

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

О.О. ЧЕРНО, О.Г. ВАСИЛЬСВ

**ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО
КЕРУВАННЯ СУДНОВОГО ВАНТАЖНОГО
МАНІПУЛЯТОРА**

Частина I

*Рекомендовано Методичною радою НУК
як методичні вказівки*

Миколаїв 2007

УДК 007.52:621.865.8

Черно О.О., Васильєв О.Г. Проектування системи автоматичного керування суднового вантажного маніпулятора. Частина 1: Методичні вказівки – Миколаїв: НУК, 2007. – 32 с.

Кафедра комп'ютеризованих систем управління

Методичні вказівки містять теоретичні відомості щодо проектування системи автоматичного керування судновими вантажними маніпуляторами, що працюють в умовах суттєвих зовнішніх збурень. Особливу увагу приділено питанням планування траєкторії маніпулятора з рухомою основою, а також аналізу і синтезу систем керування електроприводами повороту ланок маніпулятора.

Призначені для виконання курсового проекту студентами спеціальності "Системи управління і автоматики".

Рецензент к.т.н., проф. Гуров А.П.

Згідно з наказом № 110 від 25.04.07 "методичні вказівки публікуються в авторській редакції, і відповідальність за їх редагування несе автор"

© Видавництво НУК, 2007

Навчальне видання

ЧЕРНО Олександр Олександрович
ВАСИЛЬЄВ Олександр Григорович

ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ СУДНОВОГО ВАНТАЖНОГО МАНІПУЛЯТОРА

Частина I

(українською мовою)

Комп'ютерна верстка *В.Г. Мазанко*

Свідectво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

Підписано до друку 06.12.07. Папір офсетний. Формат 60×84/16.
Друк офсетний. Гарнітура "Таймс". Ум. друк. арк. 1,7. Обл.-вид. арк. 2,0.
Тираж 100 прим. Вид. № 41. Зам. № 373. Ціна договірна

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування,
54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5

ВСТУП

Промислові роботи і збудовані на їх основі роботизовані комплекси є перспективним засобом комплексної автоматизації виробничих процесів [1]. Застосування роботів дозволяє істотно підвищити продуктивність праці, ефективність діючого і заново розробляемого обладнання, а також позбавляє людину від монотонних, фізично важких, ризикованих та шкідливих для здоров'я робіт. Це особливо актуально в галузях промисловості з екстремальними умовами праці, у тому числі в морських технологіях. При проектуванні морських роботів дуже важливою задачею є розробка системи автоматичного керування рухом маніпулятора, яка повинна забезпечувати задані параметри руху в умовах значних зовнішніх збурень.

Дані методичні вказівки призначені для виконання студентами курсового проекту, присвяченому розробці системи автоматичного керування суднового вантажного маніпулятора. При проектуванні передбачається застосування обчислювальної техніки та сучасного програмного забезпечення, зокрема програмних продуктів Mathcad, SIAM, або алгоритмічних мов Паскаль, Сі та ін.

Методичні вказівки розроблено авторами на основі накопиченого досвіду викладання в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова дисципліни "Робототехнічні системи в морських технологіях" для студентів спеціальності "Системи управління і автоматики".

1. ЗАВДАННЯ ДЛЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Трьохланковий маніпулятор розташований на борту судна (рис. 1). В його функції входить транспортування малогабаритних вантажів з поверхні води на палубу.

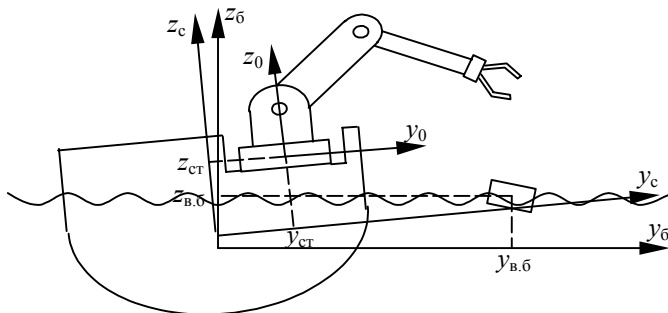


Рис. 1. Схема розташування судна, маніпулятора і вантажу

У початкових даних задаються:

- маси ланок маніпулятора m_1 , m_2 і m_3 та маса вантажу $m_{в.}$;
- довжини ланок L_1 , L_2 і L_3 та радіус першої ланки r_1 ;
- діапазони зміни кутів повороту ланок θ_1 , θ_2 і θ_3 ;
- статичні координати основи маніпулятора $x_{ст}$, $y_{ст}$ і $z_{ст}$;
- закони, за якими змінюються в часі кути рискання, диференту і крену судна $\varphi_0(t)$, $\psi_0(t)$ і $\theta_0(t)$;
- закони поступальних рухів судна уздовж осей базової системи координат $x_{пост}(t)$, $y_{пост}(t)$ і $z_{пост}(t)$;
- закони поступальних рухів вантажу на поверхні води уздовж осей базової системи координат $x_{в.б}(t)$, $y_{в.б}(t)$ і $z_{в.б}(t)$;
- моменти часу, в які схват маніпулятора повинен проходити початкову точку траєкторії, точку уходу, точку підходу і кінцеву точку відповідно t_0 , t_1 , t_2 і t_3 ;
- координати точки на палубі, в яку треба помістити вантаж, відносно основи маніпулятора $x_{т0}$, $y_{т0}$ і $z_{т0}$ (ця точка є початковою точкою траєкторії для руху маніпулятора до вантажу і кінцевою для зворотного руху);
- координати точки над палубою, через яку повинна проходити траєкторія схвату, $x_{т1}$, $y_{т1}$ і $z_{т1}$ відносно основи маніпулятора (ця точка є точ-

кою уходу для руху маніпулятора до вантажу і точкою підходу для зворотного руху);

– відстань від вантажу до точки підходу до нього Δz_{23} ;

– припустимі похибки позиціонування схвату уздовж координатних осей системи, зв'язаної з основою маніпулятора $\Delta x_{\max}$, $\Delta y_{\max}$ і $\Delta z_{\max}$.

В ході проектування необхідно розв'язати наступні задачі:

1) розрахунок руху вантажу у воді відносно основи маніпулятора;

2) планування траєкторії маніпулятора;

3) розрахунок електроприводів повороту ланок.

Розрахунок руху вантажу зводиться до визначення законів зміни його переміщень та швидкостей вздовж координатних осей основи маніпулятора x_0 , y_0 і z_0 (рис. 1). В результаті планування траєкторії визначаються закони зміни координат схвату відносно системи x_0 , y_0 , z_0 , а також закони зміни кутів повороту, кутових швидкостей та кутових прискорень ланок маніпулятора. Розрахунок електроприводів передбачає вибір приводних двигунів, синтез і аналіз систем автоматичного керування поворотами ланок.

Курсовий проект оформлюється у вигляді пояснювальної записки згідно з діючими стандартами оформлення конструкторської документації. Записка повинна містити вступ, детальний опис всіх етапів проектування, висновки і перелік літературних джерел.

2. РОЗРАХУНОК РУХУ ВАНТАЖУ У ВОДІ ВІДНОСНО ОСНОВИ МАНІПУЛЯТОРА

2.1. Розрахунок законів зміни координат вантажу відносно основи маніпулятора

Поворотні рухи судна у просторі описуються за допомогою корабельної системи кутів Ейлера. Якщо спочатку система координат x_c ; y_c ; z_c , що пов'язана з судном, співпадає з базовою системою x_6 ; y_6 ; z_6 (рис. 2), то будь-який поворот судна навколо початку базової системи координат представляється наступною послідовністю поворотів: на кут φ_0 навколо осі z_c ; на кут ψ_0 навколо осі y_c ; на кут θ_0 навколо осі x_c (при кожному повороті система x_c ; y_c ; z_c повертається разом із судном). Кути φ_0 , ψ_0 і θ_0 називаються відповідно кутами рискання, диференту і крену. Якщо коор-

динати довільної точки судна відносно його власної системи задані вектором ${}^c\mathbf{p}$, то координати цієї ж точки відносно базової системи ${}^6\mathbf{p}$ визначаються як сума добутку вектора ${}^c\mathbf{p}$ і матриці повороту ${}^6\mathbf{R}_c$ та вектора поступальних переміщень судна $\mathbf{p}_{\text{пост}}$:

$${}^6\mathbf{p} = {}^6\mathbf{R}_c \cdot {}^c\mathbf{p} + \mathbf{p}_{\text{пост}}, \quad (1)$$

де

$${}^6\mathbf{R}_c = \mathbf{R}_{z_c, \varphi_0} \cdot \mathbf{R}_{y_c, \psi_0} \cdot \mathbf{R}_{x_c, \theta_0};$$

$\mathbf{R}_{z_c, \varphi_0}$, $\mathbf{R}_{y_c, \psi_0}$ і $\mathbf{R}_{x_c, \theta_0}$ – матриці елементарних поворотів:

$$\mathbf{R}_{z_c, \varphi_0} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 & -\sin \varphi_0 & 0 \\ \sin \varphi_0 & \cos \varphi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R}_{y_c, \psi_0} = \begin{bmatrix} \cos \psi_0 & 0 & \sin \psi_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi_0 & 0 & \cos \psi_0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_{x_c, \theta_0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_0 & -\sin \theta_0 \\ 0 & \sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix}.$$

