

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ЗАВДАННЯ ДЛЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУВАННЯ..... | 3 |
| 1. ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ МАНІПУЛЯТОРА | 5 |
| 1.1. Розрахунок руху об'єкта відносно основи маніпулятора..... | 5 |
| 1.2. Розв'язання зворотної задачі кінематики для контрольних точок траєкторії | 6 |
| 1.3. Визначення кутових швидкостей ланок в кінцевій точці траєкторії | 7 |
| 1.4. Інтерполяція законів зміни кутів повороту ланок маніпулятора | 8 |
| 1.5. Розрахунок руху схвату і побудова його траєкторії | 10 |
| 1.6. Визначення максимальних кутових швидкостей та прискорень ланок маніпулятора | 12 |
| 2. РОЗРАХУНОК СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПОВОРOTУ ЛАНOK | 15 |
| 2.1. Визначення моментів навантаження | 15 |
| 2.2. Вибір приводних двигунів..... | 17 |
| 2.3. Розрахунок параметрів електроприводів повороту ланок | 20 |
| 3. СИНТЕЗ І АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ | 22 |
| ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПОВОРOTУ ЛАНOK | 22 |
| 3.1. Побудова функціональної схеми системи керування..... | 22 |
| 3.2. Побудова динамічної структурної схеми системи керування | 23 |
| 3.3. Синтез бажаних передавальних функцій систем керування електроприводами ланок..... | 24 |
| 3.4. Визначення неперервних передавальних функцій коригуючих пристроїв..... | 27 |
| 3.5. Визначення дискретних передавальних функцій коригуючих пристроїв..... | 28 |
| 3.6. Розрахунок частотних характеристик і визначення запасів стійкості систем керування | 29 |

3.7. Моделювання динаміки електроприводів ланок і визначення показників якості керування 35

ВИСНОВКИ 42

СПИСК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 44

ЗАВДАННЯ ДЛЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУВАННЯ

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

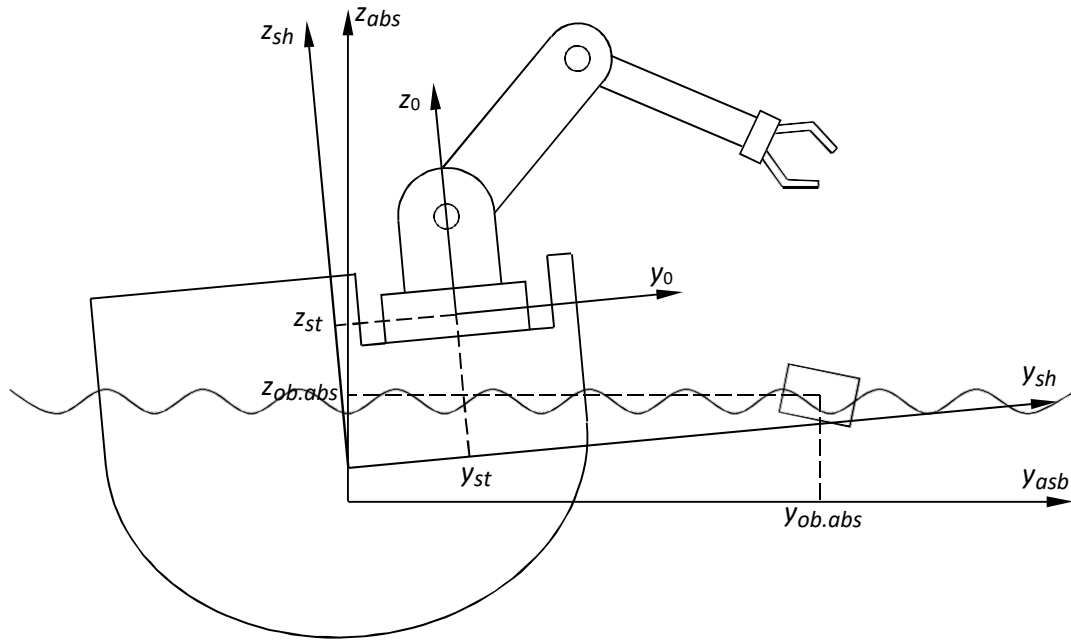


Рис. 1. Схема розташування судна, маніпулятора і об'єкта

Початкові дані, задані у програмі Mathcad, наведені на рис. 2.

Маси ланок маніпулятора, кг: $m_1 := 677$ $m_2 := 420$ $m_3 := 311$
 Маса об'єкта, кг: $m_{ob} := 200$
 Довжини ланок, м: $L_1 := 0.79$ $L_2 := 1.31$ $L_3 := 1.39$
 Радіус першої ланки, м: $r_1 := 0.25$
 Граничні значення кутів повороту ланок, град:

$\theta_{1_min} := -180$ $\theta_{2_min} := -45$ $\theta_{3_min} := -150$
 $\theta_{1_max} := 180$ $\theta_{2_max} := 90$ $\theta_{3_max} := 0$

Статичні координати основи маніпулятора, м: $x_{st} := 5$ $y_{st} := 2$ $z_{st} := 0.5$

Закони, за якими змінюються в часі кути ристання, диференту і крену судна:

$\omega_{\varphi} := 0.06$ $\omega_{\psi} := 0.1$ $\omega_{\theta} := 0.45$ $\varphi_{0_max} := 1.5 \cdot \frac{\pi}{180}$ $\psi_{0_max} := 2 \cdot \frac{\pi}{180}$ $\theta_{0_max} := 5 \cdot \frac{\pi}{180}$
 $\varphi_0(t) := \varphi_{0_max} \cdot \sin(\omega_{\varphi} \cdot t)$ $\psi_0(t) := \psi_{0_max} \cdot \sin(\omega_{\psi} \cdot t)$ $\theta_0(t) := \theta_{0_max} \cdot \sin(\omega_{\theta} \cdot t)$

| | | | | | | |
|-----|------|---------|---------|------|-------------------|------|
| | | | | | 6.151.5341м.КП.07 | Лист |
| | | | | | | 3 |
| Изм | Лист | № докум | Подпись | Дата | | |

Поступальні переміщення судна, м: $x_{\text{transl}} := 0$ $y_{\text{transl}} := 0$ $z_{\text{transl}}(t) := -0.1 \cos(\omega_{\text{zb}} \cdot t)$

Поступальні рухи об'єкта відносно абсолютної системи координат, м:

$$x_{\text{ob_abs}} := x_{\text{st}} \quad y_{\text{ob_abs}} := 3.0 \quad z_{\text{ob_abs}}(t) := 0.5 - 0.3 \cos(\omega_{\text{zb}} \cdot t)$$

Моменти часу проходження контрольних точок траєкторії, с:

Початкова точка: $t_0 := 0$ $x_{r_0} := 1.5$ $y_{r_0} := -1$ $z_{r_0} := 1$

Точка уходу: $t_1 := 2$ $x_{r_1} := 1.5$ $y_{r_1} := -1$ $z_{r_1} := 1.5$

Точка підходу: $t_2 := 4.5$ $\Delta z_{t_2} := 0.5$

Кінцева точка: $t_3 := 6.5$

Припустимі помилки позиціювання схвату, м: $\Delta x_{\text{max}} := 0.001$ $\Delta y_{\text{max}} := 0.001$ $\Delta z_{\text{max}} := 0.001$

Максимальне перерегулювання, %: $\sigma_{\text{max}} < 5$

Рис. 2. Початкові дані для розрахунку

В ході проектування необхідно розробити систему автоматичного керування електроприводами ланок маніпулятора, розв'язавши наступні задачі:

- планування траєкторії маніпулятора;
- розрахунок силової частини електроприводів повороту ланок;
- синтез і аналіз систем автоматичного керування електроприводами повороту ланок.

1. ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ МАНІПУЛЯТОРА

1.1. Розрахунок руху об'єкта відносно основи маніпулятора

На підставі формул (3) – (5) [3], визначаємо закони зміни у часі координат об'єкта відносно основи маніпулятора. Текст обчислювальної програми з результатами розрахунків наведений на рис. 3.

Координати об'єкта відносно центру судна

$$x_{ob_sh} := x_{ob_abs} - x_{transl} \quad y_{ob_sh} := y_{ob_abs} - y_{transl} \quad z_{ob_sh}(t) := z_{ob_abs}(t) - z_{transl}(t)$$

Закони зміни координат об'єкта відносно основи маніпулятора

$$\begin{aligned} x_{ob}(t) &:= (x_{ob_sh} \cdot \cos(\varphi_0(t)) \cdot \cos(\psi_0(t)) + y_{ob_sh} \cdot \sin(\varphi_0(t)) \cdot \cos(\psi_0(t))) - z_{ob_sh}(t) \cdot \sin(\psi_0(t)) - x_{st} \\ y_{ob}(t) &:= \begin{bmatrix} x_{ob_sh} \cdot (\cos(\varphi_0(t)) \cdot \sin(\psi_0(t)) \cdot \sin(\theta_0(t)) - \sin(\varphi_0(t)) \cdot \cos(\theta_0(t))) \dots \\ + y_{ob_sh} \cdot (\sin(\varphi_0(t)) \cdot \sin(\psi_0(t)) \cdot \sin(\theta_0(t)) + \cos(\varphi_0(t)) \cdot \cos(\theta_0(t))) \dots \\ + z_{ob_sh}(t) \cdot \cos(\psi_0(t)) \cdot \sin(\theta_0(t)) - y_{st} \end{bmatrix} \\ z_{ob}(t) &:= \begin{bmatrix} x_{ob_sh} \cdot (\cos(\varphi_0(t)) \cdot \sin(\psi_0(t)) \cdot \cos(\theta_0(t)) + \sin(\varphi_0(t)) \cdot \sin(\theta_0(t))) \dots \\ + y_{ob_sh} \cdot (\sin(\varphi_0(t)) \cdot \sin(\psi_0(t)) \cdot \cos(\theta_0(t)) - \cos(\varphi_0(t)) \cdot \sin(\theta_0(t))) \dots \\ + z_{ob_sh}(t) \cdot \cos(\psi_0(t)) \cdot \cos(\theta_0(t)) - z_{st} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Рис. 3. Програма та результати розрахунку законів зміни у часі координат об'єкта відносно основи маніпулятора

Продиференціювавши отримані закони переміщень об'єкта, отримуємо функції зміни складових його швидкості та визначаємо координати невідомих двох останніх точок траєкторії і швидкості в кінцевій точці (рис. 4).

Складові швидкості руху об'єкта відносно основи маніпулятора

$$v_{ob_x}(t) := \frac{d}{dt} x_{ob}(t) \quad v_{ob_y}(t) := \frac{d}{dt} y_{ob}(t) \quad v_{ob_z}(t) := \frac{d}{dt} z_{ob}(t)$$

Координати точки підходу, м

$$x_{r_2} := x_{ob}(t_2) \quad x_{r_2} = 0.015$$

$$y_{r_2} := y_{ob}(t_2) \quad y_{r_2} = 0.987$$

| | | | | | | |
|-----|------|---------|---------|------|-------------------|------|
| | | | | | 6.151.5341м.КП.07 | Лист |
| | | | | | | 5 |
| Изм | Лист | № докум | Подпись | Дата | | |

$$z_{r_2} := z_{ob}(t_2) + \Delta z_{t23} \quad z_{r_2} = 0.163$$

Координати кінцевої точки траєкторії схвату, м

$$x_{r_3} := x_{ob}(t_3) \quad x_{r_3} = 0.021$$

$$y_{r_3} := y_{ob}(t_3) \quad y_{r_3} = 0.958$$

$$z_{r_3} := z_{ob}(t_3) \quad z_{r_3} = -0.108$$

Швидкість схвату в кінцевій точці

$$v_{x_t3} := v_{ob_x}(t_3) \quad v_{x_t3} = 2.787 \times 10^{-3}$$

$$v_{y_t3} := v_{ob_y}(t_3) \quad v_{y_t3} = -0.022$$

$$v_{z_t3} := v_{ob_z}(t_3) \quad v_{z_t3} = 0.14$$

Рис. 4. Програма та результати розрахунку швидкості об'єкта і визначення невідомих координат точок траєкторії

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

На підставі (6) – (14) [3] складаємо обчислювальну програму розв'язання зворотної задачі кінематики для контрольних точок траєкторії (рис. 5).

| | | | |
|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Припустимі помилки, м | $\varepsilon_x := 0.0001$ | $\varepsilon_y := 0.0001$ | $\varepsilon_z := 0.0001$ |
| Ітераційні коефіцієнти | $\gamma_1 := 0.1$ | $\gamma_2 := 0.1$ | $\gamma_3 := 0.1$ |

```

q := for j ∈ 0..3
    θ1 ← π/6
    θ2 ← π/6
    θ3 ← -π/4
    for i ∈ 1..10000
        x ← cos(θ1)·(L2·cos(θ2) + L3·cos(θ2 + θ3))
        y ← sin(θ1)·(L2·cos(θ2) + L3·cos(θ2 + θ3))
        z ← L1 + L2·sin(θ2) + L3·sin(θ2 + θ3)

```

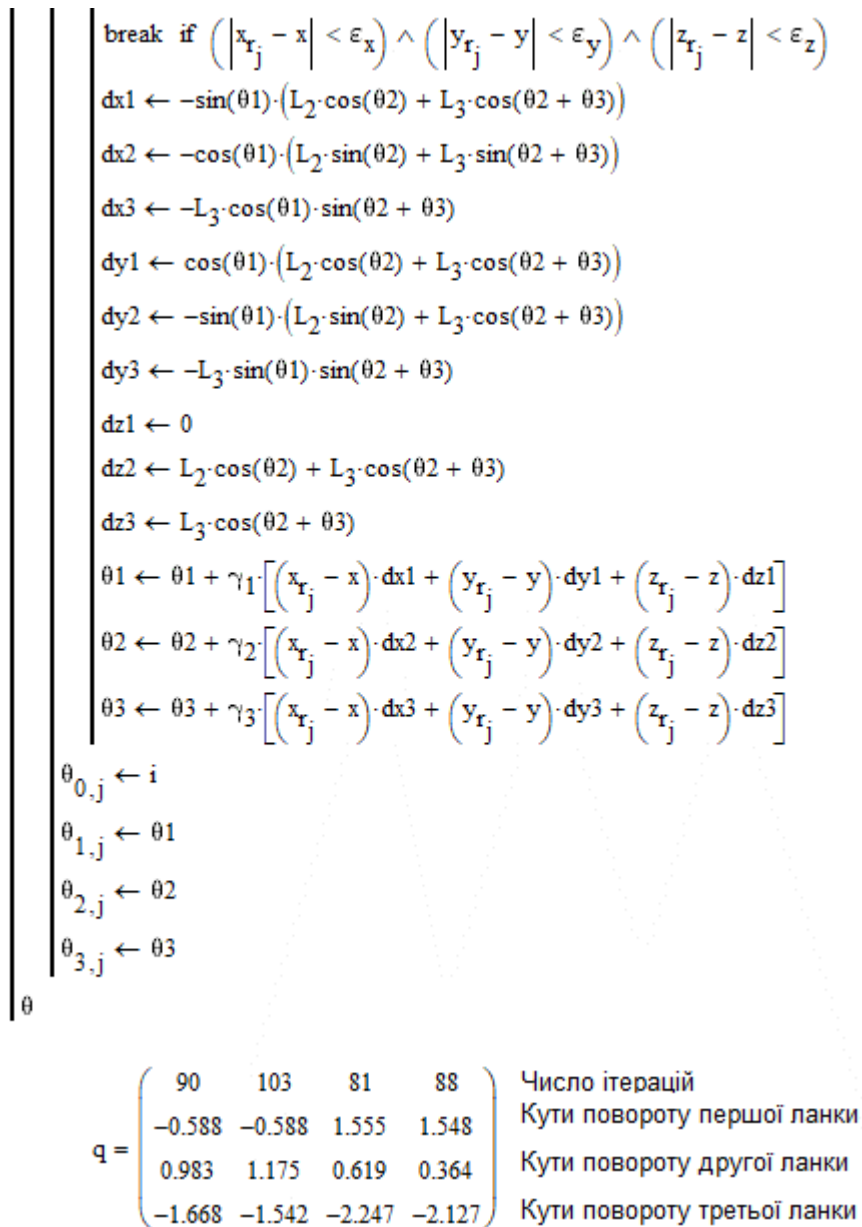


Рис. 5. Програма та результати розв'язання зворотної задачі кінематики

1.3. Визначення кутових швидкостей ланок в кінцевій точці траєкторії

За допомогою (16) – (18), (20) [3] визначаємо кутові швидкості ланок маніпулятора в кінцевій точці траєкторії (рис. 6).

