

Моделювання робочих процесів машин

УДК 621.396.6

М.Г. Діктерук, к.т.н., доцент (КНУБА);
Ю.В. Човнюк, к.т.н., проф. (Міжнародна кадрова академія)

АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕХАТРОННИХ ПРИСТРОЇВ СЛІДКУЮЧИХ СИСТЕМ ПОЗИЦІОНУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАНІПУЛЯТОРІВ

АНОТАЦІЯ. Проведено всебічний аналіз та здійснена оптимізація керування функціонуванням мехатронних пристроїв слідкуючих систем позиціонування будівельних маніпуляторів.

Ключові слова: аналіз, оптимізація, керування, функціонування, мехатронні пристрої, слідкуючі системи, позиціонування, будівельні маніпулятори.

АННОТАЦИЯ. Проведен всесторонний анализ и осуществлена оптимизация управления функционированием мехатронных устройств следящих систем позиционирования строительных манипуляторов.

Ключевые слова: анализ, оптимизация, управление, функционирование, мехатронные устройства, следящие системы, позиционирование, строительные манипуляторы.

SUMMARY. The omnidirectional analysis and optimization of control of operation for mechatronic devices of tracking systems of position of building manipulators are realized.

Key words: analysis, optimizations, control, operation, mechatronic devices, tracking systems, position, building manipulators.

Постановка проблеми. Пристрій, який дозволяє маніпулювання предметами, має назву маніпулятора, який складається з руки та кисті. Останнім часом у будівельній індустрії інтенсивно починають використовуватись будівельні маніпулятори. Рука будівельного маніпулятора є багатоланцюговий механізм, який має кілька степенів вільності руху. Рука закінчується кистю, призначеною для захоплення предметів чи якогось інструменту. У кожному шарнірі руки є слідкуюча система позиціонування, яка дозволяє забезпечити відповідне керування будівельним маніпулятором за положенням та орієнтацією кисті чи інструменту. Зазвичай у слідкуючих системах дія зворотного зв'язку повторюється через короткий інтервал часу, який складає біля 2 мс. При цьому регулювання здійснюється таким чином, щоб значення кутів зчленувань руки будівельного маніпулятора співпадали із заданими величинами. Проте, внаслідок наявності інерції у слідкуючій системі виникають неминуче коливні перехідні процеси, які для якісного керування маніпулятором слід суттєво зменшити.

Аналіз останніх публікацій по темі дослідження. У роботах [1, 2, 4-6] проведені дослідження різноманітних слідкуючих систем позиціонування (будівельних) маніпуляторів, проте відсутня оптимізація їх функціонування, яка б дозволяла побудувати таку систему керування та функціонування на одній, характерній для слідкуючих систем частоті, що складає приблизно 500 Гц, і в якій відсутня (або максимально зменшена) коливна характеристика перехідного процесу.

Мета даної роботи полягає у вдосконаленні оптимальних показників перехідного процесу в слідкуючих системах позиціонування будівельних маніпуляторів з мехатронними пристроями на основі всебічного аналізу можливих режимів їх функціонування та критеріїв якості керування. Реалізація саме такого підходу і досягнення мети роботи дозволяють мінімізувати небажані коливні перехідні процеси у вказаних слідкуючих системах та підвищити суттєво якість керування самим будівельним маніпулятором, оскільки

значно зменшить інерційні характеристики останніх.

Виклад основного змісту дослідження. Будівельний маніпулятор є багатоланцюговий механізм, зчленування якого за допомогою слідкуючої системи встановлюються у певне положення, і таким чином здійснюється керування положенням й орієнтацією кисті чи інструменту, розміщеного на кінці маніпулятора. Для керування зчленуваннями гіпотетичної роботосистеми скористаємось слідкуючою системою, оснащеною двигуном постійного струму (рис.1). Величина струму i , який надходить з цифрового аналогового перетворювача (ЦАП), підсилюється й прикладається до електродвигуна, на виході якого виникає момент M , майже пропорційний силі струму i , що протікає у роторі. Таким чином, вважаючи, що живлення електродвигуна здійснюється від деякого ідеального підсилювача струму, крутний момент на виході електродвигуна можна визначити наступним чином:

$$M = k_t \cdot i_a = K_t \cdot A \cdot i, \quad (1)$$

де k_t – коефіцієнт крутного моменту електродвигуна; A – коефіцієнт підсилен-

ня підсилювача струму; i_a – струм у роторі електродвигуна після підсилювача.

