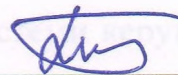


Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри


(підпис)

І. С. Білюк

« 15 » 12 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва спеціальності)

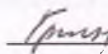
освітня програма Електромеханічні системи автоматизації та електропривод
(назва освітньої програми)

на тему: Аналіз динаміки системи керування робота-маніпулятора

Виконав: студент групи 6371м

Гриненко Владислав Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

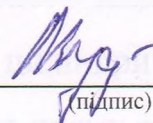


(підпис)

Керівник

доц. каф. автоматики, к.т.н.,
доц. Зубарев А. А.

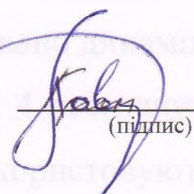
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)


(підпис)

Рецензент

доц. каф. СЕЕС, к.т.н.,
доц. Новогрецький С. М.

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


(підпис)

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

Студент



(підпис)

м. Миколаїв – 2025 року

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 65 с., 4 р., 22 рис., 4 табл., 3 дод., 12 джерел.

Ключові слова: імітаційне моделювання, ПД-регулятор, перехідна характеристика, робот-маніпулятор, система керування.

Об'єкт дослідження – перехідні процеси системи керування циліндричного робота-маніпулятора.

Мета роботи – аналіз динаміки системи керування циліндричного робота-маніпулятора.

Методи дослідження – теоретичні дослідження виконані із залученням сучасної теорії електропривода, методів теорії автоматичного керування та комп'ютерного моделювання за допомогою Scilab, обробка та аналіз отриманих результатів.

У першому розділі розглянуто класифікацію та призначення промислових роботів. Проаналізовано методи аналізу динаміки системи керування робота-маніпулятора. Побудовано динамічну модель циліндричного робота-маніпулятора на основі рівнянь Лагранжа. Розділ 2 містить вибір та обґрунтування методу наукового дослідження, алгоритм дослідження та метод розв'язання поставленого завдання. У третьому розділі досліджено динамічні моделі системи керування циліндричного робота-маніпулятора в програмі Xcos середовища Scilab. Розглянуто пряму та зворотну динаміку циліндричного робота-маніпулятора. Проаналізовано динаміку системи керування циліндричного робота-маніпулятора. В розділі 4 розглянуті питання з охорони праці. Додатки містять рисунки блоків, що використовуються в моделюванні, розрахунок інерцій електроприводів та слайди мультимедійної презентації.

ABSTRACT

Qualification work: 65 p., 4 r., 22 fig., 4 tab., With add., 12 sources.

Keywords: simulation modeling, PD controller, transient response, robot manipulator, control system.

The object of research is transient processes of the control system of a cylindrical robot manipulator.

The purpose of the work is to analyze the dynamics of the control system of a cylindrical robot manipulator.

Research methods - theoretical research was carried out using modern electric drive theory, methods of automatic control theory and computer modeling using 8сн1а6, processing and analysis of the results obtained.

The first section considers the classification and purpose of industrial robots. Methods for analyzing the dynamics of the control system of a robot manipulator are analyzed. A dynamic model of a cylindrical robot manipulator is built based on Lagrange equations. Section 2 contains the choice and justification of the method of scientific research, the research algorithm and the method of solving the task. In the third section, dynamic models of the control system of a cylindrical robot-manipulator in the X environment program are investigated. The direct and inverse dynamics of the cylindrical robot-manipulator are considered. The dynamics of the control system of the cylindrical robot-manipulator are analyzed. Section 4 considers issues of labor protection. The appendices contain drawings of blocks used in modeling, calculation of inertia of electric drives and slides of a multimedia presentation.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ	6
1.1 Роботи та їх застосування	6
1.2 Методи визначення динаміки системи керування робота- маніпулятора.....	7
1.3 Динамічна модель маніпулятора	9
1.4 Висновки до розділу 1	14
2 ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ І ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	15
2.1 Вибір та обґрунтування методу наукового дослідження.....	15
2.2 Розробка алгоритму дослідження.....	17
2.3 Вибір методів розв’язання поставленої задачі	19
2.4 Висновки до розділу 2	22
3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	23
3.1 Побудова моделі в Xcos	23
3.2 Дослідження динаміки	30
3.3 Аналіз результатів моделювання	47
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	51
4.1 Технічне обслуговування та доступність	52
4.2 Три приклади потенційної небезпеки з даних про технічне обслуговування.....	53
4.3 Політика технічного обслуговування	56
4.4 Звітування про втручання при технічному обслуговуванні	60
4.5 Висновки до розділу 4	60
ВИСНОВКИ.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	65
ДОДАТОК А Блоки, що використовуються в симуляції.....	66
ДОДАТОК Б Розрахунок інерцій електроприводів.....	68

ДОДАТОК В Мультимедійна презентація.....	71
--	----

ВСТУП

Актуальність теми. Промислові роботи знаходять все більш широке застосування у різних галузях промисловості, виконуючи безліч різноманітних завдань. Застосування промислових роботів для автоматизації виробничих процесів має безліч незаперечних переваг для підприємств.

На етапі проектування існує необхідність використання динамічних моделей, для моделювання, вивчення поведінки робота-маніпулятора, для аналізу та розробки передових стратегій керування відповідного механізму керування.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є аналіз динаміки системи керування циліндричного робота-маніпулятора. Щоб досягти поставленої мети, слід розв'язати наступні завдання:

- 1) розглянути класифікацію роботів. Дослідити будову та принцип роботи циліндричного робота-маніпулятора. Розглянути методи опису динаміки системи керування циліндричного робота-маніпулятора;
- 2) вибрати та обґрунтувати метод наукового дослідження. Розробити алгоритм дослідження та обрати методи розв'язання поставлених завдань;
- 3) скласти математичний опис системи керування циліндричного робота-маніпулятора. Виконати розрахунок параметрів елементів системи керування;
- 4) дослідити динаміку системи керування циліндричного робота-маніпулятора. Проаналізувати вплив структури та параметрів регуляторів системи керування, вплив параметрів об'єкта керування та зовнішніх факторів на якість керування циліндричного робота-маніпулятора.

Об'єкт дослідження. Перехідні процеси системи керування циліндричного робота-маніпулятора.

Предмет дослідження. Структура та параметри регуляторів системи керування та вплив зовнішніх факторів на якість керування циліндричного робота-маніпулятора.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження виконані із залученням сучасної теорії електропривода, методів теорії автоматичного керування та комп'ютерного моделювання в *Scilab*.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Роботи та їх застосування

Хоча, здається, всі знають, що таке робот, важко дати точне визначення. Оксфордський словник англійської мови дає таке визначення: «Машина, здатна автоматично виконувати складну серію дій, особливо одну, яку програмує комп'ютер». Це визначення включає кілька цікавих елементів: – «Автоматичне виконання дій». Це ключовий елемент у робототехніці, а також у багатьох інших простіших машинах, які називаються автоматами. Різниця між роботом і простим автоматом, таким як посудомийна машина, полягає у визначенні того, що таке «складна серія дій». Прання білизни складається з комплексу дій чи ні? Чи є політ на автопілоті складною дією? Приготування хліба складне? Для всіх цих завдань існують машини, які знаходяться на межі між автоматами і роботами. – «Програмується комп'ютером» є ще одним ключовим елементом робота, оскільки деякі автомати програмуються механічно і не дуже гнучкі. З іншого боку, комп'ютери зустрічаються скрізь, тому важко використовувати цей критерій, щоб відрізнити робота від іншої машини. Вирішальним елементом роботів, який прямо не згадується у визначенні, є використання датчиків. Більшість автоматів не мають датчиків і не можуть адаптувати свої дії до навколишнього середовища. Датчики – це те, що дозволяє роботів виконувати складні завдання.

За середовищем та механізмом взаємодії роботів класифікують на:

- водний;
- колісний;
- мобільний;
- наземний;
- повітряно-десантний;
- з фіксованою основою;

1.2 Методи визначення динаміки системи керування робота-маніпулятора

Нижче описано три основні формалізми, які зазвичай використовуються для моделювання динаміки маніпулятора.

1.2.1 Рівняння Лагранжа. Рівняння Лагранжа є [1]:

$$F_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i}, \quad (1.1)$$

де $L=K-P$, K – кінетична енергія, P – потенційна енергія системи, що розглядається, а q_i – узагальнені координати. F_i позначає узагальнені сили або моменти.

Рівняння, що регулюють рух складної механічної системи, такої як робот-маніпулятор, можна дуже ефективно виразити за допомогою методу, розробленого Лагранжем. Рівняння Лагранжа особливо корисні тим, що вони автоматично включають обмеження, які існують завдяки тому, що різні частини системи з'єднані один з одним, і таким чином усувають необхідність заміни одного набору рівнянь іншим, щоб усунути сили та моменти обмежень. Вони мають справу зі скалярними величинами, завдяки чому усувається потреба у складних векторних діаграмах, які необхідні для визначення та розв'язання векторних величин у відповідній системі координат [3], Недоліком методу Лагранжа є складність обчислень [4], Рівняння Лагранжа дуже дорогі в обчислювальному відношенні і, отже, неефективні для додатків керування в реальному часі, якщо їх не можна спростити.

1.2.2 Рівняння Ньютона-Ейлера. Рівняння Ньютона-Ейлера записуються у вигляді [1]:

$$\vec{f}_i = m_i \vec{r}_{\ddot{n}}, \quad (1.2)$$

$$\vec{n}_i = \vec{I}_i \vec{\omega}_i + \vec{\omega}_i \times \vec{I}_i \vec{\omega}_i, \quad (1.3)$$

де $\vec{f}_i$ – сумарна сила на ланці i , m_i – її маса, $\vec{r}_{\ddot{n}}$ – прискорення центру тяжіння. $\vec{I}_i$ – інерція, $\vec{\omega}_i$ – кутова швидкість, $\vec{n}_i$ – крутий момент.

Рівняння Ньютона-Ейлера надають альтернативний підхід, який виділяє кожен ланку послідовно як незалежне тверде тіло для визначення динамічної моделі цієї ланки.

Отримані рівняння руху являють собою рекурсивну модель для ланки, що включає змінні суміжної ланки. Ці рівняння детально описують поступальну та обертальну динаміку ланки в термінах інерційних сил і моментів. Такої прозорості відношень немає у формулюванні Лагранжа. Отже, розроблена модель допомагає конструктору зрозуміти динамічну поведінку кожної ланки окремо, зокрема поширення сил і моментів через з'єднання та їх взаємодію [5].

1.2.3 Рівняння Кейна. Аналіз, заснований або на формулюванні Лагранжа, або на техніці Ньютона-Ейлера, стає дуже складним при застосуванні до багатоланкових механізмів. Формулювання Лагранжа дає закритий набір рівнянь, але необхідна величезна кількість алгебраїчних маніпуляцій, щоб ввести та згодом виключити множники Лагранжа. Аналогічно, з підходом Ньютона-Ейлера, щоб ввести, а потім усунути не сприяючі між тілові сили обмеження та моменти, Кейн описав [6] ефективну обчислювальну схему для формулювання явних рівнянь руху для механізмів із відкритим циклом. Рівняння Кейна є [1]:

$$\tau_i = \sum_{j=1}^n \left(f_i \frac{\partial \vec{r}_j}{\partial \dot{\theta}_i} + n_j \frac{\partial \omega_j}{\partial \dot{\theta}_i} \right), \quad (1.4)$$

де f_i – сумарна сила i -ї ланки, $\vec{r}_j$ – швидкість центру ваги, n_j – крутний момент, ω_j – кутова швидкість.

Перевага цієї схеми перед формулюваннями Лагранжа та Ньютона-Ейлера полягає в тому, що вона автоматично усуває сили обмеження, що не сприяють, без необхідності обчислення довгих диференціалів [4]. Однак рекурсивні рівняння руйнують структуру динамічної моделі, що є досить корисним для розуміння для проектування системи керування. Для аналізу системи керування хотілося б отримати систему диференціальних рівнянь замкнутої форми, які описують динамічну поведінку маніпулятора. Крім того, сили взаємодії та реакції взаємного впливу в рівнянні повинні визначатися легко, щоб відповідний регулятор був

розроблений для компенсації їх ефектів. Рівняння, отримані в результаті підходу Лагранжа, мають ці характеристики.

Для моделювання динаміки використовується метод Лагранжа. Основна ідея методу Лагранжа буде описана в наступному підрозділі.

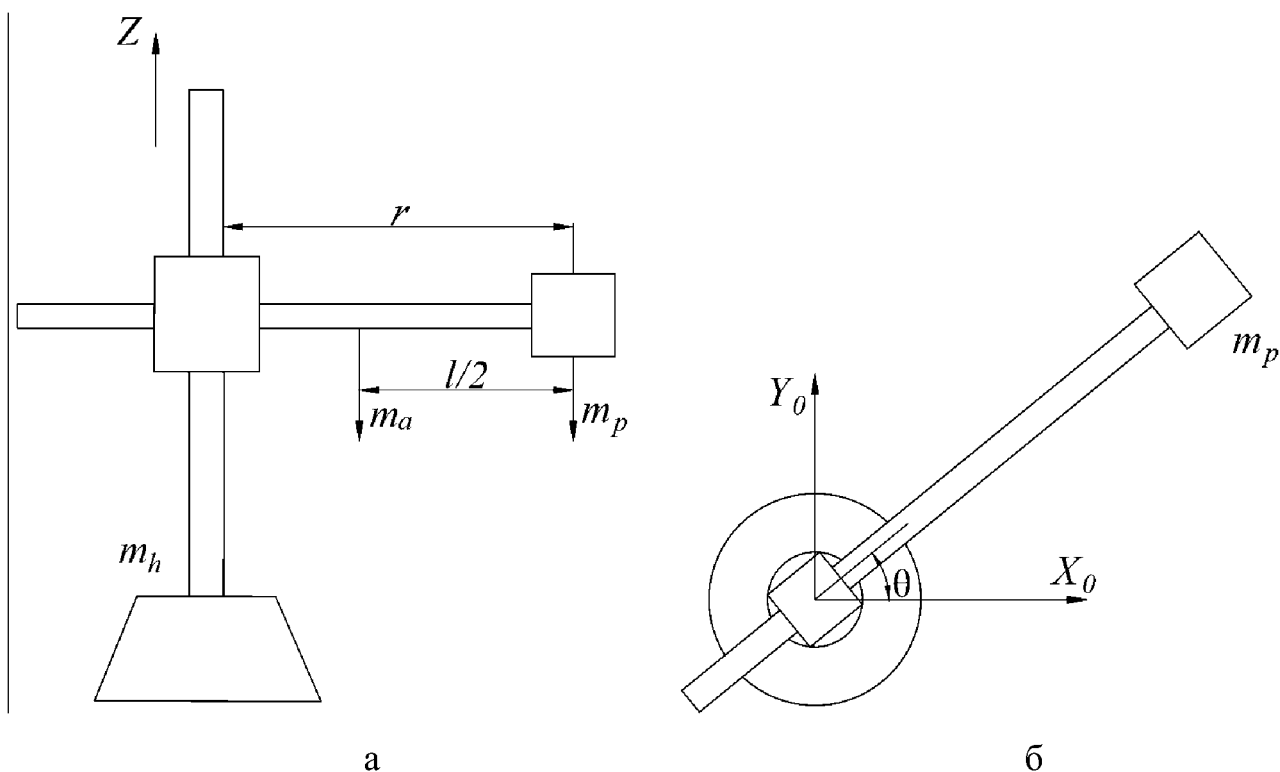
1.3 Динамічна модель маніпулятора

Виведення динамічної моделі маніпулятора на основі рівняння Лагранжа для маніпулятора є простим і систематичним. Якщо припустити рух твердого тіла, отримані рівняння руху, виключаючи динаміку електронних пристроїв, люфт і тертя шестерні, являють собою набір пов'язаних нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку.

Спрощена конструкція циліндричного робота-маніпулятора, схематично показана на рисунку 1.2, складається з трьох ступенів свободи, тобто обертання θ , вертикальне переміщення z і радіальне переміщення r . Отже, кінцеве положення кінцевого схвата можна описати незалежними координатами суглоба r, θ, z .

Таблиця 1.1 – Структурні параметри

Параметр	Опис
m_a	Маса радіального плеча
l	Довжина радіального плеча
m_p	Маса корисного вантажу
m_h	Маса основи
$m = m_a + m_p$	Маса радіального вузла
m_v	Вертикально прикладена маса (сума m_a, m_p і m_h)
F_r, F_θ, F_z	Сили та моменти, які прикладені до r, θ та z -ланок відповідно
$j(r)$	Змінна інерція радіальної ланки
J	Постійна інерція вертикального стовпа
r, θ, z	Швидкості напрямків r, θ і z
g	Прискорення вільного падіння
m_a/l	Маса на одиницю довжини радіального плеча



а – вид збоку; б – вид зверху

Рисунок 1.1 – Спрощена конструкція циліндричного робота-маніпулятора

Маса на одиницю довжини призматичної радіальної ланки є постійною, а її довжина змінюється при ковзанні через основу. Інший поступальний суглоб визначає висоту руки в горизонтальній площині. Для визначення динамічної моделі руху маніпулятора з використанням підходу Лагранжа виконуються наступні кроки:

- оцінка повної кінетичної енергії системи;
- оцінка повної потенціальної енергії системи;
- формування функції Лагранжа;
- виведення рівнянь руху.

Кінетична енергія системи складається з двох типів: обертальної кінетичної енергії та поступальної кінетичної енергії.

$$E_{k.tr} = \frac{mv^2}{2}, \quad (1.5)$$

$$E_{k.r} = \frac{j\omega^2}{2}. \quad (1.6)$$

Змінна інерція радіальної ланки $j_{(r)}$ записується у вигляді:

$$j_{(r)} = m_a \frac{r}{l} \left(\frac{r}{2} \right)^2 + m_a \frac{1-r}{l} \left(\frac{l-r}{2} \right)^2 + m_p r^2,$$

або

$$j_{(r)} = \frac{m_a}{4l} (r^3 + (l - r^3)) + m_p r^2. \quad (1.7)$$

Оскільки J – постійна інерція вертикального стовпа, кінетичну енергію обертання системи можна записати у вигляді:

$$E_{k.r} = \frac{(J+j_{(r)})\dot{\theta}^2}{2}. \quad (1.8)$$

Поступальні кінетичні енергії в напрямках r і z можна записати у вигляді:

$$E_{k.r} = \frac{m\dot{r}^2}{2}, \quad (1.9)$$

$$E_{k.v} = \frac{m_v\dot{z}^2}{2}. \quad (1.10)$$

Отже, повна кінетична енергія системи K :

$$K = \frac{1}{2} (J + j_{(r)}) \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m \dot{r}^2 + \frac{1}{2} m_v \dot{z}^2. \quad (1.11)$$

Повна потенційна енергія P системи дорівнює

$$P = m_v g z. \quad (1.12)$$

Використовуючи рівняння (1.11) і (1.12), функція Лагранжа має вигляд:

$$L = \frac{1}{2}(J + j_{(r)})\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}m\dot{r}^2 + \frac{1}{2}m_v\dot{z}^2 - m_vgz. \quad (1.13)$$

Для запису рівнянь руху визначають такі часткові похідні

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{r}} &= m\dot{r}, \\ \frac{\partial L}{\partial r} &= \left(\frac{3m_a}{4l}(r^2 + (l-r)^2) + 2m_pr^2 \right) \dot{\theta}^2, \\ \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} &= (J + j_{(r)})\dot{\theta}, \\ \frac{\partial L}{\partial \theta} &= 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \dot{z}} &= m_v\dot{z}, \\ \frac{\partial L}{\partial z} &= -m_vg. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Використовуючи наведені вище співвідношення в рівнянні (1.14), рівняння руху циліндричного робота-маніпулятора мають вигляд:

$$\ddot{r} = \frac{1}{2m} \left(\frac{3m_a}{4l}(r^2 + (l-r)^2) + 2m_pr^2 \right) \dot{\theta}^2 + \frac{F_r}{m}, \quad (1.15)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{J+j_{(r)}} \left(- \left(\frac{3m_a}{4l}(r^2 + (l-r)^2) + 2m_pr^2 \right) \dot{r}\dot{\theta} + F_{\theta} \right), \quad (1.16)$$

$$\ddot{z} = -g + \frac{F_z}{m_v}. \quad (1.17)$$

Ці три рівняння описують рух схвата циліндричного маніпулятора, в циліндричній системі координат.

У матричній формі:

$$\begin{pmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(\frac{3m_a}{4l} (r^2 + (l-r)^2) + 2m_p r^2 \right) \dot{\theta}^2 \\ -\frac{1}{J+j(r)} \left(\left(\frac{3m_a}{4l} (r^2 + (l-r)^2) + 2m_p r^2 \right) r \dot{\theta} \right) \\ 0 \end{pmatrix} +$$

$$+ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J+j(r)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_v} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_r \\ F_\theta \\ F_z \end{pmatrix}. \quad (1.18)$$

У рівнянні (1.18) перший доданок у правій частині представляє узагальнені сили Коріоліса та відцентрові узагальнені сили, другий доданок це сила тяжіння, а останній доданок означає прикладені узагальнені сили у відповідних з'єднаннях.

Динамічна модель в рівнянні (1.18) показує, що вертикальний рух характеризується незв'язаним подвійним інтегратором, причому обертальний і радіальний рухи є зв'язаними і нелінійними. Матриця інерції циліндричного робота-маніпулятора є діагональною і залежить явно від радіального зміщення. Радіальна залежність матриці інерції призводить до моменту Коріоліса $\frac{\partial j}{\partial r} \dot{\theta} \dot{r}$ в рівнянні (1.16) і відцентрова сила $\frac{\partial j}{\partial r} \dot{\theta}^2$ рівняння (1.15). Отже, маніпулятор є механічною системою змінної інерції. Залежна від координат матриця інерції $J(r)$ відображає сили взаємного впливу (відцентрові та Коріоліса), і, отже, прискорення не є постійним [7].

Хоча розроблена модель виглядає відносно нескладною, вона зберігає зв'язок і нелінійні характеристики, властиві динаміці робота. Вертикальний рух, можливо, можна керувати звичайним сервомеханізмом, але поєднані обертальні та радіальні ступені свободи створюють складні проблеми керування [7].

1.4 Висновки до розділу 1

1.4.1 Розглянуто класифікацію роботів за середовищем та механізмом взаємодії. Визначено ключові відмінності роботів від автоматичних машин, а саме гнучкість у перепрограмуванні та адаптивність до навколишнього середовища.

1.4.2 Розглянуто три основних методи визначення динаміки системи керування робота-маніпулятора, а саме рівняння Лагранжа, рівняння Ньютона-Ейлера та рівняння Кейна. Для дослідження динаміки системи керування були обрані рівняння Лагранжа, так як саме вони дозволяють відносно легко визначити ефекти та сили збурюючого впливу для того, щоб відповідний регулятор був розроблений для компенсації цих ефектів.

1.4.3 Розглянуто спрощену структуру конструкції циліндричного робота-маніпулятора та визначені структурні параметри для математичного опису динаміки системи керування циліндричного робота-маніпулятора. Виведені три рівняння Лагранжа, що описують рух схвата циліндричного маніпулятора. Отримані рівняння зберігають зв'язок і нелінійні характеристики, властиві динаміці робота. Визначено, що матриця інерції циліндричного робота-маніпулятора є діагональною і залежить явно від радіального зміщення, що призводить до появи моменту Коріоліса в радіальному з'єднанні і відцентрованої сили в кутовому, що явно ускладнює керування роботом-маніпулятором.

2 ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ І ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Вибір та обґрунтування методу наукового дослідження

Метод (від грецького *methodos* – шлях до чого-небудь) – в найбільш загальному випадку означає засіб досягнення мети, спосіб дослідження явища, який визначає планомірний підхід до їх наукового пізнання та встановлення істини. Науковий метод – це спосіб пізнання явищ дійсності в їх взаємозв'язку та розвитку, спосіб досягнення поставленої мети і завдань дослідження і відповідає на запитання: «Як пізнавати?».

Методика дослідження – це система правил використання методів, прийомів та способів для проведення будь-якого дослідження. Свідоме застосування науково-обґрунтованих методів слід розглядати як найсуттєвішу умову отримання нових знань.

Кожний метод наукового пізнання слід розглядати як систему регулятивних принципів практичної і теоретичної діяльності людини. Методів пізнання об'єктивної дійсності відомо дуже багато. Правильний вибір методів дослідження потребує знання їх класифікації.

Досить поширеним є поділ основних типів методів за двома ознаками: мети і способу реалізації.

