне теоретичне прискорення, с ⁻²	7000	7700	3700	4050	4360	1860	1970	2020	1710	2520	2100
Електромеханічна постійна часу, мс	10,3	7,6	13,2	10,1	8,6	14,2	12,3	8,5	7,9	9,9	8,5
Електромагнітна постійна часу, мс	5,3	5,75	6,75	7,3	7,65	7,35	7,85	10,6	11,8	9,25	10,6
Постійна часу нагрівання, хв	60	70	60	70	80	90	100	–	–	–	–
Маса, кг*	29/38	35/44	45/60	51/66	57/72	88/108	105/125	168/188	182/202	162/182	176/196
Висота осі обертання, мм	100	100	112	112	112	132	132	160	160	160	160
Довжина, мм*	476/640	536/700	515/693	555/733	595/773	652/842	722/912	788/985	841/1040	731/930	786/985

*У чисельнику зазначені значення для двигуна з тахогенератором, у знаменнику – з тахогенератором, гальмом і резольвером.

Двигуни серії 2ПБВ

Електродвигуни постійного струму 2ПБВ (таблиця Е.5) застосовуються в складі регульованих електроприводів різних механізмів, включаючи безредукторні приводи подач верстатів, роботів, маніпуляторів, де потрібні рівномірність обертання й висока перевантажувальна здатність по моменту при низьких частотах обертання. Живлення електродвигунів може здійснюватися від генераторів постійного струму або від випрямних пристроїв.

Двигун 2ПБВ – високомоментний із збудженням від висококоерцитивних постійних ферітових магнітів, закритого виконання із природнім охолодженням, ступенем захисту IP44S.

Виготовляється із вбудованим датчиком теплового захисту й тахогенератором постійного струму. Передбачається прибудова безлюфтового електромагнітного гальма НЗТБ-11, установка датчика шляху – резольвера або оснащення пристроєм для установки датчика шляху споживачем. Можлива доробка двигуна для установки датчика шляху – енкодера.

Приклад позначення високомоментного електродвигуна постійного струму: 2ПБВ112:

- 2 – номер серії;
- П – електродвигун постійного струму із вбудованим тахогенератором ТП-80, датчиком теплового захисту терморезистором СТ14-2А;
- Б – ступінь захисту й спосіб охолодження (закрите виконання із природнім охолодженням);
- В – високомоментний;

112 – висота осі обертання, мм.

Двигуни допускають перевантаження по струму на 50 % понад тривале значення в загальмованому стані в плинні 1 хв. і струм, відповідний до максимального моменту, протягом 1с.

Таблиця Е.5 – Технічні дані високомоментних електродвигунів постійного струму серії 2ПБВ

Параметр	Тип електродвигуна					
	2ПБВ100М	2ПБВ100L	2ПБВ112S	2ПБВ112М	2ПБВ112L	2ПБВ132S
Номінальний момент, Н·м	7,5	11,0	15,0	18,5	22,0	37,0
Максимальна потужність, кВт	1,8	2,2	3,0	3,7	4,4	7,4
Номінальна напруга, В	115	95	123	161	202	175
Номінальний струм, А	20	25	28	35	32	54
Максимальний момент, Н·м	70	100	130	170	210	350
Максимальна частота обертання, об/хв	2500	2000	2000	2000	2000	2000
Момент інерції якоря, кг·м ²	0,01	0,013	0,035	0,042	0,049	0,188
Максимальне теоретичне прискорення, с ⁻²	7400	7700	3800	4000	3800	2000
Електромеханічна постійна часу, мс	13,5	10,8	16,8	14,6	13,6	22,0
Електромагнітна постійна часу, мс	5,30	5,75	6,75	7,30	7,65	7,35
Індуктивність якоря, мГн	1,18	0,80	0,732	0,898	1,102	0,422
ККД при частоті обертання $0,25n_{max}$	71,5	73,5	75	81,5	77,5	80,5
Маса, кг	24,8	28,8	39,8	45,8	51,8	73,3
Висота осі обертання, мм	218	218	265	265	314	314
Довжина, мм	574	634	601	641	681	707

Двигуни серії ДП

Двигуни серії ДП розроблені для заміни знятих з виробництва в 1990-х роках електродвигунів постійного струму ПБСТ. По своїх технічних характеристиках, габаритних і приєднувальних розмірах електродвигуни ДП повністю замінюють серію ПБСТ.