Визначення кутових швидкостей ланок маніпулятора в точці захвату об'єкта

$$\begin{aligned}
 i &:= 1..rows(q) - 1 & \theta_i &:= q_{i,3} \\
 C_{0,0} &:= -\sin(\theta_1) \cdot (L_2 \cdot \cos(\theta_2) + L_3 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3)) & C_{1,2} &:= -L_3 \cdot \sin(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
 C_{0,1} &:= -\cos(\theta_1) \cdot (L_2 \cdot \sin(\theta_2) + L_3 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3)) & C_{2,0} &:= 0 \\
 C_{0,2} &:= -L_3 \cdot \cos(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) & & \\
 C_{1,0} &:= \cos(\theta_1) \cdot (L_2 \cdot \cos(\theta_2) + L_3 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3)) & C_{2,1} &:= L_2 \cdot \cos(\theta_2) + L_3 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \\
 C_{1,1} &:= -\sin(\theta_1) \cdot (L_2 \cdot \sin(\theta_2) + L_3 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3)) & C_{2,2} &:= L_3 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \\
 v_0 &:= v_{x_t3} & v_1 &:= v_{y_t3} & v_2 &:= v_{z_t3} \\
 \omega_{t3} &:= C^{-1} \cdot v & \omega_{t3}^T &= (-3.417 \times 10^{-3} \quad 0.12 \quad -0.095)
 \end{aligned}$$

Рис. 5. Програма та результати визначення кутових швидкостей ланок маніпулятора в кінцевій точці траєкторії

1.4. Інтерполяція законів зміни кутів повороту ланок маніпулятора

Закони зміни кутів повороту ланок маніпулятора знаходимо шляхом інтерполяції отриманих у 1.2 табличних значень кутів для контрольних точок траєкторії за допомогою сплайн-функцію "4-3-4", коефіцієнти якої визначаємо з урахуванням початкових та кінцевих швидкостей та прискорень згідно з методикою, викладеною в п. 1.4 [3] (рис. 6).

Визначення коефіцієнтів інтерполюючої функції

$$\Delta t_1 := t_1 - t_0$$

$$\Delta t_2 := t_2 - t_1$$

$$\Delta t_3 := t_3 - t_2$$

$$n := \text{rows}(q) - 1$$

$$i := 1..n$$

Номер ланки маніпулятора

Коефіцієнти сплайн-функції

$$a12_i := 0$$

$$a11_i := 0$$

$$a10_i := q_{i,0}$$

$$a20_i := q_{i,1}$$

$$a30_i := q_{i,2}$$

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

Матриця
коефіцієнтів
системи рівнянь

$$F_i := \begin{bmatrix} (q_{i,1} - q_{i,0}) & 0 & 0 & (q_{i,2} - q_{i,1}) & 0 & 0 & (q_{i,3} - q_{i,2}) & \omega_{t3i-1} & 0 \end{bmatrix}^T$$

Матриця правих частин
системи рівнянь

$$A_i := C^{-1} \cdot F_i$$

Розв'язання системи рівнянь

$$a14_i := (A_i)_0$$

$$a13_i := (A_i)_1$$

$$a23_i := (A_i)_2$$

$$a22_i := (A_i)_3$$

$$a21_i := (A_i)_4$$

$$a34_i := (A_i)_5$$

$$a33_i := (A_i)_6$$

$$a32_i := (A_i)_7$$

$$a31_i := (A_i)_8$$

Інтерполююча функція

$$\theta(t) := \begin{cases} \text{for } i \in 1..n \\ \left| \begin{array}{l} X_i \leftarrow a14_i \cdot (t - t_0)^4 + a13_i \cdot (t - t_0)^3 + a12_i \cdot (t - t_0)^2 + a11_i \cdot (t - t_0) + a10_i \text{ if } t \geq t_0 \wedge t \leq t_1 \\ X_i \leftarrow a23_i \cdot (t - t_1)^3 + a22_i \cdot (t - t_1)^2 + a21_i \cdot (t - t_1) + a20_i \text{ if } t \geq t_1 \wedge t < t_2 \\ X_i \leftarrow a34_i \cdot (t - t_2)^4 + a33_i \cdot (t - t_2)^3 + a32_i \cdot (t - t_2)^2 + a31_i \cdot (t - t_2) + a30_i \text{ if } t \geq t_2 \wedge t \leq t_3 \end{array} \right. \\ X \end{cases}$$

Рис. 6. Програма визначення інтерполюючої функції

Представляємо отримані закони у вигляді графіків (рис. 7).

| | | | | |
|-----|------|---------|---------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум | Подпись | Дата |

6.151.5341м.КП.07

Лист

9

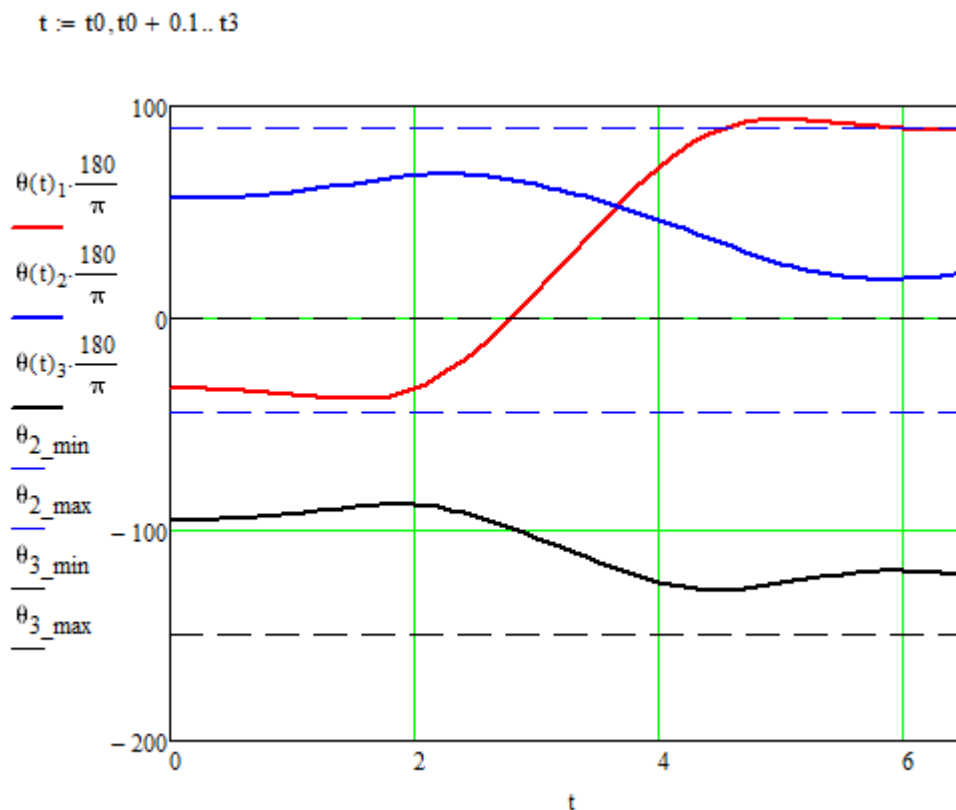


Рис. 7. Графіки зміни у часі кутів повороту ланок маніпулятора

За отриманими графіками видно, що кути повороту ланок не виходять за межі припустимих значень, заданих у початкових даних.

1.5. Розрахунок руху схвату і побудова його траєкторії

З (7) – (9) [3] визначаємо закони зміни у часі координат схвату (рис. 8).

Закон руху схвату

$$x(t) := (L_2 \cdot \cos(\theta(t)_2) + L_3 \cdot \cos(\theta(t)_2 + \theta(t)_3)) \cdot \cos(\theta(t)_1)$$

$$y(t) := (L_2 \cdot \cos(\theta(t)_2) + L_3 \cdot \cos(\theta(t)_2 + \theta(t)_3)) \cdot \sin(\theta(t)_1)$$

$$z(t) := L_1 + L_2 \cdot \sin(\theta(t)_2) + L_3 \cdot \sin(\theta(t)_2 + \theta(t)_3)$$

Рис. 8. Програма визначення руху схвату

Будуємо графіки зміни координат схвату і об'єкта (рис. 9).

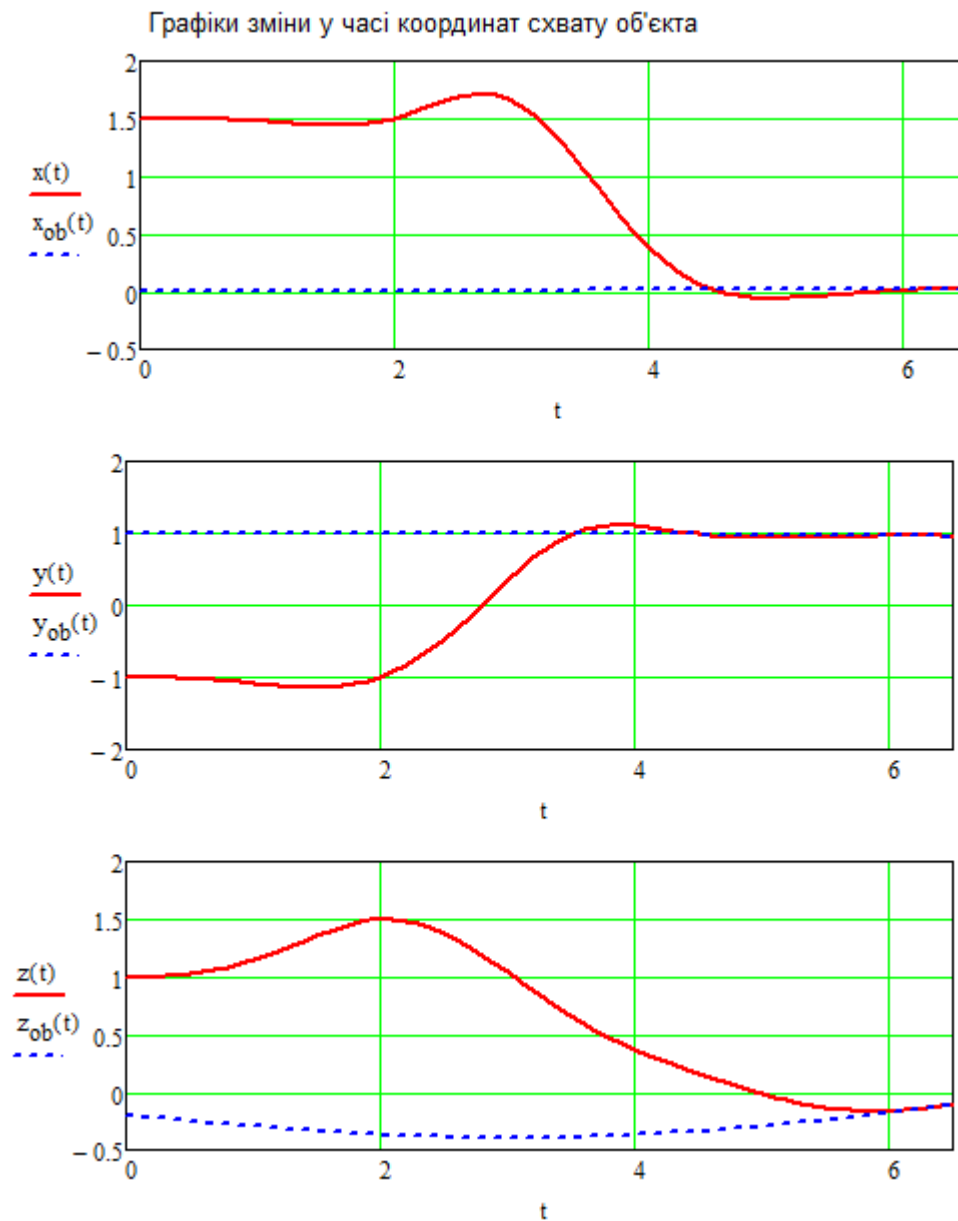


Рис. 9. Графіки зміни у часі координат схвату і об'єкта

За графіками бачимо, що схват підходить до об'єкта плавно, тобто його швидкість у кінцевій точці траєкторії співпадає зі швидкістю об'єкта. Будуємо траєкторію руху схвату у трьох проекціях: вигляд з корми судна $z(y)$, вигляд зліва $z(x)$ і вигляд зверху – $x(y)$ (рис. 10).

Траекторія схвату у 3 проекціях

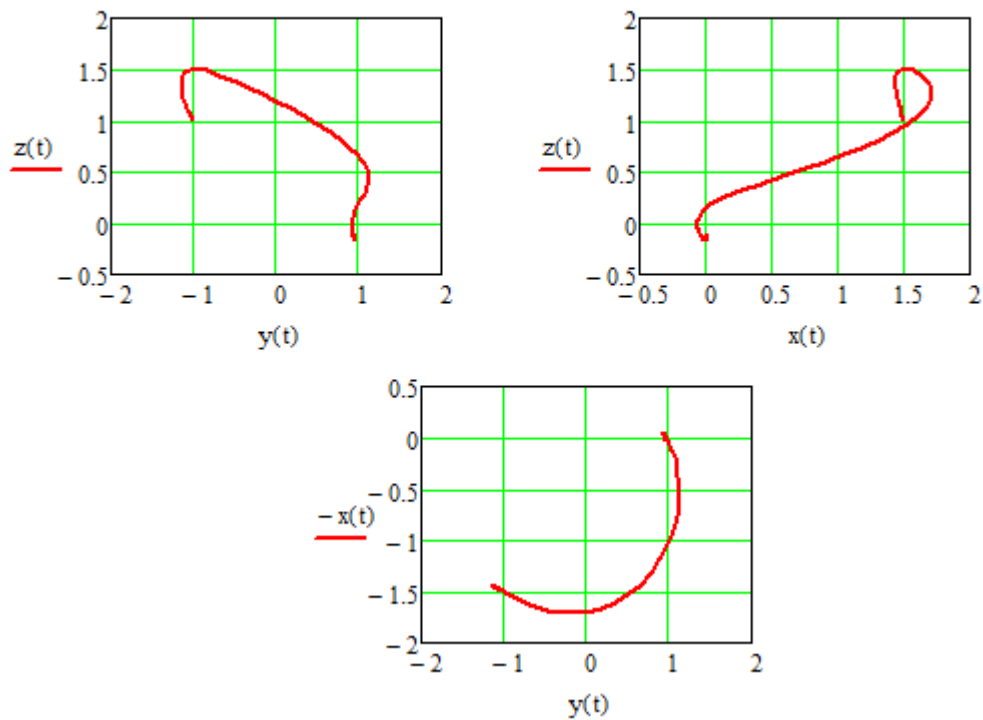


Рис. 10. Траекторія схвату в трьох проекціях

Побудована траекторія показує, що схват під час руху не перетинає основи та ланок маніпулятора і не робить зайвих рухів.

1.6. Визначення максимальних кутових швидкостей та прискорень ланок маніпулятора

Шляхом диференціювання функцій зміни кутів повороту ланок за часом, отримуємо часові залежності кутових швидкостей та прискорень (рис. 11, 12).