За першою ознакою виділяються так звані первинні методи, що використовуються з метою збору інформації, вивчення джерел, спостереження, опитування та ін. Вторинні методи використовуються з метою обробки та аналізу отриманих даних – кількісний та якісний аналіз даних, їх систематизація, шкалювання та ін.

Візуальні, або графічні, методи – графи, схеми, діаграми, картограми та ін. дають змогу отримати синтезоване уявлення про досліджуваний об'єкт і водночас наочно показати його складові, їхню питому вагу, причинно-наслідкові зв'язки, інтенсивність розподілу компонентів у заданому об'ємі. Ці методи тісно пов'язані з комп'ютерними технологіями.

У прикладних аспектах гуманітарних наук доцільно використовувати математичні методи. Математичний апарат теорії ймовірностей дає можливість вивчати масові явища в соціології, лінгвістиці. Математичні методи відіграють важливу роль при обробці статистичних даних, моделюванні.

Сучасна методологія вкладає новий зміст у традиційне уявлення про теоретичні (математичні) та емпіричні (експериментальні) методи дослідження в природних і технічних науках.

Складовою частиною наукових досліджень є експеримент.

Експеримент представляє собою науково поставлений дослід або спостереження явища або процесу в точно враховуваних умовах, що дозволяють стежити за ходом експерименту, керувати ним, відтворювати його щоразу при повторенні цих умов.

Серед відомих методів дослідження складних електромеханічних систем можна виділити фізичне, імітаційне, аналогове та математичне моделювання.

Метод фізичного моделювання передбачає дослідження на моделі, яка відтворює основні геометричні, фізичні, динамічні та функціональні характеристики та властивості оригіналу (але не обов'язково всі властивості) та має великі можливості з визначення різноманітних якостей електромеханічних систем ті їх елементів.

Метод математичного моделювання ґрунтується на здатності математично описувати рівняннями різні за природою явища (процеси) та виявляти різні функціональні зв'язки між елементами системи.

Аналогове моделювання базується на однаковому для моделі та натури математичному описі та використовується для імітації на основі аналогової фізичної системи по її елементам. При цьому кожному з фізичних елементів натури в моделі відповідає певний еквівалент. У якості моделей використовуються електричні кола, складені з пасивних та активних елементів.

При математичному моделюванні застосовуються аналітичні та статистичні моделі. Аналітичні моделі більш грубі, враховують менше число факторів, завжди

потребують деяких припущень та спрощень. Проте вони більше пристосовані для пошуку оптимальних рішень.

Комп'ютерна модель (або чисельна) – комп'ютерна програма, яка реалізує абстрактну модель деякої системи. Комп'ютерні моделі використовуються для отримання нових знань про об'єкт, що моделюється або для приблизної оцінки поведінки математичних систем, які досить складні для аналітичного дослідження. Комп'ютерне моделювання є одним з ефективних методів вивчення складних систем. Комп'ютерні моделі простіші та їх зручніше досліджувати в силу можливості проводити обчислювальні експерименти в тих випадках, коли реальні експерименти немає можливості проводити через фінансові труднощі або фізичні перешкоди. Для підтримки математичного моделювання розроблені системи комп'ютерної математики, наприклад, Maple, Mathematica, Mathcad, MATLAB, Scilab, VisSim та інші. В даній роботі використовується програма xCos пакету Scilab.

2.2 Розробка алгоритму дослідження

Методологія – це система базисних принципів, методів, методик, способів і засобів їх реалізації в організації та побудові науково-практичної діяльності. Вона включає в себе методи теоретичного та емпіричного пізнання і являє собою алгоритм пошуку і досягнення мети.

Основне призначення методики дослідження полягає у тому, щоб на основі відповідних принципів (вимог, умов, обмежень тощо) забезпечити успішне вирішення визначених мети і завдань наукового дослідження.

Алгоритм дослідження представлено в табличній формі (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Алгоритм дослідження

Аналіз динаміки системи керування циліндричного робота-маніпулятора	
Складання індивідуального календарного плану роботи	
Пошук літератури за темою, її аналіз, складання бібліографії	
Підготовка теоретичної частини	Аналіз застосування роботів-маніпуляторів у промисловості
	Аналіз методів визначення динаміки системи керування робота-маніпулятора
	Опис структурних параметрів циліндричного робота-маніпулятора
	Математичний опис системи керування циліндричного робота-маніпулятора
	Побудова математичної моделі системи керування циліндричного робота-маніпулятора в програмі <i>xCos</i>
Опис процесу дослідження	Моделювання системи керування циліндричного робота-маніпулятора в програмі <i>xCos</i>
	Дослідження динаміки системи керування циліндричного робота-маніпулятора
Узагальнення результатів моделювання	Аналіз і узагальнення результатів досліджень
	Інтерпретація отриманих результатів дослідження
	Формулювання висновків
Узагальнення науково-теоретичних результатів	
Розробка заходів з охорони праці	

Алгоритм складено на підставі головних завдань дослідження і наочно відображає його послідовність: мотивацію; формулювання проблеми дослідження; пошук теоретичної основи розв’язання проблеми; розв’язання проблеми. Він розкриває процедуру дослідження і встановлює логічну послідовність виконання структурних розділів і підрозділів кваліфікаційної роботи.

2.3 Вибір методів розв'язання постановленої задачі

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

Моделювання як метод наукового пізнання виникло в зв'язку з необхідністю вирішення завдань, які з тих чи інших причин не можуть бути вирішені безпосередньо. Вони виникають у випадках, коли об'єкт або недосяжний для дослідника, або він ще не існує і потрібно обрати оптимальний варіант його створення, або дослідження реального об'єкта вимагає багато часу та економічно невигідне тощо. Таким чином, модель виконує функцію проміжної ланки між дослідником та об'єктом пізнання. Метод моделювання передбачає, що об'єкт вивчається не безпосередньо, а шляхом дослідження іншого об'єкта, який є аналогом першого.

Модель (від лат. *modulus* – міра) – це певний умовний образ об'єкта дослідження, котрий замінює останній і перебуває з ним у такій відповідності, яка дозволяє отримати нове знання. Модель будується для того, щоб відобразити характеристики об'єкта (елементи, взаємозв'язки, структурні та функціональні властивості), суттєві з точки зору мети дослідження. Отже, моделювання пов'язане зі спрощенням, огрубінням прототипу, абстрагуванням від ряду його властивостей, ознак, сторін.

Характерною ознакою моделей можна вважати їх спрощеність стосовно оригіналу або реальної життєвої ситуації, яку моделюють. Спрощеність моделей є неминучою, тому що оригінал лише в обмеженій кількості відношень відображується в моделі.

Отже, моделювання з точки зору наукового дослідження – це метод опосередкованого пізнання за допомогою штучних або природних систем, які зберігають певні особливості об'єкта і, таким чином, замінюючи його, дають змогу отримати нове знання про оригінал.

У системному аналізі моделі є дуже важливим компонентом дослідження та проектування нових систем. Не менш важливий і прагматичний аспект моделювання, при якому модель розглядається як засіб керування системою.

Модель є цільовим відображенням об'єкта-оригіналу, що виявляється у множинності моделей одного й того ж об'єкта, тобто для різної мети або завдань дослідження можна будувати різні моделі, тому мета або завдання дослідження визначають, які саме ознаки системи мають бути відображені в моделі. Процес дослідження реальних систем, що охоплює побудову моделі, дослідження її властивостей і перенесення одержаних відомостей на реальну систему, називають моделюванням.

Основна функція моделі – це її використання як засобу пізнання. До конкретизованих (похідних від основної) функцій належать: засіб наукового осмислення дійсності, засіб спілкування, засіб навчання і тренування, інструмент прогнозування, засіб постановки та проведення експерименту.

Головними рівнями дослідження та моделювання систем є мікро- та макро-рівень. Мікрорівневе моделювання системи пов'язане з детальним описом кожного компонента системи, дослідженням її структури, функцій, взаємозв'язків, тощо.

Макрорівневе моделювання полягає в ігноруванні детальної структури системи та вивченні лише загальної поведінки системи як єдиного цілого.

Для детальнішого опису систем використовують моделі складу та моделі структури. Модель складу системи відображає, з яких елементів і підсистем складається система, а модель структури застосовується для відображення відношень між елементами та зв'язків між ними.

Модель структури описує суттєві зв'язки між елементами та підсистемами. При використанні графічних моделей будову систем подають у вигляді так званих структурних схем. Структурні схеми наглядні та містять інформацію про велику кількість властивостей системи.

Залежно від форми подання об'єкта моделювання поділяють на реальне та абстрактне.

При реальному моделюванні використовують можливість дослідження характеристик на реальному об'єкті чи на його частині, а при натурному – проводять дослідження на реальному об'єкті з подальшим обробленням результатів експерименту на основі теорії подібності.

Метод фізичного моделювання передбачає дослідження на моделі, що відтворює основні геометричні, фізичні, динамічні і функціональні властивості “оригіналу” і володіє великими можливостями по визначенню різних якостей електро-механічних систем та їх елементів.

Абстрактне моделювання має різні види: наочне, символічне, математичне. Метод математичного моделювання заснований на здатності математично описувати рівняннями різноманітні за природою явища (процеси) і виявляти різні функціональні зв'язки між елементами системи.

При математичному моделюванні застосовують аналітичні та статистичні моделі. Аналітичні моделі більш грубі, враховують менше число чинників, завжди вимагають деяких припущень і спрощень, проте вони більш пристосовані для пошуку оптимальних рішень. Статистичні методи в порівнянні з математичними громіздкі і погано осяжні.

Дослідження математичної моделі дає змогу отримати характеристики реального об'єкта чи системи. Вигляд математичної моделі залежить як від природи системи, так і від завдань дослідження. Математична модель системи містить, як правило, опис множини можливих станів системи та закон переходу з одного стану в інший. Математичне моделювання охоплює імітаційне, інформаційне, структурне, ситуаційне тощо.

На етапі вибору математичної моделі встановлюються: лінійність і не лінійність об'єкта, процесу або системи, динамічність або статичність, стаціонарність або не стаціонарність, а також ступінь детермінованості досліджуваного об'єкта чи процесу. При математичному моделюванні свідомо відволікаються від конкретної фізичної природи об'єктів, процесів або систем і, в основному, зосереджуються на вивченні кількісних залежностей між величинами, що описують ці процеси.

На базі складених диференційних рівнянь проводиться математичне моделювання системи керування електропривода. За допомогою програми *xCos* досліджуються перехідні характеристики системи при зміні задавальних параметрів.

Слід зазначити, що метод моделювання – вивчення явищ за допомогою моделей – сьогодні має особливе значення для вирішення складних фізичних завдань, чому значною мірою сприяє зростання продуктивності обчислювальної техніки. Саме тому в представленій роботі як основа використано метод моделювання.

2.4 Висновки до розділу 2

2.4.1 Для дослідження динаміки системи керування циліндричного робота маніпулятора в роботі обрано математичне моделювання, яке сьогодні є одним з ефективних методів вивчення складних систем.

2.4.2 На підставі головних завдань дослідження розроблено алгоритм дослідження, який наочно відображає його послідовність: мотивацію; формулювання проблеми дослідження; пошук теоретичної основи розв’язання проблеми; розв’язання проблеми.

2.4.3 Моделювання є основним методом для отримання результатів, оскільки робота має теоретичний характер. На базі складеної математичної моделі системи керування електропривода в програмі *xCos* пакету *Scilab* проводиться математичне моделювання та досліджуються перехідні процеси.

3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Побудова моделі в *Xcos*

Наступні три моделі реалізовані за допомогою програми *xCos* пакету *Scilab*. Пряма динамічна модель являє собою набір диференціальних рівнянь, що представляють динаміку маніпулятора, для розв'язання яких використовуються динамічні рівняння для спільних змінних (r, θ, z) , з вхідними даними такими, як узагальнені моменти та сили [5].

3.1.2 Пряма динамічна модель. Моделювання визначається рівняннями (1.15), (1.16) і (1.17).

Рівняння (1.15) і (1.16) пов'язані, тому обидва моделюються як єдина система.

Рівняння радіального та кутового напрямків переписуються у вигляді:

$$\ddot{r} = \frac{1}{2m} \left(\frac{3m_0}{4l} (r^2 + (l-r)^2) + 2m_p r^2 \right) \dot{\theta}^2 + \frac{F_r}{m},$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{J + j_{(r)}} \left(- \left(\frac{3m_0}{4l} (r^2 + (l-r)^2) + 2m_p r^2 \right) \dot{r} \dot{\theta} + F_{\theta} \right).$$

Для реалізації моделювання в *Xcos* рівняння розкладаються на різні підсистеми. На схемі моделювання кожна підсистема представлена блоком *Xcos*. Блок *Xcos* може бути загальною функцією бібліотеки (наприклад, інтегратором) або визначеною користувачем підсистемою, що складається, наприклад, із групи параметрів або групи багатьох загальних блоків *Xcos*. Наступні блоки будуються для рівнянь кутового та радіального напрямку, що складаються з констант, параметрів та змінних.

$$R_1 = (r^2 - (l-r)^2), \quad (3.1)$$

$$R_2 = 2m_p r, \quad (3.2)$$

$$C_1 = \frac{1}{2m}, \quad (3.3)$$

$$C_2 = \frac{3m_a}{4l}, \quad (3.4)$$

$$C_3 = \frac{F_r}{m}, \quad (3.5)$$

$$\Theta_1 = \frac{1}{J+j_{(r)}}, \quad (3.6)$$

$$\Theta_2 = \Theta_1 F_\theta. \quad (3.7)$$

Використовуючи рівняння (3.1)-(3.7), співвідношення для радіального та кутового напрямків набуває вигляду:

$$\ddot{r} = C_1(C_2 R_1 + R_2)\dot{\theta} + C_3, \quad (3.8)$$

$$\ddot{\theta} = -\Theta_1 \left((C_2 R_1 + R_2)\dot{r}\dot{\theta} + \Theta_2 \right). \quad (3.9)$$

Побудовані підсистеми моделі (3.1)-(3.7) наведено в Додатку А. Ці підсистеми з'єднані за допомогою виразів (3.8) та (3.9), а модель *Xcos* розроблена для прямої динаміки.

Через загальну природу маніпулятора рівняння руху у вертикальному напрямку не пов'язане і, отже, може бути легко реалізовано. Схема прямої моделі в Scilab: *Xcos* показана на рисунку 3.1.

3.1.3 Зворотна динамічна модель. Зворотну динамічну модель можна отримати з прямої динамічної моделі. В зворотній динаміці задаються шукані спільні змінні та їх перші двійні похідні та обчислюються узагальнені сили.

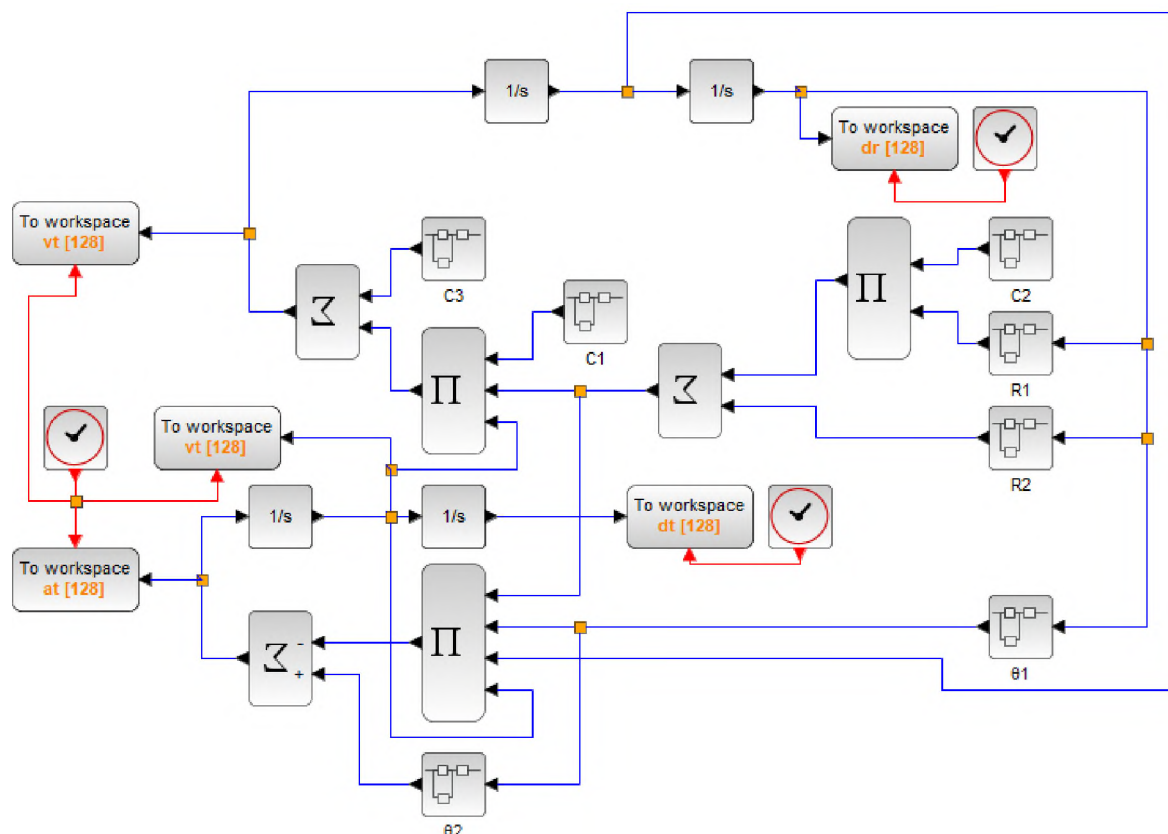
Алгебраїчною маніпуляцією з рівняннями (3.8), (3.9) та (1.7) зворотну динамічну модель можна записати у вигляді:

$$F_r = m\ddot{r} - C_1(C_2 R_1 + R_2)\dot{\theta}^2, \quad (3.10)$$

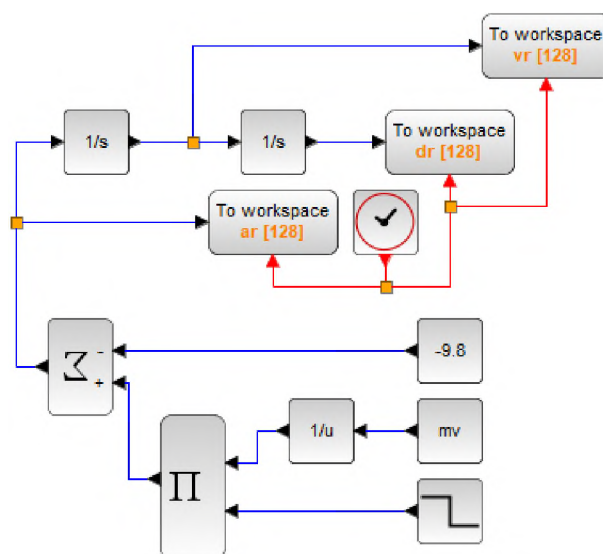
$$F_\theta = (J + j_{(r)})\ddot{\theta} + C_1(C_2 R_1 + R_2)\dot{r}\dot{\theta}, \quad (3.11)$$

$$F_z = m_v\ddot{z} + m_v g. \quad (3.12)$$

Схема моделювання у середовищі *Xcos* показані на рисунку 3.2.



а



б

а – для радіального та кутового напрямку; б – для вертикального напрямку

Рисунок 3.1 – Пряма динамічна модель в середовищі *Xcos*

3.1.3 Пряма динамічна модель зі зворотним зв'язком. Враховуючи динаміку маніпулятора, метою керування рукою робота є підтримка динамічної реакції відповідно до певної попередньо визначеної продуктивності.

Задача керування ускладнюється нелінійністю, інерційними ефектами, силами взаємного впливу та гравітаційним навантаженням на ланки маніпулятора [4]. У класичному випадку синтез відповідного регулятора є ітераційним процесом, який зазвичай виконується в моделюванні. Для виконання такої ітеративної процедури проектування необхідна динамічна модель досліджуваної системи. Використовуючи модель, закони або стратегії керування розроблені для досягнення бажаної реакції системи та продуктивності. Повну динаміку твердого тіла маніпулятора з n ступенями свободи можна записати як [1]:

$$\tau = I(\Theta)\ddot{\Theta} + V(\Theta, \dot{\Theta}) + G(\Theta), \quad (3.13)$$

де Θ і τ – узагальнені координати та вектори сил відповідно. $I(\Theta)$ – симетрична ($n \times n$) матриця інерції маніпулятора, $V(\Theta, \dot{\Theta})$ – n -вимірний вектор, включає гравітаційні ефекти. Найпростіша і найчастіше використовувана форма керування роботом - незалежне ПД-керування ланкою, що описується виразом:

$$\tau = K_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_p(\theta_d - \theta),$$

де K_p і K_v – діагоналі матриці підсилення положення та швидкості відповідно. $\dot{\theta}_d$ і $\dot{\theta}$ – бажані вектори положення та швидкості відповідно. Дві стратегії керування, що використовуються для високошвидкісних переміщень [7].

Керування з використанням ПД-регулятора лише з опорним положенням.

ПД-регулятор тільки з опорним положенням:

$$\tau = -K_v\dot{\theta} + K_p(\theta_d - \theta). \quad (3.14)$$

ПД-регулятор з опорним положенням і швидкістю:

$$\tau = K_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_p(\theta_d - \theta). \quad (3.15)$$

Другий варіант використання ПД-регулятора з опорним положенням та швидкістю який використовувався в роботі в загальному вигляді. Відповідно, рівняння (3.8), (3.9) і (1.7), набувають вигляду:

$$\ddot{r} = C_1(C_2R_1 + R_2)\dot{\theta}^2 + \frac{K_{pr}(r_d - r) + K_{vr}(\dot{r}_d - \dot{r})}{m}, \quad (3.16)$$

$$\ddot{\theta} = -\Theta_1(C_2R_1 + R_2)\dot{r}\dot{\theta} + \Theta_1(K_{v\theta}((\theta_d - \theta)) + K_{v\theta}(\dot{\theta}_d - \dot{\theta})), \quad (3.17)$$

$$\ddot{z} = g + \frac{K_{pz}(z_d - z) + K_{vr}(\dot{z}_d - \dot{z})}{m_v}, \quad (3.18)$$

де θ_1 , C_1 , C_2 , R_1 і R_2 є константами, як визначено в підрозділі 3.1.1. K_{pr} , $K_{p\theta}$ і K_{pz} – це коефіцієнти підсилення положення, K_{vr} , $K_{v\theta}$ та K_{vz} – коефіцієнти підсилення швидкості для координат r , θ та z . Для моделювання рівнянь (3.16) і (3.17) визначаються дві додаткові підсистеми як ПД (r -напрямок) і ПД (θ -напрямок), де:

$$PD_{r_d} = K_{pr}(r_d - r) + K_{vr}(\dot{r}_d - \dot{r}), \quad (3.19)$$

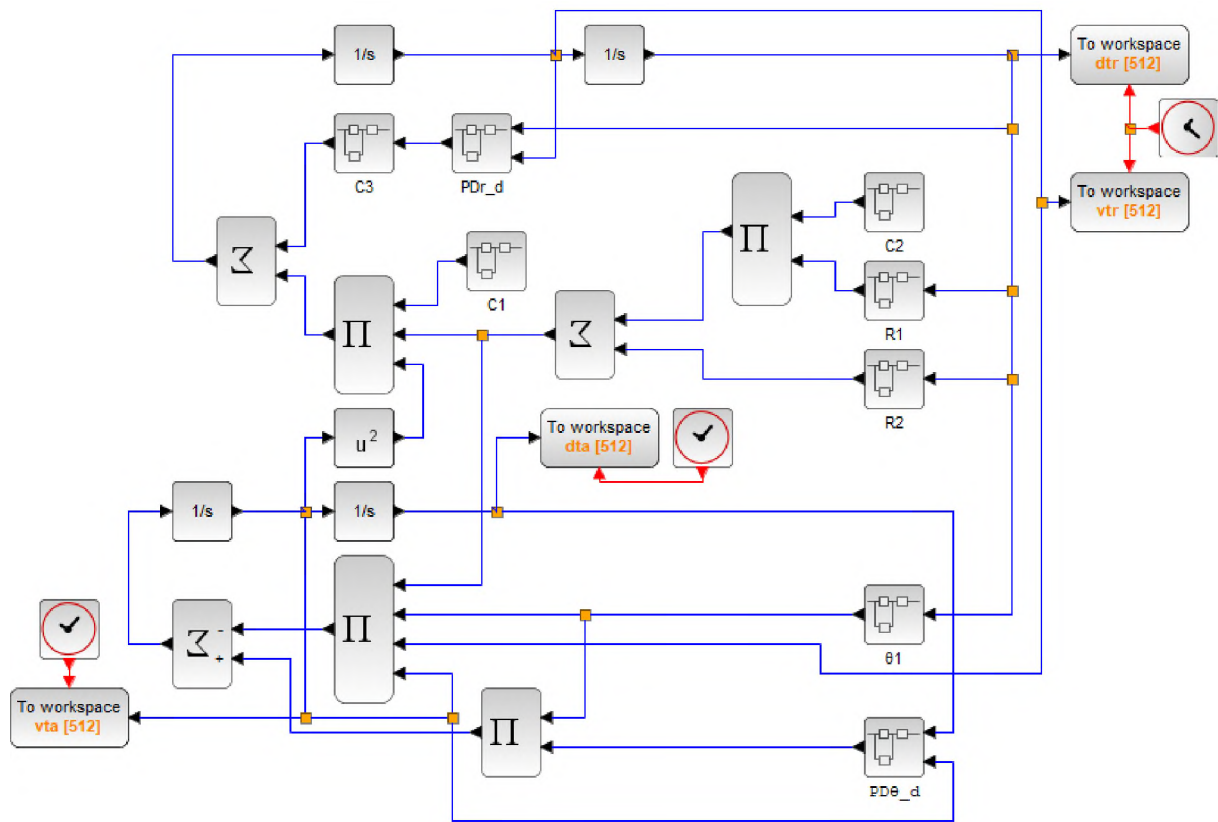
$$PD_{\theta_d} = K_{v\theta}(\theta_d - \theta) + K_{v\theta}(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}). \quad (3.20)$$

Тепер вирази (3.16) і (3.17) спрощені до

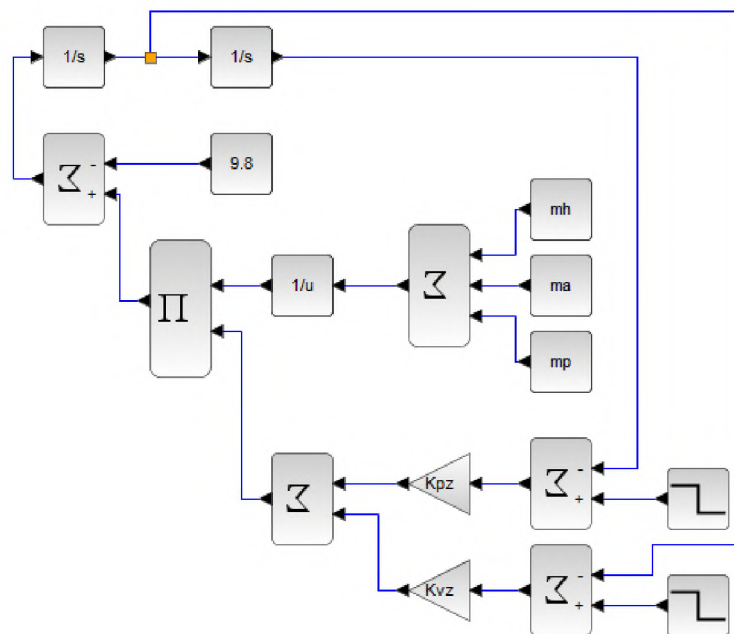
$$\ddot{r} = C_1(C_2R_1 + R_2)\dot{\theta}^2 + \frac{PD_{r_d}}{m}, \quad (3.21)$$

$$\ddot{\theta} = -\Theta_1(C_2R_1 + R_2)\dot{r}\dot{\theta} + \Theta_1 PD_{\theta_d}, \quad (3.22)$$

Вирази (3.21) і (3.22) моделюються як єдина система, а вираз (3.18) окремо. Схема моделювання у середовищі *Xcos* показані на рисунку 3.3.