Зупинимось на розгляді керувань рухом приводу. Скористаємось при цьому наступними позначеннями: J_m – момент інерції ротора; J_1 – момент інерції навантаження; θ – кут повороту вихідного вала; T_1 – момент навантаження; P – сила, що діє вздовж дотичної у зубчастій передачі; N – передавальне число; r – радіус шестерні. Рівняння руху можна подати у вигляді:

$$\begin{cases} J_m \cdot \ddot{\theta}_a = M - P \cdot r; \\ J_1 \cdot \ddot{\theta} = P \cdot N \cdot r - T_1; \\ \theta_a = N \cdot \theta. \end{cases} \quad (2)$$

Перетворюючи рівняння (2), можна встановити наступну залежність між вхідним сигналом i та кутом повороту θ вихідного вала системи, що розглядається:

$$\left(J_m + \frac{J_1}{N^2} \right) \cdot \ddot{\theta} = \frac{k_t \cdot A}{N} \cdot i - \frac{T_1}{N^2}. \quad (3)$$

Щоб отримати слідкуючу систему позиціонування, яка забезпечує

Заданий вплив (уставка) Q

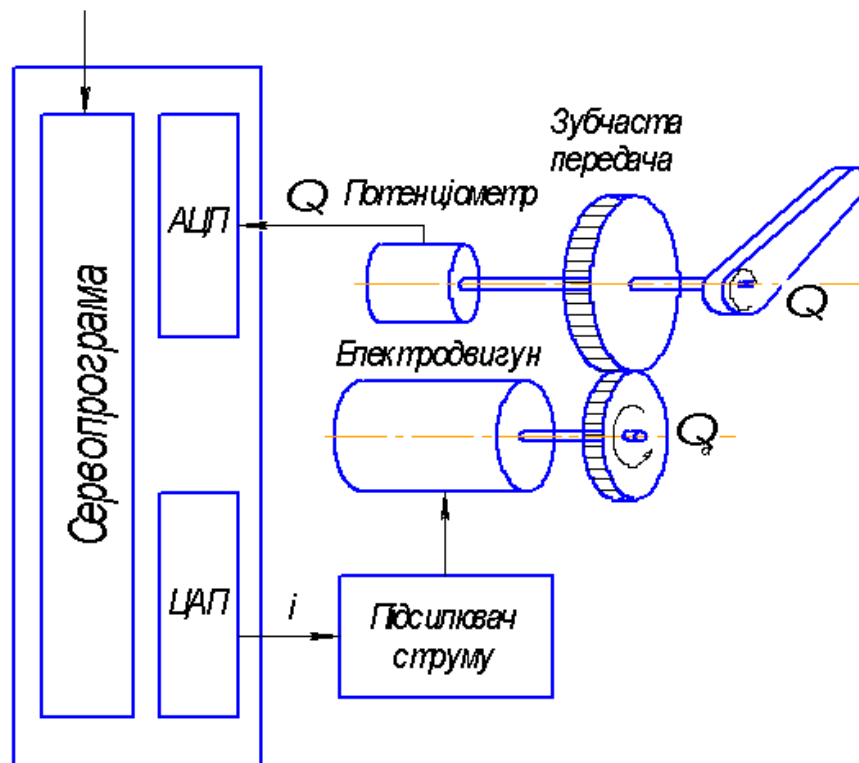


Рис. 1. Слідкуюча система маніпулятора

пропорціональне й диференціальне регулювання системи, що розглядається, необхідно охопити контуром зворотного зв'язку так, щоб вхідний сигнал i визначався наступною залежністю

$$i = k_e \cdot (\theta_r - \theta) + k_v \cdot (\dot{\theta}_r - \dot{\theta}), \quad (4)$$