Відмінності технічних характеристик полягають у встановлюваних на двигунах тахогенераторах. На електродвигуни ПБСТ встановлювалися два типи тахогенераторів: ПТ-1 і ТС-1М, які в цей час не випускаються. Замість них на двигуни серії ДП встановлюються тахогенератори ТП-75-20-0,2 (**серія ДП100**) і тахогенератори ТМГ-30П (**серії ДП150, ДП160, ДП212**). В іншому електродвигуни ПБСТ і електродвигуни ДП повністю взаємозамінні.

Двигуни серії ДП призначені для роботи в широкорегульованих електроприводах із діапазоном регулювання до 1:2000 (для верстатобудування).

Двигуни серії ПБСТ виготовляються з незалежним збудженням, без послідовної стабілізуючої обмотки. Стійка робота двигуна постійного струму (ДПС) забезпечується схемою керування електропривода. Напруга збудження встановлюється при замовленні і може бути 110 або 220 В.

Двигуни допускають регулювання частоти обертання вище від номінальної (при постійній потужності) – ослабленням поля головних полюсів або при короткотривалих режимах тривалістю не більше 5 хвилин при повному потоці – зміною напруги на якорі. При цьому для ДПС із напругою 110 В допускається підвищення напруги при номінальному струмі якоря до 220 В, із напругою 220В – до 330В, із напругою 440В – до 510В. Частота обертання не повинна перевищувати у ДПС 2–4-го габаритів 4000 об/мин, 5–6-го габаритів – 3600 об/мин. Двигуни допускають роботу з малими частотами обертання (0,5–1,5 об/хв) при номінальному збудженні і моменті, що не перевищує номінальний.

Граничне відхилення частоти обертання від номінальної при номінальному навантаженні, номінальній напрузі на якорі й обмотки збудження при сталому тепловому режимі не повинно перевищувати +15 % – 5 %.

Двигуни допускають: перевантаження по струму до $4I_n$ на протязі 10 с при номінальному збудженні (момент обертання при цьому повинен бути не менше $2.5 M_{ном}$ з номінальною частотою обертання 3000об/хв і не менше $3 M_{ном}$ для ДПС із меншими номінальними частотами

обертання); перевантаження по струму до $2I_{\text{ном}}$ на протязі 10 с при ослабленому полі при максимальній частоті обертання.

Двигуни виготовляються з убудованим тахогенератором типу ТМГ-30П.

Технічні дані тахогенератора ТМГ-30П для двигунів серії ДП (ДП150, ДП160, ДП212) наведені в таблиці Е.6.

Таблиця Е.6 – Технічні дані тахогенератора ТМГ-30П для двигунів серії ДП

Параметр	Значення
Крутизна вихідної характеристики, В/(об/хв)	0,0575 + 15 %
Номінальна частота обертання, об/хв	4000
Опір навантаження, кОм, не менше	2,64 + 2 %
Тип збудження	Постійні магніти
Нелінійність вихідної напруги, %	+2
Несиметрія вихідної напруги, %	+2
Пульсація вихідної напруги (при частоті обертання від 4000 до 50 об/хв), %	5
Маса, кг	3,3

Технічні дані електродвигунів постійного струму серії ДП наведені в таблиці Е.7.