а



б

а – для радіального та кутового напрямку; б – для вертикального напрямку

Рисунок 3.2 – Пряма динамічна модель зі зворотним зв'язком в середовищі Xcos

3.2 Дослідження динаміки

У цьому розділі були промодельовані різні експерименти щодо прямої динаміки, зворотної динаміки та керування промисловим маніпулятором. Оскільки ступінь свободи z маніпулятора повністю не пов'язані (рівняння (1.17)), що надає досить тривіальне рішення, вертикальний рух не допускається в жодному з імітаційних експериментів. При всій довжині радіального плеча маса радіального плеча і маса схвата залишаються рівними 0,6 м, 6 кг і 3 кг відповідно. Інерція вертикальної колони та корисне навантаження змінюються відповідно до зазначених вимог. При моделюванні прямої та зворотної динамічних моделей припускаються нульові початкові умови. Методом інтеграції, який використовується в усіх моделюваннях, є *Runge-Kutta 5* з розміром кроку 10 мілісекунд. Час моделювання зберігається 3 секунди.

Цей підрозділ поділено на чотири частини. У першій частині описані експерименти для прямої динамічної моделі. У другій частині представлені результати моделювання зворотної динамічної моделі. У третій частині описано, як впливають на результат моделювання пропорційних регуляторів підсилення. У четвертій частині наведено повний набір експериментів для дослідження застосування незалежних ПД-регуляторів на трьох суглобах циліндричного робота-маніпулятора.

3.2.1 Результати моделювання прямої динамічної моделі. У цьому підрозділі вивчається вплив динаміки приводної системи та зміни корисного навантаження. Наслідки зміни корисного навантаження аналізуються шляхом прикладення постійної сили до радіальної ланки та постійного крутного моменту до кутового ланки маніпулятора. У першому експерименті корисне навантаження збільшують з 1 кг до 5 кг і порівнюють графіки прискорення, швидкості та переміщення як для радіального, так і для кутового напрямків. Ці графіки показані на рисунках 3.4 і 3.5.

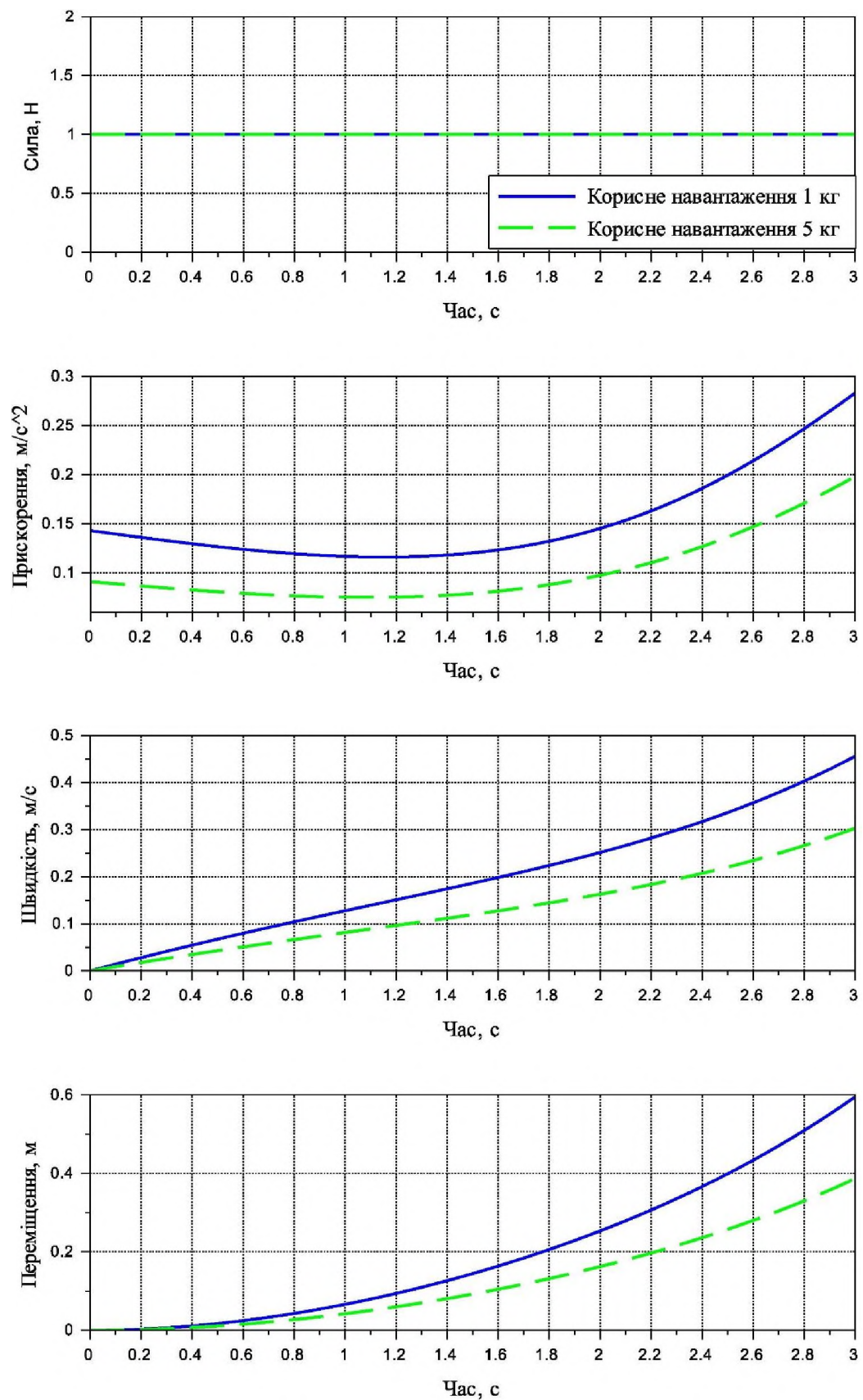


Рисунок 3.4 – Перехідні характеристики сили, прискорення, швидкості та переміщення

в радіальному напрямку з корисними навантаженнями ($J=5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$)

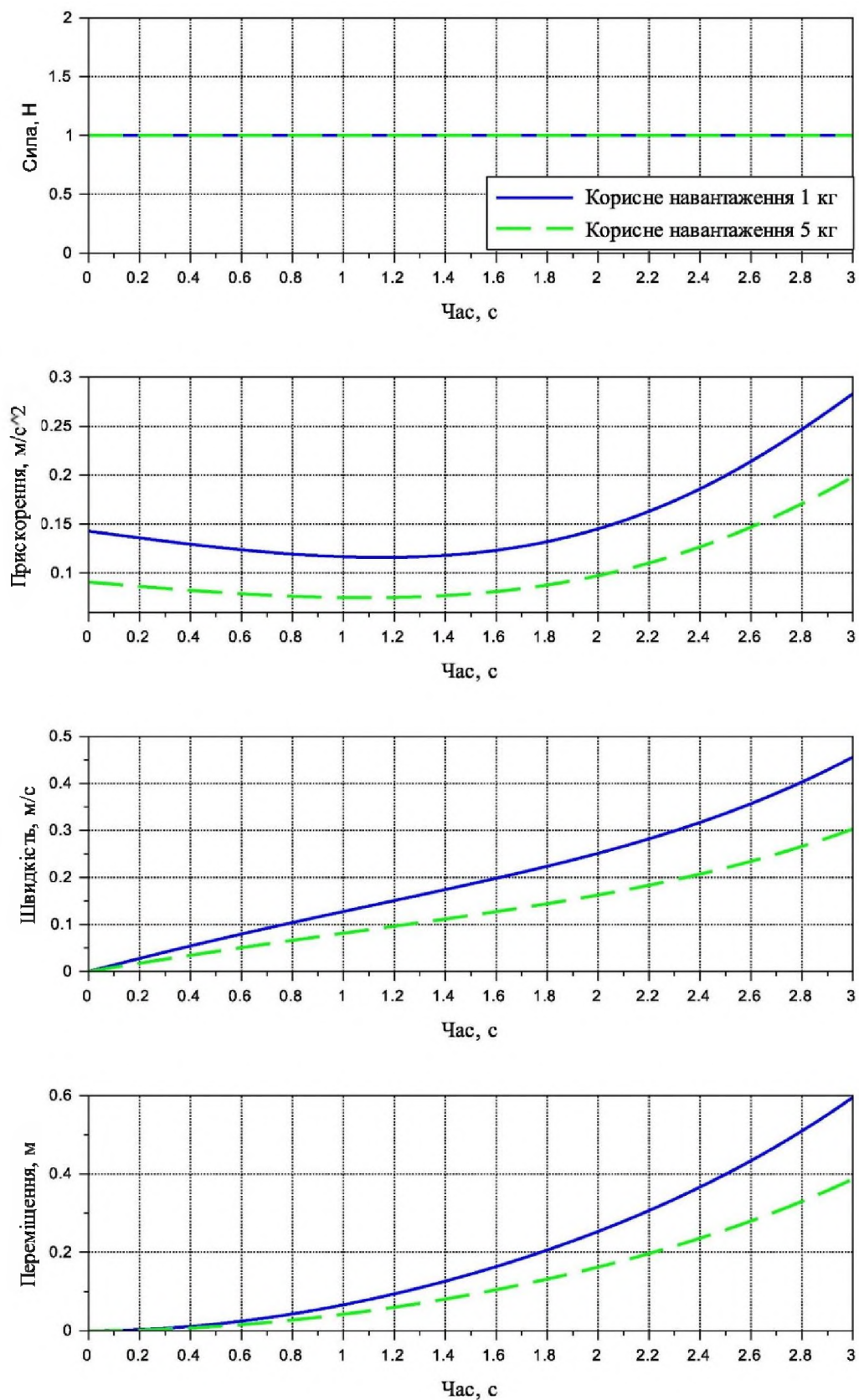


Рисунок 3.5 – Перехідні характеристики сили, прискорення, швидкості та переміщення
в кутовому напрямку з корисними навантаженнями $m_p=5$ кг і 1 кг, ($J=5$ кг·м²)

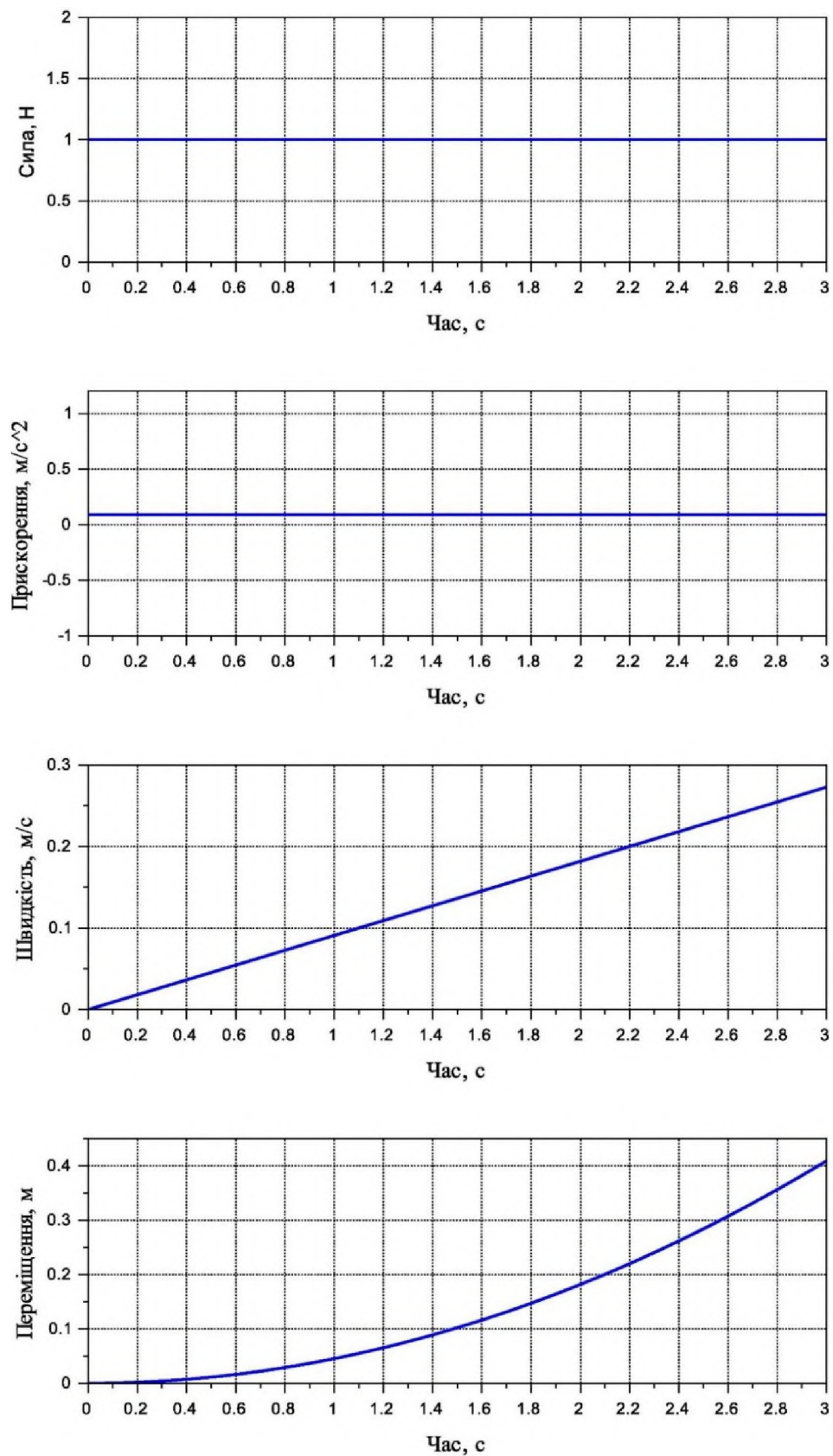


Рисунок 3.6 Перехідні характеристики сили, прискорення, швидкості та переміщення

з нульовим крутним моментом, прикладеним в кутовому напрямку

$$m_p = 5 \text{ кг і } 1 \text{ кг, } (J = 5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2)$$

Для дослідження відсутності взаємного впливу при спрацьовуванні однієї з радіальних ланок або кутового з'єднання прикладають нульовий крутний момент в кутовому напрямку і отримують графіки радіального прискорення, швидкості та переміщення, результати наведені на рисунку 3.6.

В іншому комплексі експериментів визначається вплив інерцій системи привода для радіального та кутового напрямків. Динамічну модель маніпулятора, що включає інерції системи приводів, можна записати у вигляді [1]:

$$I(\Theta) - J\ddot{\Theta} - V(\Theta, \dot{\Theta}) - G(\Theta) = \tau, \quad (3.23)$$

де $I(\Theta)$ – матриця інерції маніпулятора, J – матриця інерції приводної системи. $V(\Theta, \dot{\Theta})$ – вектор Коріоліса та відцентрових впливів, $G(\Theta)$ – враховує гравітаційні впливи, а τ – вектор керуючого крутного моменту, що створюється приводами. Матриця інерції фактичних систем привода, що використовуються при розробці циліндричного робота маніпулятора:

$$J = \text{diag}[1,37 \ 0,11 \ 12,00]. \quad (3.24)$$

Враховуючи ці значення інерцій, отримано профілі прискорення, швидкості та переміщення як для радіального, так і для кутового напрямків. Через додавання динаміки приводної системи результати перехресного зв'язку між радіальним і кутовим напрямками (які віддзеркалені назад до валу двигуна) стають відносно незначними. Таким чином, отримане прискорення виглядає відносно рівномірним. Щоб додатково дослідити вплив інерцій системи привода, експеримент повторюють для передбачуваної сильно зваженої матриці інерції системи привода, заданої як:

$$J = \text{diag} [5.00 \ 10.00 \ 12.00]. \quad (3.25)$$

Графіки з цими трьома конфігураціями показані на рисунку 3.7. У цьому випадку ефект інерції системи привода добре помітний.

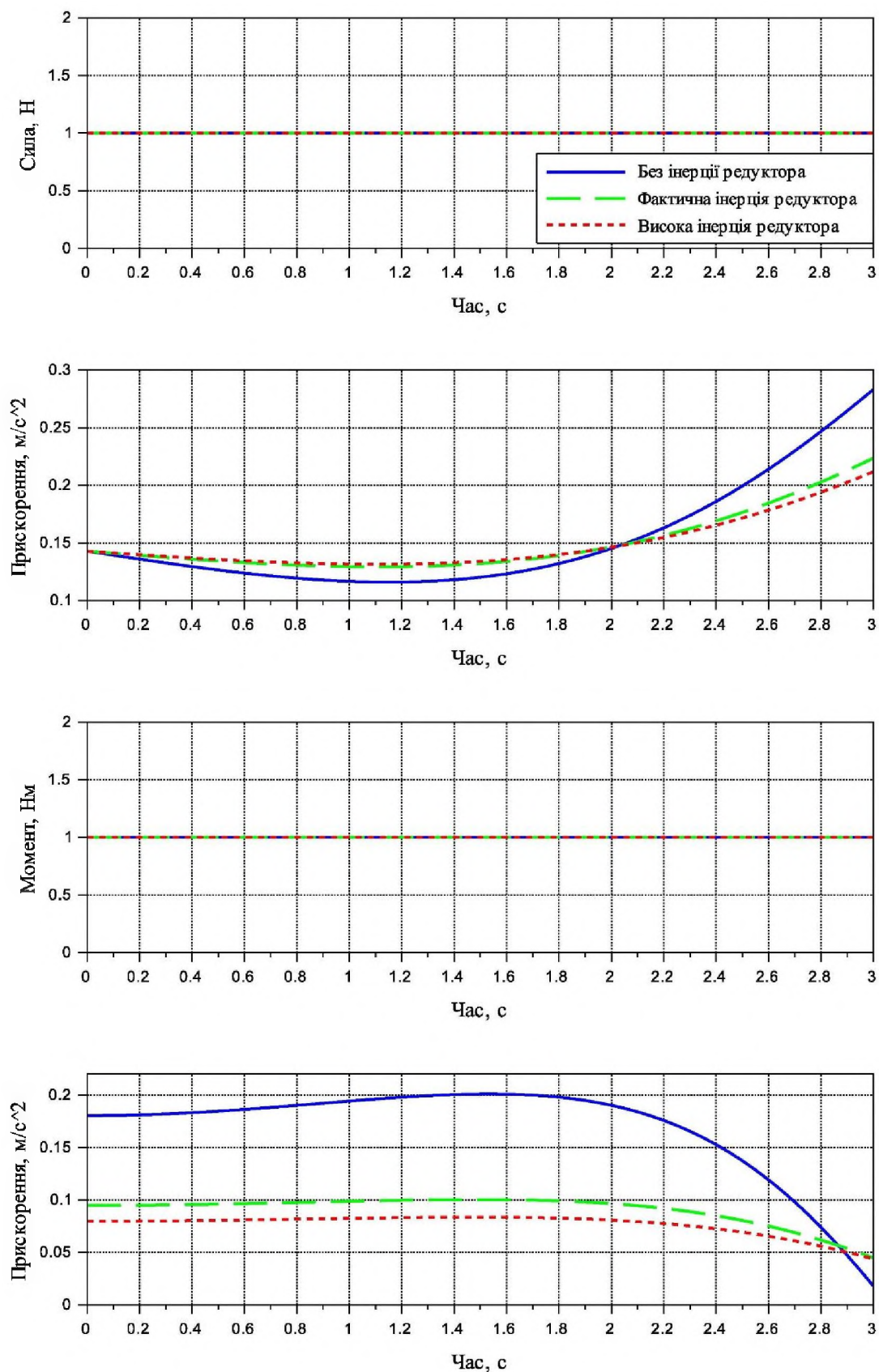


Рисунок 3.7 – Перехідні характеристики сили та крутного моменту з відповідними радіальними та кутовими прискореннями, для трьох значень інерції передач

3.2.2 Результати моделювання зворотної динамічної моделі. У зворотній динамічній моделі сили привода для прискорення визначаються як постійний вхід. Експеримент проводиться для корисного навантаження 1 кг і 5 кг. Графіки необхідних сил привода в радіальному та кутовому напрямках для корисних навантажень 1 кг і 5 кг наведені на рис. 3.8

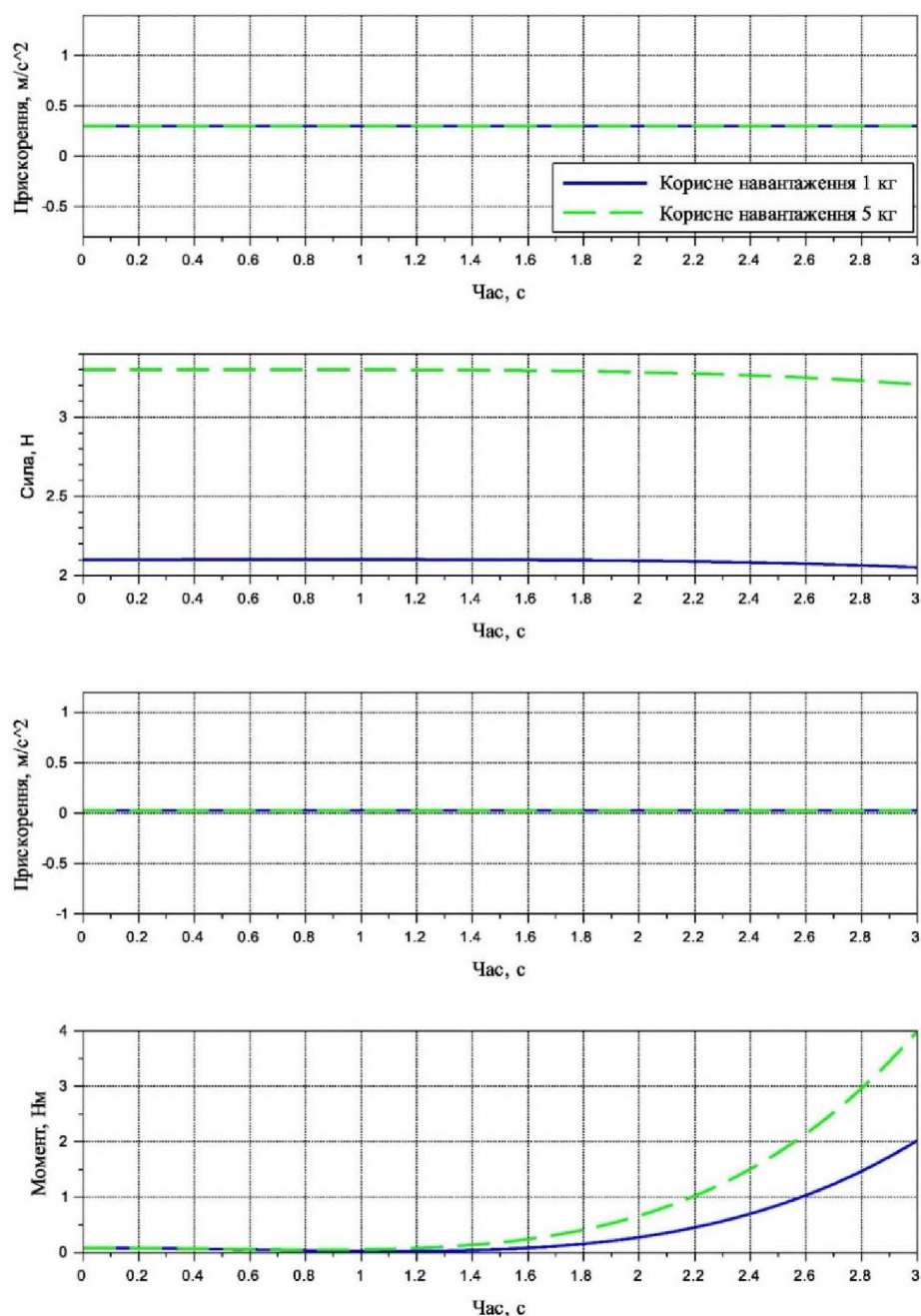


Рисунок 3.8 – Перехідні характеристики сили та моменту радіального та кутового напрямків для двох значень корисного навантаження ($J=5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$)

3.2.3 Результати моделювання прямої динамічної моделі з регулятором пропорційного підсилення. У прямій динамічній моделі пропорційні регулятори підсилення використовуються як у радіальному, так і в кутовому напрямках. Це досягається встановленням коефіцієнтів підсилення, $K_{v\theta}$ та K_{vr} рівними нулю. Результати показані на рисунку 3.9.