де θ_r – задавальна величина (уставка) слідкуючої системи, а k_e та k_v – коефіцієнти підсилення контурів пропорціонального зворотного зв'язку за положенням й за швидкістю відповідно. Для позиційної слідкуючої системи, яка має такий зворотний зв'язок, рівняння руху можна записати у вигляді:

$$\left(J_m + \frac{J_1}{N^2} \right) \cdot \ddot{\theta} + \frac{k_t \cdot A \cdot k_v}{N} \cdot \dot{\theta} + \frac{k_t \cdot A \cdot k_e}{N} \cdot \theta = \frac{k_t \cdot A \cdot k_v}{N} \cdot \dot{\theta}_r + \frac{k_t \cdot A \cdot k_e}{N} \cdot \theta_r - \frac{T_1}{N^2}. \quad (5)$$

Вводячи нові позначення $J = J_m + \frac{J_1}{N^2}$,

$$K_1 = k_t \cdot A \cdot \frac{k_e}{N}, \quad K_2 = k_t \cdot A \cdot \frac{k_v}{N}, \quad \text{а також}$$

статичну похибку слідкуючої системи $e = \theta_r - \theta$, можна отримати рівняння

$$J \cdot \ddot{e} + K_2 \cdot \dot{e} + K_1 \cdot e = J \cdot \ddot{\theta}_r + \frac{T_1}{N^2}. \quad (6)$$

При відсутності зовнішніх впливів ($T_1 = 0$) у стаціонарному стані приводу, що розглядається, статична похибка слідкуючої системи дорівнює нулю. При наявності зовнішнього впливу у стаціонарному стані

виникає відхилення $\frac{T_1}{N^2 \cdot K_1}$,

пропорціональне цьому впливові. Характеристики слідкуючого приводу (слідкуючої системи), що розглядається, можна регулювати підбором двох параметрів K_1 та K_2 , що відповідають коефіцієнтам впливу за відхиленням й за похідною відхилення за часом. За допомогою параметра K_1 можна змінювати жорсткість й частоту власних колових коливань. Вибір невеликого значення K_1 рівнозначний зменшенню жорсткості (зворотної ємності) й можливості згину в шарнірі під дією невеликої зовнішньої сили. Інакше кажучи, власні колові коливання будуть мати невелику ча-

стоту $\omega_n = \sqrt{\frac{K_1}{J}}$ й швидкість реагування

слідкуючої системи погіршується. Після визначення частоти ω_n , використовуючи коефіцієнт K_2 , можна відрегулювати характеристику демпфірування слідкуючої системи позиціонування будівельного маніпулятора. Критерієм демпфірування цієї системи є коефіцієнт демпфірування $\xi = \frac{K_1 + K_2}{2\sqrt{J \cdot K_1}}$. Зазвичай обирають таку

величину K_2 , щоб коефіцієнт демпфірування ξ складав приблизно 0.8.

Для слідкуючої системи (поданої на рис.1), що розглянута вище, керування зі зворотним зв'язком здійснюється за допомогою програми, складеної для мікроконтролера. Кут повороту вихідного вала вимірюється потенціометром. Вимірне значення надходить до аналогового цифрового перетворювача, а потім подається на вхід мікроконтролера, який обчислює вплив зворотного зв'язку за положенням і за швидкістю. Отриманий результат за допомогою цифрового аналогового перетворювача перетворюється у аналоговий сигнал. Таким чином регулюється сила струму, який приводить до руху електродвигун.

Оптимізація режимів функціонування слідкуючої системи позиціонування будівельного маніпулятора.

У подальшому розглядаємо слідкуючу систему позиціонування будівельного маніпулятора як коливну систему (КС).