Таблиця Е.7 – Технічні дані електродвигунів постійного струму серії ДП

ДПС	Потужність, кВт		U_n В	n_n , 1/хв	$n_{\max}$ 1/хв.	η %	Опір при 15 °С, Ом		L_a мГн	Момент інерції якоря, кг·м ²	M_n Н·м
	ном	max					якоря	ДП			
ДП140ЛГ	0,4	0,56	110	1000	2500	70	1,8	1,1	70	0,011	3,9
ДП140ЛГ	0,6	0,8	110	1500	3750	74	1,08	0,66	40	0,011	3,9
ДП140ЛГ	0,85	1,2	110	2200	4000	78	0,48	0,37	20	0,012	3,8
ДП140ЛГ	1	1,4	110	3000	4000	79,5	0,33	0,19	11	0,012	3,3
ДП140ЛГ	0,55	0,77	110	1000	2500	71	1,3	0,9	10	0,012	5,4
ДП140ЛГ	0,85	1,2	110	1500	3750	80,5	0,52	0,51	6,8	0,014	5,5
ДП140ЛГ	1,15	1,6	110	2200	4000	80,5	0,3	0,3	3,7	0,014	5,1
ДП140ЛГ	1,3	1,8	110	3000	4000	80	0,2	0,15	3	0,014	4,2
ДП150ЛГ УХЛ4 Р23	0,8	1,1	110	1000	2500	75	0,61	0,61	8	0,024	7,8
ДП150ЛГ УХЛ4 Р23	1,2	1,7	110	1500	3750	79,5	0,26	0,26	4	0,024	7,8
ДП150ЛГ УХЛ4 Р23	1,5	2,1	110	2200	4000	82,5	0,139	0,128	3	0,025	6,7
ДП150ЛГ УХЛ4 Р23	1	1,4	110	1000	2500	79	0,45	0,34	10	0,031	9,8
ДП150ЛГ УХЛ4 Р23	1,6	2,2	110	1500	3750	82,4	0,28	0,25	5	0,032	10,4
ДП160ЛГ УХЛ4 Р23	1,4	2	110	1000	2500	79	0,39	0,31	9	0,045	13,7
ДП160ЛГ УХЛ4 Р23	2,1	2,9	110	1500	3750	84,5	0,19	0,15	4,5	0,046	13,7
ДП160ЛГ УХЛ4 Р23	2,9	4	110	2200	4000	86	0,11	0,06	2,4	0,046	12,9
ДП160ЛГ УХЛ4 Р23	1,9	2,7	110	1000	2500	80	0,31	0,19	7,1	0,056	18,6

Двигуни постійного струму серії ДК1

Двигуни серії ДК1 призначені для експлуатації в слідкуючих регульованих електроприводах механізмів подач металообробних верстатів і в маніпуляторах із програмним керуванням, а також у верстатах для свердлильних друкарських плат і термохімічної обробки металів. Двигуни виготовляють із номінальним моментом 1,7; 2,3; 3,5; 5,2 Н·м. Кратність максимальних моментів у частках номінального через комутаційні обмеження в двигунах ДК1 залежить від частоти обертання (таблиця Е.8).

Таблиця Е.8 – Залежність величини перевантаження від обертів двигуна

Оберти двигуна	Величина перевантаження
Від 0 до $0,25 n_{\max}$	(4–6) $M_{mp,0}$
Від 0,25 до $0,5 n_{\max}$	(3–4) $M_{mp,0}$
Від 0,5 до $n_{\max}$	(1–3) $M_{mp,0}$

Таблиця Е.9 – Технічні дані двигунів серії ДК1

Тип двигуна	Момент мах/ ном Н·м	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	Потужність, кВт	Струм, А	ККД %	Опір обмотки якоря при 20 °С, Ом	Момент інерції якоря J , кг·м ²
ДК1-1.7	11,9/ 1,7	36	1000	0,18	8	65,5	0,75	0,002
ДК1-2.3	16,1/ 2,3	48	1000	0,24	7,5	67	0,95	0,0025
ДК1-3.5	24,5/ 3,5	65	1000	0,36	7,5	74,5	1,15	0,003
ДК1-5.2	36,4/ 5,2	110	1000	0,54	6,5	75,5	2,1	0,0035

$n_{\max} = 2000 \text{ об/хв.}$

У двигунах ДК1 застосовані наступні умонтовані елементи: тахогенератор ТГ1, датчик положення – типу ПМБ-1, електромагнітне гальмо типу ЕТДВ 12У3.

Таблиця Е.10 – Технічні дані тахогенератора типу ТГ1 для двигунів серії ДК1

Параметр	Значення
Крутизна вихідної характеристики, В/(об/хв)	0,03 ± 0,0015
Номінальна частота обертання, об/хв	1100
Опір навантаження, кОм, не менше	2000 ± 300
Напруга збудження	Збудження від постійних магнітів
Момент інерції ротора, кг·м ²	0,4