3.2.4 Результати моделювання прямої динамічної моделі з ПД-регулятором. У цьому підрозділі досліджується поведінка маніпулятора при використанні PD-регулятора. Щоб побачити взаємну залежність радіальних і кутових ланок, змінюються пропорційні коефіцієнти радіального та кутового напрямків. Вплив на відповіді показано на рисунках 3.10 та 3.11.

Перехідні характеристики при налаштованих регуляторах при зміні корисного навантаження на схваті як у радіальному, так і в кутовому напрямках показано на рисунку 3.12. Щоб реалізувати планування підсилення, маніпулятор приводиться в дію в двох різних початкових конфігураціях як у радіальному, так і в кутовому напрямках. Результат показаний на рисунку 3.13.

Для подальшого аналізу поведінки маніпулятора отримано продуктивності відстеження радіальних і кутових ланок синусоїдальних траєкторій з частотами 2 рад/с і 10 рад/с. Результати показані на рисунках 3.14 та 3.15. Дві найбільш часто використовувані траєкторії відстеження, що використовуються в плануванні шляху, — це кубічний поліноміальний і лінійний сегменти з параболічними зміщуваннями. Отримані реакції відстеження радіальних та кутових ланок на такі траєкторії з відповідним опорним значенням швидкості. Результати наведені на рисунках 3.16 та 3.17.

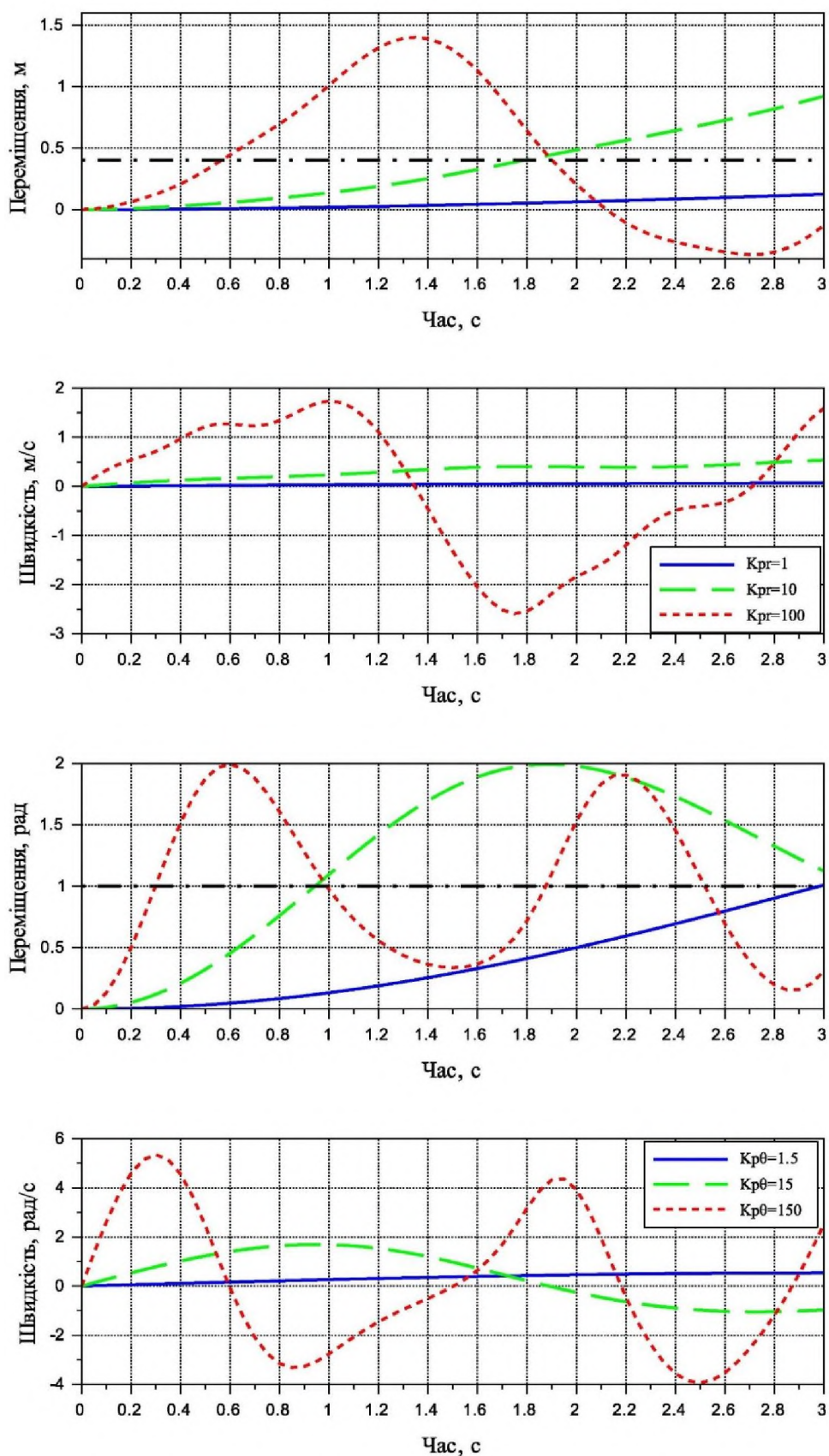


Рисунок 3.9 – Вплив на радіальну та кутову реакцію пропорційних коефіцієнтів ($K_{vr}=0$, $K_{v\theta}=0$, $m_p=5$ кг, $J=5$ кг·м², — · — бажане переміщення)

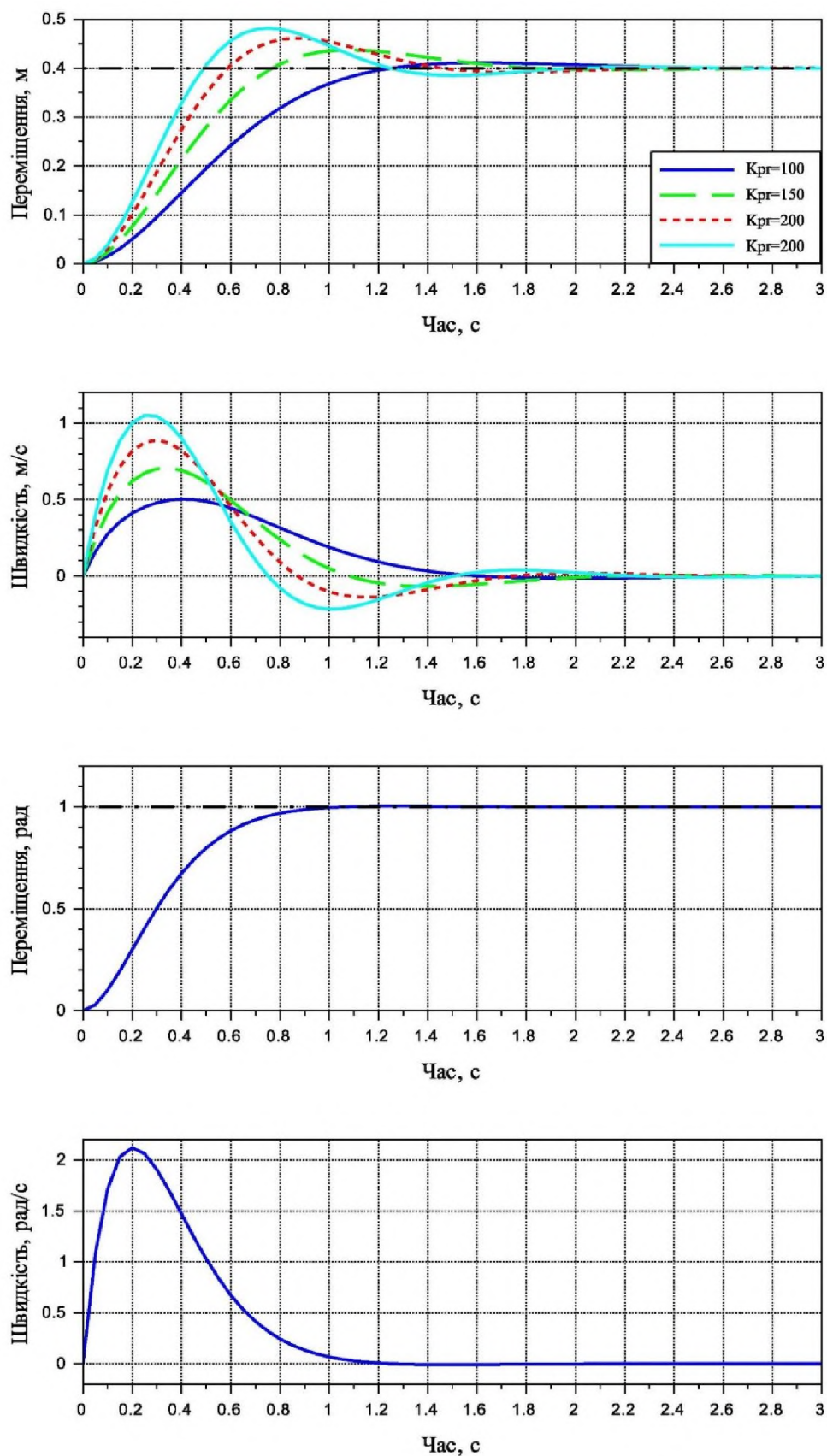


Рисунок 3.10 – Вплив на радіальну та кутову реакцію за рахунок зміни пропорційного коефіцієнту K_{pr}

($K_{vr}=50$ $K_{p\theta}=150$, $K_{v\theta}=50$, $m_p=5$ кг, $J=5$ кг·м², — · — бажане переміщення)

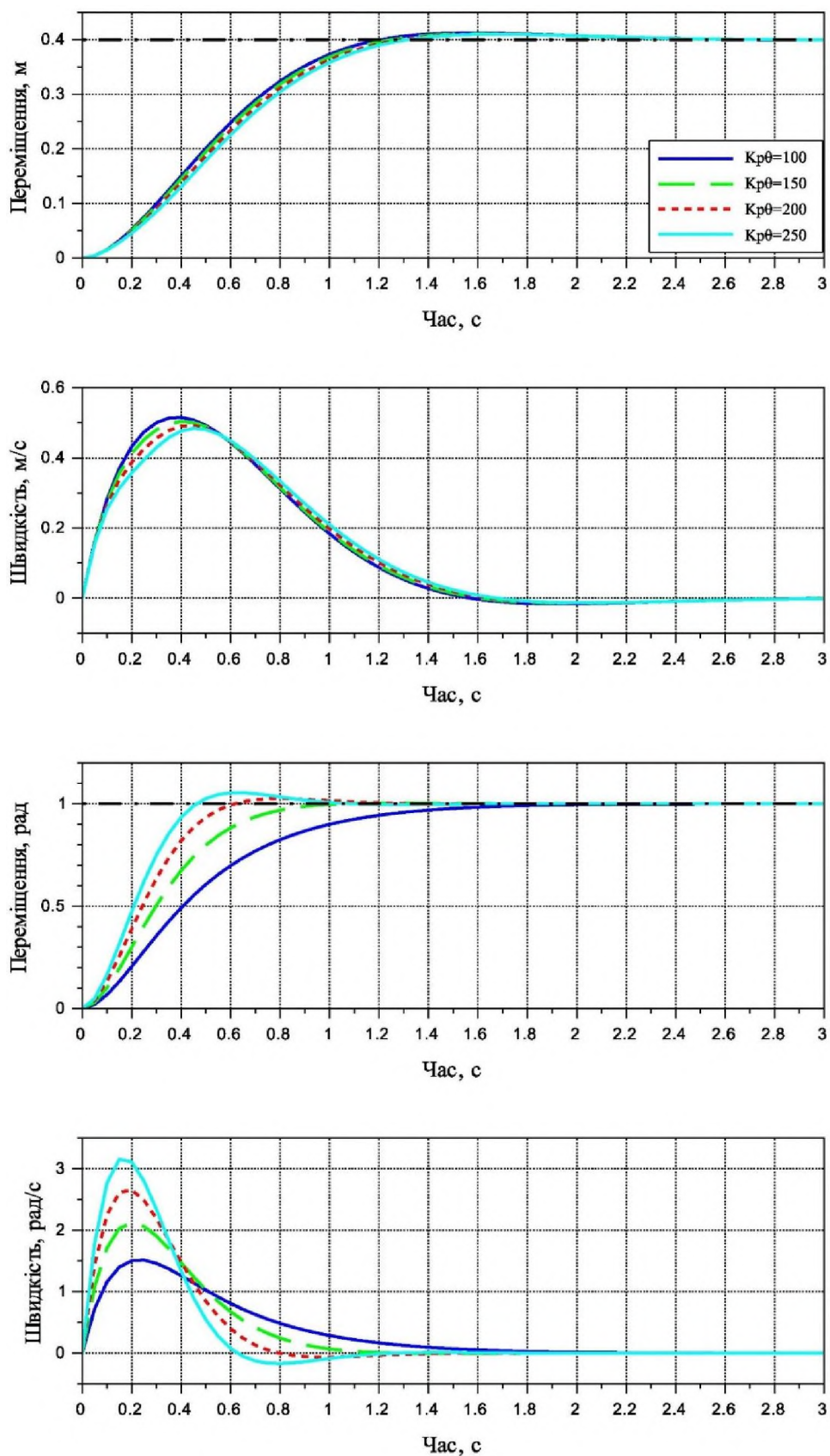


Рисунок 3.11 – Вплив на радіальну та кутову реакцію за рахунок зміни пропорційного коефіцієнту $K_{p\theta}$
 $(K_{pr}=100, K_{vr}=50, K_{v\theta}=50, m_p=5 \text{ кг}, J=5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \text{---}\cdot\text{---}$ бажане переміщення)

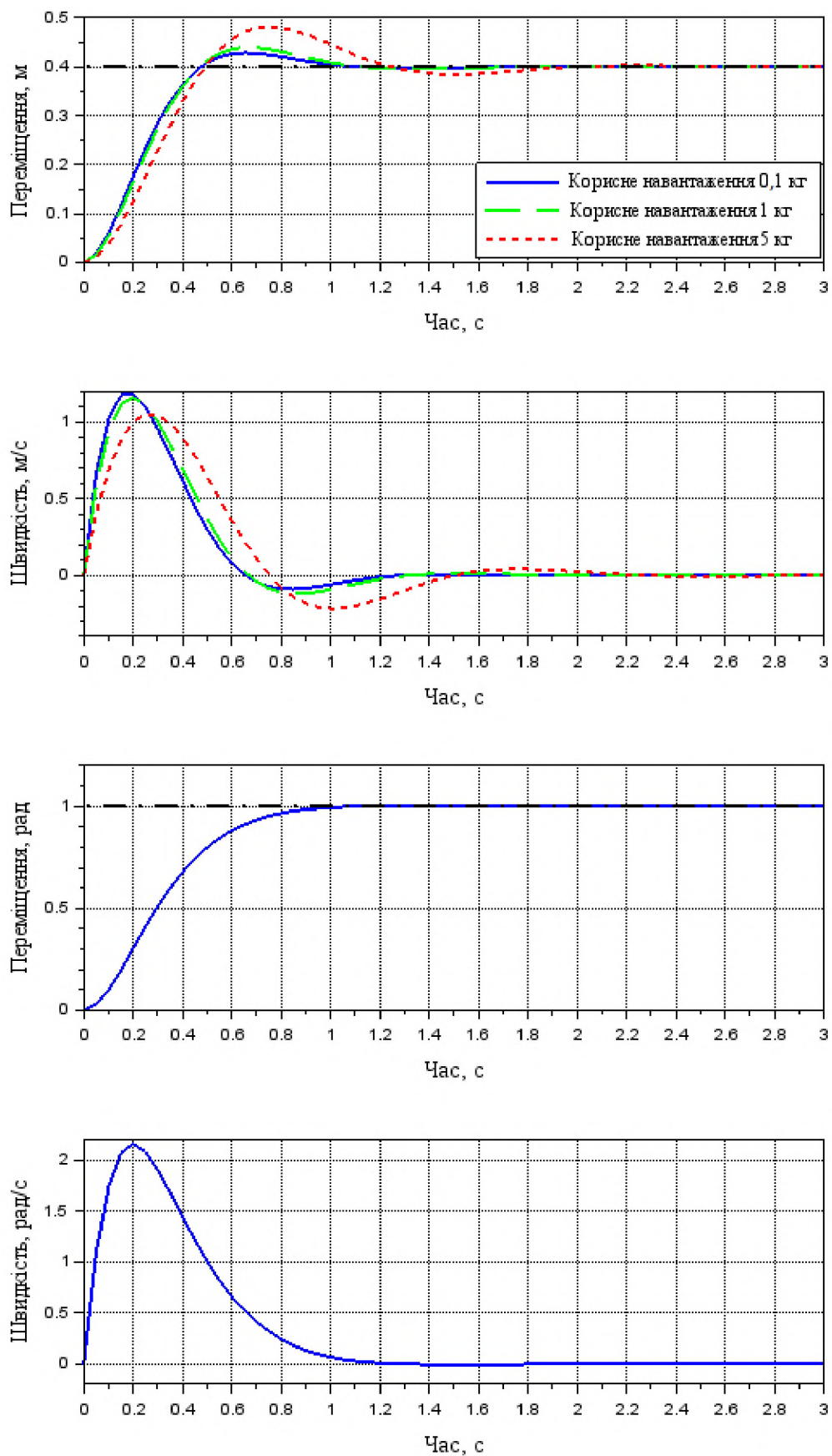


Рисунок 3.12 – Перехідні характеристики переміщення та швидкості радіального та кутового напрямків для трьох значень корисного навантаження ($K_{pr}=250$, $K_{p\theta}=150$, $K_{vr}=50$, $K_{v\theta}=50$, $J=5$ кг·м², — · — бажане переміщення)

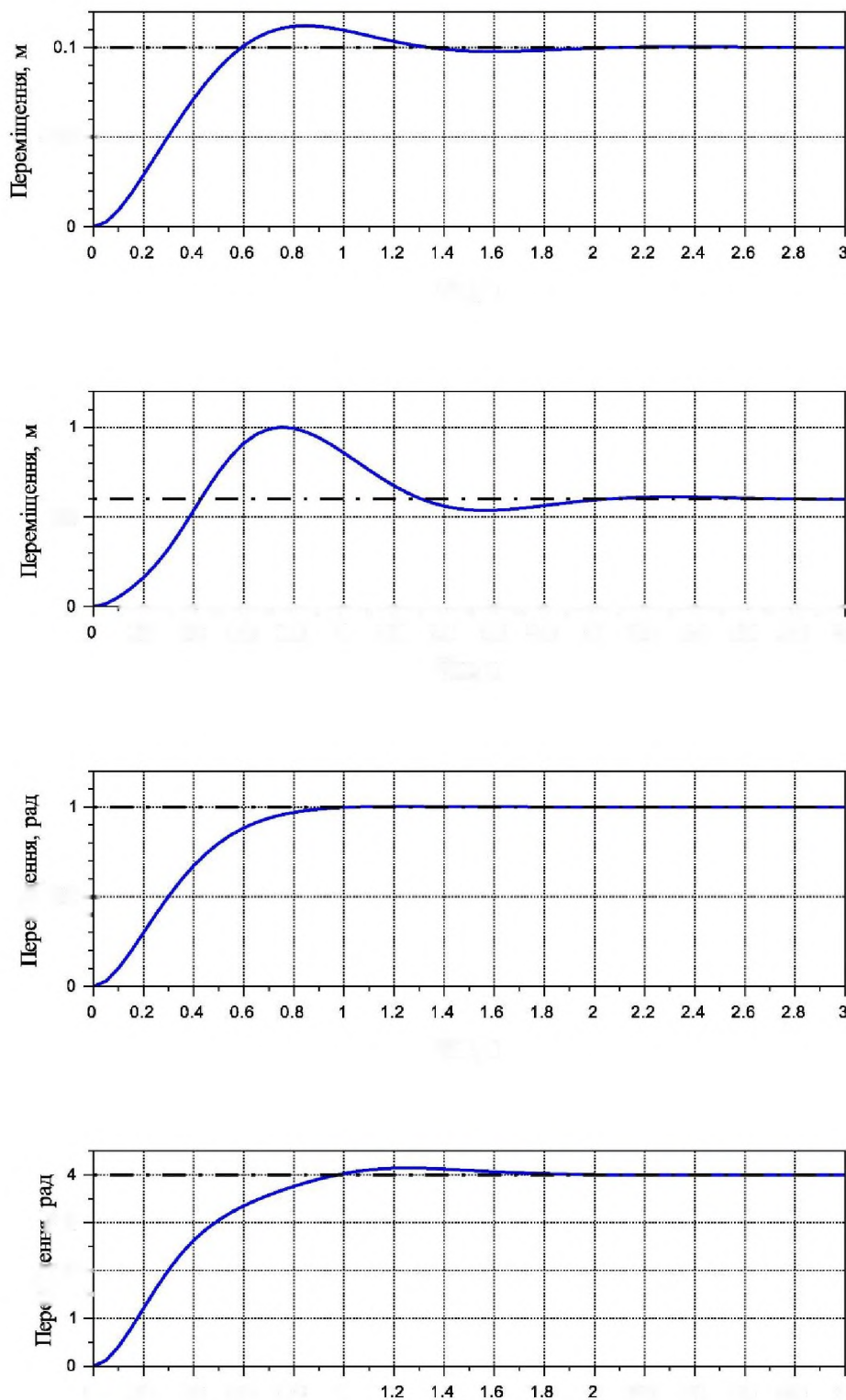


Рисунок 3.13 – Вплив на реакції внаслідок зміни початкової конфігурації
 радіального і кутового напрямків
 ($K_{pr}=250$, $K_{p\theta}=150$, $K_{vr}=50$, $K_{v\theta}=50$, $m_p=5$ кг, $J=5$ кг·м²,
 — · — бажане переміщення)