У загальному випадку основні показники функціонування КС [3, 7] – динамічний і частотний діапазони координат коливань й енергетичні характеристики системи. Тому розв'язок задач оптимізації базується на створенні систем, які задовольняють наступним якісним критеріям оптимальності: точності, максимальній швидкості, мінімальній енергії керування, максимальній енергії (якщо це потрібно) збудження коливань. Розробка оптимальних динамічних систем, які задовольняють заданим критеріям оптимальності, неможлива без їх математичного формулювання. Якість системи оцінюється у середньому за

режимами й часом їх функціонування. Тому оптимальними є динамічні системи, які задовольняють інтегральним критеріям оптимальності типу

$$I = \int_{t_1}^{t_2} F dt = \text{extremum}, \quad (7)$$

тим часом як інтервал часу $t_1 - t_2$ залежить від конкретного виду підінтегральної функції F . У подальшому нас буде цікавити мінімізація коливань КС, які виникають внаслідок триваючих протягом $t_2 - t_1 = t_p$ (де t_p – тривалість перехідного процесу) коливань КС згідно (6), причому при правій частині (6) рівній нулю, тобто власних коливань КС. Даний інтегральний критерій є деякий функціонал. У задачі синтезу оптимального керування динамічних систем шукають таке керування $U(t)$ на певному відрізку часу $t \in [t_1; t_2]$, де функціонал I приймає найбільше екстремальне значення (max або min). Конкретний математичний вираз функції F визначається залежно від необхідної цілі керування КС чи критерію оптимального керування.

Розглянемо далі критерій оптимальності, якому в першу чергу повинна задовольняти дана КС (слідкуюча система позиціонування будівельного маніпулятора), – критерій точності.

При необхідності відпрацювання КС (як динамічною системою) заданих коливань задача системи полягає у відтворенні вихідним сигналом $Y(t)$ будь-яких змін корисної складової $Y_n(t)$ вхідного сигналу, який у даному випадку є електричним аналогом вхідних впливів різної фізичної природи, програмного режиму тощо.

Похибка у динамічному відслідкуванні системою може описуватись як відстань $\varepsilon_y = \|Y - Y_n\|$ й характеризує миттєве значення відхилень координат Y від заданих Y_n . Усереднена помилка на заданому проміжку часу буде

$$\bar{\varepsilon}_y = \left\{ \int_{t_1}^{t_2} |Y - Y_n|^p dt \right\}^{\frac{1}{p}}, \quad (8)$$

де $(Y, Y_n) \in L^p[t_1, t_2]$, $P \geq 1$. Зазвичай у задачах автоматичного керування динамічними об'єктами системи оптимізуються шляхом задоволення мінімуму середньоквадратичного відхилення

$$\bar{\varepsilon}_y = \left[\int_{t_1}^{t_2} |Y - Y_n|^2 dt \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

Критерій (9) використовується у задачах детермінованого й статистичного характеру, його основою є підкореневий вираз, що є середньоквадратичний функціонал

$$I = \int_{t_1}^{t_2} \varepsilon_y^2(t) dt, \quad (10)$$

який характеризує площу, обмежену кривою квадрата ε_y (рис. 2).

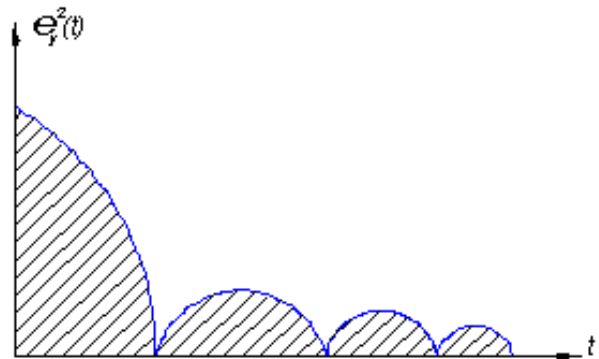


Рис. 2. Залежність функціонала $I(t)$ за виразом (10)

Середньоквадратичний функціонал (10) недостатньо чітко характеризує перехідний процес системи, оскільки важко судити про його коливний характер чи монотонність. Наприклад, більш висока оцінка I відповідає плавному тривалому й коливному короткому перехідним процесам.

Неоднозначності у оцінці якості перехідного процесу системи можна уникнути при використанні узагальненого інтегрального середньоквадратичного критерію:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} \left[\varepsilon_y^2 + \sum_{i=1}^n \left(\tau_i \cdot \frac{d^i \varepsilon_y}{dt^i} \right)^2 \right] dt, \quad (11)$$

де τ_i – вагові коефіцієнти. У основі мінімізації функціонала (11) лежить правило мінімізації координати ε_y та її похі-

дних. Тому в КС, яка задовольняє мінімуму критерію (11), достатньо швидкий та плавний перехідний процес.