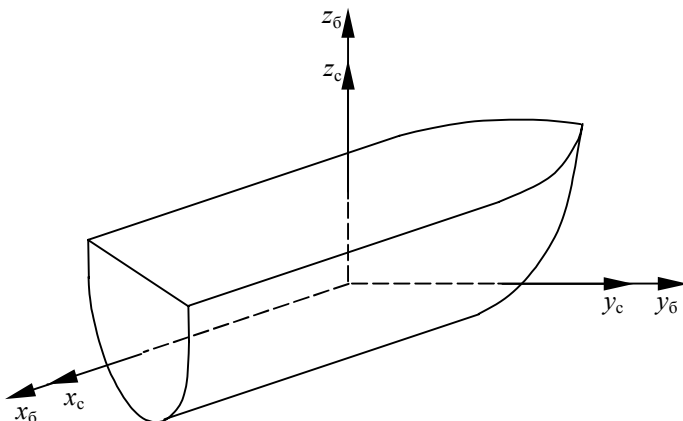


Рис. 2. Розташування координатних осей в нейтральному положенні судна

В даному випадку координати вантажу відносно базової системи ${}^6\mathbf{p}_в$ є заданими, а знайти треба його координати відносно судна ${}^6\mathbf{p}_c$. Враховуючи (1), запишемо:

$${}^c\mathbf{p}_B = ({}^6\mathbf{R}_C)^{-1} \cdot ({}^6\mathbf{p}_B - \mathbf{p}_{\text{пост}}) = ({}^6\mathbf{R}_C)^{-1} \cdot \mathbf{p}_{B,C}, \quad (2)$$

де $\mathbf{p}_{B,C} = (x_{B,C} \ y_{B,C} \ z_{B,C})^T$ – вектор, проведений із центра судна до вантажу у базовій системі координат; $({}^6\mathbf{R}_C)^{-1}$ – матриця зворотного повороту:

$$\begin{aligned} ({}^6\mathbf{R}_C)^{-1} &= \mathbf{R}_{x_c, -\theta_0} \cdot \mathbf{R}_{y_c, -\psi_0} \cdot \mathbf{R}_{z_c, -\varphi_0} = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \\ 0 & -\sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi_0 & 0 & -\sin \psi_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi_0 & 0 & \cos \psi_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 & \sin \varphi_0 & 0 \\ -\sin \varphi_0 & \cos \varphi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 \cos \psi_0 & \sin \varphi_0 \cos \psi_0 & -\sin \psi_0 \\ \cos \varphi_0 \sin \psi_0 \sin \theta_0 - & \sin \varphi_0 \sin \psi_0 \sin \theta_0 + & \cos \psi_0 \sin \theta_0 \\ -\sin \varphi_0 \cos \theta_0 & + \cos \varphi_0 \cos \theta_0 & \\ \cos \varphi_0 \sin \psi_0 \cos \theta_0 + & \sin \varphi_0 \sin \psi_0 \cos \theta_0 - & \cos \psi_0 \cos \theta_0 \\ + \sin \varphi_0 \sin \theta_0 & - \cos \varphi_0 \sin \theta_0 & \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Розкриваючи добуток (2), отримаємо:

$$\begin{aligned} {}^c\mathbf{p}_B &= \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 \cos \psi_0 & \sin \varphi_0 \cos \psi_0 & -\sin \psi_0 \\ \cos \varphi_0 \sin \psi_0 \sin \theta_0 - & \sin \varphi_0 \sin \psi_0 \sin \theta_0 + & \cos \psi_0 \sin \theta_0 \\ -\sin \varphi_0 \cos \theta_0 & + \cos \varphi_0 \cos \theta_0 & \\ \cos \varphi_0 \sin \psi_0 \cos \theta_0 + & \sin \varphi_0 \sin \psi_0 \cos \theta_0 - & \cos \psi_0 \cos \theta_0 \\ + \sin \varphi_0 \sin \theta_0 & - \cos \varphi_0 \sin \theta_0 & \end{bmatrix} \times \\ &\times \begin{bmatrix} x_{B,C} \\ y_{B,C} \\ z_{B,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{B,C} \cos \varphi_0 \cos \psi_0 + y_{B,C} \sin \varphi_0 \cos \psi_0 - z_{B,C} \sin \psi_0 \\ x_{B,C} \cdot (\cos \varphi_0 \sin \psi_0 \sin \theta_0 - \sin \varphi_0 \cos \theta_0) + \\ + y_{B,C} \cdot (\sin \varphi_0 \sin \psi_0 \sin \theta_0 + \cos \varphi_0 \cos \theta_0) + z_{B,C} \cos \psi_0 \sin \theta_0 \\ x_{B,C} \cdot (\cos \varphi_0 \sin \psi_0 \cos \theta_0 + \sin \varphi_0 \sin \theta_0) + \\ + y_{B,C} \cdot (\sin \varphi_0 \sin \psi_0 \cos \theta_0 - \cos \varphi_0 \sin \theta_0) + z_{B,C} \cos \psi_0 \cos \theta_0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Для визначення координат вантажу ${}^0\mathbf{p}_B = (x_B \ y_B \ z_B)^T$ у системі, зв'язаній з основою маніпулятора, необхідно відняти від координат $x_{B,C}, y_{B,C}$ і $z_{B,C}$ відповідні статичні координати основи маніпулятора x_{CT}, y_{CT} і z_{CT} . Тоді рівняння руху вантажу відносно основи маніпулятора можуть бути записані наступним чином:

$$x_B(t) = x_{B,C}(t) \cos \varphi_0(t) \cos \psi_0(t) + y_{B,C}(t) \sin \varphi_0(t) \cos \psi_0(t) - z_{B,C}(t) \sin \psi_0(t) - x_{CT}; \quad (3)$$

$$y_B(t) = x_{B,C}(t) \cdot (\cos \varphi_0(t) \sin \psi_0(t) \sin \theta_0(t) - \sin \varphi_0(t) \cos \theta_0(t)) + y_{B,C}(t) \cdot (\sin \varphi_0(t) \sin \psi_0(t) \sin \theta_0(t) + \cos \varphi_0(t) \cos \theta_0(t)) + z_{B,C}(t) \cos \psi_0(t) \sin \theta_0(t) - y_{CT}; \quad (4)$$

$$z_B(t) = x_{B,C}(t) \cdot (\cos \varphi_0(t) \sin \psi_0(t) \cos \theta_0(t) + \sin \varphi_0(t) \sin \theta_0(t)) + y_{B,C}(t) \cdot (\sin \varphi_0(t) \sin \psi_0(t) \cos \theta_0(t) - \cos \varphi_0(t) \sin \theta_0(t)) + z_{B,C}(t) \cos \psi_0(t) \cos \theta_0(t) - z_{CT}, \quad (5)$$

де $x_{B,C}(t) = x_{B,0}(t) - x_{\text{пост}}(t)$; $y_{B,C}(t) = y_{B,0}(t) - y_{\text{пост}}(t)$; $z_{B,C}(t) = z_{B,0}(t) - z_{\text{пост}}(t)$.

2.2. Розрахунок законів зміни швидкості вантажу відносно основи маніпулятора

Закони зміни швидкості вантажу відносно основи маніпулятора визначаються шляхом диференціювання за часом рівнянь (3)–(5):

$$v_{B,x}(t) = \frac{dx_B}{dt}; \quad v_{B,y}(t) = \frac{dy_B}{dt}; \quad v_{B,z}(t) = \frac{dz_B}{dt}.$$

3. ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ МАНІПУЛЯТОРА

3.1. Розв'язання зворотної задачі кінематики для контрольних точок траєкторії

При плануванні траєкторії будемо виходити з наступних міркувань:

- оскільки рух вантажу у воді є визначеним в системі координат, пов'язаний з рухомою основою маніпулятора, планування траєкторій можна здійснювати як для маніпулятора з нерухомою основою;

- після захвату вантажу схват повертається на борт уздовж тієї ж траєкторії, що і при русі з борту до вантажу, тому при плануванні траєкторії можна розглядати тільки рух схвату з борту судна до вантажу.