Технічні характеристики електродвигунів постійногоструму типу 2ПН

Таблиця Е.11

Тип Електро- двигуна	Номінальні дані двигуна						ККД, %	Максимальна потужність збудження, Вт	Опір при 15 С, Ом		Момент інерції якоря, кг·м ²
	Потужність, кВт	Напруга якоря, В	Напруга збудження, В	Сила струму якоря, А	Номінальна частота, м ⁻¹	Максимальна частота, м ⁻¹			якоря	додаткових полів	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2ПН-180М	12,0	220 440	220 220	76,50 38,1	1500 1500	4000 3500	85,5 86,0	745	0,084 0,338	0,056 0,221	0,2
	26,0	220 440	220 220	130,0 645	2240 2240	3500 3500	88,0 88,5		0,038 0,15	0,025 0,092	
	37,0	220 440	220 220	185,0 918	3000 3150	3500 3500	89,0 89,5		0,022 0,084	0,015 0,056	
2ПН-180Б	7,1	220 440	220 220	37,6 187	750 750	2500 1850	80,0 80,5	580	0,26 106	0,183 0,67	0,229
	10,0	220 440	220 220	52,5 26,0	1000 1000	3000 2500	83,5 83,5		0,168 0,585	0,11 0,462	
	18,5	220 440	220 220	93,50 47,0	1500 1600	3500 3500	87,0 87,5		0,065 0,26	0,044 0,183	
	30,0	440	220	74,6	2200	3500	89,0	786	0,136	0,084	
	42,0	440	220	1040	3000	3500	90,5		0,65	0,044	
2ПН-200М	8,5	220 440	220 220	44,5 22,2	800 800	2500 1850	82,0 82,0	595	0,188 0,796	0,116 0,506	0,25
	13,0	220 440	220 220	67,0 33,4	1120 1000	3000 2500	85,0 84,5		0,106 0,485	0,061 0,303	
	22,0	220 440	220 220	111,0 55,6	1500 1500	1500 3500	87,5 87,5	690	0,047 0,246	0,029 0,13	
	36,0	220 440	220 220	181,0 89,7	2200 2200	3500 3500	88,5 89,5	800	0,026 0,106	0,016 0,061	
	60,0	440	220	149,0	3150	3500	90,5	1045	0,047	0,029	
2ПН-200Б	11,0	220 440	220 220	57,0 28,3	800 750	2500 1850	84,0 83,5	670	0,125 0,565	0,08 0,393	0,3
	16,0	220 440	220 220	82,0 410	1000 1000	3000 2500	86,0 86,0		0,083 0,343	0,053 0,224	
	30,0	220 440	220 220	150,0 74,5	1500 1600	3500 3500	88,5 89,5	870	0,031 0,185	0,02 0,08	
	53,0	440	220	131,0	2360	3500	90,5	1149	0,055	0,037	
	75,0	440	220	1840	3150	3500	91,5		0,031	0,02	

Продовж. табл. Е.11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2ПН-225М	7,5	220	220	40	500	1500	77,0		0,09	0,087	0,525
	11	440	220	58	600	1800	79,0		0,13	0,098	
	15	220	220	80	750	2500	80,5		0,085	0,061	
	22	220	220	94	1000	2500	82,5	1000	0,067	0,056	
2ПН-90М	0,17	220	220	1,32	750	1500			27,2	16,2	0,004
	0,25	229	220	1,71	1120	2000	57,0	60	15,47	11,2	
	0,37	220		2,44	1500	4300	61,5		10,61	6,66	
	0,71	220	220	4,26	2360	4000	74,0	77	3,99	2,55	
	1,00	220	220	5,85	3000	4000	72,0	100	2,52	1,47	
2ПИ-90Б	0,22	220	220	1,53	800	1500	54,5		17,5	13,13	0,005
	0,34	220	220	2,20	1000	2000	60,0	66	12,2	7,96	
	0,55	220	220	3,32	1500	4300	67,5	85	5,44	3,89	
	0,90	220	220	5,06	2120	4000	73,0		2,85	1,731	
	1,30	220	220	7,20	3150	4000	78,0	108	1,3	0,932	
2ПН-100М	0,37	220	220	2,50	750	1500	59,5		11,78	6,7	0,011
	0,50	220	220	3,10	1000	2000	66,0	78	7,05	4,62	
	0,75	220	220	4,35	1500	4300	71,5		3,4	2,05	
	1,20	220	220	6,75	2200	4000	76,5	102	1,792	0,93	
	2,00	220	220	11,0	3000	4000	79,0	130	0,805	0,57	
2ПН-132Б	1,9	220	220	10,9	750	2500	72,0		1,28	1,00	0,047
		440	220	5,5	750	1850	70,5	266	6,42	4,45	
	3,0	220	220	16,9	1000	3000	75,5		0,88	0,64	
		440	220	8,3	1000	2500	76,5		3,38	2,16	
	5,5	220	220	30,40	1500	4000	80,5		0,322	0,27	
		440	220	14,6	1600	3750	81,5	363	1,28	1,00	
	8,5	220	220	44,2	2200	4000	84,0		0,167	0,124	0,047
		440	220	21,9	2240	4000	84,5	411	0,67	0,445	
	14,0	220	220	72,1	3150	4000	86,0		0,08	0,066	
		440	220	35,9	3150	4000	86,5	482	0,322	0,27	
2ПН-160М	3,0	220	220	16,6	750	2500	76,5		0,732	0,485	0,084
		440	220	8,3	750	1850	76,0	280	3,15	2,21	
	4,5	220	220	24,2	1000	3000	79,5		0,411	0,304	
		440	220	12,1	950	2500	79,0	340	1,78	1,44	
	7,5	220	220	39,20	1500	4000	83,0		0,183	0,135	
		440	220	19,4	1500	3750	84,0	448	0,732	0,485	
	13,0	220	220	66,5	2120	4000	85,5		0,081	0,056	0,104
		440	220	33,0	2360	4000	86,5	596	0,279	0,175	
	18,0	220	220	92,0	3150	4000	87,0		0,037	0,024	
		440	220	45,5	3150	4000	87,5	690	0,145	0,101	
2ПН-160Л	4,0	220	220	21,8	800	2500	78,5		0,486	0,389	
		440	220	10,9	750	1850	78,5	314	2,02	1,8	
	6,3	220	220	33,4	1000	3000	81,5		0,278	0,196	0,104
		440	220	16,6	1060	2500	82,0	410	0,985	0,842	