Розглянемо у подальшому критерій оптимальності (11) для випадку, коли $i = (1, 2)$, $n = 2$, тобто

$$I = \int_{t_1}^{t_2} (\varepsilon_y^2 + \tau_1^2 \cdot \dot{\varepsilon}_y^2 + \tau_2^2 \cdot \ddot{\varepsilon}_y^2) dt \Rightarrow \min. \quad (12)$$

У задачі мінімізації середньоквадратичного функціонала (12) важливим є визначення вагових коефіцієнтів τ_1, τ_2 . Зазвичай вибір цих коефіцієнтів заснований на заданих технічних вимогах до характеристик системи, що досліджується. Такою характеристикою може бути заданий перехідний процес, який описується диференціальним рівнянням з визначеними коефіцієнтами. Наприклад, для КС з одним ступенем вільності руху рівняння має вид:

$$\beta_2 \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + \beta_1 \cdot \frac{dy}{dt} + y = 0, \quad (13)$$

розв'язок якого є екстремаль функціонала (12) у формі (4.42) [3]. Оскільки вказаний розв'язок є рішенням рівняння Ейлера-Пуассона, то необхідно знайти зв'язок коефіцієнтів β_1, β_2 (13) з коефіцієнтами τ_1, τ_2 (12).

У подальшому у (12) вважатимемо $\varepsilon_y \equiv e$, $\beta_1 \equiv \frac{K_2}{K_1}$, $\beta_2 \equiv \frac{J}{K_1}$. Для (13) запишемо характеристичне рівняння

$$\beta_2 \cdot k^2 + \beta_1 \cdot k + 1 = 0. \quad (14)$$

На основі умови стійкості КС вважаємо, що корені (14) розміщені у лівій півплощині.

Характеристичне рівняння для функціонала (12) визначається рівнянням Ейлера-Пуассона

$$\varepsilon_y - \tau_1^2 \cdot \dot{\varepsilon}_y + \tau_2^2 \cdot \varepsilon_y^{(IV)} = 0, \quad (15)$$

буде

$$\tau_2^2 \cdot k^4 - \tau_1^2 \cdot k^2 + 1 = 0. \quad (16)$$

Останнє характеристичне рівняння має два корені у лівій півплощині й два – у правій. Для приведення (14) до вигляду (16) подамо характеристичне рівняння з коефіцієнтами β_1, β_2 для коренів у правій півплощині як

$$\beta_2 \cdot k^2 - \beta_1 \cdot k + 1 = 0. \quad (17)$$

Перемножимо (14) й (17), отримаємо

$$\beta_2^2 \cdot k^4 - (\beta_1^2 - 2\beta_2) \cdot k^2 + 1 = 0. \quad (18)$$

Порівнюючи (16) й (18), знаходимо

$$\tau_1 = \sqrt{\beta_1^2 - 2\beta_2} = \sqrt{\frac{K_2^2}{K_1^2} - 2 \cdot \frac{J}{K_1}}; \quad (19)$$

$$\tau_2 = \beta_2 = \frac{J}{K_1}.$$

Виражаємо далі коефіцієнти β_1, β_2 через постійну часу $\tau_{\text{опт}}$ оптимальної КС й показник затухання $\xi_{\text{опт}}$.

Для цього запишемо рівняння перехідного процесу наступним чином

$$\tau_{\text{опт}}^2 \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + 2\xi_{\text{опт}} \cdot \tau_{\text{опт}} \cdot \frac{dy}{dt} + y = 0. \quad (20)$$

Порівнюючи рівняння(13) й (20), прийдемо до співвідношень

$$\beta_1 = 2\xi_{\text{опт}} \cdot \tau_{\text{опт}}; \beta_2 = \tau_{\text{опт}}^2. \quad (21)$$