Контрольними точками траєкторії є: початкова точка, точка уходу, точка підходу і кінцева точка. Координати початкової точки x_{t0}, y_{t0} і z_{t0} і точки уходу x_{t1}, y_{t1} і z_{t1} задані у початкових даних. Координати кінцевої точки дорівнюють координатам вантажу в момент часу $t = t_3$:

$$x_{t3} = x_B(t_3); \quad y_{t3} = y_B(t_3); \quad z_{t3} = z_B(t_3).$$

Точка підходу повинна знаходитись на відстані Δz_{t23} над вантажем в момент часу $t = t_2$:

$$x_{t2} = x_B(t_2); \quad y_{t2} = y_B(t_2); \quad z_{t2} = z_B(t_2) + \Delta z_{t23}.$$

Для кожної контрольної точки необхідно розв'язати зворотну задачу кінематики, тобто визначити кути повороту ланок маніпулятора θ_1, θ_2 і θ_3 (рис. 3), при яких координати схвату $x; y; z$ з певною точністю співпадають з координатами заданої точки

$$x_t; y_t; z_t.$$

$$x = x_t \pm \delta x; \quad y = y_t \pm \delta y; \quad z = z_t \pm \delta z.$$

Похибки $\delta x, \delta y$ і δz повинні бути на порядок меншими за припустимі похибки позиціонування схвату:

$$\begin{aligned} \delta x &= 0,1 \Delta x_{\max}; & \delta y &= 0,1 \Delta y_{\max}; \\ \delta z &= 0,1 \Delta z_{\max}. \end{aligned}$$

Таким чином, вектор приєднаних координат $\theta = (\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3)^T$ повинен задовольняти наступній умові:

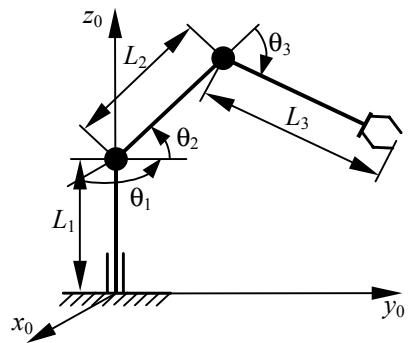


Рис. 3. Кінематична схема маніпулятора

$$(|x(\boldsymbol{\theta}) - x_t| < \delta x) \cap (|y(\boldsymbol{\theta}) - y_t| < \delta y) \cap (|z(\boldsymbol{\theta}) - z_t| < \delta z), \quad (6)$$

де координати схвату $x(\boldsymbol{\theta})$, $y(\boldsymbol{\theta})$ і $z(\boldsymbol{\theta})$ визначаються в процесі розв'язання прямої задачі кінематики для кінематичної схеми (рис. 3):

$$x(\boldsymbol{\theta}) = (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \cos \theta_1; \quad (7)$$

$$y(\boldsymbol{\theta}) = (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \sin \theta_1; \quad (8)$$

$$z(\boldsymbol{\theta}) = L_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3). \quad (9)$$

Для визначення необхідних кутів θ_1 , θ_2 і θ_3 найбільш зручно використовувати метод градієнтного спуску [4]. Суть даного методу зводиться до пошуку мінімуму функціоналу

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{2} \left((x(\boldsymbol{\theta}) - x_t)^2 + (y(\boldsymbol{\theta}) - y_t)^2 + (z(\boldsymbol{\theta}) - z_t)^2 \right) = \min \quad (10)$$

шляхом зміни координат вектора $\boldsymbol{\theta}$ (кутів повороту ланок) у циклі за наступним алгоритмом:

$$\theta_i := \theta_i - \gamma_i \frac{\partial J}{\partial \theta_i}, \quad (11)$$

де i – номер ланки; γ_i – ітераційний коефіцієнт. Враховуючи (7)–(11), алгоритм зміни кутів θ_1 , θ_2 і θ_3 для маніпулятора (рис. 3), визначається наступною послідовністю операцій присвоєння:

$$\theta_1 := \theta_1 - \gamma_1 \cdot \left((x - x_t) \frac{\partial x}{\partial \theta_1} + (y - y_t) \frac{\partial y}{\partial \theta_1} \right); \quad (12)$$

$$\theta_2 := \theta_2 - \gamma_2 \cdot \left((x - x_t) \frac{\partial x}{\partial \theta_2} + (y - y_t) \frac{\partial y}{\partial \theta_2} + (z - z_t) \frac{\partial z}{\partial \theta_2} \right); \quad (13)$$

$$\theta_3 := \theta_3 - \gamma_3 \cdot \left((x - x_t) \frac{\partial x}{\partial \theta_3} + (y - y_t) \frac{\partial y}{\partial \theta_3} + (z - z_t) \frac{\partial z}{\partial \theta_3} \right), \quad (14)$$

де

$$\frac{\partial x}{\partial \theta_1} = -(L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \sin \theta_1;$$

$$\frac{\partial x}{\partial \theta_2} = -(L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3)) \cos \theta_1;$$

$$\frac{\partial x}{\partial \theta_3} = -L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_1; \quad \frac{\partial y}{\partial \theta_1} = (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \cos \theta_1;$$

$$\frac{\partial y}{\partial \theta_2} = -(L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3)) \sin \theta_1; \quad \frac{\partial y}{\partial \theta_3} = -L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_1;$$

$$\frac{\partial z}{\partial \theta_2} = L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3); \quad \frac{\partial z}{\partial \theta_3} = L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3).$$

Таким чином, розв'язання зворотної задачі кінематики зводиться до наступного: спочатку кутам θ_1 , θ_2 і θ_3 присвоюються довільні значення, а потім вони змінюються в циклі за алгоритмом (12)–(14), доки не задовольнять умові (6). Ітераційні коефіцієнти γ_i впливають на швидкість та стійкість розрахунку. Якщо значення цих коефіцієнтів обрати занадто малими, процес розрахунку буде дуже довгим, а якщо великими – обчислювання буде розбіжним, і задачу взагалі не буде розв'язано. Тому, для кожного окремого випадку ітераційні коефіцієнти треба підбирати індивідуально.

Як правило, рішення зворотної задачі кінематики не є однозначним: існують декілька комбінацій значень кутів θ_1 , θ_2 і θ_3 , при яких схват знаходиться в одній і тій самій точці (рис. 4). Але майже завжди один з варіантів є зайвим, оскільки він не задовольняє вимогам фізичної реалізації (на рис. 4 варіант 2). Для того, щоб уникнути зайвих рішень, необхідно на початку розв'язання задачі задавати довільні значення кутів θ_1 , θ_2 і θ_3 якомога ближчими до очікуваних результатів. Після отримання рішення необхідно обов'язково накреслити кінема-

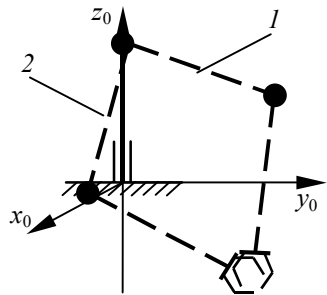


Рис. 4. Два варіанти розв'язання зворотної задачі кінематики для однієї точки траєкторії схвату

тичну схему маніпулятора у відповідному положенні і перевірити, чи підходить дана комбінація кутів з точки зору фізичної реалізації.

3.2. Визначення кутових швидкостей ланок в кінцевій точці траєкторії

Для того, щоб уникнути ударного зіткнення схвату і вантажу, їх швидкості в момент часу t_3 повинні співпадати:

$$v_x(t_3) = v_{B,x}(t_3); \quad v_y(t_3) = v_{B,y}(t_3); \quad v_z(t_3) = v_{B,z}(t_3). \quad (15)$$

Це забезпечується відповідними кутовими швидкостями ланок маніпулятора в кінцевій точці траєкторії $\omega_1(t_3)$, $\omega_2(t_3)$ і $\omega_3(t_3)$. Для їх визначення необхідно у рівняннях (7)–(9) представити величини x , y , z , θ_1 , θ_2 і θ_3 як функції часу, продиференціювати (7)–(9) за часом і, враховуючи, що

$$\begin{aligned} v_x(t) &= \frac{\partial x}{\partial t}; \quad v_y(t) = \frac{\partial y}{\partial t}; \quad v_z(t) = \frac{\partial z}{\partial t}; \\ \omega_1(t) &= \frac{\partial \theta_1}{\partial t}; \quad \omega_2(t) = \frac{\partial \theta_2}{\partial t}; \quad \omega_3(t) = \frac{\partial \theta_3}{\partial t}, \end{aligned}$$

розв'язати отримані рівняння відносно $\omega_1(t)$, $\omega_2(t)$ і $\omega_3(t)$ для $t = t_3$. Після диференціювання отримаємо наступні рівняння:

$$\begin{aligned} v_x(t) &= -\omega_1(t)(L_2 \cos \theta_2(t) + L_3 \cos(\theta_2(t) + \theta_3(t))) \sin \theta_1(t) - \\ &\quad - \omega_2(t)(L_2 \sin \theta_2(t) + L_3 \sin(\theta_2(t) + \theta_3(t))) \cos \theta_1(t) - \\ &\quad - \omega_3(t)L_3 \sin(\theta_2(t) + \theta_3(t)) \cos \theta_1(t), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} v_y(t) &= \omega_1(t)(L_2 \cos \theta_2(t) + L_3 \cos(\theta_2(t) + \theta_3(t))) \cos \theta_1(t) - \\ &\quad - \omega_2(t)(L_2 \sin \theta_2(t) + L_3 \sin(\theta_2(t) + \theta_3(t))) \sin \theta_1(t) - \\ &\quad - \omega_3(t)L_3 \sin(\theta_2(t) + \theta_3(t)) \sin \theta_1(t), \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} v_z(t) &= \omega_2(t)(L_2 \cos \theta_2(t) + L_3 \cos(\theta_2(t) + \theta_3(t))) + \\ &\quad + \omega_3(t)L_3 \cos(\theta_2(t) + \theta_3(t)). \end{aligned} \quad (18)$$

