

УДК 62-82

**ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ
У СЛІДКУЮЧІЙ МЕХАТРОННІЙ СИСТЕМІ
З ЕЛЕКТРОМАШИННИМ ПІДСИЛЮВАЧЕМ
ТА ВИКОНАВЧИМ ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

© **В. С. Ловейкін, д.т.н., професор, Ю. В. Човнюк, к.т.н.,
доцент, Ю. О. Ромасевич, Національний університет
біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна**

**Проведена оптимизация переходных процессов
в следящей мехатронной системе с электромашинным уси-
лителем и исполнительным двигателем постоянного тока.**

**Optimization of transitional processes in the watching mecha-
tronics system with an electromachine amplifier and executive
engine of direct current is conducted.**

Постановка проблеми

Сучасний розвиток техніки пов'язаний з постійним підвищення вимог до якості виробів, що випускаються, у тому числі й точності. Це у повній мірі стосується сучасних слідкуючих мехатронних систем (СМС). Для реалізації високоточної обробки сигналів, які надходять до останніх, їх виконавчі двигуни та приводи повинні забезпечувати широкий діапазон керування штатними рухами, а також точність позиціювання у долях мікрометрів. Слід зазначити, що електромеханічні приводи не завжди задовольняють цим вимогам, і, зокрема, коли вони входять до складу слідкуючої мехатронної системи (СМС) з електромашинним підсилювачем та виконавчим двигуном постійного струму.

Аналіз попередніх досліджень

Математична модель електромашинного підсилювача, пра-

цюючого на виконавчий двигун постійного струму з незалежним збудженням, розроблена у [1–3]. Проте, авторам даної роботи не вдалось віднайти у науково-технічній літературі досліджень щодо оптимізації перехідних процесів у СМС зі вказаним підсилювачем і виконавчим двигуном. Подібні СМС зараз широко використовуються у сучасних промислових роботах, що й забезпечує актуальність даних досліджень.

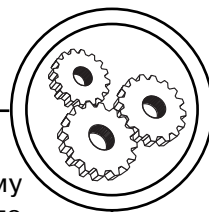
Мета роботи

Встановлення оптимальних параметрів та режимів пуску/гальмування (перехідних процесів) у СМС з електромашинним підсилювачем та виконавчим двигуном постійного струму за допомогою критеріїв, наведених у [4].

Результати проведених досліджень

1. Математична модель СМС з електромашинним підсилюва-

МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ



чем та виконавчим двигуном постійного струму.

Використовуючи підхід [1], складемо диференціальне рівняння електромашинного підсилювача, працюючого на виконавчий двигун постійного струму з незалежним збудженням. Принципова схема включення електромашинного підсилювача (ЕМП) й двигуна постійного струму з незалежним збудженням наведена на рис. 1. На цій схемі прийняті позначення: ПД — приводний двигун електромашинного підсилювача; ВД — виконавчий двигун; ОЗ — обмотка збудження виконавчого двигуна; КО — компенсаційна обмотка (ЕМП); $R_{ш}$ — реостат, який шунтує компенсаційну обмотку; ОУ — обмотка управління.

Електромашинний двигун представляє собою електричну машину постійного струму. У пазах ЕМП розміщені обмотка управління й компенсаційна обмотка. Ротор ЕМП починає обер-

татись завдяки приводному двигу. У якості приводного двигуна, як правило, використовується асинхронний трифазний двигун. У ЕМП нероздільного виконання приводний двигун зібраний у одному корпусі з генератором. На колекторі ротору ЕМП встановлені дві пари щіток — на повздовжній вісі й на поперечній. Щітки на поперечній вісі замкнені накоротко.

При подачі напруги U_y на обмотку управління ЕМП виникає магнітний потік Φ_y обмотки управління. Магнітний потік невеликий і пропорційний струму I_y у обмотці управління. Оскільки ротор ЕМП обертається з постійною швидкістю, то у його обмотці наводиться під впливом потоку управління ЕРС E_1 , котра також невелика по амплітуді. Але поперечні щітки ЕМП замкнені накоротко, і тому струм у поперечному ланцюгу I_n , незважаючи на незначну величину ЕРС, буде значним. Цей струм викликає великий магнітний