Співвідношення (21), у свою чергу, визначають зв'язок вагових коефіцієнтів τ_1 й τ_2 з параметрами $\tau_{\text{опт}}$, $\xi_{\text{опт}}$ у вигляді

$$\tau_1 = \tau_{\text{опт}} \cdot \sqrt{2(2\xi_{\text{опт}}^2 - 1)}; \tau_2 = \tau_{\text{опт}}^2. \quad (22)$$

Постійну часу $\tau_{\text{опт}}$ можна знайти із співвідношень:

$$\tau_{\text{опт}} = \frac{T_{\text{min}}}{5}; T_{\text{min}} = \frac{2}{\omega_{\text{зр}}}, \quad (23)$$

де T_{min} – тривалість оптимального перехідного процесу $y(t)$ (для нашої задачі $y(t) \equiv e \equiv \theta_r - \theta$); $\omega_{\text{зр}}$ – частота зрізу оптимальної КС. Вагові коефіцієнти τ_1 й τ_2 приймають додатні значення, тому:

$$2\xi_{\text{опт}}^2 - 1 > 0. \quad (24)$$

З нерівності (24) виходить, що показник затухання $\xi_{\text{опт}} > 0,7$. У подальшому для T_{min} й $\xi_{\text{опт}}$ обираємо наступні значення [1]: $T_{\text{min}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 1 \text{ мс}$; $\xi_{\text{опт}} = 0,8$. Тоді маємо наступні значення вагових коефіцієнтів:

$$\tau_{\text{опт}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}; \tau_1 = 1,497 \cdot 10^{-4} \text{ с};$$

$$\tau_2 = 4 \cdot 10^{-8} \text{ с}^2; \quad \omega_{\text{зр}} = 2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1};$$

$$\beta_2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с};$$

$$\beta_1 = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

Виходячи зі співвідношень (19) можна стверджувати, що параметри слідкуючої

системи позиціонування будівельного маніпулятора повинні задовольняти умовам

$$\sqrt{\frac{K_2^2}{K_1^2} - 2 \frac{J}{K_1}} = 1,497 \cdot 10^{-4} \text{ с};$$

$$\frac{J}{K_1} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}. \quad (25)$$

Тоді вказана система може вважатись такою, що функціонує у оптимальному динамічному режимі й задовольняє критерію точності (12), який необхідно задовольнити для подібних систем будівельних маніпуляторів.

Висновки

1. Проведено всебічний динамічний аналіз властивостей слідкуючої системи будівельного маніпулятора, яка забезпечує функцію позиціонування завдяки наявності у ньому спеціального мехатронного пристрою.
2. Запропонована схема оптимізації керування функціонуванням вказаної системи, яка забезпечує реалізацію критерію якості перехідного процесу та визначає його оптимальні характеристики.
3. Результати дослідження можуть бути у подальшому застосовані для вдосконалення та оптимізації існуючих інженерних методів розрахунку та оптимізації режимів функціонування слідкуючих систем позиціонування будівельних маніпуляторів з мехатронними пристроями.

Література

1. *Мехатроника*/ Исии Т., Симояма И., Иноуэ Х. и др. – М.: Мир, 1988. – 318 с.
2. *Введение в мехатронику*/ О.М.Яхно, А.В.Узунов, А.Ф. Луговской и др. – К.: НТУУ «КПИ», 2008. – 528 с.
3. *Божко А.Е.* Синтез оптимального управления колебательными системами. – К.: Наукова думка, 1990. – 164 с.
4. *Бутковский А.Г., Черкашин А.Ю.* Оптимальное управление электромеханическими устройствами постоянного тока. – М.: Энергия, 1972. – 109 с.
5. *Цаценкин В.К.* Об одной модели квазиоптимальных по быстродействию позиционных и следящих приводов // *Машиноведение*. – 1973. – Вып. 6. – С. 21-25.
6. *Чистов В.П., Бондаренко В.И., Святославский В.А.* Оптимальное управление электрическими приводами. – М.: Энергия, 1968. – 232 с.
7. *Божко А.Е.* Оптимальное управление в системах воспроизведения вибраций. – К.: Наукова думка, 1977. – 217 с.

Рецензент: В.С. Ловейкін, д-р.т.н., проф.
(КНУБА)

Отримано: 27.04.2009р