Закон зміни кутових швидкостей:

$$\omega(t) := \begin{cases} \text{for } i \in 1..n \\ \left| \begin{array}{l} X_i \leftarrow 4a_{14_i} \cdot (t - t_0)^3 + 3a_{13_i} \cdot (t - t_0)^2 + 2a_{12_i} \cdot (t - t_0) + a_{11_i} \text{ if } t \geq t_0 \wedge t < t_1 \\ X_i \leftarrow 3a_{23_i} \cdot (t - t_1)^2 + 2a_{22_i} \cdot (t - t_1) + a_{21_i} \text{ if } t \geq t_1 \wedge t < t_2 \\ X_i \leftarrow 4a_{34_i} \cdot (t - t_2)^3 + 3a_{33_i} \cdot (t - t_2)^2 + 2a_{32_i} \cdot (t - t_2) + a_{31_i} \text{ if } t \geq t_2 \wedge t \leq t_3 \end{array} \right. \\ X \end{cases}$$

Визначення закону зміни кутових швидкостей ланок

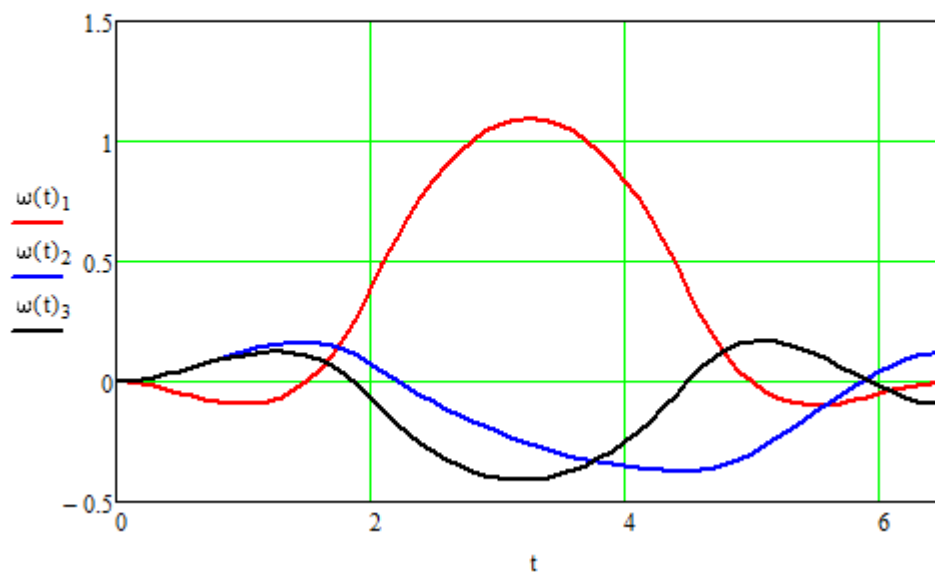


Рис. 11. Визначення закону зміни кутових швидкостей ланок

Закон зміни кутових прискорень

$$\varepsilon_i(t) := \begin{cases} X_i \leftarrow 12 a_{14_i} \cdot (t - t_0)^2 + 6 a_{13_i} \cdot (t - t_0) + 2 a_{12_i} & \text{if } t \geq t_0 \wedge t < t_1 \\ X_i \leftarrow 6 a_{23_i} \cdot (t - t_1) + 2 a_{22_i} & \text{if } t \geq t_1 \wedge t < t_2 \\ X_i \leftarrow 12 a_{34_i} \cdot (t - t_2)^2 + 6 a_{33_i} \cdot (t - t_2) + 2 a_{32_i} & \text{if } t \geq t_2 \wedge t \leq t_3 \end{cases}$$

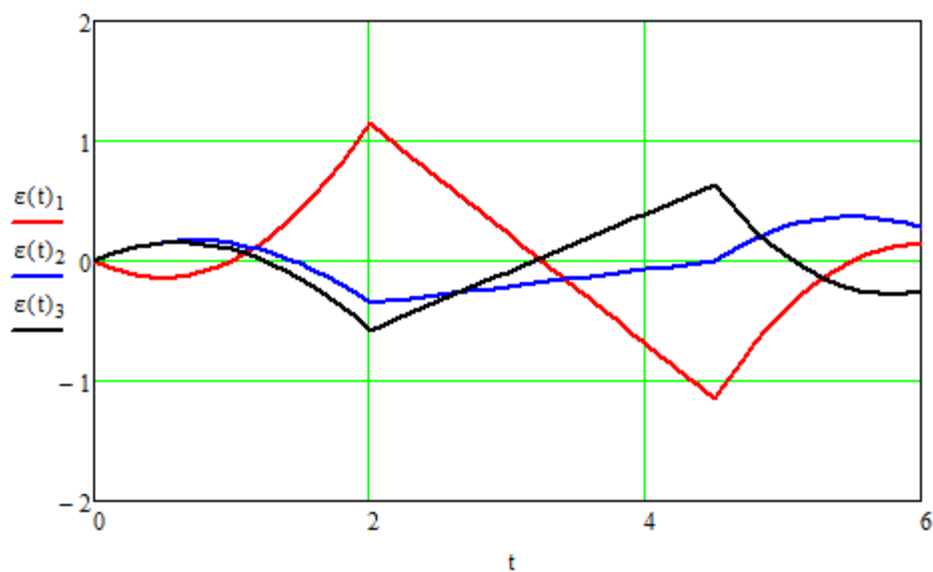


Рис. 12. Визначення закону зміни кутових прискорень ланок

Визначаємо максимальні за модулем кутові швидкості та прискорення (рис. 13).

Визначення максимальних кутових швидкостей та прискорень:

$$\Omega_{\max} := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..n \\ \quad X_{i,1} \leftarrow 0 \\ \quad N \leftarrow 1000 \\ \quad \text{for } j \in 1..N \\ \quad \quad t_j \leftarrow \frac{j}{N} \cdot t_3 \\ \quad \quad \text{if } |\omega(t_j)_i| > X_{i,1} \\ \quad \quad \quad X_{i,0} \leftarrow t_j \\ \quad \quad \quad X_{i,1} \leftarrow |\omega(t_j)_i| \end{array} \right| X$$

$$\varepsilon_{\max} := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..n \\ \quad X_i \leftarrow 0 \\ \quad N \leftarrow 1000 \\ \quad \text{for } j \in 1..N \\ \quad \quad t_j \leftarrow \frac{j}{N} \cdot t_3 \\ \quad \quad X_i \leftarrow |\varepsilon(t_j)_i| \quad \text{if } |\varepsilon(t_j)_i| > X_i \end{array} \right| X$$

$$t_{\omega_{\max}_i} := \Omega_{\max_{i,0}}$$

$$\omega_{\max_i} := \Omega_{\max_{i,1}}$$

Моменти часу, що відповідають максимальним швидкостям, с: $t_{\omega_{\max}}^T = (0 \ 3.25 \ 4.504 \ 3.192)$

Максимальні кутові швидкості, рад/с: $\omega_{\max}^T = (0 \ 1.096 \ 0.374 \ 0.409)$

Максимальні кутові прискорення $\varepsilon_{\max}^T = (0 \ 1.144 \ 0.371 \ 0.631)$

Рис. 13. Програма та результати визначення максимальних кутових швидкостей та прискорень ланок

Отримані величини будуть використовуватись для визначення максимальних навантажень на електроприводи повороту ланок маніпулятора.

2. РОЗРАХУНОК СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПОВОРОТУ ЛАНОК

2.1. Визначення моментів навантаження

На підставі (22) – (29) [3] визначаємо максимальні моменти навантаження електроприводів повороту ланок маніпулятора (рис. 14).

Моменти інерції ланок відносно власних осей обертання

$$J_1 := \frac{1}{2} m_1 \cdot r_1^2 \quad J_2 := \frac{1}{3} m_2 \cdot L_2^2 \quad J_3 := \frac{1}{3} m_3 \cdot L_3^2$$

$$J_1 = 21.156 \quad J_2 = 240.254 \quad J_3 = 200.294$$

Максимальне прискорення кута крену судна

$$\varepsilon_{\theta_max} := 10 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \omega_{\theta}^2 \quad \varepsilon_{\theta_max} = 0.035$$

Прискорення вільного падіння $g := 9.8$

Максимальні статичні моменти навантаження

$$M_{st_max_1} := g \cdot \sin(\theta_{0_max}) \cdot \left[\frac{1}{2} L_2 \cdot m_2 + \left(\frac{1}{2} L_3 + L_2 \right) m_3 + (L_2 + L_3) m_{ob} \right]$$

$$M_{st_max_2} := g \cdot \left[\frac{1}{2} L_2 \cdot m_2 + \left(\frac{1}{2} L_3 + L_2 \right) m_3 + (L_2 + L_3) m_{ob} \right]$$

$$M_{st_max_3} := g \cdot \left(\frac{1}{2} L_3 \cdot m_3 + L_3 \cdot m_{ob} \right)$$

$$M_{st_max}^T = \begin{pmatrix} 0 & 1.229 \times 10^3 & 1.41 \times 10^4 & 4.843 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

Максимальні динамічні моменти навантаження

$$M_{dyn_max_1} := \varepsilon_{max_1} \left[J_1 + J_2 + (L_2^2 + L_2 \cdot L_3) m_3 + J_3 + (L_2 + L_3)^2 m_{ob} \right] \dots$$

$$+ \varepsilon_{\theta_max} \cdot (z_{st} + L_1) \cdot \left[\frac{1}{2} L_2 \cdot m_2 + \left(\frac{1}{2} L_3 + L_2 \right) m_3 + (L_2 + L_3) m_{ob} \right]$$

$$M_{dyn_max_2} := (\varepsilon_{max_2} + \varepsilon_{\theta_max}) \cdot \left[J_2 + (L_2^2 + L_2 \cdot L_3) m_3 + J_3 + (L_2 + L_3)^2 m_{ob} \right] \dots$$

$$+ \varepsilon_{max_3} \cdot L_2 \cdot L_3 \cdot \left(\frac{1}{2} m_3 + m_{ob} \right)$$

$$M_{dyn_max_3} := (\varepsilon_{max_3} + \varepsilon_{max_2} + \varepsilon_{\theta_max}) \cdot (J_3 + L_3^2 m_{ob})$$

$$M_{dyn_max}^T = \begin{pmatrix} 0 & 3.521 \times 10^3 & 1.627 \times 10^3 & 608.655 \end{pmatrix}$$

Максимальні моменти навантаження

$$M_{\max} := M_{st_max} + M_{dyn_max} \quad M_{\max}^T = \begin{pmatrix} 0 & 4.75 \times 10^3 & 1.573 \times 10^4 & 5.451 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

Рис. 14. Програма та результати розрахунку максимальних моментів навантаження електроприводів

На підставі (30) – (32) [3] визначаємо статичні моменти навантаження при максимальних швидкостях ланок (рис. 15).

Кути повороту ланок при максимальних швидкостях

$$\theta(t_{\omega_max_1}) \cdot \frac{180}{\pi} = \begin{pmatrix} 0 \\ 27.751 \\ 59.41 \\ -109.796 \end{pmatrix} \quad \theta(t_{\omega_max_2}) \cdot \frac{180}{\pi} = \begin{pmatrix} 0 \\ 89.198 \\ 35.379 \\ -128.763 \end{pmatrix} \quad \theta(t_{\omega_max_3}) \cdot \frac{180}{\pi} = \begin{pmatrix} 0 \\ 24.08 \\ 60.258 \\ -108.426 \end{pmatrix}$$

Статичні моменти навантаження при максимальних швидкостях:

$$M_{st_w_max_1} := g \cdot \sin(\theta_{0_max}) \cdot \left[\left(\frac{1}{2} m_2 + m_3 + m_{ob} \right) \cdot L_2 \cdot \cos(\theta(t_{\omega_max_1})_2) \dots \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{2} m_3 + m_{ob} \right) \cdot L_3 \cdot \cos(\theta(t_{\omega_max_1})_2 + \theta(t_{\omega_max_1})_3) \right]$$

$$M_{st_w_max_2} := g \cdot \left[\left(\frac{1}{2} m_2 + m_3 + m_{ob} \right) \cdot L_2 \cdot \cos(\theta(t_{\omega_max_2})_2) \dots \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{2} m_3 + m_{ob} \right) \cdot L_3 \cdot \cos(\theta(t_{\omega_max_2})_2 + \theta(t_{\omega_max_2})_3) \right]$$

$$M_{st_w_max_3} := \left| g \cdot \left(\frac{1}{2} m_3 + m_{ob} \right) \cdot L_3 \cdot \cos(\theta(t_{\omega_max_2})_2 + \theta(t_{\omega_max_2})_3) \right|$$

$$M_{st_w_max}^T = \begin{pmatrix} 0 & 679.655 & 7.261 \times 10^3 & 285.805 \end{pmatrix}$$

Рис. 15. Програма та результати розрахунку статичних моментів навантаження при максимальних швидкостях ланок

2.2. Вибір приводних двигунів

Згідно методики, викладеній у п. 2.2 [3], обираємо вентильні електродвигуни [2] для трьох приводів повороту ланок маніпулятора (рис. 16 – 18).

Для першого електропривода обираємо двигун ДБМ 192-27-3

Тривалий момент на валу $M_{do_1} := 27$

Номінальний струм $I_{do_1} := 19$

Номінальна частота обертання $n_{n_1} := 3000$

Момент інерції ротора $J_{m_1} := 141.6 \cdot 10^{-4}$

Номінальна кутова швидкість $\omega_{n_1} := \frac{\pi \cdot n_{n_1}}{30}$ $\omega_{n_1} = 314.159$

Передавальне число редуктора $i_{r_1} := \frac{\omega_{n_1}}{\omega_{max_1}}$ $i_{r_1} = 286.69$

Задаємо ККД редуктора $\eta_r := 0.9$

Максимальний крутний момент, що потребується

$$M_{req_max_1} := \frac{M_{max_1}}{i_{r_1} \cdot \eta_r} + 1.1 J_{m_1} i_{r_1} \varepsilon_{max_1} \quad M_{req_max_1} = 23.519$$

Виконується умова

$$M_{do_1} > M_{req_max_1}$$

$$M_{do_1} = 27$$

Обраний двигун забезпечує необхідний максимальний крутний момент

Крутний момент, що потребується при максимальній швидкості обертання

$$M_{req_w_max_1} := \frac{M_{st_w_max_1}}{i_{r_1} \cdot \eta_r} \quad M_{req_w_max_1} = 2.634$$

Виконується умова

$$0.5 \cdot M_{do_1} = 13.5$$

$$0.5 \cdot M_{do_1} > M_{req_w_max_1}$$

Обраний двигун забезпечує необхідний крутний момент при максимальній швидкості

Рис. 16. Вибір двигуна для першого електропривода

Для другого електропривода обираємо двигун ДБМ 192-27-3

Тривалий момент на валу $M_{do_2} := 27$

Номинальний струм $I_{do_2} := 19$

Номинальна частота обертання $n_{n_2} := 3000$

Момент інерції ротора $J_{m_2} := 141.6 \cdot 10^{-4}$

Номинальна кутова швидкість $\omega_{n_2} := \frac{\pi \cdot n_{n_2}}{30}$

$$\omega_{n_2} = 314.159$$

Передавальне число редуктора $i_{r_2} := \frac{\omega_{n_2}}{\omega_{max_2}} \quad i_{r_2} = 841.031$

Задаємо ККД редуктора $\eta_{kr} := 0.9$

Максимальний крутний момент, що потребується

$$M_{req_max_2} := \frac{M_{max_2}}{i_{r_2} \cdot \eta_r} + 1.1 J_{m_2} i_{r_2} \epsilon_{max_2} \quad M_{req_max_2} = 25.636$$

Виконується умова

$$M_{do_2} > M_{req_max_2}$$

$$M_{do_2} = 27$$

Обраний двигун забезпечує необхідний максимальний крутний момент

Крутний момент, що потребується при максимальній швидкості обертання

$$M_{req_w_max_2} := \frac{M_{st_w_max_2}}{i_{r_2} \cdot \eta_r} \quad M_{req_w_max_2} = 9.593$$