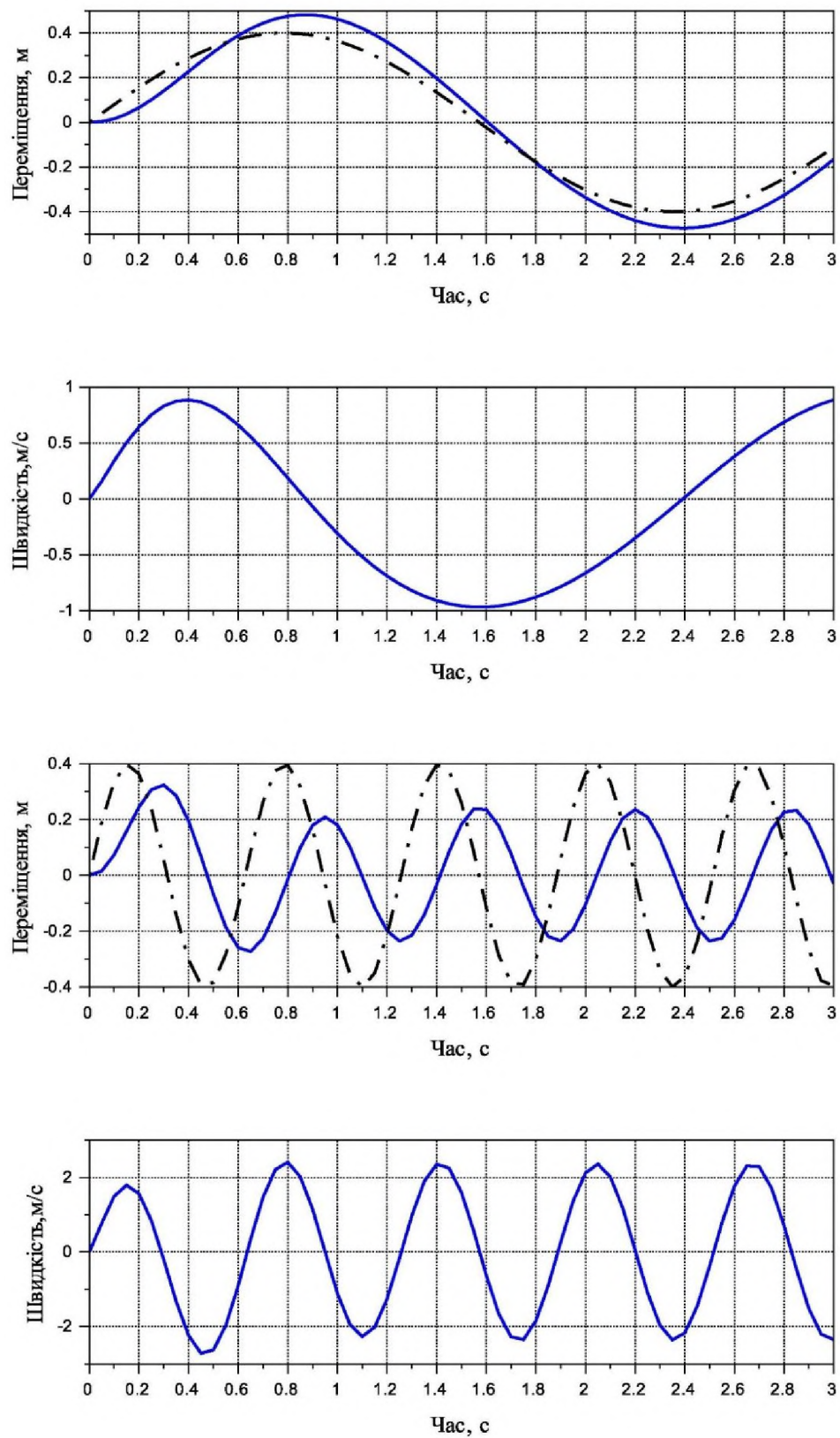


Рисунок 3.14 – Відстеження реакцій радіальної ланки на синусоїдальні траєкторії з частотою 2 рад/с ш 10 рад/с

($K_{pr}=250$, $K_{p\theta}=150$, $K_{vr}=50$, $K_{v\theta}=50$, $m_p=5$ кг, $J=5$ кг·м², — · — бажане переміщення)

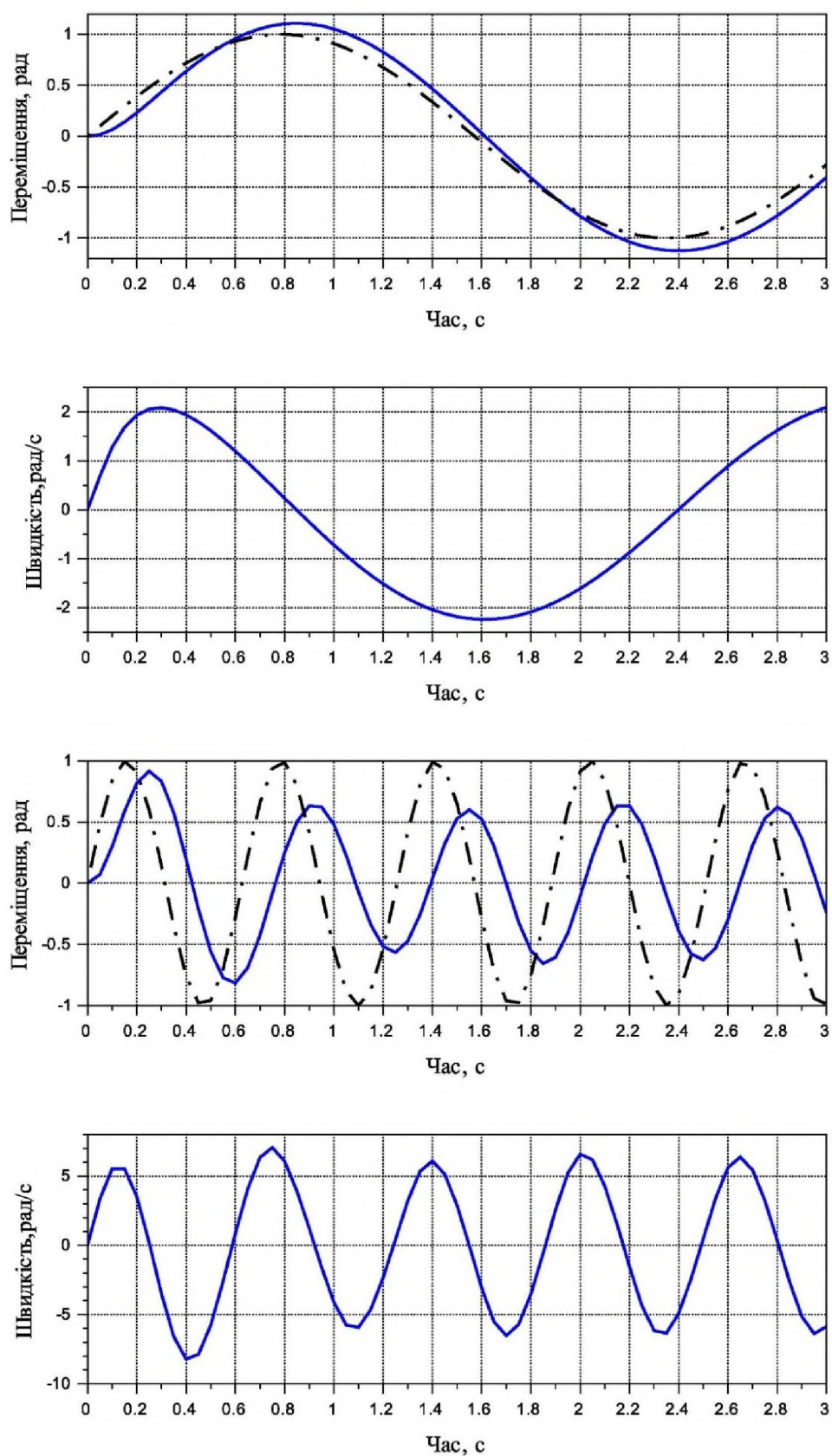


Рисунок 3.15 – Відстеження реакцій кутової ланки на синусоїдальні траєкторії з частотою 2 рад/с ш 10 рад/с

($K_{pr}=250$, $K_{p\theta}=150$, $K_{vr}=50$, $K_{v\theta}=50$, $J=5$ кг·м², — · — бажане переміщення)

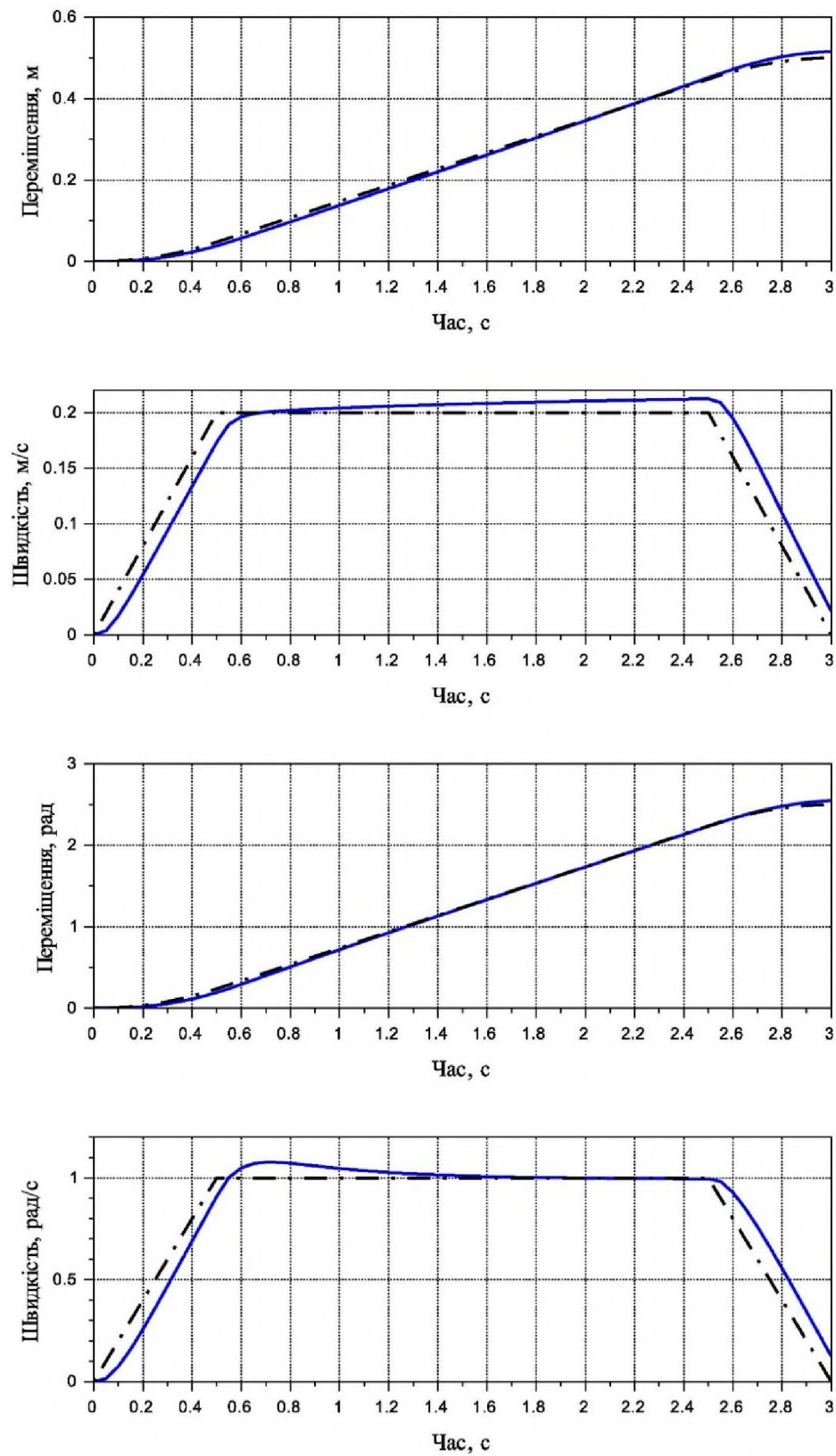


Рисунок 3.16 – Відстеження реакцій радіальних і кутових ланок на траєкторію LSPB з відповідним опорним значенням швидкості ($K_{pr}=100$, $K_{p\theta}=150$, $K_{vr}=200$, $K_{v\theta}=75$, $m_p=5$ кг, $J=5$ кг·м², — · — бажане переміщення)

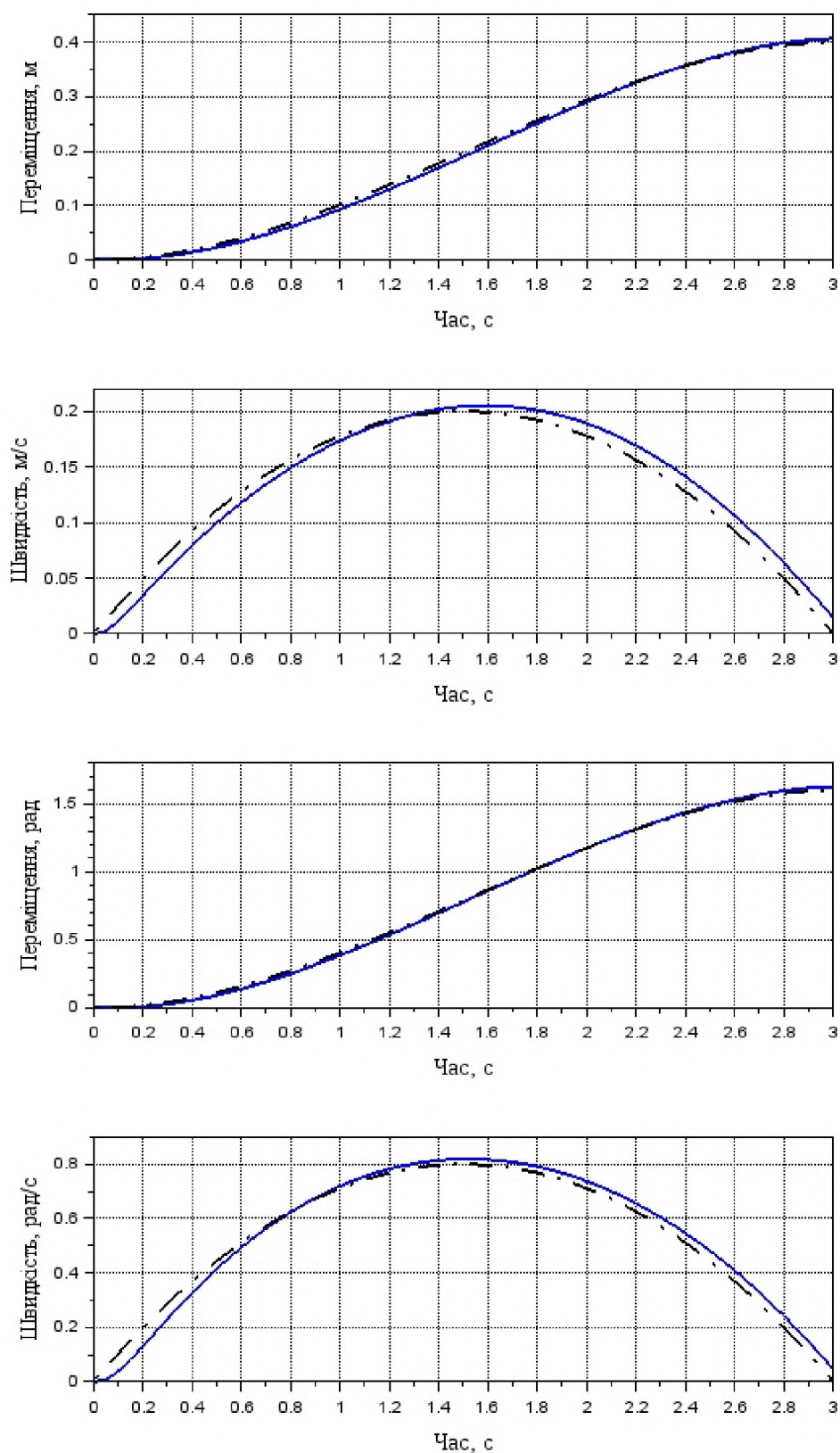


Рисунок 3.17 – Відстеження реакцій радіальних і кутових ланок на траєкторію кубічного полінома з відповідним опорним значенням швидкості ($K_{pr}=100$, $K_{p\theta}=150$, $K_{vr}=200$, $K_{v\theta}=75$, $m_p=5$ кг, $J=5$ кг·м², — · — бажане переміщення)

3.3 Аналіз результатів моделювання

У цьому підрозділі проведений аналіз результатів різноманітних експериментів та перевіряється ефективність отриманої моделі системи керування циліндричного робота-маніпулятора.

На рисунках 3.4 і 3.5 показано профілі прискорення, швидкості та переміщення для радіального та кутового напрямків у відповідь на постійні узагальнені сили. Результати отримані для двох значень корисного навантаження і. е. 1 кг і 5 кг. Результати чітко показують менше прискорення у випадку корисного навантаження 5 кг. Ця тенденція обумовлена другим законом руху Ньютона ($a=F/m$). Вплив зміни корисного навантаження на прискорення більш помітний для радіального напрямку, ніж для кутового. Це пов'язано з тим, що для кутового з'єднання структура маніпулятора є симетричною відносно осі z , тоді як у випадку радіального зв'язку симетрія порушується.

На рисунку 3.6 показані прискорення, швидкості та переміщення для радіального напрямку, коли прикладений момент у кутовому напрямку рівний нулю. У цьому випадку, як і слід було очікувати, відбувається постійне прискорення і не спостерігається ефектів зв'язку.

Рівняння (1.18) показує, що матриця інерції залежить від координат. Ця залежність від координат у матриці інерції породжує сили взаємного впливу, і, отже, прискорення не є рівномірними для постійних прикладених сил [6]. Однак, коли використовуються двигуни-редуктори з достатніми передавальними відношеннями, інерції системи привода зазвичай стають домінуючими і, таким чином, затьмарюють перехресний взаємний вплив з'єднань один на одного [5], що призводить до порівняно рівномірних прискорень для постійних прикладених зусиль. Таким чином, коли використовуються двигуни-редуктори, взаємний вплив пригнічуються, і кожним з'єднанням можна керувати незалежно, розглядаючи будь-яке залишковий вплив як порушення. У таких випадках більше не потрібне керування на основі моделі. На рисунку 3.7 показані профілі реакції з інерційними системами привода та без них відповідно. Здається, що, хоча вибрані системи привода для не

повністю усувають взаємний вплив, решта ефектів не є істотними і їх можна ігнорувати, коли маніпулятор використовується в обмеженій робочій зоні.

На рисунку 3.8 показано застосування зворотної динамічної моделі. Модель використовується для отримання профілів сили і крутного моменту привода для корисних навантажень 1 кг і 5 кг для постійних прискорень. Як і очікувалося, з'являються більші сили для 5 кг корисного навантаження.

Основною метою вивчення та дослідження динамічної моделі маніпулятора є створення відповідного механізму керування. Як обговорювалося раніше, незалежне спільне керування є розумно виправданим з вибраними приводами. Тому на кожному з трьох з'єднань використовуються незалежні регулятори. Спочатку, як показано на рисунку 3.9, маніпулятор перевіряється за допомогою пропорційного регулятора на різних коефіцієнти підсилення. Результати показують, що систему не вдалося стабілізувати за допомогою пропорційного регулятора. Система демонструє нестабільність навіть при дуже малих коефіцієнтах підсилення. Ця ситуація вимагає використання деякого демпфування. Тому ПД-регулятор використовується як регулятор похідного типу, який додає демпфірування до системи, а також покращує похибку усталеного стану, дозволяючи використовувати високі пропорційні підсилення [10]. Наведені крокові реакції радіальних та кутових з'єднань для різних пропорційних підсилень. на рисунках 3.10 і 3.11, які показують, що тепер система легко стабілізується. Використовуючи ПД-регулятор, система стає більш чутливою до змін i , таким чином, досягається швидка реакція. Як зазначено раніше, система демонструє коливання навіть при менших пропорційних коефіцієнтів підсилення, отже, РІ-регулятор не можна використовувати, оскільки він посилює коливання. Також помічено, що при зміні K_{pr} в діапазоні від 100 до 250 не спостерігається значного взаємного впливу у реакції кутового суглоба.

Подібні результати отримані для радіальної ланки, коли $K_{p\theta}$ змінюється від 100 до 250.

Тому в цьому діапазоні коефіцієнтів підсилень не існує сильного зв'язку між ланками.

Ефект зміни корисного навантаження для фіксованих коефіцієнтів показано на рисунку 3.12. Знову ж таки, ефект більш очевидний для радіального зв'язку через причину, зазначену раніше. Можна помітити, що для радіальної ланки коливання підвищуються для більших корисних навантажень через більшу інерцію. Крім того, час підйому для більшого корисного навантаження більше. Це пояснюється тим, що контролеру потрібно більше часу, щоб наблизитися до бажаного кроку для більшого значення корисного навантаження. Це ясно показує, що радіальний регулятор повинен бути налаштований (або запланований) для різних корисних навантажень для досягнення необхідної продуктивності.

Необхідність планування коефіцієнтів підсилення для радіального регулятора додатково підкреслюється, якщо порівнювати відповіді значення крокового входу для різних початкових умов, наведених на рисунку 3.13.

Однак для поворотної ланки планування коефіцієнтів підсилення не є необхідним, як показано на рисунку. Це пояснюється тим, що кутовий суглоб симетричний відносно осі z .

Ефективність відстеження маніпулятора синусоїдальних траєкторій показано на рисунках 3.14 і 3.15. Виявляється, що маніпулятор рухається за бажаною траєкторією 2 рад/сек з невеликою розбіжністю. Однак для бажаної синусоїдальної траєкторії 10 рад/с відставання по фазі та амплітуді стають досить величезними. Це показує, що для фіксованого виграшу маніпулятор можна змусити маневрувати лише з обмеженою швидкістю. Таким чином, контролери потрібно переналаштувати, якщо швидкість зміни бажаної траєкторії буде надмірно змінена.

У програмах відстеження маніпуляторів часто використовується еталон швидкості.

На рисунках 3.16 і 3.17 показано реакції відстеження радіальних і кутових ланок LSPB і кубічних поліноміальних траєкторій, коли також надано відповідне опорне значення швидкості.

Результати відстеження радіальних і кутових ланок траєкторію LSPB і траєкторію кубічного полінома показують, що помилки відстеження в обох випадках незначні.

3.4 Висновки до розділу 3

3.4.1 Побудовано пряму, зворотну та динамічну модель зі зворотним зв'язком системи керування циліндричного робота-маніпулятора. При побудові математичної моделі с в середовищі *Scilab: Xcos* використовувався підхід, при якому динамічна модель складається з підсистем з найменшим використанням елементарних динамічних ланок. Попередньо були побудовані моделі всіх підсистем.

3.4.2 Описано експерименти для прямої та зворотної динамічної моделі. Представлено результати моделювання. Описано, вплив на результат моделювання пропорційних регуляторів підсилення. Наведено повний набір експериментів для дослідження застосування незалежних ПД-регуляторів на трьох суглобах циліндричного робота-маніпулятора.

3.4.2 Проведений аналіз результатів різноманітних експериментів та перевірено ефективність отриманої моделі системи керування циліндричного робота-маніпулятора. Визначено, що при використанні пропорційних регуляторів система демонструє коливання навіть при дуже малих коефіцієнтах підсилення, що робить неможливим використання ПІ-регуляторів, оскільки вони посилять коливання. При використанні ПД-регуляторів, система стає більш чутливою до змін, що покращує похибку усталеного стану, дозволяючи використовувати високі пропорційні коефіцієнти підсилення.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Менеджери з технічного обслуговування, відповідальні за роботизовані робочі станції, зазвичай зацікавлені в тому, щоб мати детальну інформацію про небезпеку на своїх робочих станціях з двох причин. По-перше, заходи з технічного обслуговування, які призводять до травми, можуть супроводжуватися тривалим періодом простою системи, щоб визначити точну причину травми. Якщо частина цього часу стягується з групи технічного обслуговування, це може включати витрати на незадіяних працівників і втрачене виробництво на роботизованій робочій станції та на робочих станціях, які вона постачає.