Продовж. табл. Е.11

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	
2ПН-100Б	0,42	220	220	2,75	750 1060	1500	61,5	92	7,87	6,2	0,012	
	0,63	220	220	3,88		2000	67,0		4,92	3,52		
	1,10	220	220	6,81		1500	4300		74,0	2,2		1,57 0,853
	1,70	440	220	9,29		2200	4000		78,0	1,17		
	2,20	440	220	11,80	3150	4000	81,0		0,52			
2ПН-112М	0,60	220	220	3,9	800	2500	60,5	157	5,07	4,5	0,014	
		440	220	2,0	750	1850	59,0		23,6	19,8		
	0,85	220	220	5,3	950	3500	64,0	175	3,85	3,08		
		440	220	2,7	1060	2500	65,0		13,7	12,7		
	1,50	220	220	8,80	1500	4000	70,0	202	1,77	1,55		
		440	220	4,3	1600	3750	72,0		405	5,26		
	2,5	220	220	13,8	2200	4000	76,0	236	0,788	0,682		
		440	220	6,9	2360	4000	76,5		3,12	2,69		
	3,60	220	220	19,3	3000	4000	79,0	284	0,42	0,356		
		440	220	9,7	3000	4000	79,0		1,77	1,55		
2ПН-112Б	0,80	220	220	5,06	750	2500	63,5	156	3,68	3,42	0,017	
		440	220	2,52	750	1850	63,0		17,2	13,9		
	1,25	220	220	7,45	1000	3500	68,0	181	2,34	2,04		
		440	220	3,75	1000	2500	68,0		9,55	8,34		
	2,20	220	220	12,30	1500	4000	75,0	218	0,968	0,848		
		440	220	6,10	1600	3750	76,0		3,68	3,42		
	3,40	220	220	18,30	2240	4000	79,0	293	0,413	0,411		
		440	220	9,00	2240	4000	79,5		1,73	1,51		
	5,30	220	220	27,70	3000	4000	81,5	380	0,242	0,195		
		440	220	13,60	3000	4000	81,5		0,968	0,848		
2ПН-132М	1,60	220	220	9,40	750	2500	68,5	274	1,88	1,39	0,038	
		440	220	4,70	750	1850	69,0		8,45	4,96		
	2,50	220	220	14,20	1000	3000	73,5	290	1,08	0,763		
		440	220	7,20	1000	2500	73,0		4,54	3,26		
	4,00	220	220	21,80	1500	4000	79,0	352	0,564	0,336		
	440	220	10,90	1500	3750	79,0	2,28		1,44			
	7,00	220	220	36,70	2240	4000	83,0	367	0,226	0,166		
		440	220	18,40	2240	4000	83,0		0,906	0,692		
	10,5	220	220	54,70	3000	4000	84,5	367	0,14	0,094		
		440	220	27,10	3000	4000	85,0		0,564	0,336		
2ПБ-180М	12,0	220	220	61,4	3350	3500	87,5	173	0,038	0,025	0,2	
		440	220	30,2	3000	3500	88,5		0,181	0,122		
2ПБ-180Б	4,2	220	220	22,2	750	2500	81,5	260	0,378	0,263	0,229	
		440	220	11,0	750	1850	82,0		1,69	0,981		
2ПБ-200Б	6,0	220	220	31,7	800	2500	84,5	248	0,22	0,15	0,3	
		440	220	15,7	800	1850	84,5		0,925	0,652		
	8,0	220	220	40,6	950	3000	87,5		248	0,125		0,08
		440	220	20,4	1060	2500	87,0			0,565		0,393
	11,0	220	220	56,2	1500	3500	88,5	248	0,083	0,053		
		440	220	27,6	1500	3500	89,0		0,286	0,168		
	15,0	220	220	75,0	2360	3500	89,5	248	0,031	0,02		
		440	220	37,5	2360	3500	90,0		0,125	0,08		