Виконується умова

$$0.5 \cdot M_{do_2} = 13.5$$

$$0.5 \cdot M_{do_2} > M_{req_w_max_2}$$

Обраний двигун забезпечує необхідний крутний момент при максимальній швидкості

Рис. 17. Вибір двигуна для другого електропривода

Для третього електропривода обираємо двигун ДБМ 142-11-3

Тривалий момент на валу $M_{do_3} := 11$

Номинальний струм $I_{do_3} := 8.4$

Номинальна частота обертання $n_{n_3} := 3000$

Момент інерції ротора $J_{m_3} := 33.08 \cdot 10^{-4}$

Номинальна кутова швидкість $\omega_{n_3} := \frac{\pi \cdot n_{n_3}}{30}$

$$\omega_{n_3} = 314.159$$

Передавальне число редуктора $i_{r_3} := \frac{\omega_{n_3}}{\omega_{max_3}} \quad i_{r_3} = 768.175$

Задаємо ККД редуктора $\eta_{kr} := 0.9$

Максимальний крутний момент, що потребується

$$M_{req_max_3} := \frac{M_{max_3}}{i_{r_3} \cdot \eta_r} + 1.1 J_{m_3} i_{r_3} \epsilon_{max_3} \quad M_{req_max_3} = 9.649$$

Виконується умова

$$M_{do_3} > M_{req_max_3}$$

$$M_{do_3} = 11$$

Обраний двигун забезпечує необхідний максимальний крутний момент

Крутний момент, що потребується при максимальній швидкості обертання

$$M_{req_w_max_3} := \frac{M_{st_w_max_3}}{i_{r_3} \cdot \eta_r} \quad M_{req_w_max_3} = 0.413$$

Виконується умова

$$0.5 \cdot M_{do_3} = 5.5$$

$$0.5 \cdot M_{do_3} > M_{req_w_max_3}$$

Обраний двигун забезпечує необхідний крутний момент при максимальній швидкості

Рис. 18. Вибір двигуна для третього електропривода

Обрані двигуни задовольняють вимогам потрібного моменту.

| | | | | | | |
|-----|------|---------|---------|------|-------------------|------|
| | | | | | 6.151.5341м.КП.07 | Лист |
| | | | | | | 19 |
| Изм | Лист | № докум | Подпись | Дата | | |

2.3. Розрахунок параметрів електроприводів повороту ланок

За формулами (43) – (55) [3] розраховуємо параметри електроприводів повороту ланок маніпулятора (рис. 19).

Номинальні потужності двигунів:

$$P_{n_i} := M_{do_i} \cdot \omega_{n_i} \quad P_n^T = \begin{pmatrix} 0 & 8.482 \times 10^3 & 8.482 \times 10^3 & 3.456 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

Напруга живлення інвертора: $U_d := 515$

Активні опори обмоток якоря:

$$R_i := \frac{U_d}{I_{do_i}} - \frac{P_{n_i}}{(I_{do_i})^2} \quad R^T = \begin{pmatrix} 0 & 3.609 & 3.609 & 12.333 \end{pmatrix}$$

Постійні двигунів:

$$c_i := \frac{M_{do_i}}{I_{do_i}} \quad c^T = \begin{pmatrix} 0 & 1.421 & 1.421 & 1.31 \end{pmatrix}$$

Коефіцієнти передачі двигунів за вхідною напругою

$$k_{m_i} := \frac{1}{c_i} \quad k_m^T = \begin{pmatrix} 0 & 0.704 & 0.704 & 0.764 \end{pmatrix}$$

Коефіцієнти передачі двигунів за моментом:

$$k_{t_i} := \frac{R_i}{(c_i)^2} \quad k_t^T = \begin{pmatrix} 0 & 1.787 & 1.787 & 7.192 \end{pmatrix}$$

Частота мережі: $f_{net} := 50$

Індуктивність обмоток якоря:

$$L_i := \frac{U_d}{I_{do_i} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{net}} \cdot 0.25 \quad L^T = \begin{pmatrix} 0 & 0.022 & 0.022 & 0.049 \end{pmatrix}$$

Електромагнітні постійні часу

$$T_{e_i} := \frac{L_i}{R_i} \quad T_e^T = \begin{pmatrix} 0 & 5.977 \times 10^{-3} & 5.977 \times 10^{-3} & 3.956 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Мінімальні моменти інерції навантаження електроприводів

$$J_{min_1} := J_1 + J_3 \cdot \sin(\theta_{3_min})^2$$

$$J_{min_2} := J_2 + \left(\frac{1}{3} L_3^2 + L_2 \cdot L_3 \cdot \cos(\theta_{3_min}) + L_2^2 \right) m_3$$

$$J_{\min_3} := J_3$$

$$J_{\min}^T = \begin{pmatrix} 0 & 123.516 & 1.37 \times 10^3 & 200.294 \end{pmatrix}$$

Максимальні моменти інерції навантаження електроприводів

$$J_{\max_1} := J_1 + J_2 + (L_2^2 + L_2 \cdot L_3) \cdot m_3 + J_3 + (L_2 + L_3)^2 \cdot m_{ob}$$

$$J_{\max_2} := J_2 + (L_2^2 + L_2 \cdot L_3) m_3 + J_3 + (L_2 + L_3)^2 \cdot m_{ob}$$

$$J_{\max_3} := J_3 + L_3^2 \cdot m_{ob}$$

$$J_{\max}^T = \begin{pmatrix} 0 & 3.02 \times 10^3 & 2.999 \times 10^3 & 586.714 \end{pmatrix}$$

Мінімальні та максимальні значення електромеханічної постійної часу

$$T_{\min_i} := \frac{1.1 J_{m_i} + \frac{J_{\min_i}}{(i_{r_i})^2}}{(c_i)^2} R_i$$

$$T_{\min}^T = \begin{pmatrix} 0 & 0.031 & 0.031 & 0.029 \end{pmatrix}$$

$$T_{\max_i} := \frac{1.1 J_{m_i} + \frac{J_{\max_i}}{(i_{r_i})^2}}{(c_i)^2} R_i$$

$$T_{\max}^T = \begin{pmatrix} 0 & 0.093 & 0.035 & 0.033 \end{pmatrix}$$

Рис. 19. Програма та результати розрахунку параметрів електроприводів повороту ланок

Отримані параметри будуть використовуватись при синтезі та аналізі систем керування електроприводами ланок маніпулятора.

3. СИНТЕЗ І АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПОВОРОТУ ЛАНОК

3.1. Побудова функціональної схеми системи керування

Функціональна схема системи керування електроприводом повороту ланки маніпулятора [3] наведена на рис. 20.

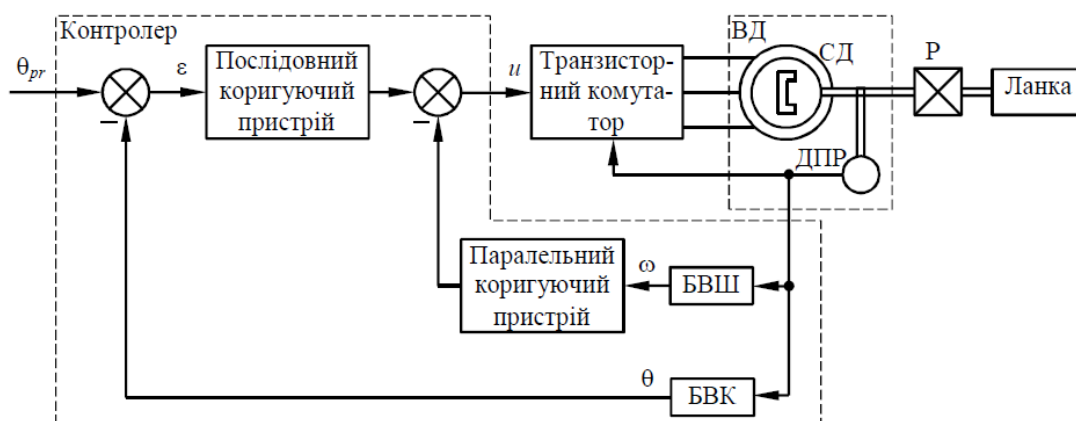


Рис. 18. Функціональна схема системи автоматичного керування кутом повороту ланки маніпулятора

На схемі прийнято наступні позначення: ВД – вентиляний двигун, до складу якого входить синхронний двигун СД зі збудженням від постійних магнітів і резольвером, що виконує функції датчика положення ротора ДПР; БВШ і БВК – блоки визначення швидкості ω і кута θ повороту ланки; Р – редуктор; θ_{pr} – приписане значення кута повороту ланки; ε – помилка; u – керуюче діяння (напруга), що подається на двигун. Приписане значення кута повороту ланки θ_{pr} у вигляді цифрового сигналу надходить до керуючого контролера за послідовним інтерфейсом зв'язку від тактичного рівня системи керування роботом. Сигнал датчика положення ротора також надходить на дискретний вхід контролера через пристрій перетворення сигналу резольвера у сигнал енкодера (на схемі не показаний). Цей сигнал несе інформацію про миттєве значення кута повороту

ротора двигуна (motor) θ_m . В контролері це значення ділиться на передавальне число редуктора i_r , і визначається кут повороту ланки:

$$\theta(kT) = \theta_m(kT) / i_r,$$

де k – номер відліку; T – період дискретизації.

Різниця між приписаним значенням кута повороту ланки та його дійсною величиною є сигналом помилки:

$$\varepsilon(kT) = \theta_{pr}(kT) - \theta(kT).$$

Шляхом диференціювання кута повороту визначається кутова швидкість ланки:

$$\omega(kT) = \frac{1}{i_r} \frac{\theta_m(kT) - \theta_m((k-1)T)}{T}.$$

Коригуючі пристрої визначають закон керування, за яким в залежності від величини помилки ε та кутової швидкості ω формується керуюче діяння u , яке подається у вигляді напруги на електродвигун [3].

3.2. Побудова динамічної структурної схеми системи керування

Динамічна структурна схема системи керування електроприводом повороту ланки маніпулятора [3] наведена на рис. 21.

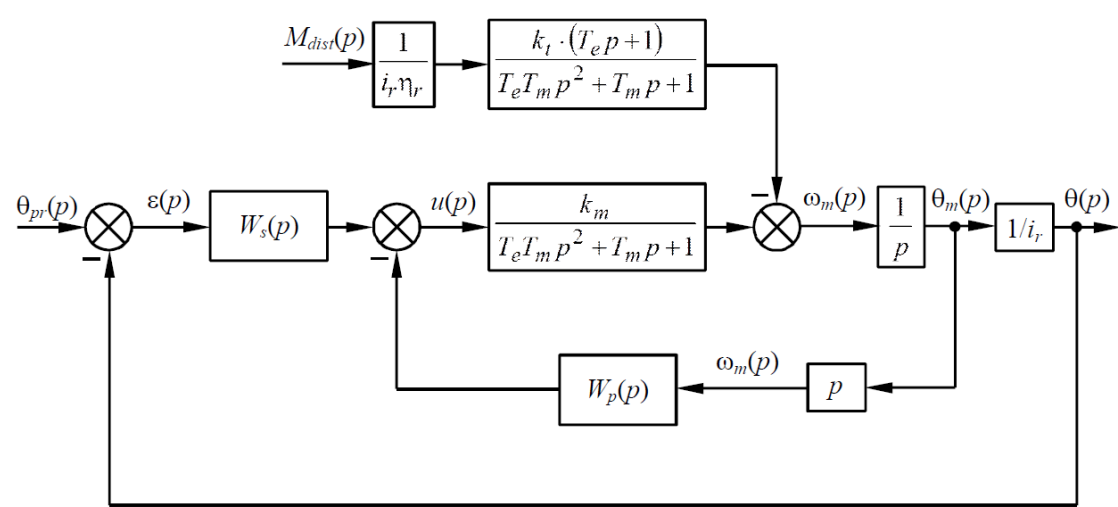


Рис. 21. Динамічна структурна схема системи автоматичного керування кутом повороту ланки маніпулятора

На схемі позначено: $W_s(p)$ – передавальна функція послідовного (serial) коригуючого пристрою; $W_p(p)$ – передавальна функція паралельного коригуючого пристрою; M_{dist} – збурюючий (disturbing) момент; ω_m – кутова швидкість двигуна.

На даний момент наведені на схемі динамічні параметри незмінної частини системи керування (двигуна та редуктора) є відомими, а передавальні функції коригуючих пристроїв будуть визначені в результаті синтезу.

3.3. Синтез бажаних передавальних функцій систем керування електроприводами ланок

Згідно [1, 3], асимптотична бажана ЛАЧХ розімкненої системи керування рухом ланки маніпулятора має вигляд (рис. 22), а бажана передавальна функція визначається рівнянням:

$$W_{des}(p) = \frac{k}{p} \frac{T_2 p + 1}{(T_1 p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)(T_5 p + 1)},$$

де $T_j = \omega_j^{-1}$ – постійні часу; ω_j – спрягаючі частоти, що визначаються з умов забезпечення необхідних показників якості керування; $j = 1..5$.

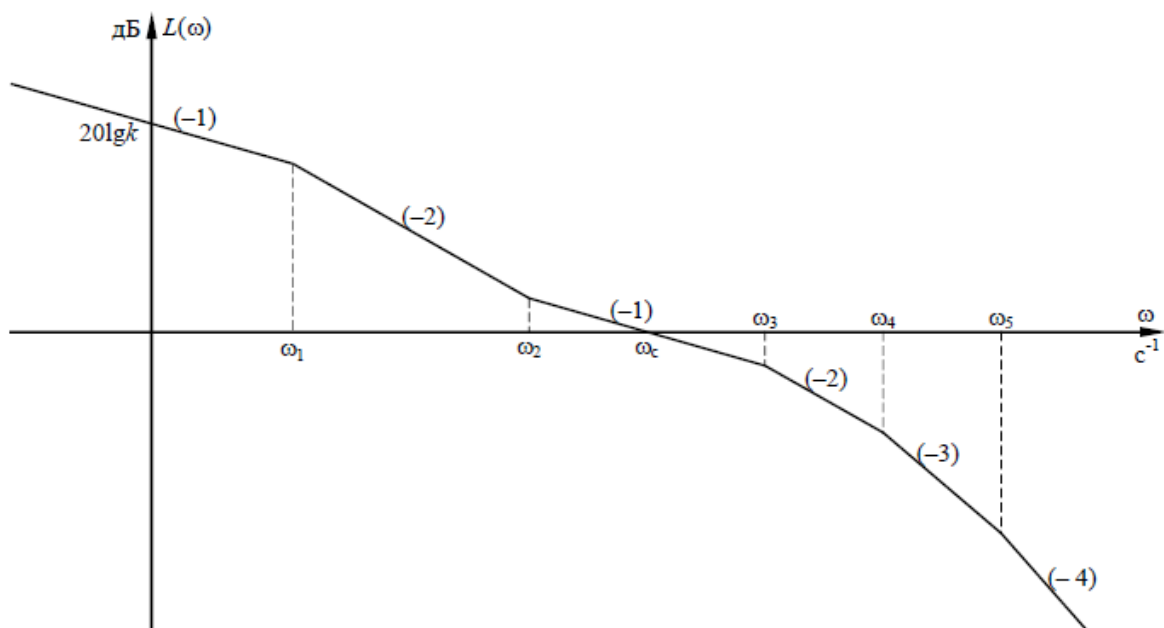


Рис. 22. Асимптотична бажана ЛАЧХ розімкненої системи керування

За допомогою (57) – (59) [3] визначаємо коефіцієнти підсилення ро- зімкнених систем керування, що забезпечують необхідну точність відпра- цювання лінійних вхідних сигналів з максимальними швидкостями при подоланні максимальних моментів збурення (рис. 23).