Підставивши в систему рівнянь (16)–(18) $t = t_3$, перепишемо її в матричному вигляді:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{\Omega} = \mathbf{V}, \quad (19)$$

де $\mathbf{A}$ – матриця коефіцієнтів системи рівнянь (16)–(18) при $t = t_3$; $\mathbf{V} = (v_x(t_3) \ v_y(t_3) \ v_z(t_3))^T$ – вектор швидкості схвату при $t = t_3$, який визначається за формулою (15); $\mathbf{\Omega} = (\omega_1(t_3) \ \omega_2(t_3) \ \omega_3(t_3))^T$. Виразивши з (19) $\mathbf{\Omega}$, отримаємо необхідні значення кутових швидкостей ланок:

$$\mathbf{\Omega} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{V}. \quad (20)$$

3.3. Інтерполяція законів зміни кутів повороту ланок маніпулятора

На попередніх етапах розрахунку було знайдено кути повороту ланок маніпулятора в контрольних точках траєкторії $\boldsymbol{\theta}(t_0)$, $\boldsymbol{\theta}(t_1)$, $\boldsymbol{\theta}(t_2)$ і $\boldsymbol{\theta}(t_3)$ і кутові швидкості в кінцевій точці $\omega_1(t_3)$, $\omega_2(t_3)$ і $\omega_3(t_3)$. Крім цього відомо, що швидкість схвату в початковій точці, а також його прискорення в початковій та кінцевій точках траєкторії повинні дорівнювати нулю. Це означає, що кутові швидкості ланок у початковій точці $\omega_1(t_0)$, $\omega_2(t_0)$ і $\omega_3(t_0)$, а також їх кутові прискорення в початковій $\varepsilon_1(t_0)$, $\varepsilon_2(t_0)$ і $\varepsilon_3(t_0)$ та кінцевій $\varepsilon_1(t_3)$, $\varepsilon_2(t_3)$ і $\varepsilon_3(t_3)$ точках повинні також бути нульовими. На основі даної інформації необхідно знайти функції, які описують зміну в часі кутів повороту ланок θ_1 , θ_2 і θ_3 під час руху схвату від початкової до кінцевої точки траєкторії.

Для інтерполяції залежностей, які задані великим числом точок, або для яких сформульовано багато додаткових умов (задані значення першої та другої похідних у точках), звичайно використовуються сплайн-функції [4]. Сплайн-функція представляє собою послідовність поліномів низького ступеня (поліноміальних сплайнів), кожен з яких описує її поведінку на певному інтервалі значень аргументу. В залежності від кількості інтервалів розбиття області значень аргументу та порядків інтерполюючих поліномів існує багато різновидів сплайн-функцій. Для інтерполяції законів зміни кутів повороту ланок маніпулятора будемо використовувати функцію "4 – 3 – 4". Тоді закон зміни кута повороту i -ї ланки прийме наступний вигляд:

$$\theta_i(t) = \begin{cases} a14_i \cdot (t-t_0)^4 + a13_i \cdot (t-t_0)^3 + a12_i \cdot (t-t_0)^2 + \\ + a11_i \cdot (t-t_0) + a10_i \text{ при } t_0 \leq t \leq t_1; \\ a23_i \cdot (t-t_1)^3 + a22_i \cdot (t-t_1)^2 + \\ + a21_i \cdot (t-t_1) + a20_i \text{ при } t_1 \leq t \leq t_2; \\ a34_i \cdot (t-t_2)^4 + a33_i \cdot (t-t_2)^3 + a32_i \cdot (t-t_2)^2 + \\ + a31_i \cdot (t-t_2) + a30_i \text{ при } t_2 \leq t \leq t_3, \end{cases} \quad (21)$$

де коефіцієнти поліномів визначаються шляхом розв'язання рівнянь, складених на основі умов проходження через контрольні точки, забезпечення необхідних значень першої та другої похідних функції у крайніх точках, а також умов неперервності першої та другої похідних в точках сполучень сплайнів:

$$a10_i = \theta_i(t_0); \quad a20_i = \theta_i(t_1); \quad a30_i = \theta_i(t_2); \quad a11_i = 0; \quad a12_i = 0;$$

$$(a14_i \quad a13_i \quad a23_i \quad a22_i \quad a21_i \quad a34_i \quad a33_i \quad a32_i \quad a31_i)^T = \mathbf{C}^{-1} \cdot \mathbf{F}_i;$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \Delta t_1^4 & \Delta t_1^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4\Delta t_1^3 & 3\Delta t_1^2 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 12\Delta t_1^2 & 6\Delta t_1 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t_2^3 & \Delta t_2^2 & \Delta t_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3\Delta t_2^2 & 2\Delta t_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 6\Delta t_2 & 2 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta t_3^4 & \Delta t_3^3 & \Delta t_3^2 & \Delta t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4\Delta t_3^3 & 3\Delta t_3^2 & 2\Delta t_3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12\Delta t_3^2 & 6\Delta t_3 & 2 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{F}_i = [(\theta_i(t_1) - \theta_i(t_0)) \quad 0 \quad 0 \quad (\theta_i(t_2) - \theta_i(t_1)) \quad 0 \quad 0 \quad (\theta_i(t_3) - \theta_i(t_2)) \quad \omega_i(t_3) \quad 0]^T;$$

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0; \quad \Delta t_2 = t_2 - t_1; \quad \Delta t_3 = t_3 - t_2.$$

На основі рівняння (21) необхідно побудувати часові діаграми кутів повороту ланок і перевірити, чи не виходять вони за межі припустимих значень.

3.4. Визначення максимальних кутових швидкостей та прискорень ланок маніпулятора

Для того, щоб отримати закони зміни в часі кутових швидкостей та прискорень ланок маніпулятора необхідно взяти відповідно першу і другу похідні від рівняння (21):

$$\omega_i(t) = \begin{cases} 4a14_i \cdot (t-t_0)^3 + 3a13_i \cdot (t-t_0)^2 + 2a12_i \cdot (t-t_0) + a11_i & \text{при } t_0 \leq t \leq t_1; \\ 3a23_i \cdot (t-t_1)^2 + 2a22_i \cdot (t-t_1) + a21_i & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2; \\ 4a34_i \cdot (t-t_2)^3 + 3a33_i \cdot (t-t_2)^2 + 2a32_i \cdot (t-t_2) + a31_i & \text{при } t_2 \leq t \leq t_3; \end{cases}$$

$$\varepsilon_i(t) = \begin{cases} 12a14_i \cdot (t-t_0)^2 + 6a13_i \cdot (t-t_0) + 2a12_i & \text{при } t_0 \leq t \leq t_1; \\ 6a23_i \cdot (t-t_1) + 2a22_i & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2; \\ 12a34_i \cdot (t-t_2)^2 + 6a33_i \cdot (t-t_2) + 2a32_i & \text{при } t_2 \leq t \leq t_3. \end{cases}$$

При визначенні максимальних значень кутових швидкостей та прискорень напрямком обертання не враховується, тому величини $\omega_{\max i}$ та $\varepsilon_{\max i}$ визначаються як максимальні значення модулів величин ω_i та ε_i :

$$\omega_{\max i} = \max(|\omega_i|), \quad \varepsilon_{\max i} = \max(|\varepsilon_i|).$$

3.5. Розрахунок руху схвату і побудова його траєкторії

Закони зміни в часі координат схвату визначаються за допомогою (7)–(9), де θ_1 , θ_2 і θ_3 змінюються згідно (21). Враховуючи, що рух вантажу у воді визначається рівняннями (3)–(5), необхідно побудувати в одній системі координат графіки функцій $x(t)$ і $x_b(t)$, в другій $y(t)$ і $y_b(t)$,

а в третій $z(t)$ і $z_B(t)$ і перевірити плавність підходу схвату до вантажу: в точці t_3 дотичні до графіків повинні співпадати. Після цього будують траєкторію схвату в трьох проекціях: вигляд з корми судна $z(y)$, вигляд зліва $z(x)$ і вигляд зверху – $x(y)$.

4. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПОВОРОТУ ЛАНОК

При виконанні курсового проекту кожен електропривод слід розраховувати окремо: спочатку електропривод повороту першої ланки, потім другої, потім третьої (в подальшому будемо називати їх відповідно як перший електропривод, другий і третій). При цьому розрахунок кожного електроприводу повинен складатися з наступних етапів: визначення максимального моменту навантаження; вибір приводного двигуна; побудова структурної схеми системи керування; синтез бажаної передавальної функції системи керування; синтез передавальних функцій функціональних блоків; розрахунок і побудова перехідної характеристики.