По-друге, деякі витрати на пристрої безпеки та розробку безпечних процедур, які визнаються невідповідними виконуваний роботі, можуть бути стягнені з групи технічного обслуговування. Стандарт ANSI щодо безпеки роботизації вимагає забезпечення безпеки при технічному обслуговуванні, яке безпосередньо відповідає типу та рівню небезпек, які представляють роботи та роботизовані системи. Дані, які використовуються управлінням технічного обслуговування, можуть допомогти у визначенні рівнів небезпеки для завдань технічного обслуговування. У цьому розділі розглядаються три сфери управління технікою роботи, які стосуються економічно ефективного запобігання травмам.

- 1) кількісний аналіз ремонтпридатності та доступності;
- 2) політика щодо коригувального та профілактичного технічного обслуговування;
- 3) комп'ютеризований збір даних.

4.1 Технічне обслуговування та доступність

Для того, щоб персонал з безпеки робототехніки працював разом із управлінням технічне обслуговування робототехніки, вимагає усвідомлення особливого значення двох термінів, які легко сплутати – технічне обслуговування та ремонтопридатність. «Технічне обслуговування» – це описовий термін для повного спектру людської діяльності та організації, за допомогою яких здійснюється ремонт та обслуговування обладнання. З іншого боку, «ремонтпридатність» – це кількісний показник продуктивності здатності ремонту конкретної конструкції обладнання. Значення ремонтпридатності визначаються, коли для системи визначено ціль ремонтпридатності. Ця мета іноді виражається як прийнятний час простою системи.

Одне з визначень ремонтпридатності полягає в тому, що це характеристика проектування та монтажу, яка надає системі велику властиву здатність підтримувати, таким чином, що зменшує необхідну кількість робочих годин на технічне обслуговування, рівень кваліфікації, інструменти, випробувальне обладнання, засоби та логістичні витрати і таким чином досягається більша доступність обладнання. Для промислової робототехніки це означає, що система з кращим показником ремонтпридатності, ніж інша система, буде доступна для виробництва більшу частину часу, оскільки для її виправлення потрібно менше часу, потрібно менше кваліфікованого персоналу, використовуються більш ефективні інструменти, тестове обладнання та засоби, і менш затратний. З точки зору безпеки, обчислені значення ремонтпридатності є прийнятними лише тоді, коли показано, що використання ефективних пристроїв безпеки та процедур було враховано під час обчислень.

Ремонтпридатність виражається кількома способами:

- середнім часом ремонту (MTTR); залежно від випадку це значення може відхилятися від середнього відповідно до експоненційного розподілу;
- за тривалістю ремонту, який має кумулятивну ймовірність завершення 0,9 (див. рисунок 4.1), за наявністю обладнання, де Енгель Бергер вказав, що середній час між відмовами 400 годин був досягнутий спеціально для роботів. Інші частини

роботизованої робочої станції та всієї робочої станції мають різні показники відмов.

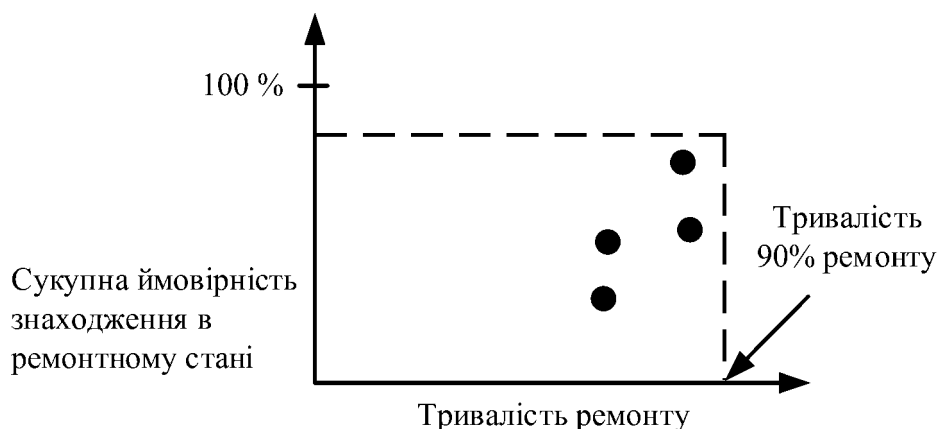


Рисунок 4.1 – Ремонтопридатність, виражена як 90 % тривалості ремонту

4.2 Три приклади потенційної небезпеки з даних про технічне обслуговування

Час впливу небезпек під час виконання завдань з технічного обслуговування роботизованих систем є одним із факторів, які слід враховувати при виборі пристроїв безпеки та встановленні процедур безпеки. Як буде видно з наступних прикладів, дані, зібрані для аналізу ремонтнопридатності, можуть вказати, як часто і як довго працівники технічного обслуговування потенційно піддаються небезпеці роботи.

4.2.1 Часті та тривалі потенційні опромінення. Система зварювальних робіт мала дві лінії по п'ятнадцять робіт у кожній. Дані про простої зварювальних елементів системи були зібрані протягом трьох місяців (1634 робочих години). У таблиці 4.1 узагальнено зібрані дані. Для шістнадцяти різних проблем, пов'язаних із інструментами робота, дві задачі виконувались щодня, а чотири тривали понад 1/2 години. Середній час ремонту (MTTR) для зварювального обладнання становив 11 хвилин. Це час потенційного впливу небезпек, пов'язаних із зварювальним обладнанням на цих лініях.

Для частих завдань у цьому прикладі аналітик з безпеки може звернути особливу увагу на простоту використання запобіжних заходів і шукати стандартизовані, безпечні процедури. Для довготривалих завдань необхідно оцінити необхідність підключення робота до потужності.

Таблиця 4.1 – Досвід ремонту інструменту на роботизованій лінії

	Час простою виробництва (хв.)	Кількість ремонтів	Хвилин на ремонт
* Зламана трубка – витік охолоджуючої води	1236	150	8,2
* Застряг електрод	996	133	7,5
Несправність зварювального приладу – охолодження витік води	805	27	29,3
З'єднання зламано – витік охолоджуючої води	670	25	26,3
Електродний елемент – витік охолоджуючої води	432	69	6,3
Неправильне розташування електродів	353	34	10,4
Витік в пневмосистемі	210	27	7,8
** З'єднання живлення трансформатора вимкнено для обслуговування	195	2	97,5
Електродотримач не працює – втрата охолоджуючої води	145	14	10,4
** Кабель живлення окремо	120	1	120,0
Заміна гідравлічного реле	115	9	12,8
** Тиристорна панель не працює	100	3	33,3
Проблема з потоком	75	8	9,4
** Розплавився вторинні запобіжники	60	1	60,0
Несправність гідравлічного реле	40	7	5,7
Сервоклапан не працює	35	2	17,5
Підсумки	5587 (93 год 7 хв)	512	MTTR 10,9
* позначає часті завдання			
** позначає тривалі завдання			

4.2.2 Діагностика несправностей зменшує тривалість потенційного опромінення. На рисунку 3.2 показано різницю в часі потенційного ризику технічного обслуговування (час простою) між системою без діагностики несправностей і системою з такою діагностикою. Використання діагностики несправностей скоротило

час технічного обслуговування, а отже, і потенційну небезпеку на 32-39 відсотків у порівнянні з попереднім часом. Діагностика в цьому випадку відстежувала:

- 1) перевищення очікуваної тривалості механічної операції;
- 2) неприпустимі логічні стани;
- 3) перевищення параметрів (тиск, температура), які можуть бути шкідливими для компонентів системи.

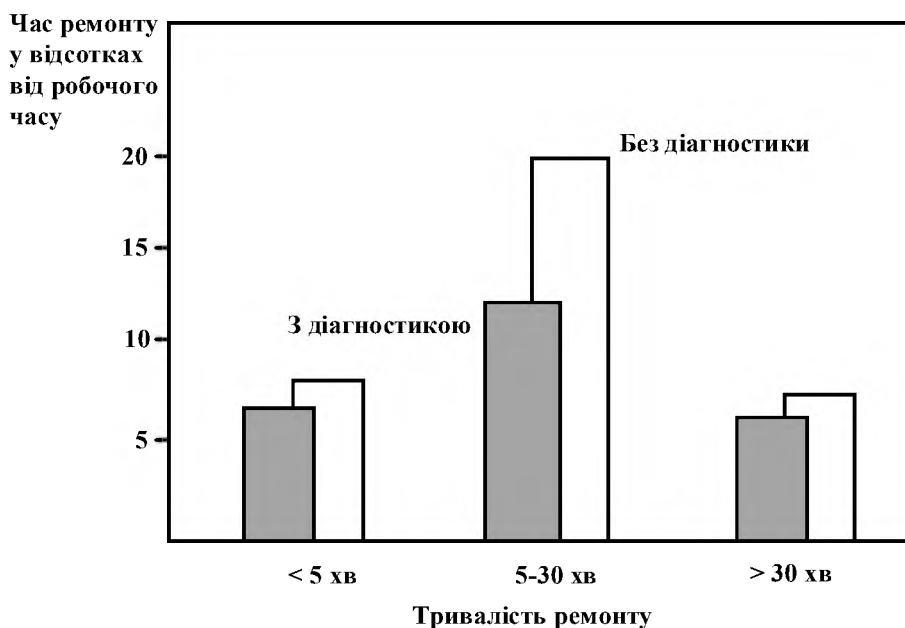


Рисунок 4.2 – Час ремонту з діагностикою та без неї

4.2.3 Короткі, часті експозиції. На рисунку 4.3 наведено зразок інформації про простої з заводу зі складання автомобілів. Це показує, що 75 відсотків часу простою для технічного обслуговування, проведеного протягом одного виробничого періоду, тривали одну хвилину або менше. Тут міркуванням безпеки буде встановлення систем безпеки, які не можна було б легко обійти (наприклад, низький паркан, блокування, яке легко замикається). Деякі працівники обходять запобіжні пристрої, коли втручання зазвичай коротке і зупинка здається непотрібною.

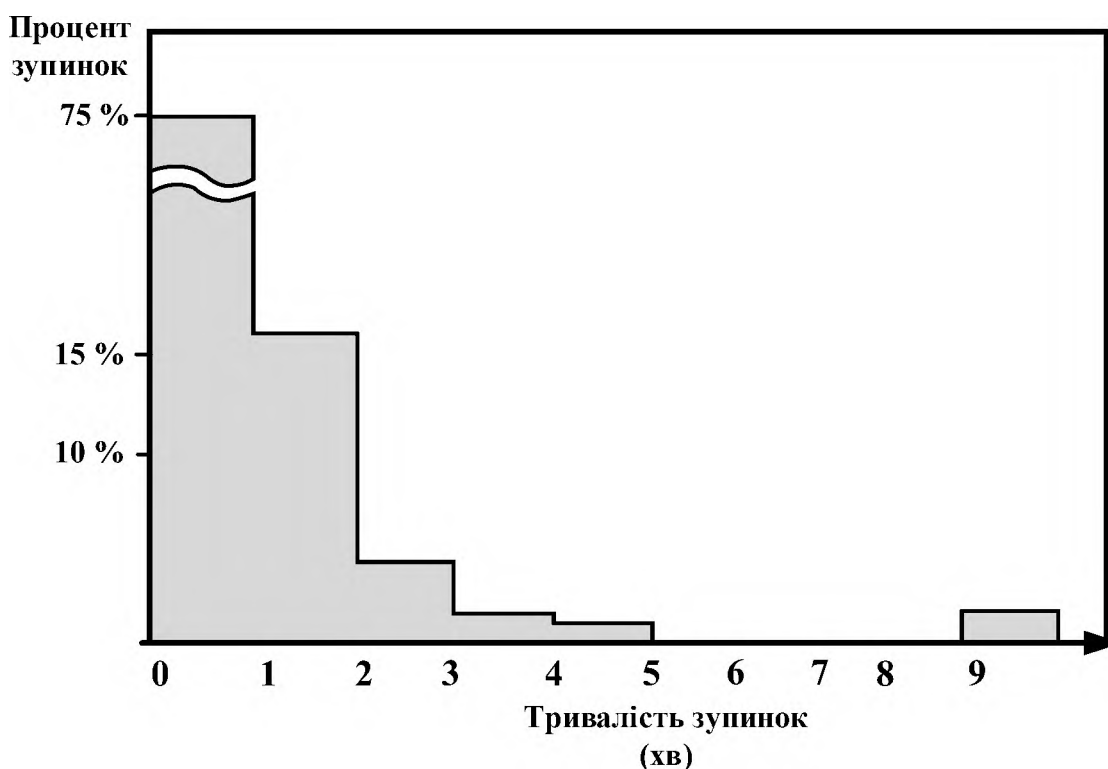


Рисунок 4.3 – Частота серед причини зупинки роботизованої системи

4.3 Політика технічного обслуговування

На рисунку 4.4 показані різні види технічного обслуговування. Політика технічного обслуговування — це правило компанії щодо того, коли потрібно проводити профілактичне технічне обслуговування, а коли нічого не робити, доки не знадобиться коригувальне обслуговування. Профілактичне технічне обслуговування, яке можна виконати при вимкненому живленні робота, є менш небезпечним, ніж корекційне технічне обслуговування, яке, можливо, доведеться виконувати при включеному живленні. Дотримувана політика технічного обслуговування може вплинути на потенційну безпеку. Наприклад, робоча станція робота може використовуватися в звичайному виробничому режимі для створення додаткового запасу під час запланованих періодів технічного обслуговування (наприклад, під час нічної зміни, присвяченої технічному обслуговуванню). Це накопичення дозволяє вимкнути робочу станцію робота для корекційного технічного обслуговування під час нормального виробництва без втрати продуктивності робочої станції. Однак це доцільно робити лише після проведення необхідного профілактичного технічного

обслуговування в запланований період технічного обслуговування. Політика технічного обслуговування, що передбачає тимчасове відкладення несуттєвого коригуючого технічного обслуговування та дозволу робочій станції робота працювати в зниженому режимі, до повного зняття живлення, зменшить вплив небезпечної енергії.

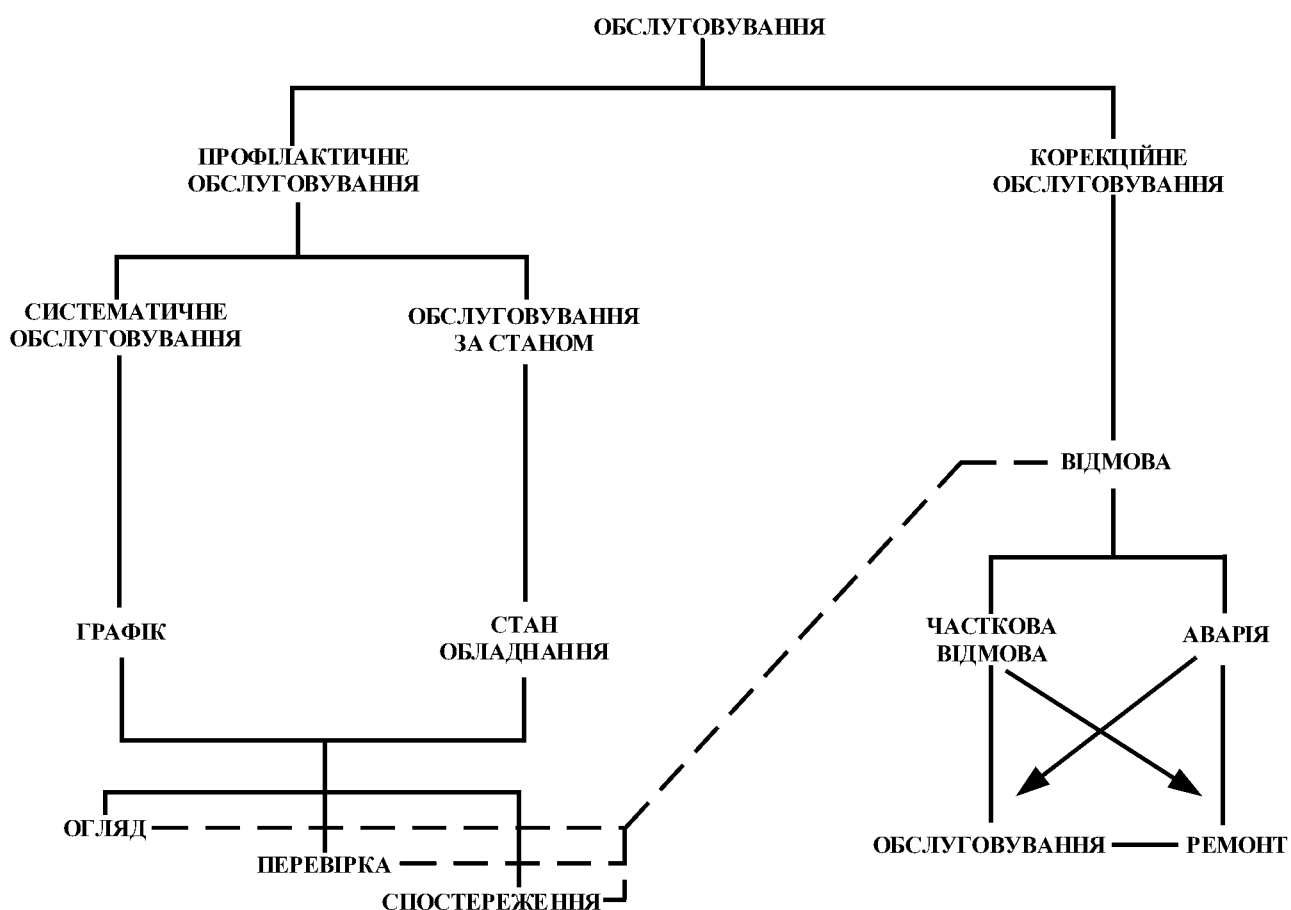


Рисунок 4.4 – Різні види технічного обслуговування

Джонс і Доусон повідомили, зібрану інформацію про час зупинки роботи системи для трьох компаній із, здавалося б, різними політиками обслуговування роботів (див. таблицю 4.2). Ці дані охоплюють понад 20 000 годин роботизованого виробництва 37 роботів для дугового та точкового зварювання.

З цієї таблиці видно, що між компаніями існує велика розбіжність у типах дій, які здійснюються під час зупинки роботів. Зокрема, якщо ми подивимося на дії, які називаються регулярним технічним обслуговуванням, ми побачимо, що

компанія А має політику рідко зупинятися для планового технічного обслуговування (лише 2 відсотки дій, що здійснюються під час зупинок), тоді як компанія С досить часто зупиняється для планового технічного обслуговування (22,3 відсотки всіх зупинок).

Таблиця 4.2 – Дії, вжиті під час зафіксованих випадків зупинки

Дії прийняті	Відсоток випадків, коли кожна дія записується		
	Компанія А	Компанія В	Компанія С
Заміна несправного обладнання	3,6%	19,0%	22,8%
Налаштування/очищення	7,0%	16,4%	50,3%
Скидання	72,4%	64,0%	41,2%
Перепрограмування	8,1%	8,9%	7,6%
Регулярне технічне обслуговування	2,0%	5,7%	22,3%
Позапланове обслуговування	67,4%	21,0%	11,1%
Діагностика несправності	5,9%	2,3%	1,0%
Інший	6,6%	1,6%	6,3%

У таблиці 4.3 порівнюються чотири можливі політики технічного обслуговування відповідно до використовуваної інформації та типу організації, в якій вони знаходяться.

Таблиця 4.3 – Чотири рівні управління технічним обслуговуванням

ВИД ОБСЛУГОВУВАННЯ	ВИКОРИСАННЯ ІН- ФОРМАЦІЇ	ОРГАНІЗАЦІЯ
Профілактичне обслуговування; систематичні та умовні. Систематичний аналіз за допомогою датчиків і комп'ютера надійності та терміну служби проблемних машин.	Багато машин з числовим керуванням. Багато датчиків і мікропроцесорів. Внутрішня технічна інформаційна мережа (шина). Комп'ютери, призначені для технічного обслуговування, часто з інтерфейсом обробки сигналу.	Тісна співпраця з виробничими службами, щоб виробничий персонал брав участь у пошуку кращих методів технічного обслуговування. Існуючий офіс вивчення методів, обробки інформації та надійності.
Систематична профілактика. Кондиційне обслуговування шляхом систематичних відвідувань і вимірювань на певному обладнанні.	Багато машин із числовим керуванням і датчиками не підключені до інформаційної системи обслуговування. Інтегрована система управління технічним обслуговуванням на комп'ютері, призначеному для обслуговування.	Квазіконтрактні! домовленості з виробничою службою. Наявність офісу методик та нових проектів. Бюджет розбитий на категорії відповідно до обладнання та робочої групи.
Систематична профілактика. Експериментальне використання методів аналізу вібрації тощо.	Багато програм розроблено на системах обробки інформації компанії, але без інтеграції цих систем. Багато систем ручного введення: інвентаризація тощо.	Наявність аналізів роботи. Загальний бюджет служби та її підрозділів не вказано детально.
Коригувальне технічне обслуговування, за винятком заміни мастила та періодичного мастила.	Відсутня обробка інформації, або тільки пакетна обробка даних службою обробки інформації компанії: облік витрат, управління запасами.	Технічне обслуговування організовано з невеликою структурою, часто повністю залежить від виробничої служби.

4.4 Звітування про втручання при технічному обслуговуванні

Для оцінки обслуговування було запропоновано кілька категорій звітності. Інформація про технічне обслуговування, яка може бути корисною для аналізу безпеки, включає:

- посилання на пристрій, що ремонтується, наприклад, виробник, тип, номер у серії;
- дата (рік, місяць, день), причина та характер втручання. Якщо причиною є несправність, час, походження та ознака несправності;
- тривалість експлуатації найменшого підрозділу, визначеного як пристрій, що ремонтується, і про який доступна така інформація;
- де в системі знаходяться вийшли з ладу деталі: вузол, компонент тощо;
- несправності компонента, що ремонтується або замінюється, і причина заміни;
- категорія технічного обслуговування (коригувальний, профілактичний...);
- назва посади ремонтника;
- наявні засоби для проведення ремонту в рамках цієї категорії ремонту;
- дата виведення системи з експлуатації та введення її в експлуатацію, а також період часу, протягом якого проводилося технічне обслуговування системи та підсистеми.

Можливості збору даних про безпеку технічного обслуговування роботизованих установок є значними, коли об'єм пам'яті комп'ютера на таких установках достатньо великий. Відділи безпеки можуть вважати за доцільне розробити або використовувати існуючі бази даних як спосіб збору інформації щодо запобігання травматизму.

4.5 Висновки до розділу 4

Ефективно розроблені системи безпеки для роботизованих робочих станцій задовольнить потребу персоналу час від часу підходити до робота. Важливим аспектом роботизованого виробництва, яким не можна нехтувати, є те, що таке виробництво залежить від виконання випадково відбуваються людських завдань біля робота. Ці випадкові завдання не можуть бути рідкісними подіями. Метою системи безпеки є захист людини, яка входить у зону, яка зазвичай є робочою зоною робота, від потенційної небезпеки несподіваного руху робота. Таким чином, завдання, які вимагають від персоналу працювати поруч з роботом, коли він працює, будуть виконуватися лише у вибраних безпечних умовах керування.

Оскільки роботизовані системи можуть бути досить складними, рекомендується використовувати системний підхід до аналізу безпеки роботи з обслуговуванням. Перш ніж впроваджувати запропоновані заходи безпеки, доцільно оцінити їх ефективність щодо видів втручання, передбачених для робочої станції. Після впровадження можуть проводитися періодичні перевірки ефективності заходів безпеки для втручань, які фактично відбуваються. Перевірка не тільки працездатності захисних пристроїв у цих ситуаціях, але й розуміння працівниками правильної безпечної експлуатації обладнання є чітко гарантованою.

Під час систематичного аналізу для безпечного обслуговування роботизованих робочих станцій необхідно враховувати різноманітні фактори. Ці фактори можуть оцінюватися різними особами з відповідною кваліфікацією. Наприклад, людина, яка має кваліфікацію з керування машиною, може оцінити, чи може несправність програмованого пристрою керування привести до небезпечного переміщення електричних, гідравлічних або пневматичних елементів, які все ще мають потужність під час виконання завдання. Можливо, знадобиться хтось, хто має досвід у співпраці між працівниками та керівництвом, щоб визначити, як отримати визнання використання нових пристроїв безпеки. Персонал, залучений до придбання та вдосконалення роботизованої системи, міг би порадити, як конструкція роботизованої системи може змінюватися в міру зміни технології. Фахівці з безпеки

зможуть надати інформацію про вибір між захисними пристроями та процедурами, чинними правилами безпеки та розумними принципами техніки безпеки.