Припустимі помилки кутів повороту ланок, рад

$$\delta_{\max_1} := \frac{\min(\Delta x_{\max}, \Delta y_{\max})}{L_2 + L_3} \quad \delta_{\max_2} := \frac{\min(\Delta x_{\max}, \Delta y_{\max}, \Delta z_{\max})}{L_2 + 2L_3} \quad \delta_{\max_3} := \delta_{\max_2}$$

$$\delta_{\max}^T = (0 \quad 3.704 \times 10^{-4} \quad 2.445 \times 10^{-4} \quad 2.445 \times 10^{-4})$$

Максимальні значення збурного моменту

$$M_{\text{dist_max}_i} := M_{\max_i} - J_{\max_i} \cdot \varepsilon_{\max_i}$$

$$M_{\text{dist_max}}^T = (0 \quad 1.294 \times 10^3 \quad 1.461 \times 10^4 \quad 5.081 \times 10^3)$$

Коефіцієнти підсилення розімкнених систем

$$k_i := \frac{1}{\delta_{\max_i}} \cdot \left[\omega_{\max_i} + \frac{1}{(i_{r_i})^2 \cdot \eta_r} \cdot k_{t_i} \cdot M_{\text{dist_max}_i} \right]$$

$$k^T = (0 \quad 3.043 \times 10^3 \quad 1.696 \times 10^3 \quad 1.954 \times 10^3)$$

Рис. 23. Програма та результати розрахунку коефіцієнтів підсилення розімкнених систем керування електроприводами ланок

За рівняннями (63), (64) [3] визначаємо параметри синусоїдальних вхідних сигналів, при яких кутові швидкості та кутові прискорення ланок досягають максимальних значень (рис. 24).

Параметри синусоїдального сигналу

$$\Theta_{s_i} := \frac{(\omega_{\max_i})^2}{\varepsilon_{\max_i}} \quad \Theta_s^T \cdot \frac{180}{\pi} = (0 \quad 60.124 \quad 21.549 \quad 15.186)$$

$$\omega_{s_i} := \frac{\varepsilon_{\max_i}}{\omega_{\max_i}} \quad \omega_s^T = (0 \quad 1.044 \quad 0.993 \quad 1.543)$$

Рис. 24. Визначення параметрів синусоїдальних вхідних сигналів

На підставі (68), (72) – (75) [3] визначаємо спрягаючі частоти бажаних ЛАЧХ та відповідні ним постійні часу бажаних передавальних функцій розімкненої системи (рис. 25).

Спрягаючі частоти бажаних ЛАЧХ

$$\omega_{1_i} := \frac{(\omega_{s_i})^2 \cdot \Theta_{s_i}}{\sqrt{(k_i)^2 \cdot (\delta_{\max_i})^2 - (\omega_{s_i})^2 \cdot (\Theta_{s_i})^2}} \quad \omega_1^T = (0 \quad 4.34 \quad 2.063 \quad 2.555)$$

$$\alpha := 20$$

$$\omega_{2_i} := \sqrt{\frac{k_i \cdot \omega_{1_i}}{\alpha}} \quad \omega_2^T = (0 \quad 25.699 \quad 13.226 \quad 15.799)$$

$$\omega_3 := 70 \cdot \omega_2 \quad \omega_3^T = (0 \quad 1.799 \times 10^3 \quad 925.83 \quad 1.106 \times 10^3)$$

$$\omega_4 := 10 \cdot \omega_3 \quad \omega_4^T = (0 \quad 1.799 \times 10^4 \quad 9.258 \times 10^3 \quad 1.106 \times 10^4)$$

$$\omega_5 := 10 \cdot \omega_4 \quad \omega_5^T = (0 \quad 1.799 \times 10^5 \quad 9.258 \times 10^4 \quad 1.106 \times 10^5)$$

Постійні часу бажаних передавальних функцій, с:

$$T_{1_i} := (\omega_{1_i})^{-1} \quad T_{2_i} := (\omega_{2_i})^{-1} \quad T_{3_i} := (\omega_{3_i})^{-1} \quad T_{4_i} := (\omega_{4_i})^{-1} \quad T_{5_i} := (\omega_{5_i})^{-1}$$

$$T_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.23 \\ 0.485 \\ 0.391 \end{pmatrix} \quad T_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.039 \\ 0.076 \\ 0.063 \end{pmatrix} \quad T_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 5.559 \times 10^{-4} \\ 1.08 \times 10^{-3} \\ 9.042 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \quad T_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 5.559 \times 10^{-5} \\ 1.08 \times 10^{-4} \\ 9.042 \times 10^{-5} \end{pmatrix} \quad T_5 = \begin{pmatrix} 0 \\ 5.559 \times 10^{-6} \\ 1.08 \times 10^{-5} \\ 9.042 \times 10^{-6} \end{pmatrix}$$

Рис. 25. Програма та результати розрахунку спрягаючих частот бажаних ЛАЧХ та постійних часу бажаних передавальних функцій розімкненої системи

Отримані бажані передавальні функції є основою для визначення структури і параметрів коригуючих пристроїв систем керування електроприводами ланок.

3.4. Визначення неперервних передавальних функцій коригуючих пристроїв

За рівняннями (79), (85) – (88) [3] визначаємо структуру і параметри коригуючих пристроїв (рис. 26).

Коефіцієнти підсилення паралельних коригуючих пристроїв

$$k_{p_i} := \frac{1}{k_{m_i}} \cdot \left(\frac{T_{e_i} \cdot T_{\max_i}}{T_{3_i} \cdot T_{4_i}} - 1 \right) \quad k_p^T = \left(0 \quad 2.57 \times 10^4 \quad 2.577 \times 10^3 \quad 2.11 \times 10^3 \right)$$

Постійні часу паралельних коригуючих пристроїв

$$\tau_i := \frac{1}{k_{m_i} \cdot k_{p_i}} \cdot \left[(T_{3_i} + T_{4_i}) \cdot \left(\frac{k_{p_i}}{c_i} + 1 \right) - T_{\max_i} \right] \quad \tau^T = \left(0 \quad 6.063 \times 10^{-4} \quad 1.169 \times 10^{-3} \quad 9.746 \times 10^{-4} \right)$$

Передавальні функції паралельних коригуючих пристроїв

$$W_p(p) := \begin{cases} \text{for } i \in 1..n \\ W_i \leftarrow k_{p_i} \cdot (\tau_i \cdot p + 1) \\ W \end{cases}$$

Коефіцієнти підсилення послідовних коригуючих пристроїв

$$k_{s_i} := c_i \cdot k_i \cdot i_{r_i} \cdot (k_{m_i} \cdot k_{p_i} + 1) \quad k_s^T = \left(0 \quad 2.242 \times 10^{10} \quad 3.676 \times 10^9 \quad 3.169 \times 10^9 \right)$$

Передавальні функції послідовних коригуючих пристроїв

$$W_s(p) := \begin{cases} \text{for } i \in 1..n \\ W_i \leftarrow k_{s_i} \cdot \frac{T_{2_i} \cdot p + 1}{(T_{1_i} \cdot p + 1) \cdot (T_{5_i} \cdot p + 1)} \\ W \end{cases}$$

Рис. 26. Програма та результати визначення структури та параметрів коригуючих пристроїв

Оскільки коригуючі пристрої будуть реалізовані як програма мікроконтролера, потрібно знайти їх дискретні передавальні функції.

3.5. Визначення дискретних передавальних функцій коригуючих пристроїв

За рівняннями (89), (90) [3] визначаємо дискретні передавальні функції цифрових коригуючих пристроїв (рис. 27).

Максимальні спрягаючі частоти

$$\frac{\omega_s^T}{2\pi} = (0 \quad 2.863 \times 10^4 \quad 1.474 \times 10^4 \quad 1.76 \times 10^4)$$

Частота дискретизації

$$f_d := 3 \cdot 10^5$$

Період дискретизації

$$T := f_d^{-1} \quad T = 3.333 \times 10^{-6}$$

Визначаємо дискретні передавальні функції цифрових коригуючих пристроїв методом відображення диференціалів.

Передавальні функції паралельних цифрових коригуючих пристроїв:

$$W_{p_d}(z) := \begin{cases} \text{for } i \in 1..n \\ W_i \leftarrow k_{p_i} \cdot \left(\tau_i \cdot \frac{1 - z^{-1}}{T} + 1 \right) \\ W \end{cases}$$

Передавальні функції послідовних цифрових коригуючих пристроїв:

$$W_{s_d}(z) := \begin{cases} \text{for } i \in 1..n \\ W_i \leftarrow k_{s_i} \cdot \frac{T}{(T_{1_i} + T) - T_{1_i} \cdot z^{-1}} \cdot \left(T_{2_i} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{T} + 1 \right) \cdot \frac{T}{(T_{5_i} + T) - T_{5_i} \cdot z^{-1}} \\ W \end{cases}$$

Перевірка: $z_1 := 0.63$

$$W_s\left(\frac{z1-1}{T \cdot z1}\right) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1.841 \times 10^{11} \\ -6.351 \times 10^8 \\ -8.639 \times 10^8 \end{pmatrix} \quad W_{s_d}(z1) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1.841 \times 10^{11} \\ -6.351 \times 10^8 \\ -8.639 \times 10^8 \end{pmatrix}$$

Рис. 27. Програма та результати визначення структури і параметрів цифрових коригуючих пристроїв

За отриманими дискретними передавальними функціями коригуючих пристроїв можна скласти програму мікроконтролера, що буде реалізовувати закон керування.

3.6. Розрахунок частотних характеристик і визначення запасів стійкості систем керування

На основі рівнянь (89) – (91) [3] складаємо програму розрахунку комплексної передавальної функції, ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнених систем керування (рис. 28).

$j := \sqrt{-1}$

Комплексні передавальні функції:

$$W(\omega, T_m) := \begin{cases} \text{for } i \in 1..n \\ W_i \leftarrow e^{-j \cdot \omega \cdot T} \cdot W_{s_d}(e^{j \cdot \omega \cdot T}) \cdot \frac{\frac{k_{m_i}}{T_{e_i} \cdot T_{m_i} \cdot (j \cdot \omega)^2 + T_{m_i} \cdot j \cdot \omega + 1} \cdot \frac{1}{j \cdot \omega}}{1 + \frac{k_{m_i}}{T_{e_i} \cdot T_{m_i} \cdot (j \cdot \omega)^2 + T_{m_i} \cdot j \cdot \omega + 1} \cdot \frac{1}{j \cdot \omega} \cdot (e^{-j \cdot \omega \cdot T}) \cdot \frac{1 - e^{-j \cdot \omega \cdot T}}{T} \cdot W_{p_d}(e^{j \cdot \omega \cdot T})} \cdot \frac{1}{i_{r_i}} \end{cases}$$

W

ЛАЧХ та ЛФЧХ:

$$L(\omega, T_m) := \begin{cases} \text{for } i \in 1..n \\ L_i \leftarrow 20 \cdot \log(|W(\omega, T_m)_i|) \\ L \end{cases} \quad \varphi(\omega, T_m) := \begin{cases} \text{for } i \in 1..n \\ \varphi_i \leftarrow \arg(W(\omega, T_m)_i) \\ \varphi_i \leftarrow \varphi_i - 2\pi \text{ if } \varphi_i > -\frac{\pi}{2} \\ \varphi \end{cases}$$

Рис. 28. Програма розрахунку комплексної передавальної функції, ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнених систем керування

За рівняннями (94) – (97) [3] визначаємо параметри осі частот (рис. 29).

Найменші та найбільші спрягаючі частоти

$$\omega_1^T = (0 \quad 4.34 \quad 2.063 \quad 2.555) \quad \omega_5^T = (0 \quad 1.799 \times 10^5 \quad 9.258 \times 10^4 \quad 1.106 \times 10^5)$$

Параметри осі частот:

$$\text{Початкова та кінцева частоти} \quad \omega_{\text{begin}} := 10^{-1} \quad \omega_{\text{end}} := 10^5$$

$$\text{Число декад} \quad N_{\text{dec}} := \log\left(\frac{\omega_{\text{end}}}{\omega_{\text{begin}}}\right) \quad N_{\text{dec}} = 6$$

$$\text{Число точок} \quad N_{\text{points}} := 10^3$$

$$\text{Крок за частотою} \quad \Delta\omega_{\text{dec}} := \frac{N_{\text{dec}}}{N_{\text{points}}}$$

Матриця значень частоти:

$$\omega := \begin{cases} \text{for } i \in 0..N_{\text{points}} \\ \omega_{\text{dec}} \leftarrow i \cdot \Delta\omega_{\text{dec}} \\ \omega_i \leftarrow \omega_{\text{begin}} \cdot 10^{\omega_{\text{dec}}} \\ \omega \end{cases}$$

Рис. 29. Програма та результати розрахунку параметрів осі частот

Будуємо графіки ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнених систем керування електроприводами ланок для мінімального, максимального та подвійного максимального значень електромеханічної постійної часу (рис. 30 – 32).

Номер ланки: $i := 1$

Номер точок: $u := 0 \dots \text{rows}(\omega) - 1$

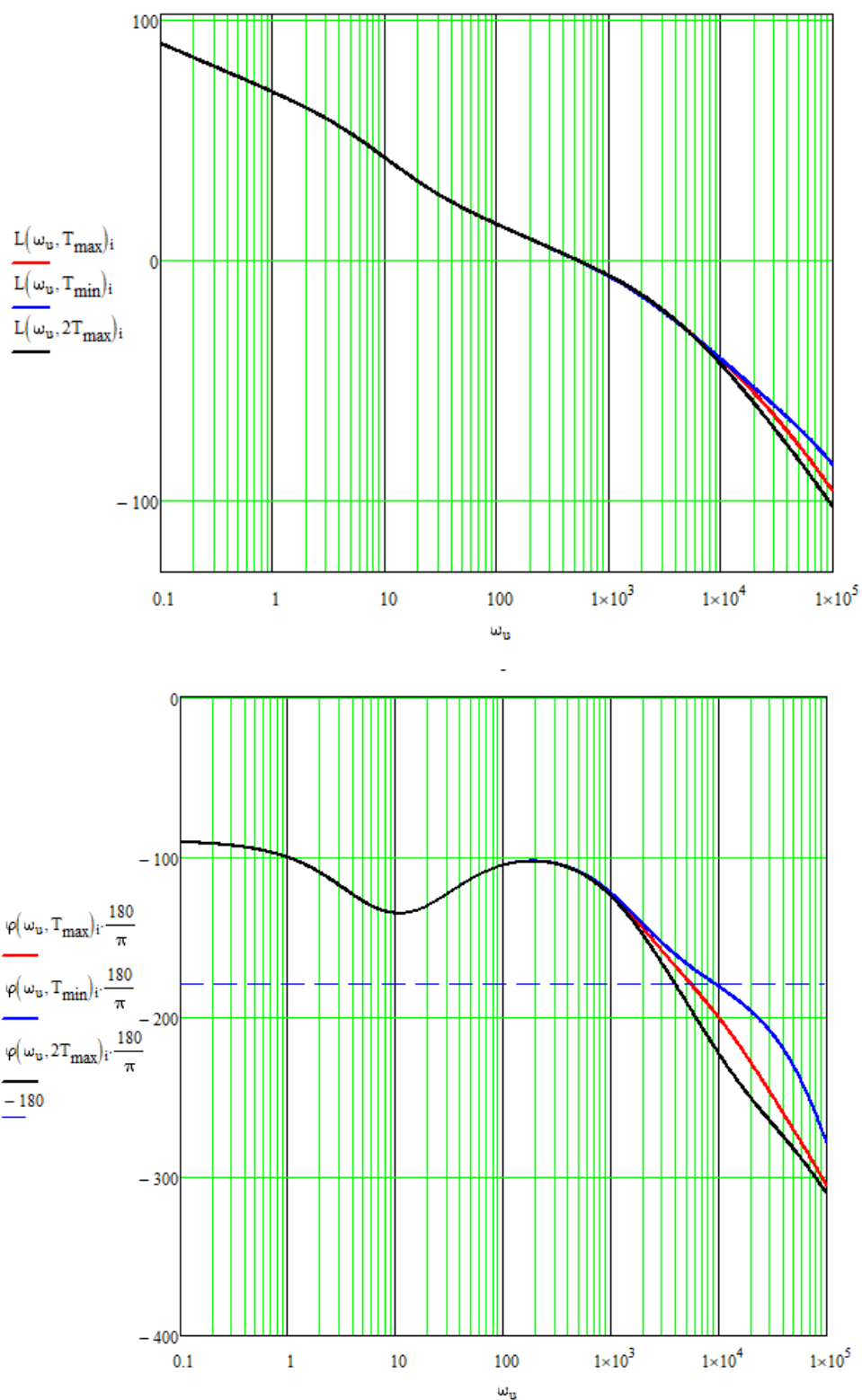


Рис. 30. Частотні характеристики розімкненої системи керування електроприводом першої ланки

| | | | | |
|-----|------|---------|---------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум | Подпись | Дата |