4.1. Визначення максимальних моментів навантаження

Кожен електропривод повинен зберігати свою працездатність при найбільш важких збігах обставин: коли статичний і динамічний моменти, що діють на дану ланку, одночасно приймають максимальні значення і співпадають за напрямками. Тому максимальний момент навантаження визначається як сума максимальних значень статичного і динамічного моментів:

$$M_{\text{н.макс}} = M_{\text{н.ст.макс}} + M_{\text{н.дин.макс}}.$$

Для першого електроприводу максимальний статичний момент навантаження виникає при $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta$, максимальному куті крену θ_0 і наявності вантажу у схваті:

$$M_{\text{н.ст.макс}} = g \sin \theta_{0 \text{ макс}} \cdot \left(\frac{1}{2} L_2 m_2 + \left(L_2 + \frac{1}{2} L_3 \right) m_3 + (L_2 + L_3) m_B \right),$$

де g – прискорення вільного падіння; $\theta_{0 \text{ макс}}$ – максимальне значення кута крену, задане у початкових даних. Максимальний динамічний момент має місце при такому ж положенні маніпулятора, якщо при цьому кутові прискорення судна навколо осі x_c і першої ланки навколо z_0 приймають

максимальні значення, а створені ними сили інерції діють на схват маніпулятора в одному напрямку:

$$M_{\text{н.дин.мах}} = \epsilon_{\text{мах 1}} \cdot (J_1 + J_2 + (L_2^2 + L_2 L_3) m_3 + J_3 + (L_2 + L_3)^2 m_{\text{в}}) + \epsilon_{\theta \text{ мах}} \cdot (z_{\text{ст}} + L_1) \left(\frac{1}{2} L_2 m_2 + \left(L_2 + \frac{1}{2} L_3 \right) m_3 + (L_2 + L_3) m_{\text{в}} \right),$$

де $J_1 = \frac{1}{2} m_1 r_1^2$; $J_2 = \frac{1}{3} m_2 L_2^2$; $J_3 = \frac{1}{3} m_3 L_3^2$ – моменти інерції ланок відносно власних осей обертання; $\epsilon_{\theta \text{ мах}}$ – максимальне прискорення кута крену судна. Якщо кут крену змінюється за синусоїдальним законом з частотою ω_{θ} :

$$\epsilon_{\theta \text{ мах}} = \omega_{\theta}^2 \theta_{0 \text{ мах}}.$$

Для другого електроприводу максимальний статичний момент навантаження виникає при $\theta_0 = \theta_2 = \theta_3 = 0$ і наявності вантажу у схваті:

$$M_{\text{н.ст.мах}} = g \cdot \left(\frac{1}{2} L_2 m_2 + \left(L_2 + \frac{1}{2} L_3 \right) m_3 + (L_2 + L_3) m_{\text{в}} \right).$$

Максимальний динамічний момент має місце, якщо при $\theta_2 = \theta_3 = 0$ і наявності вантажу у схваті кутові прискорення $\epsilon_{\theta \text{ мах}}$, $\epsilon_{\text{мах 1}}$ і $\epsilon_{\text{мах 2}}$ направлені в один бік і приймають максимальні значення:

$$M_{\text{н.дин.мах}} = (\epsilon_{\theta \text{ мах}} + \epsilon_{\text{мах 2}}) (J_2 + (L_2^2 + L_2 L_3) m_3 + J_3 + (L_2 + L_3)^2 m_{\text{в}}) + \epsilon_{\text{мах 3}} L_2 L_3 \cdot \left(\frac{1}{2} m_3 + m_{\text{в}} \right).$$

Для третього електроприводу максимальний статичний момент навантаження виникає при $\theta_0 + \theta_2 + \theta_3 = 0$ і наявності вантажу у схваті:

$$M_{\text{н.ст.мах}} = L_3 g \cdot \left(\frac{1}{2} m_3 + m_{\text{в}} \right).$$

Максимальний динамічний момент має місце, якщо при $\theta_3 = 0$ і на-

явності вантажу у схваті кутові прискорення $\varepsilon_{\theta \max}$, $\varepsilon_{\max 2}$ і $\varepsilon_{\max 3}$ направлені в один бік і приймають максимальні значення:

$$M_{\text{н.дин.мах}} = (\varepsilon_{\theta \max} + \varepsilon_{\max 2} + \varepsilon_{\max 3}) (J_3 + L_3^2 m_{\text{в}}).$$

4.2. Вибір приводних двигунів

Для електричних слідкуючих приводів найбільш розповсюджені двигуни постійного струму з незалежним збудженням [1]. Попередній вибір двигуна здійснюють в залежності від потрібної потужності:

$$P_{\text{тр}} = k_3 \omega_{\max} M_{\text{н.мах}},$$

де $k_3 = 1,2 \dots 2,5$ – коефіцієнт запасу, який враховує можливе збільшення потрібної потужності для подолання сил інерції двигуна та редуктора, а також ККД редуктора. За потрібною потужністю по каталогу обирають близький за потужністю двигун. Для нього з каталогу виписують номінальну кутову швидкість обертання вала $\omega_{\text{д.ном}}$, номінальний момент $M_{\text{д.ном}}$ і момент інерції ротора $J_{\text{д}}$. В залежності від номінальної швидкості обертання ротора двигуна і максимальної швидкості повороту ланки маніпулятора визначають необхідне передавальне число редуктора:

$$i_{\text{р}} = \frac{\omega_{\text{д.ном}}}{\omega_{\max}}.$$

Після цього обраний двигун перевіряють за потрібним моментом:

$$M_{\text{тр}} = (J_{\text{д}} + J'_{\text{р}}) i_{\text{р}} \varepsilon_{\max} + \frac{1}{i_{\text{р}} \eta_{\text{р}}} M_{\text{н.мах}},$$

де $J'_{\text{р}} = (0,05 \dots 0,25) J_{\text{д}}$ – момент інерції редуктора, приведений до валу двигуна; $\eta_{\text{р}}$ – ККД редуктора. Якщо $M_{\text{д.ном}} < M_{\text{тр}}$, обирають двигун більшої потужності і повторюють перевірку. Якщо $M_{\text{д.ном}} > M_{\text{тр}}$, виконують перевірку для двигуна меншої потужності. Остаточний вибір двигуна вважається правильним, якщо його номінальний момент більший за потрібний, а номінальний момент найближчого за каталогом двигуна мен-

шої потужності – менший за потрібний. Для остаточно обраного двигуна виписують всі дані, наведені в каталогах.

Каталоги для вибору двигунів постійного струму наведені в [3] (таблиці 2.3 і 2.6).

4.3. Побудова структурних схем систем керування електроприводами

Функціональна схема електричного слідкуючого приводу зображена на рис. 5. На схемі змінна $U_{\text{пр}}$ – величина, пропорційна програмному значенню кута повороту $\theta_{\text{пр}}$:

$$U_{\text{пр}} = k_{\text{д.п}} \theta_{\text{пр}},$$

де $k_{\text{д.п}}$ – коефіцієнт передачі датчика кута повороту. Функціональні блоки ФБ1 та ФБ2 включають в себе узгоджуючі, підсилюючі та коригуючі пристрої. Структура і параметри системи "підсилювач потужності – двигун – редуктор – навантаження" є фіксованими, тому дана частина слідкуючої системи називається незмінною частиною. Структура і параметри функціональних блоків ФБ1 та ФБ2 визначаються в результаті синтезу системи.

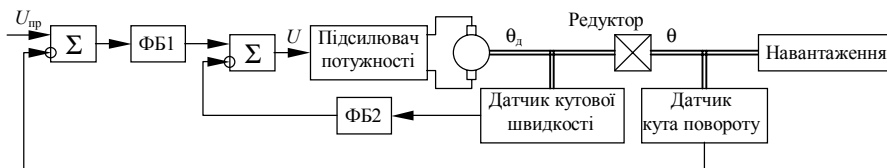


Рис. 5. Функціональна схема системи керування електроприводом повороту ланки маніпулятора

Динамічні властивості незмінної частини системи описуються її передавальними функціями за вхідною напругою $G_U(p)$ і за моментом навантаження $G_M(p)$, які дорівнюють:

$$G_U(p) = \frac{k_{\text{п.п}} k_{\text{д}} / i_{\text{р}}}{p \cdot (T_{\text{е}} T_{\text{м}} p^2 + T_{\text{м}} p + 1)}; \quad G_M(p) = \frac{k_{\text{м}}}{i_{\text{р}}^2} \cdot \frac{(T_{\text{е}} p + 1)}{p \cdot (T_{\text{е}} T_{\text{м}} p^2 + T_{\text{м}} p + 1)},$$

де $k_{п.п}$ – коефіцієнт передачі підсилювача потужності; $k_d = 1/c_e$ – коефіцієнт передачі двигуна за напругою; $k_m = R_y/(c_e c_m)$ – коефіцієнт передачі двигуна за моментом; $T_e = L_y/R_y$ – електромагнітна постійна часу кола якоря; $T_m = (J_d + J'_p + J_n/i_p^2)R_y/(c_e c_m)$ – електромеханічна постійна часу незмінної частини; c_e – коефіцієнт проти-ЕРС двигуна; c_m – коефіцієнт моменту двигуна; R_y – активний опір обмотки якоря; L_y – індуктивність обмотки якоря; J_n – момент інерції навантаження.