Оцінка правил технічного обслуговування та записів допоможе визначити ступінь потенційної небезпеки всередині робочих зон роботів. Така оцінка потрібна, щоб зрозуміти серйозність потреби в заходах безпеки роботів у порівнянні з необхідністю виділення ресурсів на інші сфери безпеки на робочому місці, що розвивається. Оцінки, в яких використовуються записи технічного обслуговування, що піддаються робітникам шкідливим роботам, можуть показати ефективність різного обладнання та процедур контролю небезпек.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі представлені результати аналізу динаміки системи керування робота-маніпулятора.

1 Розглянуто класифікацію робіт та методи побудови динамічної моделі системи керування циліндричного робота-маніпулятора. Встановлено, що на практиці використовують три основних методи опису динаміки системи керування робота-маніпулятора: рівняння Лагранжа, рівняння Ньютона-Ейлера та рівняння Кейна. Для опису динаміки системи керування в роботі обрано рівняння Лагранжа, оскільки в них легко ідентифіковано сили взаємодії та поєднання сил, що дозволяє розробити відповідний регулятор для компенсації цих впливів.

2 Розроблено алгоритм дослідження, який відображає його послідовність: мотивацію; формулювання проблеми дослідження; пошук теоретичної основи розв'язання проблеми; розв'язання проблеми. Як основний метод наукового дослідження в роботі обрано імітаційне моделювання.

3 Розглянуто спрощену структуру циліндричного робота-маніпулятора та визначено структурні параметри для математичного опису динаміки його системи керування. Складено рівняння Лагранжа, що описують рух схвата циліндричного робота-маніпулятора. Отримані рівняння зберігають нелінійні характеристики, які властиві динаміці робота. Визначено, що матриця інерції циліндричного робота-маніпулятора є діагональною і залежить явно від радіального зміщення, яке призводить до появи моменту Коріоліса, що явно ускладнює керування роботом-маніпулятором. Показано, що взаємний вплив шарнірів маніпулятора у динаміці дуже малий порівняно з інерцією приводних систем, що дозволяє розглядати кожну систему привода окремо.

4 Розглянуто динаміку системи керування циліндричного робота-маніпулятора за допомогою середовища Xcos. Виявлено, що при використанні незалежних ПД-регуляторів у кожній ланці для випадку робіт із прямим приводом усуваються такі ефекти, як люфт, тертя та податливість, які присутні в механічних

передачах. Нелінійний зв'язок між ланками є значним, і динаміка двигунів є більш складною.

Визначено, що при використанні пропорційних регуляторів система демонструє нестабільність навіть при дуже малих коефіцієнтах підсилення, що робить неможливим використання ПІ-регуляторів, оскільки вони посилюють коливальність. При використанні ПД-регуляторів, система стає більш чутливою до змін, що покращує похибку усталеного стану, дозволяючи використовувати високі пропорційні коефіцієнти підсилення.

Результати відпрацювання трапецеїдальної траєкторії та траєкторії кубічного полінома показали, що при налаштованих ПД-регуляторах помилки відстеження в обох випадках незначні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Robotic Science / M. Brady (Ed.) // The MIT Press – Cambridge, 1989.
2. Control System Design / B. Friedland // McGraw-Hill Book Company – New York, 1987.
3. Robotics: Control Sensing, Vision and intelligence / Fu, K. S., Gonzalez, R. C. and Lee, C.S.G // McGraw-Hill – St. Louis, 1987.
4. Fundamental for Control of Robotic Manipulators / A. J. Koivo // John Wiley and Sons – Singapore, 1989.
5. Modelling and Control of a Parallel-Actuated Robot Manipulator / M. A. Syed // University of Wales – UK, 1991.
6. Discrete dynamic robot models / C. P. Neuman and V. D. Tourassis // IEEE Trans. System, Man and Cybernetics –. 1985 –193-204,.
7. Model-Based Control of a Robot Manipulator / C. H. An, C. G. Atkeson and J. M. Hollerbach, // The MIT Press – Massachusetts, 1988.
8. "Design and control of direct drive robots - A survey", in Oussama Khatib, John J. Crag and Thomas Lozan-Pwrez (Eds.) / K. Yousuf-Toumi // The Robotic Review-1, MIT Press – Cambridge, 1989.
9. Introduction to Robotics, 2nd Edition / J. Craig // Addison-Wesley Publishing Company – New York 1989.
10. Modern Control Engineering / K. Ogata // Prentice Hall International Inc.– New Jersey, 2009.
11. Mechanical Engineering Design, 5th Edition / J. E. Shigley // McGraw-Hill Book Company – New York, 1989.
12. Motor Catalogue of MINIMOTOR SA, CH-6981, Croglio, Switzerland.

ДОДАТОК А

Блоки, що використовуються в симуляції

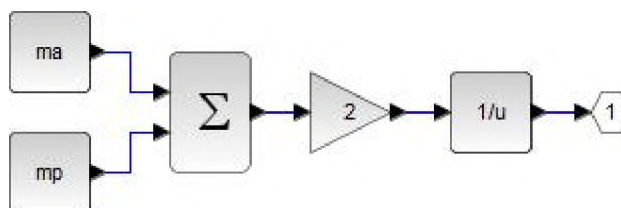


Рисунок А.1 – Блок С1

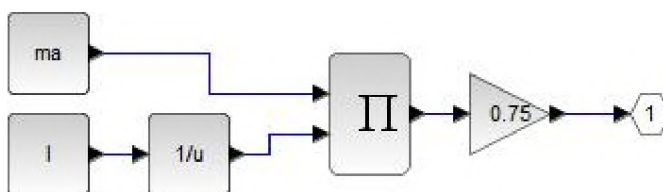


Рисунок А.2 – Блок С2

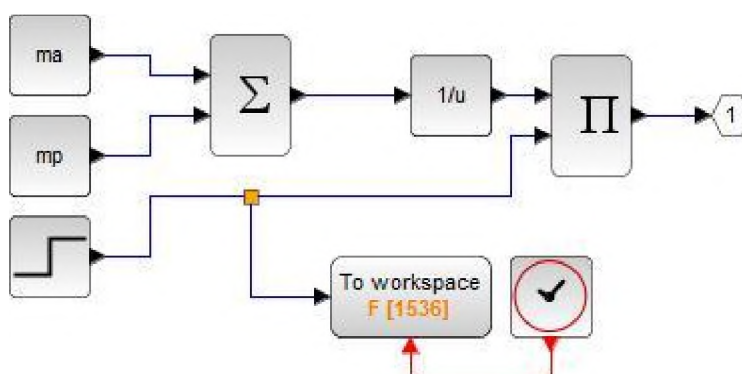


Рисунок А.3 – Блок С3

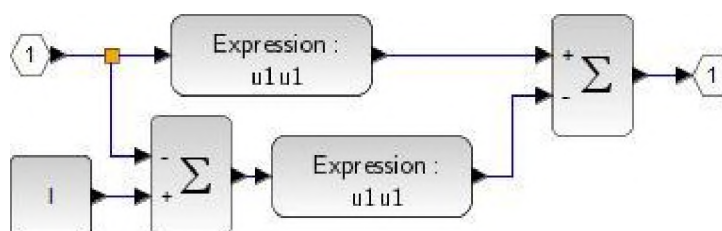


Рисунок А.4 – Блок R1

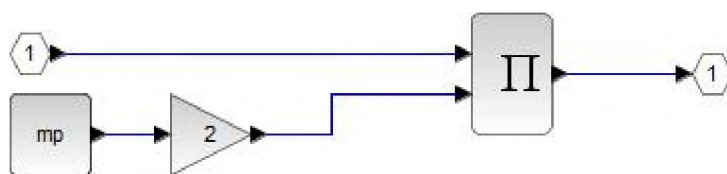


Рисунок А.5 – Блок R2

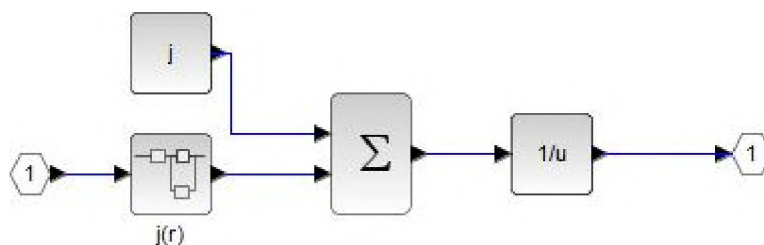


Рисунок А.6 – Блок Θ1

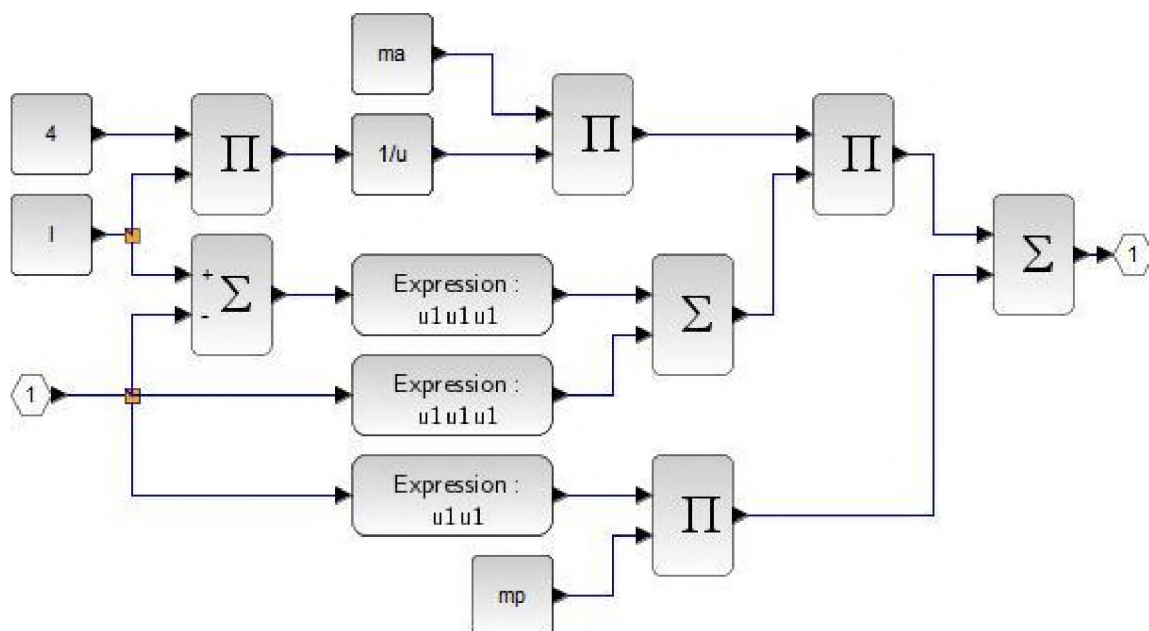


Рисунок А.7 – Блок j(r)

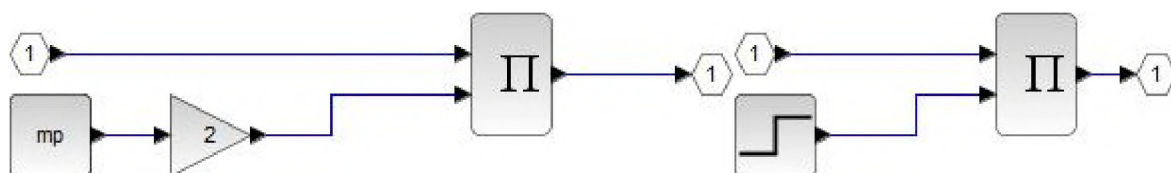


Рисунок А.8 – Блок Θ2

ДОДАТОК Б

Розрахунок інерцій електроприводів

У конструкції маніпулятора використані двигуни постійного струму. Інерція ротора трьох двигунів дорівнює:

Інерція ротора радіального приводу $J_r = 1,16 \times 10^{-7} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$

Інерція ротора кутового приводу $J_\theta = 1,16 \times 10^{-7} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$

Інерція ротора вертикального приводу $J_v = 1,86 \times 10^{-6} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$

Ланка маніпулятора приводиться в рух двигунами через редуктор, а; іншими словами, швидкість зв'язку дорівнює I/a , помножений на швидкість приводу. Інерція двигуна, що відбивається через передачу, збільшується на a^2 . Отже, інерції систем приводу після перемикання передачі є

$$J_r = (17,2)^2 \times 1,16 \times 10^{-7} = 3,43 \times 10^{-5} \text{ кг}\cdot\text{м}^2,$$

$$J_\theta = (989)^2 \times 1,16 \times 10^{-7} = 0,11 \text{ кг}\cdot\text{м}^2,$$

$$J_v = (14)^2 \times 1,86 \times 10^{-6} = 0,36 \times 10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

У радіальному напрямку поступальний рух здійснюється за допомогою ходового гвинта. Тому інерційний член радіального приводу слід перевести в масу. Крутний момент є добутком сили F і середнього радіусу r_m ходового гвинта

$$\tau = Fr_m. \quad (\text{Б.1})$$

Поступальна і кутова швидкість ходового гвинта пов'язані як

$$v = p\omega, \quad (\text{Б.2})$$

де p – крок ходового гвинта. Також

$$\dot{v} = p\dot{\omega}, \quad (\text{Б.3})$$

Другими законами Ньютона для обертального та поступального рухів є

$$\tau = J\dot{\omega}, \quad (\text{Б.4})$$

$$F = m\dot{v}, \quad (\text{Б.5})$$

де J і m – момент інерції і маса тіла, а F і τ – прикладена сила і крутний момент відповідно.

Прирівнявши рівняння (Б.1) і (Б.4) отримуємо:

$$J = \frac{Fr_m}{\dot{\omega}}.$$

Використовуючи рівняння (Б.5), наведене вище рівняння можна записати так

$$J = \frac{m\dot{v}r_m}{\dot{\omega}}. \quad (\text{Б.6})$$

Тепер використовуючи рівняння (Б.3)

$$J = mpr_m, \quad (\text{Б.7})$$

або

$$m = \frac{J}{pr_m}. \quad (\text{Б.8})$$

Крок і середній радіус радіального ходового гвинта дорівнює:

$$p = 2,50 \times 10^{-3} \text{ м}, \quad rm = 0,01 \text{ м}.$$

Тому для радіального напрямку маса визначається за допомогою рівняння (Б.8)

$$mr = 1,37 \text{ кг}.$$

Для вертикального напрямку крок ходового гвинта і середній радіус дорівнює

$$p = 3 \times 10^{-3} \text{ м},$$

$$r_m = 0,01 \text{ м}.$$

Таким чином, маса для вертикального напрямку дорівнює

$$m_{ver} = 12,00 \text{ кг}.$$

Таким чином матриця тепер стає

$$J = \begin{pmatrix} 1.37 & 1 & 1 \\ 1 & 0.11 & 1 \\ 1 & 1 & 12 \end{pmatrix}.$$

ДОДАТОК В
Мультимедійна презентація

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня магістра
на тему:

**«АНАЛІЗ ДИНАМІКИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА»**

Студент магістратури:

Гриненко В. Р.

Керівник кваліфікаційної роботи магістра:

доц. каф. автоматики, к.т.н.,
доц. Зубарев А. А.

Миколаїв 2025

Рисунок В.1 – Слайд 1 мультимедійної презентації

Актуальність теми. Мета роботи. Об'єкт і предмет дослідження

Промислові роботи знаходять все більш широке застосування у різних галузях промисловості, виконуючи безліч різноманітних завдань. Застосування промислових роботів для автоматизації виробничих процесів має безліч незаперечних переваг для підприємств.

На етапі проєктування існує необхідність використання динамічних моделей, для моделювання вивчення поведінки робота-маніпулятора, для аналізу та розробки передових стратегій керування відповідного механізму керування.

Мета роботи

Аналіз динаміки системи керування циліндричного робота-маніпулятора

Об'єкт дослідження

Перехідні процеси системи керування циліндричного робота-маніпулятора

Предмет дослідження

Структура та параметри регуляторів системи керування та вплив зовнішніх факторів на якість керування циліндричного робота-маніпулятора

Рисунок В.2 – Слайд 2 мультимедійної презентації

Завдання дослідження

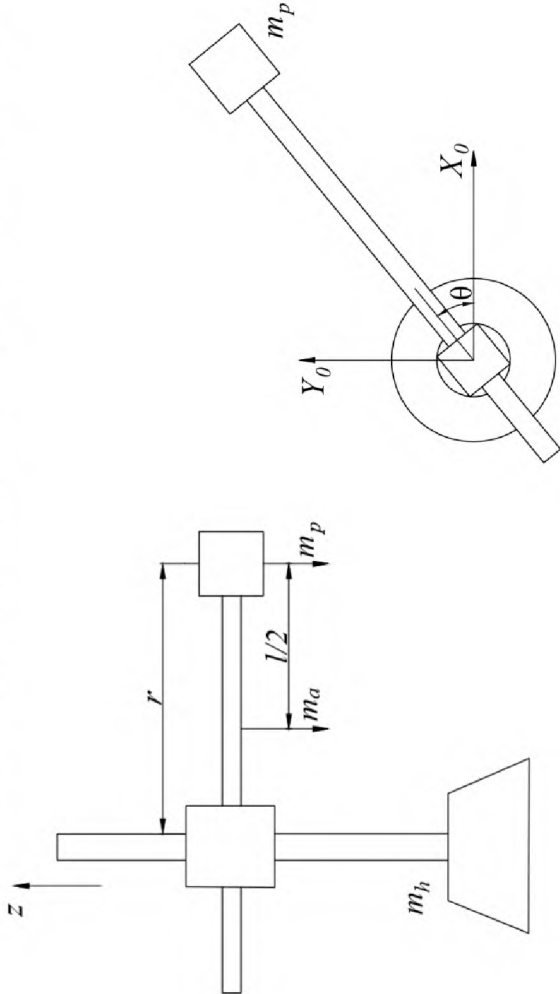
1. Розглянути класифікацію роботів. Дослідити будову та принцип роботи циліндричного робота-маніпулятора. Розглянути методи опису динаміки системи керування циліндричного робота-маніпулятора.
2. Вибрати та обґрунтувати метод наукового дослідження. Розробити алгоритм дослідження та обрати методи розв'язання поставлених завдань.
3. Скласти математичний опис системи керування циліндричного робота-маніпулятора. Виконати розрахунок параметрів елементів системи керування.
4. Дослідити динаміку системи керування циліндричного робота-маніпулятора. Проаналізувати вплив структури та параметрів регуляторів системи керування, вплив параметрів об'єкта керування та зовнішніх факторів на якість керування циліндричного робота-маніпулятора.

Рисунок В.3 – Слайд 3 мультимедійної презентації

Будова циліндричного робота-маніпулятора

4

Спрощена конструкція циліндричного робота-маніпулятора



Структурні параметри

Параметр	Опис
m_a	Маса радіального плеча
l	Довжина радіального плеча
m_p	Маса корисного вантажу
m_h	Маса основи
$m = m_a + m_p$	Маса радіального вузла
m_v	Вертикально прикладена маса (сума m_a, m_p і m_h)
$F_r F_\theta, F_z$	Сили та моменти, які прикладені до r, θ та z -ланок відповідно
$j(r)$	Змінна інерція радіальної ланки
J	Постійна інерція вертикальної колони
r, θ, z	Швидкості напрямків r, θ і z
g	Прискорення вільного падіння
m_d/l	Маса на одиницю довжини радіального плеча

Рисунок В.4 – Слайд 4 мультимедійної презентації

Динамічна модель робота для прямої задачі

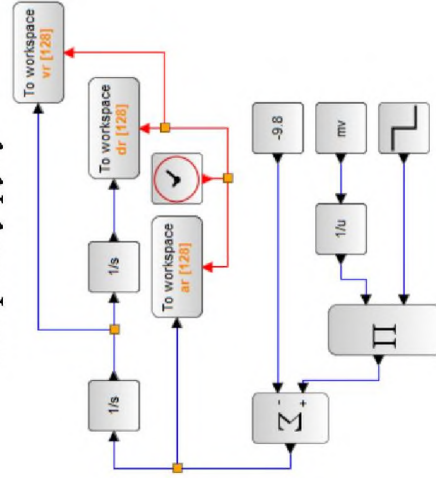
Рівняння Лагранжа для прямої задачі динаміки

$$\ddot{r} = -\frac{1}{2m} \left(\frac{3m_a}{4l} (r^2 + (l-r)^2) + 2m_p r^2 \right) \dot{\theta}^2 + \frac{F_r}{m}$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{1}{J + j_{(r)}} \left(-\left(\frac{3m_a}{4l} (r^2 + (l-r)^2) + 2m_p r^2 \right) \dot{r} \dot{\theta} + F_{\theta} \right)$$

$$\ddot{z} = -g + \frac{F_z}{m_v}$$

Динамічна модель для вертикального напрямку руху



Динамічна модель для радіального та кутового напрямків руху

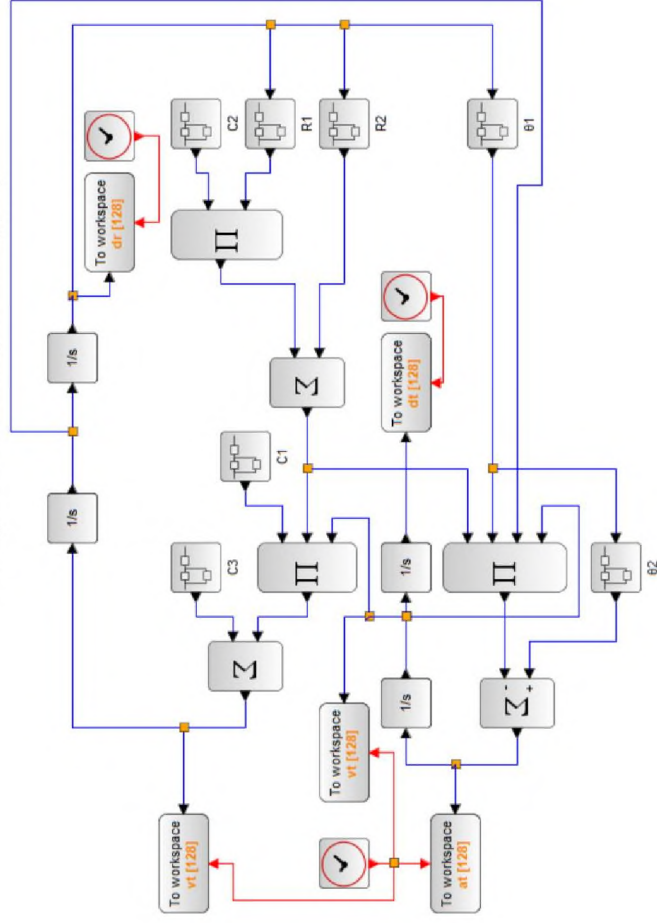


Рисунок В.5 – Слайд 5 мультимедійної презентації

Динамічна модель робота для зворотної задачі

6

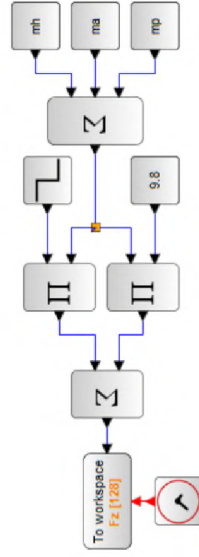
Рівняння Лагранжа для зворотної задачі динаміки

$$F_r = m\ddot{r} - C_1(C_2R_1 + R_2)\dot{\theta}^2$$

$$F_\theta = (J + J_c)\ddot{\theta} + C_1(C_2R_1 + R_2)\dot{\theta}$$

$$F_z = m_v\ddot{z} + m_v g$$

Динамічна модель для вертикального напрямку руху



Динамічна модель системи керування для радіального та кутового напрямків руху

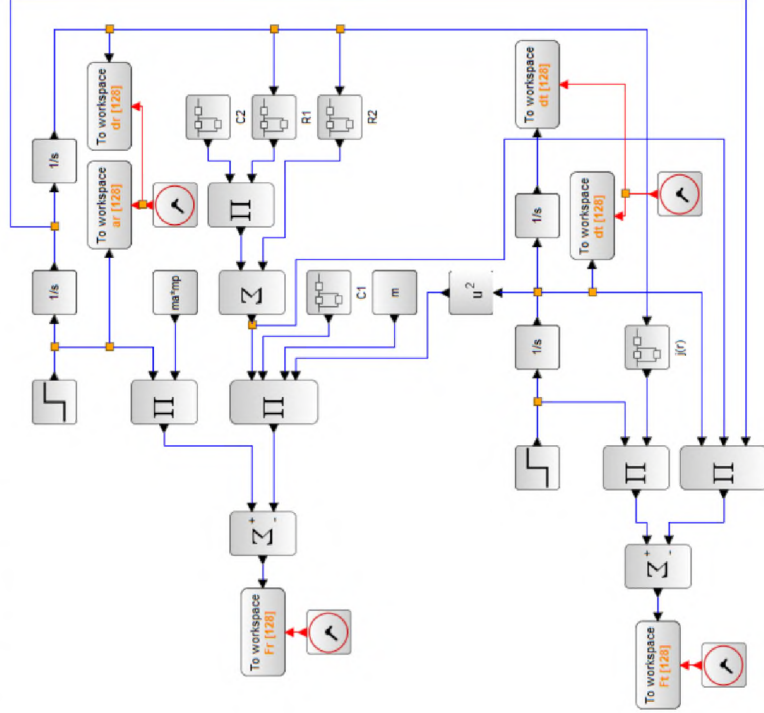
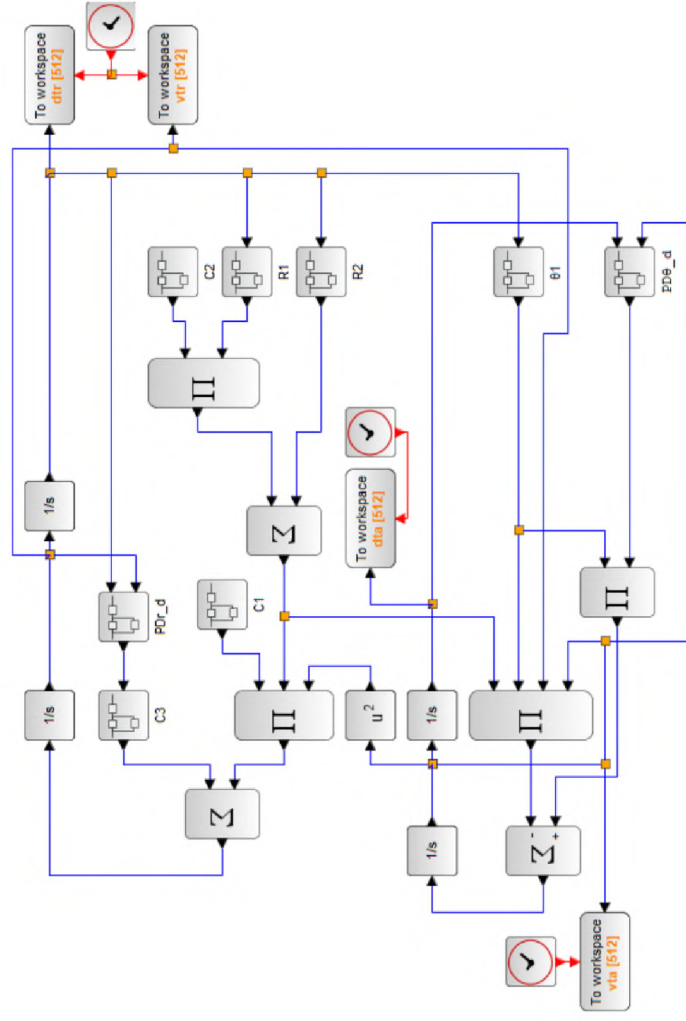