ДОДАТОК Ж

Електроприводи постійного струму. Загальні відомості.

Технічні характеристики.

Опис та робота комплектного електропривода ЕТУ2-2П.

Електроприводи серії ЕТУ2-2П

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

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

В електроприводах 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 електроприводів через мережні реактори (без трансформатора).

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

Структура умовної позначки:

ЕТУ2 – X_1 П;

ЕТУ – електропривод постійного струму тиристорний уніфікований;
2 – номер розробки;

X_1 – виконання по реверсу: 1 – нереверсивний, 2 – реверсивний;

П – подачі.

Функціональна схема швидкодіючого реверсивного електропривода ЕТУ2-2П приведена на рисунку Ж.1.

Електропривод складається з блоку перетворювача ТПЯ БС 3202.П, електродвигуна постійного струму М1 з вбудованим тахогенератором BR1 та трансформатором Т1, блоку запобіжників U1, задатчика швидкості R1, пускової апаратури. В ланцюзі якоря двигуна М1 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 Т1 при напрузі ОЗМ1 110 В (при напрузі ОЗМ1 220 В блок U2 підключається до двох фаз силової вторинної обмотки Т1).

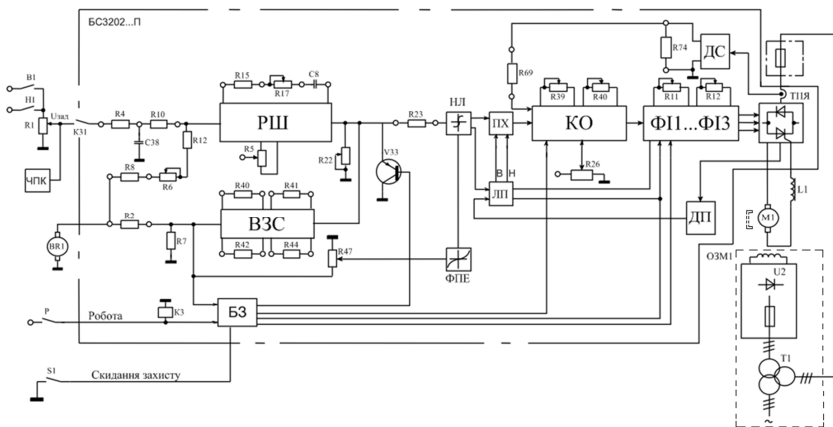


Рисунок Ж.1 – Функціональна схема реверсивного електропривода ЭТУ2-2П

Система керування електропривода представляє собою двоконтурну систему керування частоти обертання валу двигуна з підлеглим струмовим контуром.

Схема 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 ФП1...ФІЗ. Введення керуючого сигналу у ФП1...ФІЗ, а також його зсув ($\alpha_{нач}$) і обмеження вузлів ($\alpha_{хв}, \alpha_{макс}$) 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 вико-нується 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 електропривода в режимі переривчастого струму (РПС).

Для узгодження реверсивного сигналу НЛ і нереверсивної регульовальної 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.

Електроприводи серії ЕПУ1-ЕПУ1М-7

Електроприводи серії ЕПУ1М призначені для створення реверсивних і неревверсивних систем керування електродвигунами постійного струму з одно- і двозонним регулюванням швидкості.

Область застосування: у верстатобудуванні – у механізмах подачі (виконання П) і головного руху (виконання Д, Е, М), у тому числі у верстатах з ЧПК, промислових роботах та інших механізмах різних галузей промисловості.

ЕПУ1М є модернізованим виконанням електропривода серії ЕПУ1 і повністю його замінює.

Продовженням аналогового пристрою серії ЕПУ1М є цифрова серія ЕПУ1М-7.