6.151.5341м.КП.07

Лист

31

Номер ланки: $i := 2$

Номер точек: $u := 0..rows(\omega) - 1$

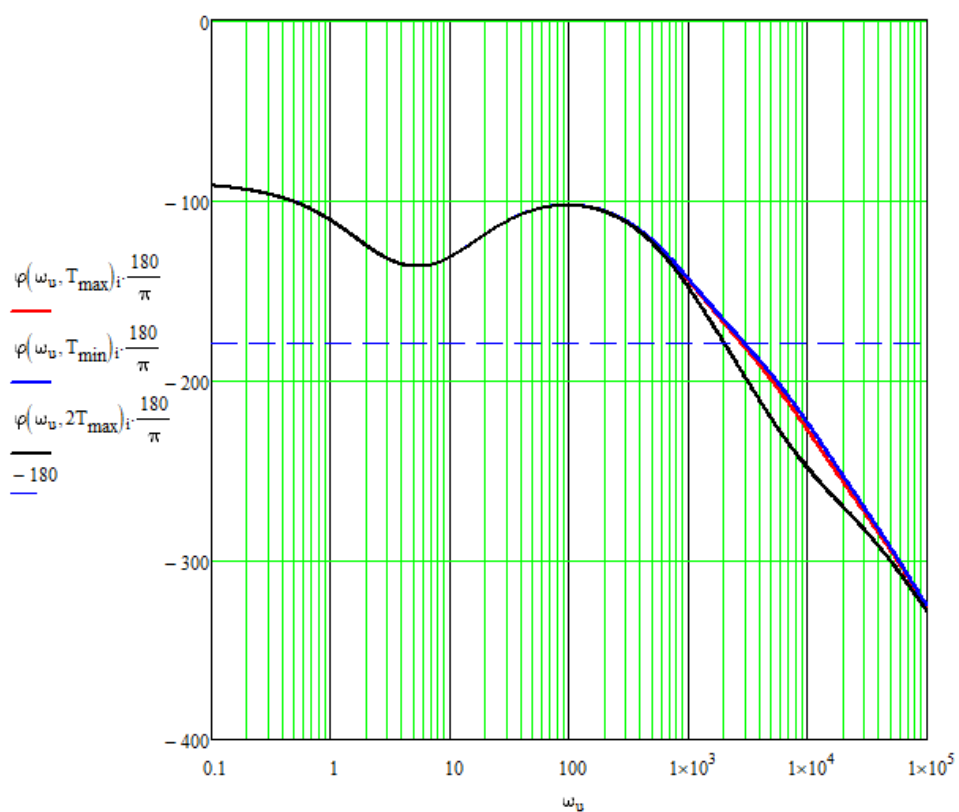
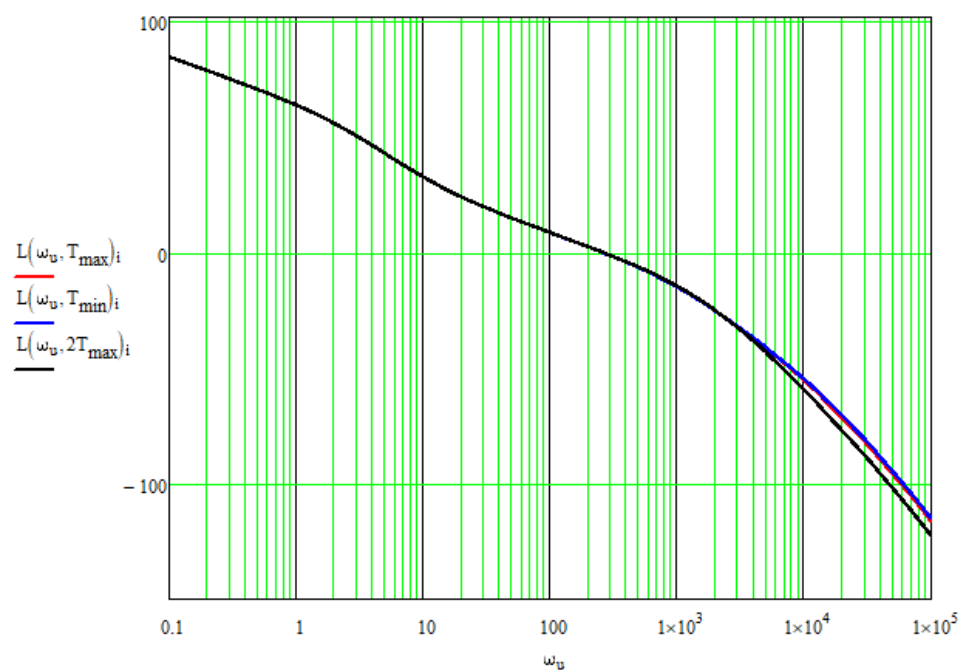


Рис. 31. Частотні характеристики розімкненої системи керування електроприводом другої ланки

| | | | | |
|-----|------|---------|---------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум | Подпись | Дата |

6.151.5341м.КП.07

Лист

32

Номер ланки: $i := 3$

Номер точок: $u := 0..rows(\omega) - 1$

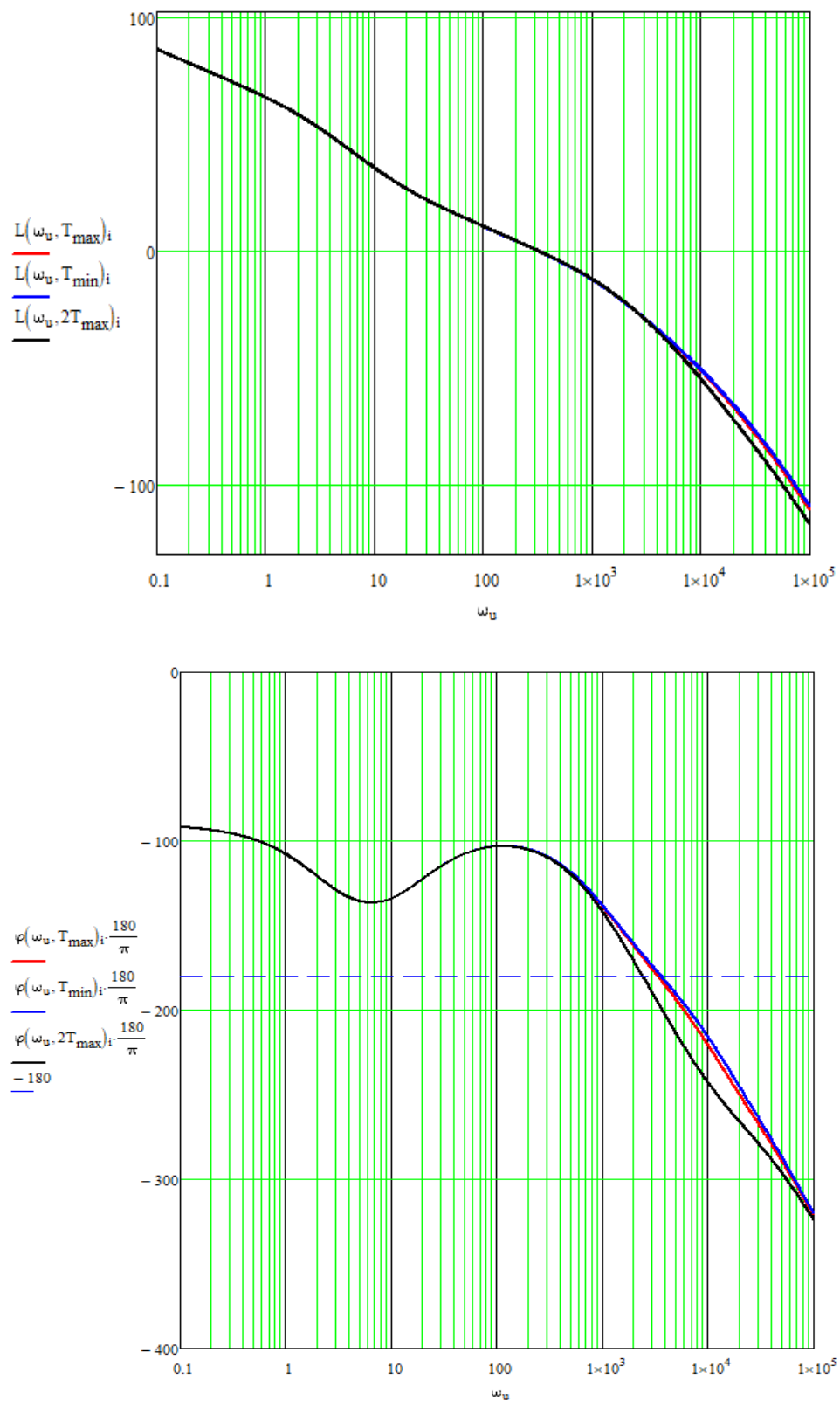


Рис. 32. Частотні характеристики розімкненої системи керування електроприводом третьої ланки

6.151.5341м.КП.07

Лист

33

| | | | | |
|-----|------|---------|---------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум | Подпись | Дата |

Зміна постійної часу T_m в межах від T_{\min} до $2T_{\max}$ призводить до істотного відхилення ЛАЧХ розімкнених систем від бажаних тільки на високочастотних ділянках (рис. 30 – 32). На низькочастотних та середньочастотних ділянках вони, незалежно від величини T_m , практично співпадають з бажаними, що свідчить про робастність систем керування.

За отриманими графіками частотних характеристик визначаємо запаси стійкості за фазою $\Delta\varphi$ та амплітудою ΔL (табл. 1).

Таблиця 1. Запаси стійкості систем керування

| | 1-й електропривод | | 2-й електропривод | | 3-й електропривод | |
|-------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | $\Delta\varphi, ^\circ$ | $\Delta L, \text{дБ}$ | $\Delta\varphi, ^\circ$ | $\Delta L, \text{дБ}$ | $\Delta\varphi, ^\circ$ | $\Delta L, \text{дБ}$ |
| $T_m = T_{\min}$ | 69,97 | 44,7 | 70,01 | 32,59 | 70,47 | 32,94 |
| $T_m = T_{\max}$ | 69,87 | 30,89 | 69,95 | 30,69 | 70,31 | 30,82 |
| $T_m = 2T_{\max}$ | 69,56 | 26,1 | 69,81 | 24,56 | 70,1 | 25,32 |

Для кожного з трьох електроприводів, при зміні електромеханічної постійної часу від мінімального до максимального значення, запаси стійкості практично не змінюються, тому при роботі маніпулятора з навантаженням, що не перевищує номінальне, показники якості керування будуть відповідати заданим. При навантаженні, що вдвічі перевищує номінальне, системи керування залишаються стійкими, причому запаси стійкості за фазою знижуються менше, ніж на 1° , що свідчить про незначне підвищення перерегулювання та часу перехідного процесу при двократному перевищенні маси об'єкта маніпулювання.

Таким чином, моделювання динаміки систем керування можна проводити тільки для $T_m = T_{\max}$.

3.7. Моделювання динаміки електроприводів ланок і визначення показників якості керування

Задачею моделювання є розрахунок перехідних процесів у системі керування при відпрацюванні типових вхідних діянь [3]. Для цього створюємо модель системи керування електроприводом ланки маніпулятора у програмі Simulink (рис. 33).

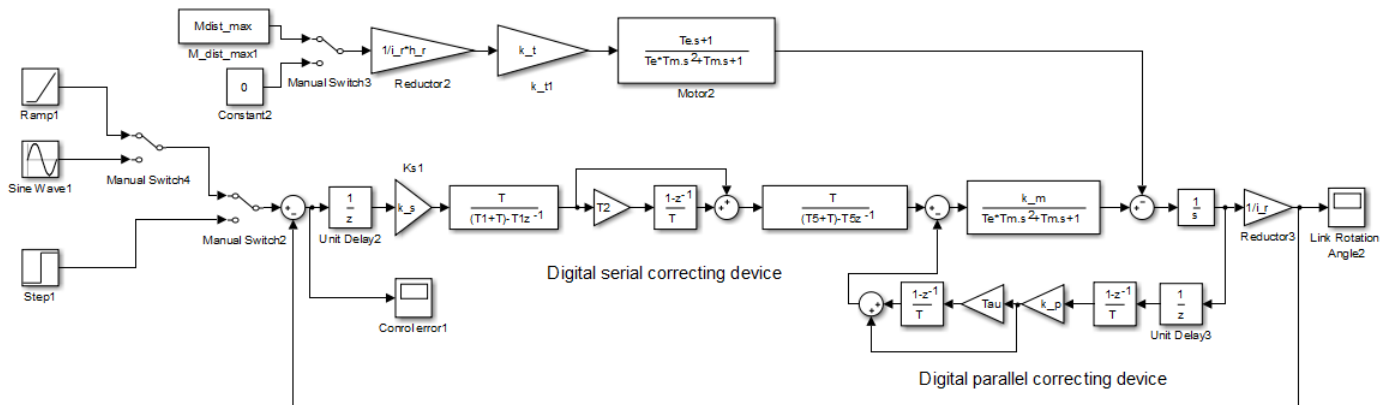


Рис. 33. Динамічна модель системи керування у програмі Simulink

Розраховані у середовищі Mathcad параметри систем керування виводимо на екран (рис. 34) і переносимо їх до файлів Drive1.m, Drive2.m і Drive3.m (рис. 35), що будуть підключені до моделі в Simulink.

$$\begin{aligned}
 k_m &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0.704 \\ 0.704 \\ 0.764 \end{pmatrix} & k_t &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1.787 \\ 1.787 \\ 7.192 \end{pmatrix} & T_e &= \begin{pmatrix} 0 \\ 5.977 \times 10^{-3} \\ 5.977 \times 10^{-3} \\ 3.956 \times 10^{-3} \end{pmatrix} & T_{\max} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0.093 \\ 0.035 \\ 0.033 \end{pmatrix} & i_r &= \begin{pmatrix} 0 \\ 286.69 \\ 841.031 \\ 768.175 \end{pmatrix} & \eta_r &= 0.9 \\
 & & & & & & T &= 3.333 \times 10^{-6} \\
 k_p &= \begin{pmatrix} 0 \\ 2.57 \times 10^4 \\ 2.577 \times 10^3 \\ 2.11 \times 10^3 \end{pmatrix} & \tau &= \begin{pmatrix} 0 \\ 6.063 \times 10^{-4} \\ 1.169 \times 10^{-3} \\ 9.746 \times 10^{-4} \end{pmatrix} & k_s &= \begin{pmatrix} 0 \\ 2.242 \times 10^{10} \\ 3.676 \times 10^9 \\ 3.169 \times 10^9 \end{pmatrix} & T_1 &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0.23 \\ 0.485 \\ 0.391 \end{pmatrix} & T_2 &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0.039 \\ 0.076 \\ 0.063 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$$T_5 = \begin{pmatrix} 0 \\ 5.559 \times 10^{-6} \\ 1.08 \times 10^{-5} \\ 9.042 \times 10^{-6} \end{pmatrix} \quad M_{dist_max} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1.294 \times 10^3 \\ 1.461 \times 10^4 \\ 5.081 \times 10^3 \end{pmatrix} \quad \omega_{max} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1.096 \\ 0.374 \\ 0.409 \end{pmatrix} \quad \Theta_s = \begin{pmatrix} 0 \\ 1.049 \\ 0.376 \\ 0.265 \end{pmatrix} \quad \omega_s = \begin{pmatrix} 0 \\ 1.044 \\ 0.993 \\ 1.543 \end{pmatrix}$$