Рисунок В.6 – Слайд 6 мультимедійної презентації

Динамічна модель робота із зворотним зв'язком для прямої задачі

Модель для радіального та кутового напрямків руху



Модель для вертикального напрямку руху

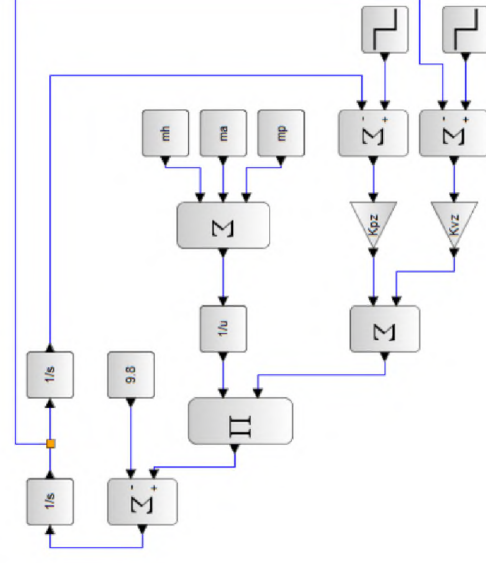


Рисунок В.7 – Слайд 7 мультимедійної презентації

8

Аналіз динаміки моделі робота для прямої задачі

Перехідні характеристики в радіальному напрямку
Перехідні характеристики в кутовому напрямку
Перехідні характеристики при зміні моменту інерції

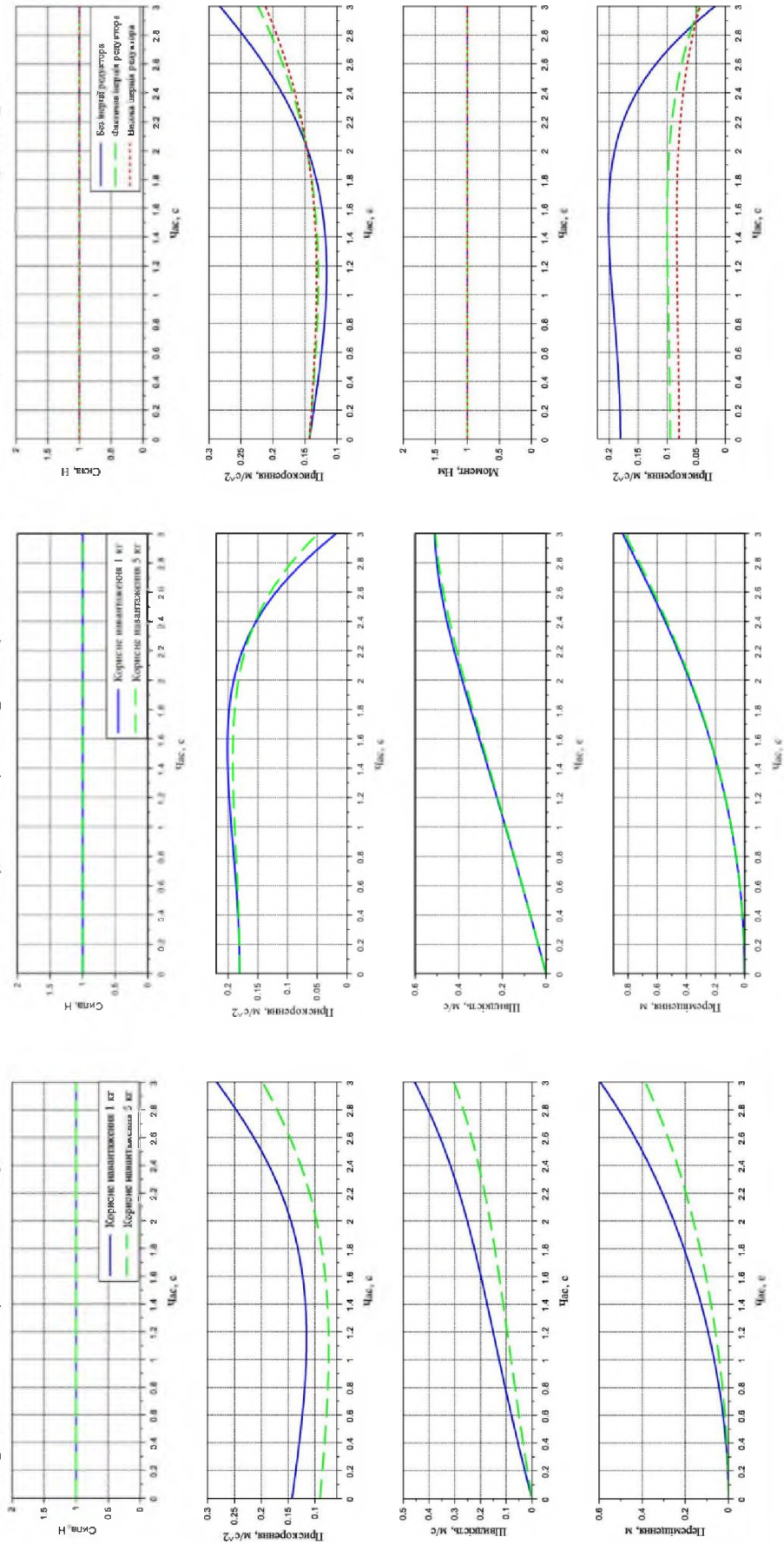
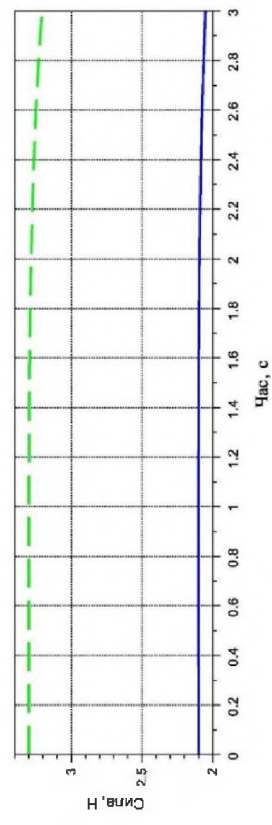
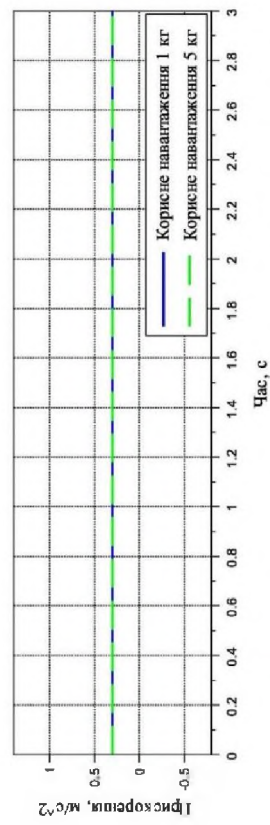


Рисунок В.8 – Слайд 8 мультимедійної презентації

Аналіз динаміки моделі робота для зворотної задачі 9

Перехідні характеристики в радіальному напрямку



Перехідні характеристики в кутовому напрямку

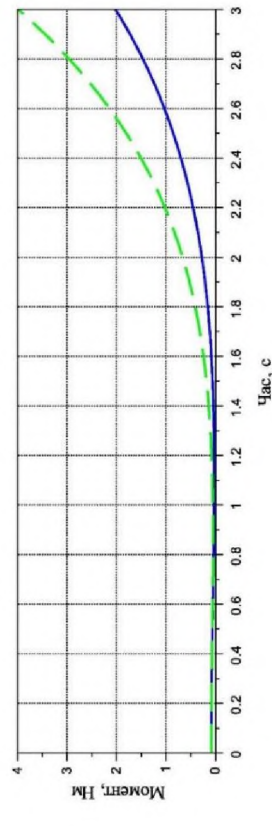
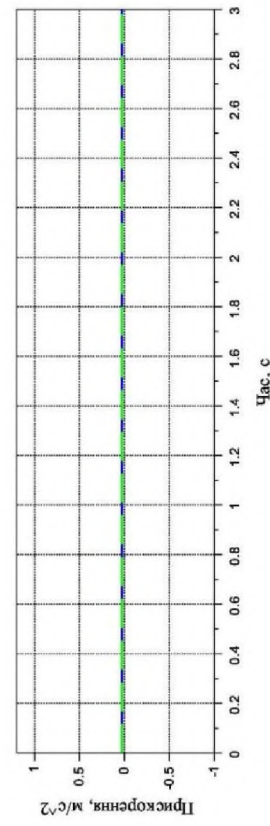
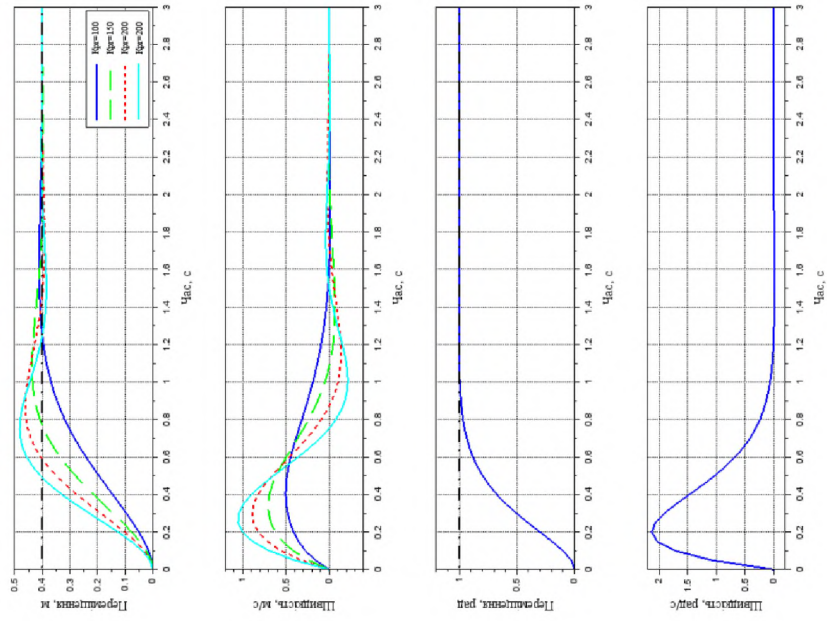


Рисунок В.9 – Слайд 9 мультимедійної презентації

Аналіз динаміки моделі робота із зворотнім зв'язком для прямої задачі

Перехідні характеристики при зміні коефіцієнту k_{pr}



Перехідні характеристики при зміні коефіцієнту $k_{p\theta}$

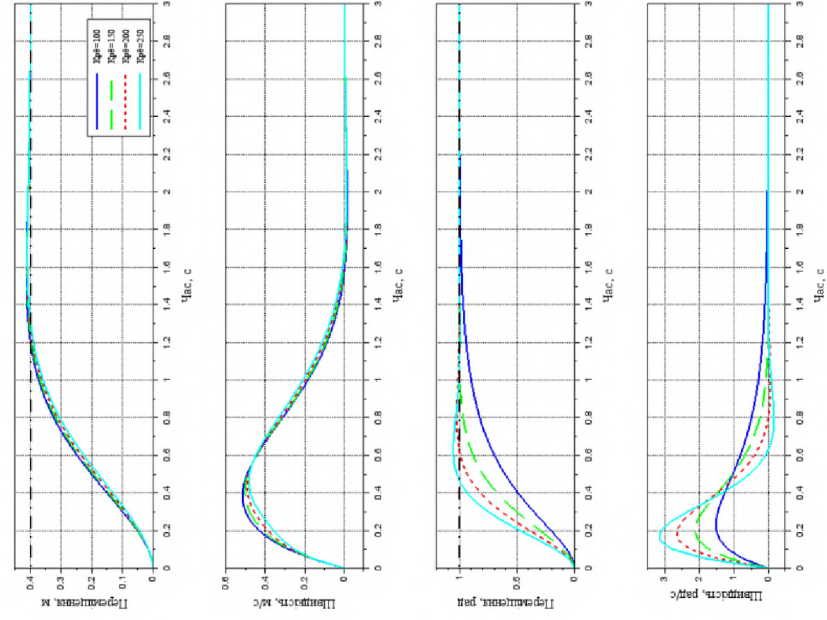
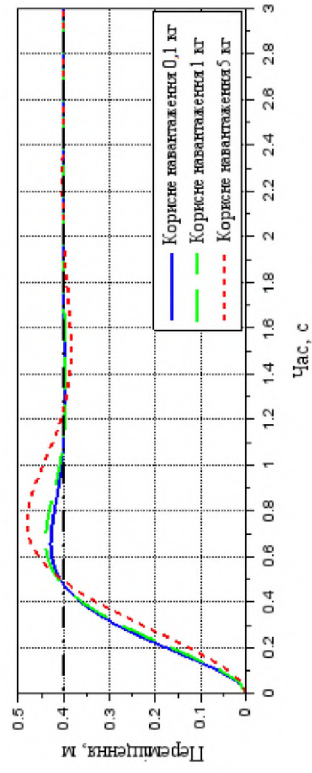


Рисунок В.10 – Слайд 10 мультимедійної презентації

Аналіз динаміки моделі робота із зворотнім зв'язком для прямої задачі

11

Перехідні характеристики радіальної ланки
при впливі корисного навантаження



Перехідні характеристики кутової ланки
при впливі корисного навантаження

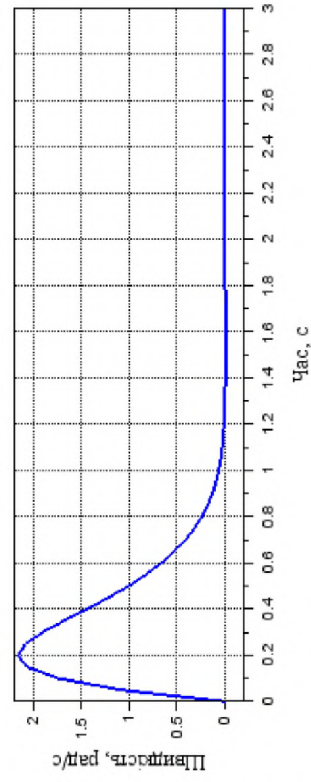
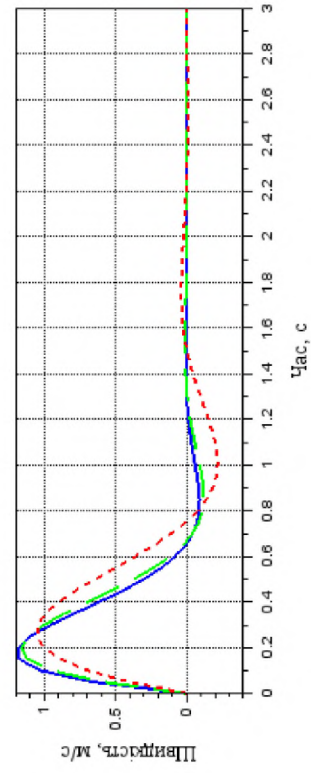
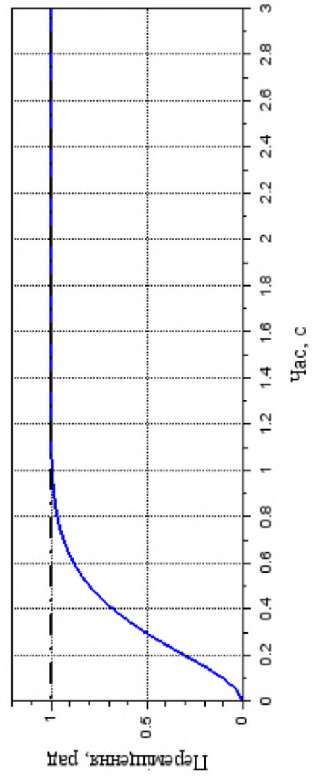
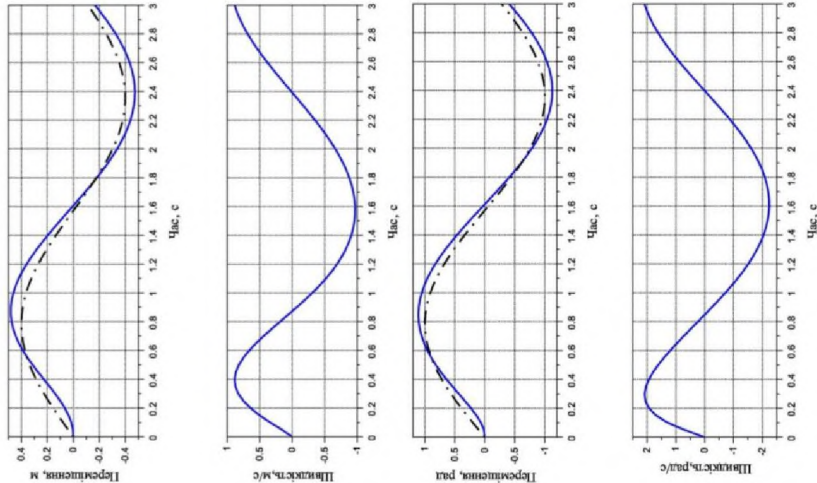


Рисунок В.11 – Слайд 11 мультимедійної презентації

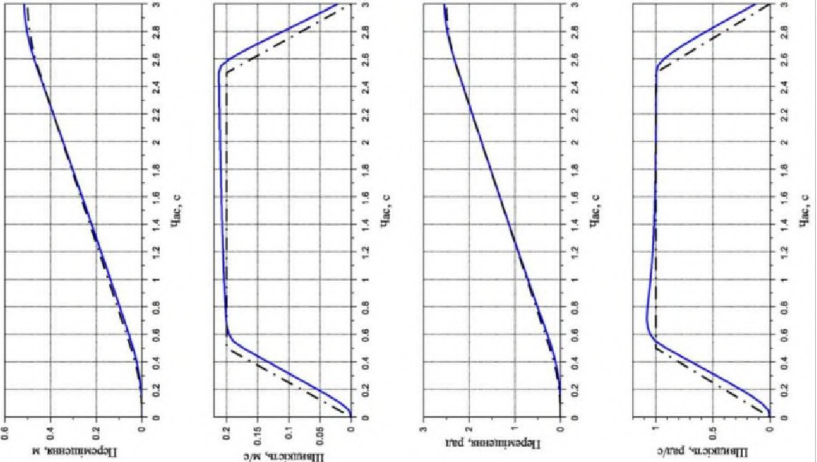
Аналіз динаміки моделі робота із зворотнім зв'язком для прямої задачі

12

Синусоїдальна траєкторія



Трапецеїдальна траєкторія



Кубічна поліноміальна траєкторія

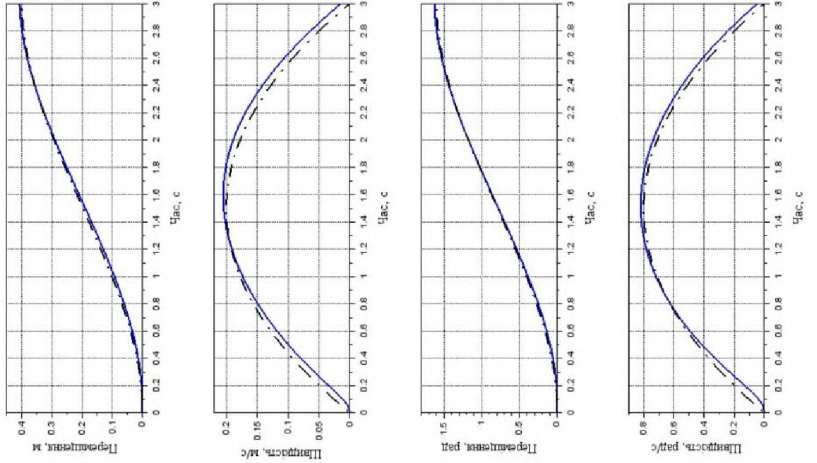


Рисунок В.12 – Слайд 12 мультимедійної презентації

Висновки

1. Розглянуто класифікацію роботів та методи побудови динамічної моделі системи керування циліндричного робота-маніпулятора. Встановлено, що на практиці використовують три основних методи опису динаміки системи керування робота-маніпулятора: рівняння Лагранжа, рівняння Ньютона-Ейлера та рівняння Кейна. Для опису динаміки системи керування в роботі обрано рівняння Лагранжа, оскільки в них легко ідентифіковано сили взаємодії та поєднання сил, що дозволяє розробити відповідний регулятор для компенсації цих впливів.
2. Розроблено алгоритм дослідження, який відображає його послідовність: мотивацію; формулювання проблеми дослідження; пошук теоретичної основи розв'язання проблеми; розв'язання проблеми. Як основний метод наукового дослідження в роботі обрано імітаційне моделювання.
3. Розглянуто спрощену структуру циліндричного робота-маніпулятора та визначено структурні параметри для математичного опису динаміки його системи керування. Складено рівняння Лагранжа, що описують рух схвата циліндричного робота-маніпулятора. Отримані рівняння зберігають нелінійні характеристики, які властиві динаміці робота.
4. Розглянуто динаміку системи керування циліндричного робота-маніпулятора за допомогою середовища Xcos. Виявлено, що при використанні незалежних ПД-регуляторів у кожній ланці для випадку роботів із прямим приводом усуваються такі ефекти, як люфт, тертя та податливість, які присутні в механічних передачах. Нелінійний зв'язок між ланками є значним, і динаміка двигунів є більш складною.

Рисунок В.13 – Слайд 12 мультимедійної презентації