Оскільки момент інерції навантаження J_n змінюється під час руху маніпулятора, постійна часу T_m є змінним параметром, причому мінімальному значенню J_n відповідає мінімальне T_m , а максимальному J_n – максимальне T_m . Мінімальне та максимальне значення моменту інерції навантаження $J_{n.min}$ та $J_{n.max}$ для першого електроприводу визначаються за наступними формулами:

$$J_{n.min} = J_1 + J_3 \sin^2 \theta_{3.min};$$

$$J_{n.max} = J_1 + J_2 + (L_2^2 + L_2 L_3) m_3 + J_3 + (L_2 + L_3)^2 m_B,$$

де $\theta_{3.min}$ – мінімальне значення кута θ_3 .

Для другого електроприводу:

$$J_{n.min} = J_2 + \left(\frac{1}{3} L_3^2 + L_2 L_3 \cos \theta_{3.min} + L_2^2 \right) m_3;$$

$$J_{n.max} = J_2 + (L_2^2 + L_2 L_3) m_3 + J_3 + (L_2 + L_3)^2 m_B.$$

Для третього електроприводу:

$$J_{n.min} = J_3; \quad J_{n.max} = J_3 + L_3^2 m_B.$$

Структурна схема системи керування наведена на рис. 6. На схемі

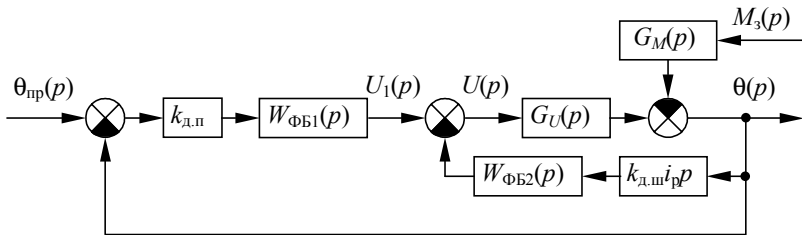


Рис. 6. Структурна схема системи керування електроприводом повороту ланки маніпулятора

прийнятті наступні позначення: $W_{\text{ФБ1}}(p)$ і $W_{\text{ФБ2}}(p)$ – передавальні функції функціональних блоків ФБ1 і ФБ2; $M_3(p)$ – збурне діяння (момент сили, діючий з боку навантаження); $k_{\text{д.ш}}$ – коефіцієнт передачі датчика швидкості.

4.4. Синтез бажаних передавальних функцій систем керування електроприводами

Для функціонування слідкуючого приводу необхідно, щоб замкнена система була стійкою, а рівень похибок при відпрацюванні припустимих програмних діянь не перевищував заданого. Додаткові вимоги встановлюють на характер перехідних процесів у системі.

Згідно з типовими режимами руху навантаження обирають припустимі програмні діяння:

1) обертання вала навантаження з постійною кутовою швидкістю $\dot{\theta}$, яка не перевищує заданої максимальної ω_{max} , з урахуванням необхідності подолання опору збурного моменту M_3 , який не перевищує заданого $M_{3 \text{ max}}$;

2) зміна кута повороту вала навантаження за гармонічним законом $\theta_{\text{пр}} = \Theta_{\text{пр}} \sin(\omega t)$ так, щоб в будь-який момент часу кутова швидкість $\dot{\theta}_{\text{пр}}$ не перевищувала заданої ω_{max} , а кутове прискорення $\ddot{\theta}_{\text{пр}}$ не перевищувало заданого ε_{max} .

Оцінка рівня похибки, викликаной цими діяннями, здійснюється з урахуванням тільки похибки в усталеному режимі. Для того, щоб при діянні першого типу усталена похибка не збільшувалася до нескінченності, система повинна бути астатичною. Це означає, що бажана передавальна функція розімкненої системи повинна мати наступний вигляд:

$$W_{\text{ж}}(p) = \frac{k}{p} N(p),$$

де k – коефіцієнт підсилення розімкненої системи; $N(p)$ – дробно-раціональна функція, що задовольняє умові $N(0) = 1$.

Рівень усталеної похибки при діянні першого типу повністю визначається коефіцієнтом підсилення розімкненої системи:

$$e_{\text{уст}} = e_{\text{уст.шв}} + e_{\text{уст.м}},$$

де $e_{\text{уст.шв}} = \dot{\theta}_{\text{пр}} / k$ – швидкісна складова похибки; $\epsilon_{\text{уст.м}} = k_{\text{м}} M_3 / (k i_{\text{р}}^2)$ – моментна складова похибки. Максимальне значення сумарної похибки дорівнює:

$$e_{\text{уст.мах}} = \frac{1}{k} \left(\omega_{\text{мах}} + \frac{k_{\text{м}} M_{3.\text{мах}}}{i_{\text{р}}^2} \right),$$

де $M_{3.\text{мах}}$ визначається як максимальний момент навантаження мінус момент, зумовлений силою інерції від прискорення, створюваного даним приводом:

$$M_{3.\text{мах}} = M_{\text{н.мах}} - J_{\text{н.мах}} \epsilon_{\text{мах}}.$$

Оскільки значення $e_{\text{уст.мах}}$ не повинно перевищувати припустимого рівня $\delta_{\text{мах}}$, найменше значення коефіцієнту підсилення розімкненої системи визначається наступним рівнянням:

$$k = \frac{1}{\delta_{\text{мах}}} \left(\omega_{\text{мах}} + \frac{k_{\text{м}} M_{3.\text{мах}}}{i_{\text{р}}^2} \right),$$

де припустимий рівень похибки кутового переміщення $\delta_{\text{мах}}$ визначається із геометричних співвідношень в залежності від припустимих похибок позиціонування схвату $\Delta x_{\text{мах}}$, $\Delta y_{\text{мах}}$ і $\Delta z_{\text{мах}}$, які задані у початкових даних. Формули для визначення $\delta_{\text{мах}}$ наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

№ ланки	1	2	3
$\delta_{\text{мах}}$	$\frac{\min(\Delta x_{\text{мах}}, \Delta y_{\text{мах}})}{L_2 + L_3}$	$\frac{\min(\Delta x_{\text{мах}}, \Delta y_{\text{мах}}, \Delta z_{\text{мах}})}{L_2 + L_3}$	$\frac{\min(\Delta x_{\text{мах}}, \Delta y_{\text{мах}})}{L_3}$

При діянні другого типу кутове переміщення, швидкість та прискорення змінюються за наступними законами:

$$\theta_{\text{пр}}(t) = \Theta_{\text{пр}} \sin(\omega t); \quad \dot{\theta}_{\text{пр}}(t) = \Theta_{\text{пр}} \omega \cos(\omega t);$$

$$\ddot{\theta}_{\text{пр}}(t) = -\Theta_{\text{пр}} \omega^2 \sin(\omega t).$$

Це діяння призводить до появи гармонічної складової похибки, амплітудне значення якої визначається наступним рівнянням:

$$e_r(\omega) = \frac{\Theta_{\text{пр}}}{|1 + W_{\text{ж}}(j\omega)|}.$$

Умову точності відробки гармонічних діянь можна сформулювати наступним чином:

$$\frac{\Theta_{\text{пр}}}{|1 + W_{\text{ж}}(j\omega)|} \leq \delta_{\text{max}} \quad \text{при} \quad \Theta_{\text{пр}} \leq \tilde{\Theta} \text{ і } \omega \leq \tilde{\omega}, \quad (22)$$

де максимальні значення амплітуди $\tilde{\Theta}$ і частоти $\tilde{\omega}$ визначаються наступними рівняннями:

$$\tilde{\Theta} = \frac{\omega_{\text{max}}^2}{\epsilon_{\text{max}}}; \quad \tilde{\omega} = \frac{\epsilon_{\text{max}}}{\omega_{\text{max}}}.$$

Враховуючи, що при низьких частотах $|W_{\text{ж}}(j\omega)| \gg 1$, одиницею в нерівності (22) можна знехтувати. Тоді умову (22) можна переписати в наступному вигляді:

$$|W_{\text{ж}}(j\omega)| \geq \frac{\tilde{\Theta}}{\delta_{\text{max}}} \quad \text{при} \quad \omega \leq \tilde{\omega}. \quad (23)$$

Геометричний сенс умови (23) полягає в тому, що ЛАЧХ розімкненої системи не повинна заходити в прямокутну область (рис. 7), вершина якої має координати:

$$\omega = \tilde{\omega}; \quad L(\omega) = 20 \lg \frac{\tilde{\Theta}}{\delta_{\text{max}}}.$$

Таким чином, виходячи з вимог точності відробки двох типових сигналів, отримано умови, яких достатньо для побудови низькочастотної ділянки бажаної ЛАЧХ системи. Запишемо рівняння першої низькочастотної асимптоти бажаної ЛАЧХ:

$$L(\omega) = 20 \lg \frac{k}{\omega}. \quad (24)$$

Проведемо другу низькочастотну асимптоту під нахилом -40 дБ/дек через точку $(\tilde{\omega}; L(\tilde{\omega}))$ (рис. 7):

$$L(\omega) = L(\tilde{\omega}) - 40 \lg \frac{\omega}{\tilde{\omega}}. \quad (25)$$