Рис. 34. Розраховані параметри систем керування

| Drive1.m | + | Drive2.m | + | Drive3.m | + |
|---|---|--|---|--|---|
| 1 - k_m=0.704%коэффициент | | 1 - k_m=0.704%коэффициент | | 1 - k_m=0.764%коэффициент передачи двигателя за напругою | |
| 2 - k_t=1.787%коэффициент | | 2 - k_t=1.787%коэффициент | | 2 - k_t=7.192%коэффициент передачи двигателя за моментом | |
| 3 - Te=5.977E-3%електромагнітна постійна часу | | 3 - Te=5.977E-3%електромагнітна постійна часу | | 3 - Te=3.956E-3%електромагнітна постійна часу | |
| 4 - Tm=0.093%електромеханічна постійна часу | | 4 - Tm=0.035%електромеханічна постійна часу | | 4 - Tm=0.033%електромеханічна постійна часу | |
| 5 - i_r=286.69%передавальне число редуктора | | 5 - i_r=841.031%передавальне число редуктора | | 5 - i_r=768.175%передавальне число редуктора | |
| 6 - h_r=0.9%ККД редуктора | | 6 - h_r=0.9%ККД редуктора | | 6 - h_r=0.9%ККД редуктора | |
| 7 - T=3.333E-6%період дискретизації | | 7 - T=3.333E-6%період дискретизації | | 7 - T=3.333E-6%період дискретизації | |
| 8 - k_p=2.57E+4%коefficient підсилення паралельного кориг.пристрою | | 8 - k_p=2.577E+3%коefficient підсилення паралельного кориг.пристрою | | 8 - k_p=2.11E+3%коefficient підсилення паралельного кориг.пристрою | |
| 9 - Tau=6.063E-4%постійна часу паралел.кориг.пристрою | | 9 - Tau=1.169E-3%постійна часу паралел.кориг.пристрою | | 9 - Tau=9.746E-4%постійна часу паралел.кориг.пристрою | |
| 10 - k_s=2.242E+10%коefficient підсилення послідовного кориг.пристрою | | 10 - k_s=3.676E+9%коefficient підсилення послідовного кориг.пристрою | | 10 - k_s=3.169E+9%коefficient підсилення послідовного кориг.пристрою | |
| 11 - T1=0.23%постійна часу послід.кориг.пристрою | | 11 - T1=0.485%постійна часу послід.кориг.пристрою | | 11 - T1=0.391%постійна часу послід.кориг.пристрою | |
| 12 - T2=0.039%постійна часу послід.кориг.пристрою | | 12 - T2=0.076%постійна часу послід.кориг.пристрою | | 12 - T2=0.063%постійна часу послід.кориг.пристрою | |
| 13 - T5=5.559E-6%постійна часу послід.кориг.пристрою | | 13 - T5=1.08E-5%постійна часу послід.кориг.пристрою | | 13 - T5=9.042E-6%постійна часу послід.кориг.пристрою | |
| 14 - Mdist_max=1.294E+3%максимальний збурюючий момент | | 14 - Mdist_max=1.461E+4%максимальний збурюючий момент | | 14 - Mdist_max=5.081E+3%максимальний збурюючий момент | |
| 15 - w_max=1.096%максимальна кутова швидкість ланки | | 15 - w_max=0.374%максимальна кутова швидкість ланки | | 15 - w_max=0.409%максимальна кутова швидкість ланки | |
| 16 - Q_s=1.049%амплітуда синусоїдального вхідного діяння | | 16 - Q_s=0.376%амплітуда синусоїдального вхідного діяння | | 16 - Q_s=0.265%амплітуда синусоїдального вхідного діяння | |
| 17 - w_s=1.044%частота синусоїдального вхідного діяння | | 17 - w_s=0.993%частота синусоїдального вхідного діяння | | 17 - w_s=1.543%частота синусоїдального вхідного діяння | |

Рис. 35. Завдання параметрів моделі в Simulink

На вхід моделі подаємо по черзі лінійні сигнали завдання зі швидкостями ω_{max} при максимальних значення моментів збурення M_{dist_max} . В результаті отримуємо осцилограми суми швидкісної та моментної складових помилки для трьох електроприводів (рис. 36 – 38).

Аналогічно подаємо синусоїдальні сигнали з параметрами, розрахованими у п. 3.3, і отримуємо осцилограми гармонічної складової помилки (рис. 39 – 41).

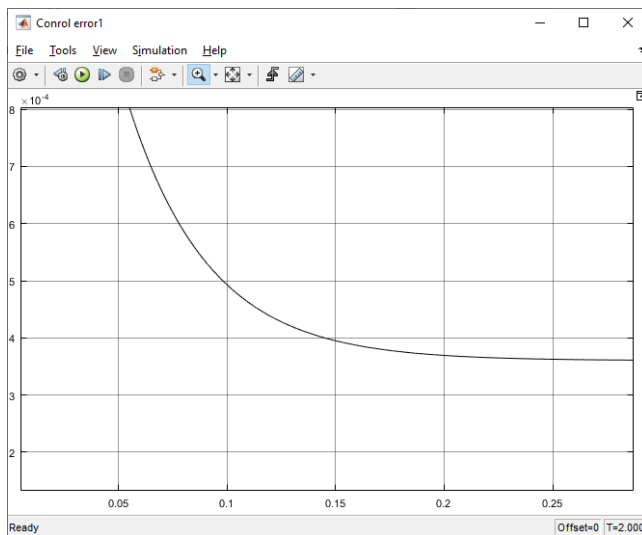
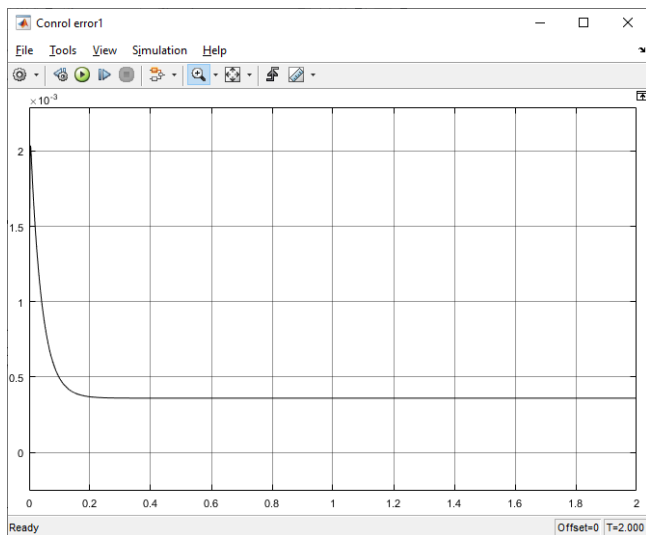


Рис. 36. Осцилограма суми швидкісної та моментної складових помилки для першого електропривода

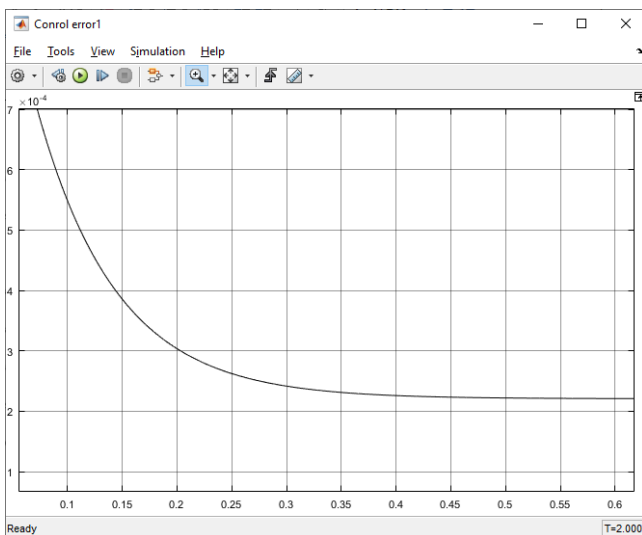
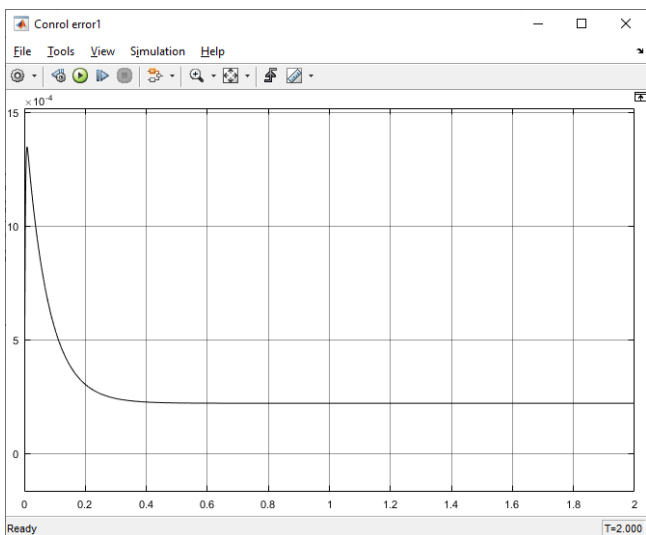


Рис. 37. Осцилограма суми швидкісної та моментної складових помилки для другого електропривода

| | | | | |
|-----|------|---------|---------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум | Подпись | Дата |

6.151.5341м.КП.07

Лист

37

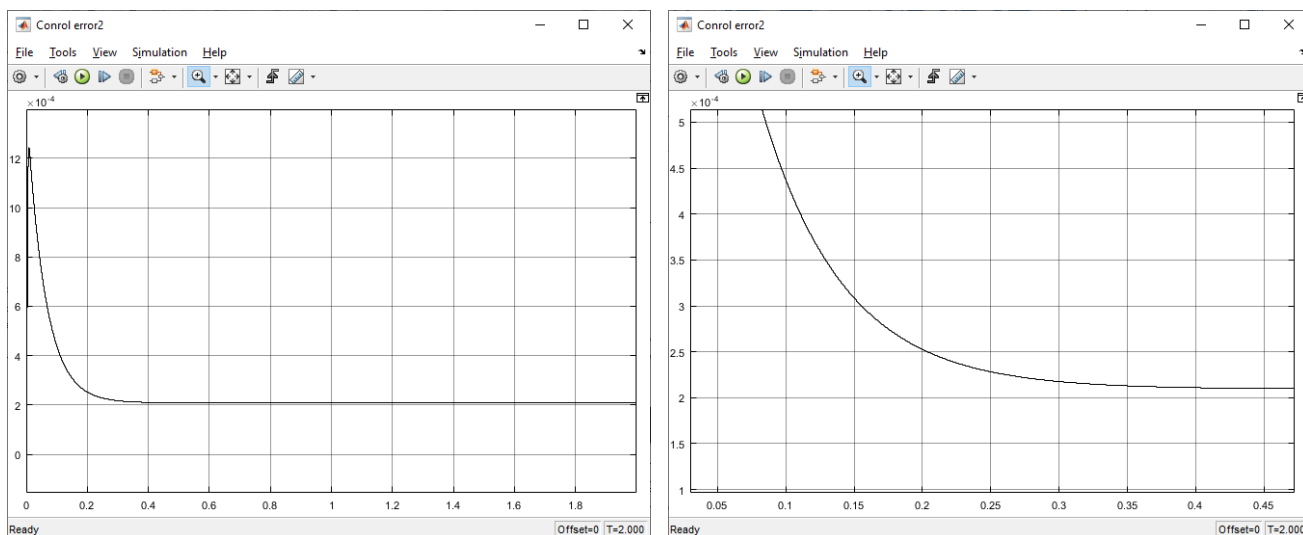


Рис. 38. Осцилограма суми швидкісної та моментної складових помилки для третього електропривода

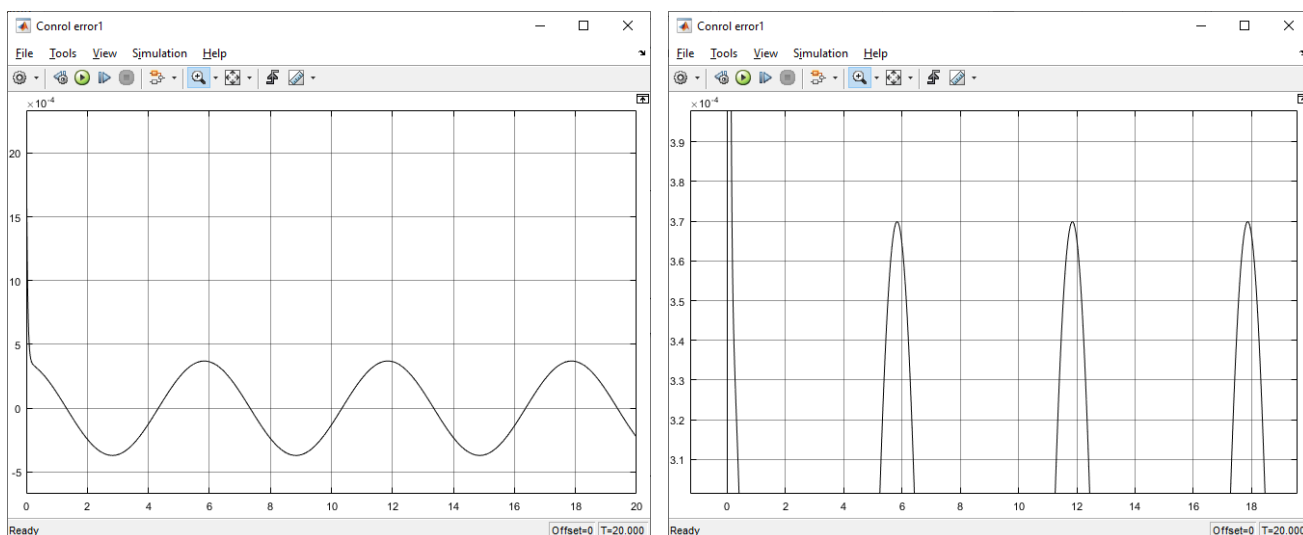


Рис. 39. Осцилограма гармонічної складової помилки для першого електропривода

| | | | | |
|-----|------|---------|---------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум | Подпись | Дата |