Структура умовної позначки:

ЕПУ1 М-Х1-

ЕПУ – Електропривод постійного струму уніфікований;

1М – Номер розробки, Модернізований варіант;

Х1 – Виконання по реверсу: 1 – неревверсивний, 2 – реверсивний.

Електроприводи серії ЕПУ1М живляться від трифазної мережі напругою 220, 380, 400, 415 В частоти 50 Гц, силова частина перетворювача підключається до мережі через силовий трансформатор або мережний (струмообмежуючий або комутаційний) реактор.

ЕПУ1М мають систему імпульсно-фазового керування СІФУ, розширену діагностику, ПІ-регулятор швидкості, ПІ-регулятор струму

в структурі електропривода, спрощену лінеаризацію в переривчастому режимі й т. п.

Перетворювачі ЕПУ1М з випрямленою напругою 115 і 230 В підключаються до мережі 380 В через трансформатор ТС або ТСЗ.

Структурна схема електропривода ЕПУ1М7 наведена на
рисунку Ж.2.

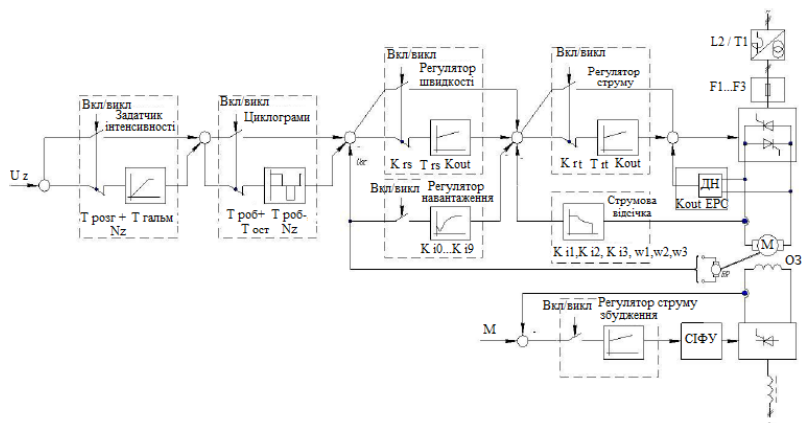


Рисунок Ж.2 – Структурна схема електропривода ЭПУ1М7

Електроприводи серії Sinamics DCM

Електроприводи Sinamics DCMASTER призначені для промислового машинобудування й виробництва промислового обладнання.

Області застосування приводів Sinamics – високопродуктивні одиночні приводи (поворотні механізми, підйомники, конвесери), сервоприводи в маніпуляторах.

Випрямлячі струму Siemens Sinamics DC Master призначені для керування електродвигунами постійного струму незалежного, послідовного, паралельного або змішаного збудження, а також для керування активним або активно-індуктивним навантаженням постійного струму (наприклад, електромагніти).

Перетворювачі постійного струму SINAMICS DC MASTER спеціально призначені для живлення ланцюга якоря й обмотки збудження двигунів постійного струму з регульованою швидкістю.

Альтернативне використання (приміром, живлення обмотки збудження синхронного генератора) також можливо.

Перетворювачі постійного струму SINAMICS DC MASTER являють собою компактні пристрої із силовими компонентами для живлення

ланцюгів якоря й обмотки збудження електродвигуна з керуючою електронікою, а також додатковими модулями (опціями).

У пристроїв з номінальним постійним струмом від 15 А до 1200 А силова частина для якоря й обмотки збудження зібрана з електрично ізольованими модулями тиристорів, радіатор з'єднаний з потенціалом землі. У пристроїв з високим номінальним постійним струмом силова частина для ланцюга якоря зібрана з таблетковими тиристорами й радіаторами (модулі тиристорів) на потенціалі.

У складі перетворювача – ПІ-регулятори швидкості, ПІ-регулятори струму, ПІ-регулятори ЕРС, ПІ-регулятори струму збудження.

Спрощена функціональна схема системи керування, яка реалізована в перетворювачі Sinamics DCM, представлена на рисунку Ж.3.