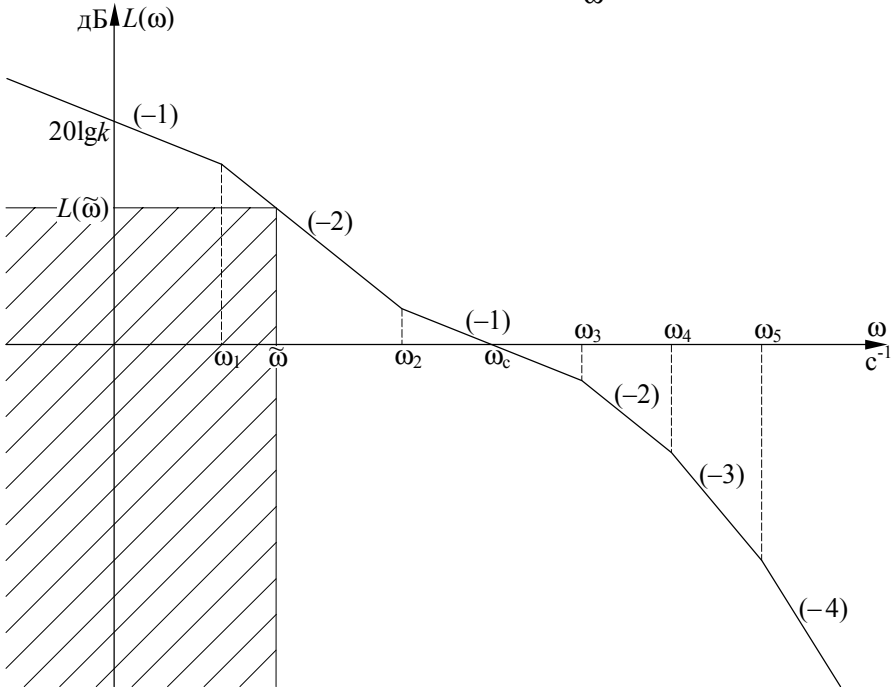


Рис. 7. Бажана ЛАЧХ системи керування поворотом ланки маніпулятора

Підставивши $\omega = \tilde{\omega}$ і прирівнявши (25) до (24), знайдемо першу спрягаючу частоту ω_1 :

$$\omega_1 = \frac{\varepsilon_{\max}}{k\delta_{\max}}.$$

Друга і третя спрягаючі частоти ω_2 і ω_3 визначаються за умови забезпечення стійкості замкненої системи і бажаної якості перехідного процесу. З критерію стійкості Найквіста і властивостей асимптотичних ЛАЧХ виходить, що запас стійкості виявиться достатнім, якщо ЛАЧХ пройде через нульовий рівень з нахилом -20 дБ/дек, причому тривалість ділян-

ки з таким нахилом займе не менше однієї декади, а сама ділянка розташується приблизно симетрично відносно частоти зрізу. В цьому випадку перегулювання в системі не буде перевищувати 20..30%, а час перехідного процесу можна оцінити за формулою:

$$t_{\pi} = (1..2) \frac{2\pi}{\omega_c},$$

де ω_c – частота зрізу.

Запишемо рівняння середньочастотної асимптоти бажаної ЛАЧХ:

$$L(\omega) = -20 \lg \frac{\omega}{\omega_c}. \quad (26)$$

Підставивши $\omega = \omega_2$ і прирівнявши (26) до (25), отримаємо:

$$\omega_2 = \frac{\varepsilon_{\max}}{\delta_{\max} \omega_c}.$$

Відношення ω_c / ω_2 обирається в межах $\alpha = 2..5$. Тоді

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\max}}{\delta_{\max} \alpha}}.$$

Оскільки середньочастотна ділянка повинна займати не менше однієї декади, частоту ω_3 обирають в 10 разів більшою, ніж ω_2 :

$$\omega_3 = 10\omega_2.$$

Поведінка ЛАЧХ за частотою ω_3 не впливає на точність та стійкість системи, однак з метою захисту від впливу високочастотних перешкод раціонально забезпечити швидке падіння коефіцієнту підсилення на високих частотах. Для цього вводять додаткові зломи асимптотичної ЛАЧХ на частотах ω_4 і ω_5 :

$$\omega_4 = \alpha\omega_3; \quad \omega_5 = \alpha\omega_4.$$

Побудована асимптотична бажана ЛАЧХ (рис. 7) визначає бажану передавальну функцію розімкненої системи:

$$W_{\text{ж}}(p) = \frac{k}{p} \frac{T_2 p + 1}{(T_1 p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)(T_5 p + 1)}, \quad (27)$$

де $T_1 = k\delta_{\text{max}} / \varepsilon_{\text{max}}$; $T_2 = \sqrt{\delta_{\text{max}} \alpha / \varepsilon_{\text{max}}}$; $T_3 = 0,1T_2$; $T_4 = T_3 / \alpha$; $T_5 = T_4 / \alpha$.

4.5. Синтез передавальних функцій функціональних блоків

Передавальні функції функціональних блоків визначають, виходячи з умови, що вся система в цілому повинна мати такі самі, або майже такі самі властивості, що й бажана.

Згідно структурній схемі (рис. 6):

$$W(p) = k_{\text{д.п}} k_1 W_1(p) \frac{G_U(p)}{1 + k_{\text{д.ш}} k_2 W_2(p) G_U(p) i_p p}, \quad (28)$$

де k_1 і k_2 – відповідно коефіцієнти підсилення функціональних блоків ФБ1 і ФБ2; $W_1(p) = W_{\text{ФБ1}}(p)/k_1$; $W_2(p) = W_{\text{ФБ2}}(p)/k_2$. Передатні функції $W_1(p)$ і $W_2(p)$ визначають структуру функціональних блоків і задовольняють умові $W_1(0) = W_2(0) = 1$.

Коефіцієнт підсилення розімкненої системи:

$$k = \frac{k_{\text{д.п}} k_1 k_{\text{п.п}} k_{\text{д}} / i_p}{1 + k_{\text{д.ш}} k_2 k_{\text{п.п}} k_{\text{д}}}.$$

Введемо позначення:

$$k_1^* = k_{\text{д.п}} k_1 k_{\text{п.п}}; \quad k_2^* = k_{\text{д.ш}} k_2 k_{\text{п.п}};$$

$$G^*(p) = G_U(p) / k_{\text{п.п}} = \frac{k_{\text{д}} / i_p}{p \cdot (T_{\text{е}} T_{\text{м}} p^2 + T_{\text{м}} p + 1)}; \quad (29)$$

$$G_1(p) = \frac{G^*(p)}{1 + k_2^* W_2(p) G^*(p) i_p p}. \quad (30)$$

Тоді передавальна функція розімкненої системи прийме наступний вигляд:

$$W(p) = k_1^* W_1(p) G_1(p). \quad (31)$$

Структуру і параметри функціональних блоків визначають у наступній послідовності:

1) задають вигляд передавальної функції $W_2(p)$;

2) зафіксувавши постійну часу T_M на максимальному значенні, прирівнюють $W(p)$ до $W_{ж}(p)$ при $T_M = T_{M,max}$ і визначають $W_1(p)$, k_1^* , k_2^* та параметри функції $W_2(p)$;

3) враховуючи відомі значення коефіцієнтів $k_{д,п}$, $k_{д,ш}$ і $k_{п,п}$, визначають k_1 і k_2 .

Отримані таким чином структура і параметри функціональних блоків забезпечують рівність $W(p) = W_{ж}(p)$ тільки при $T_M = T_{M,max}$. Те, наскільки властивості системи будуть близькими до бажаних при $T_M \neq T_{M,max}$, залежить від вибору структури блоку ФБ2, тобто вигляду передавальної функції $W_2(p)$.

Оберемо

$$W_2(p) = \tau p + 1. \quad (32)$$

Тоді, згідно (29) і (30),

$$G_1(p) = \frac{k^*}{p \cdot \left(\frac{T_e T_{M,max}}{1 + k_2^* k_d} p^2 + \frac{T_M + k_2^* k_d \tau}{1 + k_2^* k_d} p + 1 \right)},$$

де $k^* = \frac{k_d / i_p}{1 + k_2^* k_d}$. Враховуючи (27) і (31), для забезпечення рівності

$W(p) = W_{ж}(p)$ при $T_M = T_{M,max}$ значення k_2^* і τ повинні бути такими, щоб знаменник передавальної функції $G_1(p)$ можна було привести до вигляду $p \cdot (T_3 p + 1)(T_4 p + 1)$:

$$\begin{cases} \frac{T_e T_{M,max}}{1 + k_2^* k_d} = T_3 T_4; \\ \frac{T_{M,max} + k_2^* k_d \tau}{1 + k_2^* k_d} = T_3 + T_4. \end{cases}$$

Розв'язавши цю систему, отримаємо:

$$k_2^* = \frac{1}{k_d} \left(\frac{T_e T_{M,max}}{T_3 T_4} - 1 \right); \quad \tau = T_{M,max} \frac{T_e \cdot (T_3 + T_4) - T_3 T_4}{T_e T_{M,max} - T_3 T_4}.$$

Оскільки при $T_{\text{м}} = T_{\text{м.мах}}$

$$G_1(p) = \frac{k^*}{p \cdot (T_3 p + 1)(T_4 p + 1)},$$

для забезпечення рівності $W(p)$ і $W_{\text{ж}}(p)$, обираємо

$$W_1(p) = \frac{T_2 p + 1}{(T_1 p + 1)(T_5 p + 1)}. \quad (33)$$

В загальному випадку при даних $W_1(p)$, $W_2(p)$, k_1^* і k_2^* передавальна функція $G_1(p)$ визначиться наступним рівнянням:

$$G_1(p) = \frac{k^*}{p \cdot \left(\frac{T_{\text{м}}}{T_{\text{м.мах}}} T_3 T_4 p^2 + \left(T_3 + T_4 - \frac{T_3 T_4}{T_{\text{е}}} \left(1 - \frac{T_{\text{м}}}{T_{\text{м.мах}}} \right) \right) p + 1 \right)}.$$

Оскільки $T_{\text{м}} \leq T_{\text{м.мах}}$, при $T_{\text{е}} > T_3 T_4 / (T_3 + T_4)$ полюси передавальної функції $G_1(p)$ виходять за межі середньочастотної ділянки бажаної ЛАЧХ у височастотну область, тобто асимптотична ЛАЧХ розімкненої системи співпадає з бажаною до частоти ω_3 . Це означає, що при значних $T_{\text{е}}$ зміна постійної часу $T_{\text{м}}$ практично не впливає на якість перехідних процесів.