6.151.5341м.КП.07

Лист

38

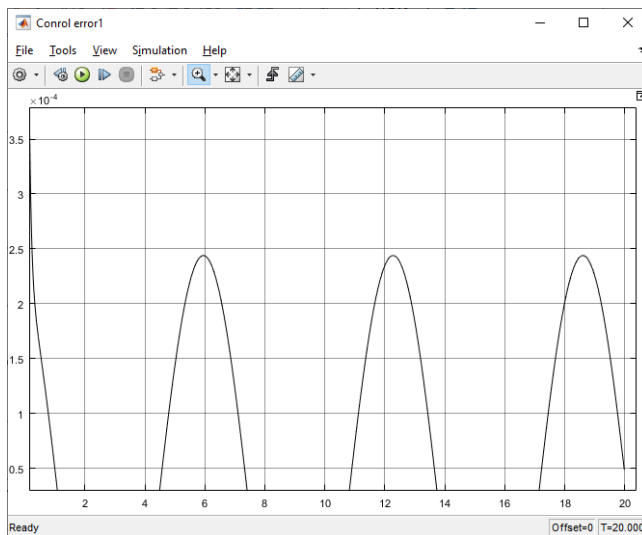
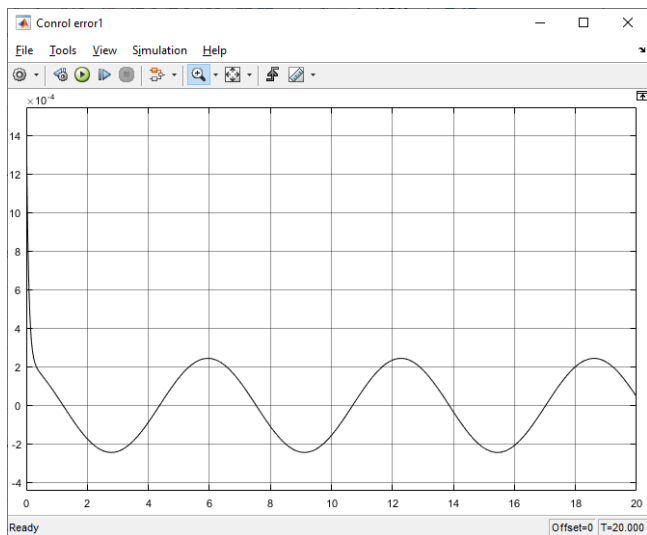


Рис. 40. Осцилограма гармонічної складової помилки для другого електропривода

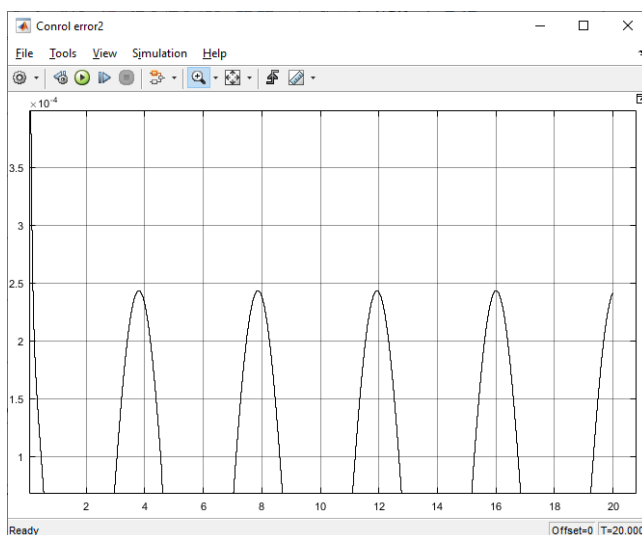
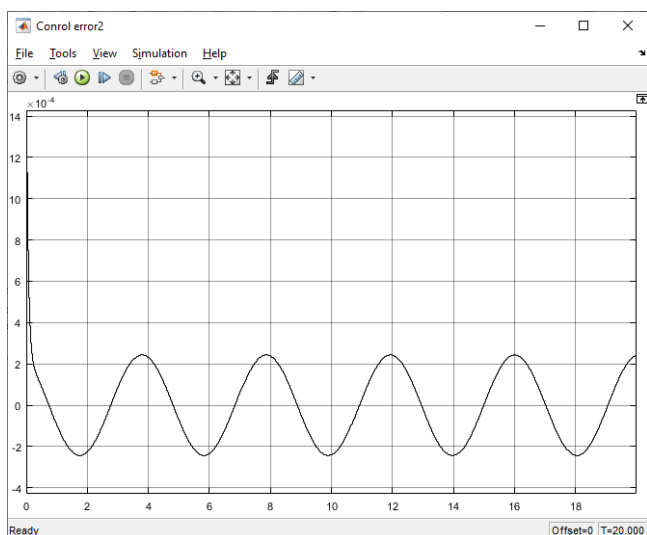


Рис. 41. Осцилограма гармонічної складової помилки для третього електропривода

| | | | | |
|-----|------|---------|---------|------|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докум | Подпись | Дата |

6.151.5341м.КП.07

Лист

39

За отриманими осцилограмами визначаємо усталені значення суми швидкісної та моментної складових помилки і амплітуди гармонічної складової помилки. Результати заносимо до таблиці 2. Отримані значення помилок не перевищують максимально припустимих.

Таблиця 2. Усталені значення складових помилки

| № електропривода | 1 | 2 | 3 |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $e_{st.v} + e_{st.t}$, рад | $3,6 \cdot 10^{-4}$ | $2,2 \cdot 10^{-4}$ | $2,09 \cdot 10^{-4}$ |
| e_h , рад | $3,7 \cdot 10^{-4}$ | $2,44 \cdot 10^{-4}$ | $2,43 \cdot 10^{-4}$ |
| δ_{\max} , рад | $3,704 \cdot 10^{-4}$ | $2,447 \cdot 10^{-4}$ | $2,446 \cdot 10^{-4}$ |

Для визначення прямих показників якості керування подаємо на вхід моделі одиничний сходячковий сигнал. Отримуємо перехідні характеристики (рис. 42 – 44), за якими визначаємо максимальне перерегулювання σ_{\max} і час перехідного процесу t_{set} (табл. 3).

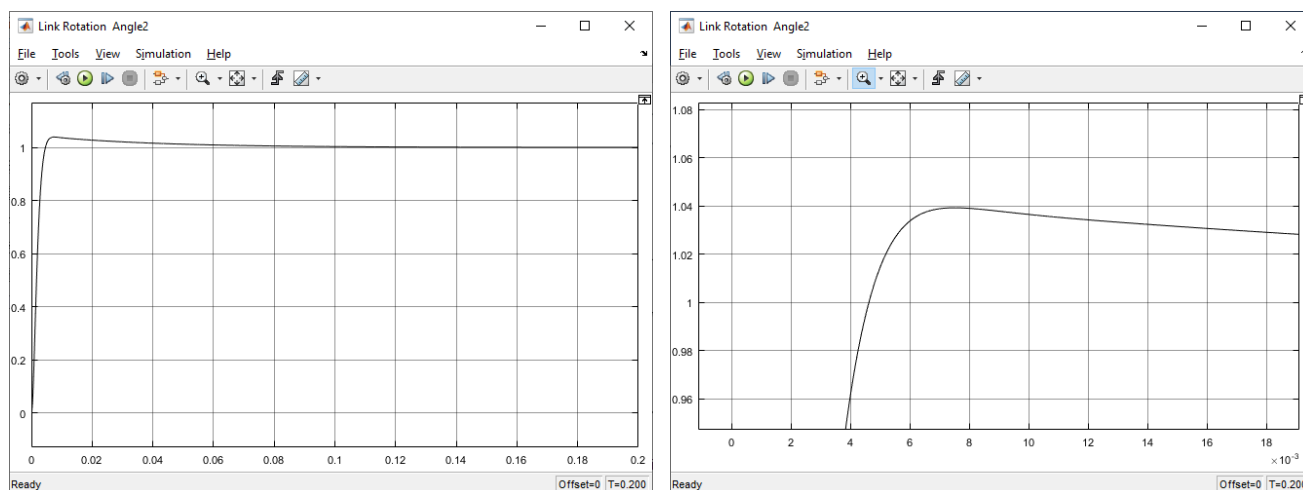


Рис. 42. Перехідна характеристика системи керування першим електроприводом

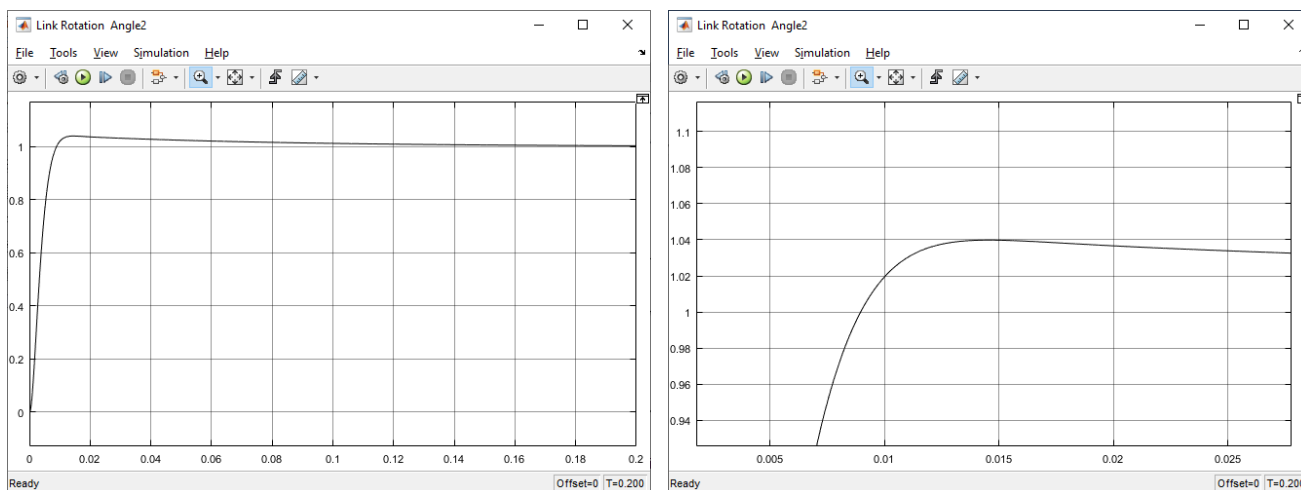


Рис. 43. Перехідна характеристика системи керування другим електроприводом

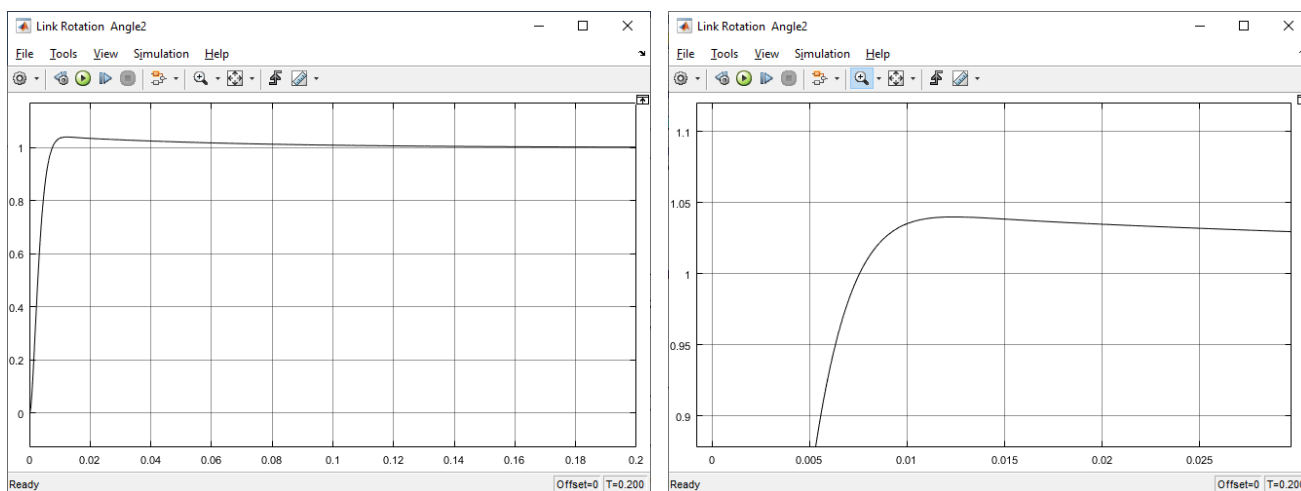


Рис. 44. Перехідна характеристика системи керування третім електроприводом

Таблиця 3. Прямі показники якості керування

| № електропривода | 1 | 2 | 3 |
|---------------------|-----|-----|-----|
| σ_{\max} , % | 4 | 4 | 4 |
| t_{set} , мс | 3,9 | 7,5 | 6,3 |

Отримані показники якості керування повністю задовольняють поставленим вимогам.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання курсового проекту розроблено систему автоматичного керування електроприводами ланок морського робота, призначеного для транспортування об'єктів з водної поверхні на палубу судна. При цьому були розв'язані наступні задачі.

Визначено закони зміни у часі кутів повороту ланок маніпулятора при відпрацюванні типової траєкторії руху схвату до об'єкта. Це дало змогу обчислити максимальні кутові швидкості та прискорення ланок, а потім максимальні моменти навантаження.

Для забезпечення визначених швидкостей руху ланок з максимальним навантаженням, обрано вентильні електродвигуни: ДБМ192-27-3 для електроприводу першої ланки, ДБМ192-27-3 – для другої та ДБМ142-11-3 для третьої.

Розроблено функціональну схему систем керування електроприводами ланок маніпулятора. Кожен електропривод містить головний зворотний зв'язок за кутом повороту ланки та місцевий зворотний зв'язок за швидкістю електродвигуна.

Побудовано динамічну структурну схему системи автоматичного керування рухом ланки маніпулятора.

Методом бажаних ЛАЧХ визначено структуру і параметри послідовного та паралельного коригуючих пристроїв. Методом відображення диференціалів визначено їх дискретні передавальні функції, за якими можна скласти програму для мікроконтролера, що реалізовуватиме закон керування.

Визначено запаси стійкості систем автоматичного керування електроприводами повороту ланок. Запаси стійкості за фазою для 1-го, 2-го та 3-го електроприводів становлять відповідно $69,97^\circ$, $70,01^\circ$ і $70,47^\circ$. Встановлено, що зміна електромеханічної постійної часу внаслідок руху ланок маніпулятора практично не впливає на точність та запаси стійкості систем керування.

При двократному перевищенні електромеханічною постійною часу її максимального значення внаслідок значного перевантаження маніпулятора, запаси

| | | | | | | |
|-----|------|---------|---------|------|-------------------|------|
| | | | | | 6.151.5341м.КП.07 | Лист |
| | | | | | | 42 |
| Изм | Лист | № докум | Подпись | Дата | | |

стійкості зменшуються не більше ніж на 1° , що не може істотно вплинути на показники якості керування. Це свідчить про робастність розробленої системи.

Побудовано динамічну модель систем керування у програмі "Simulink" і досліджено їх реакцію на типові діяння: лінійний вхідний сигнал з максимальною швидкістю при подоланні максимального моменту збурення; синусоїдальний вхідний сигнал, перша та друга похідна якого відповідають максимальній швидкості та прискоренню ланки маніпулятора; одиничний сходячковий сигнал. В результаті встановлено, що для кожного електропривода сума швидкісної та моментної складових помилки керування є меншою за максимально припустиму помилку, а гармонічна складова – дорівнює припустимій. Максимальні перерегулювання складають 4% для всіх приводів, що не перевищує заданого у початкових даних припустимого значення 5%. Час перехідного процесу для першого, другого та третього електроприводів складає відповідно 3,9 мс, 7,5 мс, 6,3 мс.

Таким чином, розроблена система задовольняє поставленим вимогам якості керування.

| | | | | | | |
|-----|------|---------|---------|------|-------------------|------|
| | | | | | 6.151.5341м.КП.07 | Лист |
| | | | | | | 43 |
| Изм | Лист | № докум | Подпись | Дата | | |

СПИСКИ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бурдаков, С. Ф. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов: Учеб. пособие [Текст] / С. Ф. Бурдаков, В. А. Дьяченко, А. Н. Тимофеев. – М.: Высш. шк., 1986. – 264 с.
2. Волокитина, Е. В. Новые моментные вентильные электродвигатели для прецизионных электроприводов технологических роботов и металлообрабатывающего оборудования [Текст] / Е. В. Волокитина, А. И. Власов, Ю. Г. Опалев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2011. – №4. – С. 37 – 40.
3. Черно, О. О. Методичні вказівки до виконання курсового проекту «Проектування системи автоматичного керування суднового вантажного маніпулятора» : у 2 ч. Частина 1. Теоретичні основи та методика проектування [Ел. ресурс] / О. О. Черно, О. Г. Васильєв. – Миколаїв : НУК, 2017. – 31 с.