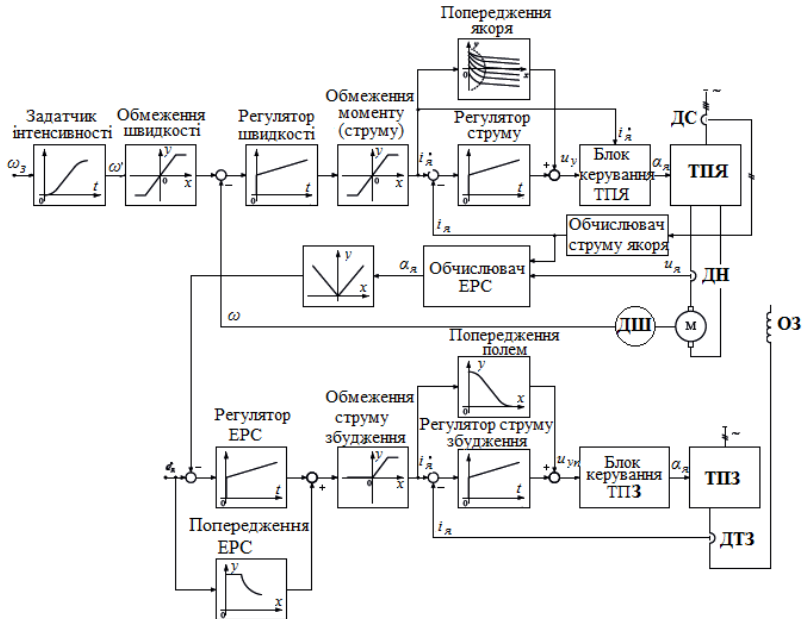


Рисунок Ж.3 – Функціональна схема системи керування перетворювача Sinamics

В основі побудови системи керування лежить принцип підлегло-го регулювання координат. Система має два залежні канали керування по ланцюгу якоря з реверсивним тиристорним перетворювачем ТПЯ й по ланцюгу збудження з перетворювачем ТПЗ. За рахунок наявності

двох каналів керування в перетворювачі реалізована двозонна система регулювання швидкості, яка в першій зоні регулює швидкість двигуна за рахунок зміни напруги на якорі при сталості магнітного потоку, а в другій зоні підвищення швидкості проводиться шляхом ослаблення магнітного потоку при сталості ЕРС.

Для керування швидкістю через напругу якірного ланцюга використовується двоконтурна система автоматичного регулювання. Система регулювання швидкості має внутрішній контур регулювання струму якоря із пропорційно-інтегральним регулятором, який підпорядкований зовнішньому контуру регулювання швидкості. Сигнал зворотного зв'язку надходить із обчислювача ЕРС, на який подаються сигнали струму й напруги якоря.

Технічні характеристики електроприводів постійного струму зведені в таблиці Ж.1.

Таблиця Ж.1 – Технічні характеристики електроприводів постійного струму

Серія ЕП	ЭТУ2-2П	ЭПУ1М-7, ЭПУ1	Sinamics DCM
Тип комплектного електропривода	Тиристорний, уніфікований, реверсивний	Тиристорний, реверсивний, цифровий/аналоговий	Тиристорний, цифровий, реверсивний
Потужність, кВт	До 290	1,5...400	6,3...2508
Діапазон регулювання $n_{\max} / n_{\min}$	1:10000	1:10000	
Найбільша частота обертання $n_{\max}$, об/хв	3000	3000	
Напруга, В	115...230	220...415	3 АС, від 400 до 950
Тривалий момент ел. двигуна, Н·м	1,7...47	7,5...50	
Перевантажувальна здатність моменту	4...6	до 6	1,8
Номінальний струм, А	25...630	25, 50, 200	15...3000
Номінальний струм збудження, А	5, 10, 20, 30		3...40 А (опція – 85 А)
Полоса пропускання, Гц			
Контур швидкості	30	Не менше 20	
Контур струму	30		
Потужність трансформатора, кВА	Дію 10	до 16	
Тип двигуна	ДПУ, 2ПБВ, 4П	ПБВ, 2ПБВ, 2ПКВ, ДПУ, ДР, 4П, 2П, ПБ2П, ПО2П	
Маса без двигуна, кг		14,5	28...78

Навчальне видання

ВАСИЛЬЄВ Олександр Григорович
ОЛЬШЕВСЬКИЙ Сергій Іванович
ЧЕРНО Олександр Олександрович

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання курсової роботи
з дисципліни
"Системи керування промисловими
робототехнічними комплексами"

Комп'ютерна правка *М. О. Паненко*
Комп'ютерне верстання *В. В. Москаленко*

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 7,4. Тираж 100 прим. Вид. № 27. Зам. № 1111-76.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025

E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6402 від 19.09.2018 р.