При досить малих значеннях $T_{\text{е}}$ і суттєвій різниці між $T_{\text{м}}$ та $T_{\text{м.мах}}$ полюси $G_1(p)$ стають комплексними. Якщо величина $T_{\text{е}}$ настільки мала, що при зменшенні постійної часу $T_{\text{м}}$ дійсна частина полюсів $G_1(p)$ наближається до нуля, якість перехідних процесів різко погіршується (зростає перерегулювання та коливальність). При подальшому зменшенні $T_{\text{м}}$ перехідний процес стає розбіжним, тобто система втрачає стійкість. Тому при малих значеннях електромагнітної постійної часу обирають

$$W_2(p) = 1, \quad (34)$$

коефіцієнт k_2^* визначають за формулою

$$k_2^* = \frac{1}{k_{\text{д}}} \left(\frac{T_{\text{м.мах}}}{T_3} - 1 \right),$$

а передавальну функцію $W_1(p)$ – за рівнянням (33). Тоді при $T_M \neq T_{M.\max}$

$$G_1(p) = \frac{k^*}{p \cdot (T'_3 p + 1)(T'_4 p + 1)},$$

де

$$T'_3 = \frac{2T_e}{1 - \sqrt{1 - 4 \frac{T_e T_{M.\max}}{T_3 T_M}}}; \quad T'_4 = \frac{2T_e}{1 + \sqrt{1 - 4 \frac{T_e T_{M.\max}}{T_3 T_M}}}.$$

Якщо T'_3 і T'_4 – дійсні числа, передавальна функція $G_1(p)$ містить дві аперіодичні ланки зі спрягаючими частотами, більшими за ω_3 . При цьому зміна постійної часу T_M практично не впливає на якість перехідних процесів.

Якщо T'_3 і T'_4 – комплексні, передавальна функція $G_1(p)$ містить коливальну ланку зі спрягаючою частотою

$$\omega'_{34} = \sqrt{\frac{T_{M.\max}}{T_M T_e T_3}}$$

і коефіцієнтом відносного демпфірування

$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_M T_3}{T_{M.\max} T_e}}.$$

При $T_e < T_3$ спрягаюча частота ω'_{34} виходить за межі середньочастотної ділянки у високочастотну область.

Таким чином, структура функціонального блоку ФБ2 обирається за допомогою рівнянь (32) або (34) в залежності від величини електромагнітної постійної часу T_e за наступними правилами:

- 1) якщо, $T_e \geq T_3$, передавальна функція $W_2(p)$ визначається виразом (32);
- 2) якщо $T_e \leq T_3 T_4 / (T_3 + T_4)$, передавальна функція $W_2(p)$ визначається за формулою (34);
- 3) якщо $T_3 T_4 / (T_3 + T_4) < T_e < T_3$, необхідно спробувати обидва варіанти і обрати той, який забезпечує більш якісні перехідні процеси при $T_{M.\min} \leq T_M \leq T_{M.\max}$.

4.6. Розрахунок перехідних характеристик систем керування електроприводами.

Перехідна характеристика – це реакція системи на одиничне ступеневе діяння при нульових початкових умовах. Вона дозволяє оцінити динамічні властивості системи за допомогою прямих показників якості керування, до яких відносяться: усталена похибка, максимальне перерегулювання, час перехідного процесу і коливальність [2]. Для розрахунку перехідних характеристик використовують зворотнє перетворення Лапласа [1]. Враховуючи, що перетворена за Лапласом одинична сходинка має вигляд $1/p$, рівняння перехідної характеристики визначається наступною формулою:

$$\theta(t) = L^{-1} \left\{ \frac{1}{p} \Phi(p) \right\},$$

де $\Phi(p) = W(p)/(1 + W(p))$ – передавальна функція замкненої системи; $L^{-1} \{ \}$ – процедура зворотного перетворення Лапласа. За графіком функції $\theta(t)$ (рис. 8) визначають наступні показники якості керування:

1) максимальне перерегулювання

$$\sigma_{\max} = (\max(\theta) - 1) \cdot 100\%;$$

2) час перехідного процесу t_n ;

3) коливальність μ (кількість перерегулювань до моменту $t = t_n$).

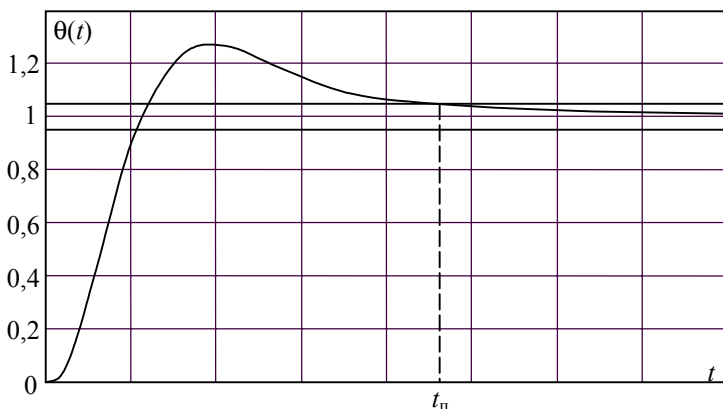


Рис. 8. Перехідна характеристика

Усталена похибка повинна бути нульовою, оскільки система є астатичною.

Показники $\sigma_{\max}$, t_{π} і μ при $T_{\min} \leq T_{\text{м}} \leq T_{\max}$ повинні задовольняти наступним умовам:

$$\sigma_{\max} < 30\%; t_{\pi} < \frac{4\pi}{\omega_c}; \mu \leq 2.$$

Якщо хоча б один з показників не відповідає даним умовам, необхідно вводити в систему додаткові коригуючі пристрої, або застосовувати адаптивний принцип керування.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання курсового проекту "Проектування системи автоматичного керування суднового вантажного маніпулятора" студентами закріплюється теоретичний матеріал з динаміки суднових маніпуляторів, планування їх траєкторій, синтезу і аналізу систем керування електроприводами. При цьому вони набувають навичок у використанні числових методів для розв'язання систем лінійних і нелінійних рівнянь, інтерполяції залежностей та розрахунку перехідних процесів у лінійних системах, а також у виборі елементів автоматизованого електроприводу.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Бурдаков С.Ф., Дьяченко В.А., Тимофеев А.Н.* Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов: Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1986. – 264 с.
 2. *Зайцев Г.Ф.* Теория автоматического управления и регулирования. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Выща шк., 1989. – 431 с.
 3. *Сафонов Ю.М.* Электроприводы промышленных роботов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
 4. *Фу К., Гонсалес Р., Ли. К.* Робототехника: Пер. с англ. – М.: Мир., 1989. – 624 с.
-

ЗМІСТ

Вступ	3
1. Завдання для курсового проектування	4
2. Розрахунок руху вантажу у воді відносно основи мані пуля- тора	5
2.1. Розрахунок законів зміни координат вантажу відносно основи маніпулятора	5
2.2. Розрахунок законів зміни швидкості вантажу відносно основи маніпулятора	8
3. Планування траєкторії маніпулятора	9
3.1. Розв'язання зворотної задачі кінематики для контрольних точок траєкторії	9
3.2. Визначення кутових швидкостей ланок в кінцевій точці траєкторії	12
3.3. Інтерполяція законів зміни кутів повороту ланок маніпу- лятора	13
3.4. Визначення максимальних кутових швидкостей та при- скорень ланок маніпулятора	15
3.5. Розрахунок руху схвату і побудова його траєкторії	15
4. Розрахунок електроприводів повороту ланок	16
4.1. Визначення максимальних моментів навантаження	16
4.2. Вибір приводних двигунів	18
4.3. Побудова структурних схем систем керування електропри- водами	19
4.4. Синтез бажаних передавальних функцій систем керування електроприводами	21
4.5. Синтез передавальних функцій функціональних блоків	26
4.6. Розрахунок перехідних характеристик систем керування електроприводами	30
Висновки	31
Література	31