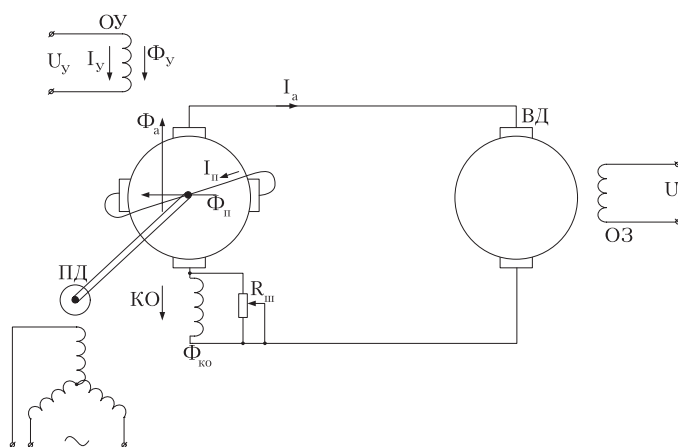
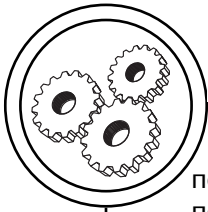


Рис. 1. Принципова схема включення ЕМП й двигуна постійного струму з незалежним збудження



МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

потік Φ_n , спрямований вдовж поперечної вісі. Потік Φ_n наводить у обмотці ротора електрорушійну силу E_2 , котра знімається щітками, розміщеними на подовжній вісі. Потік Φ_a , створений струмом навантаження I_a , спрямований проти потоку Φ_y обмотки управління. Для компенсації цього потоку у подовжньому ланцюгу розміщена компенсаційна обмотка. Величина $\Phi_{ко}$, а відповідно, й степінь компенсації регулюється за допомогою реостату $R_{щ}$.

Залежність ЕРС холостого ходу E_{xx} від струму у обмотці управління I_y $E_{xx} = f(I_y)$ є характеристикою холостого ходу ЕМП.

Характеристика холостого ходу має вид, зображений на рис. 2.

Ця характеристика холостого ходу ЕМП може бути прийнята лінійною до тих значень I_y , при котрих настає насичення магнітної системи підсилувача.

Подамо диференціальне рівняння ЕМП при його роботі разом з двигуном постійного струму незалежного збудження. Для спрощення покладемо, що ЕМП працює у режимі повної компенсації. Рівняння напруг для керу-

ючого та позовдвжнього ланцюгів будуть мати відповідний вигляд:

$$U_y = I_y r_y + L_y \frac{dI_y}{dt}, \quad (1)$$

$$E_1 = I_n r_n + L_n \frac{dI_n}{dt}, \quad (2)$$

$$E_2 = I_a r_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + k_\omega \omega. \quad (3)$$

До цих рівнянь слід додати рівняння для моментів на валу двигуна:

$$M_\partial = M_\partial + I \frac{d\omega}{dt}, \quad (4)$$

причому $M_\partial = k_M I_a$.

У співвідношеннях (1)-(3) прийняті позначення: $I_y, I_n, I_a, r_y, r_n, r_a, L_y, L_n, L_a$ — струми, опори та індуктивності ланцюга управління, поперечного ланцюга й ланцюга якорів ЕМП — ВД; ω — швидкість обертання валу двигуна; I — момент інерції частин, що обертаються, приведені до валу двигуна; k_ω — коефіцієнт пропорційності між проти-ЕРС двигуна й швидкістю обертання його валу; k_M — коефіцієнт пропорційності між обертальним моментом двигуна й струмом у якірному ланцюгу.

Перейдемо до рівнянь у відхиленнях відносно усталеного стану. Покладаючи у рівняннях (1)-(4) похідні рівними нулю, отримуємо систему рівнянь, які описують усталений стан агрегату ЕМП-ВД СМС:

$$\begin{cases} U_{y0} = I_{y0} r_y; & E_{20} = f_2(I_{n0}); \\ E_{10} = I_{n0} r_n; & M_{\partial 0} = M_{\partial 0}; \\ E_{20} = I_{a0} r_a + k_\omega \omega; & M_{\partial 0} = k_M I_{a0}; \\ E_{10} = f_1(I_{y0}). \end{cases} \quad (5)$$

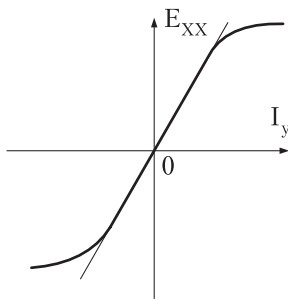
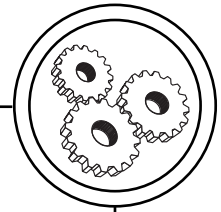


Рис. 2. Характеристика холостого ходу ЕМП

МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ



Нехай $U_{y0}, I_{y0}, E_{10}, E_{20}, I_{a0}, \omega_0, M_{o0}, M_{\theta 0}$ — деякий розв'язок системи (5). Вважаючи, що:

$$\begin{cases} U_y = U_{y0} + \Delta U_y; & \omega_y = \omega_0 + \Delta \omega; \\ I_y = I_{y0} + \Delta I_y; & M_\theta = M_{\theta 0} + \Delta M_\theta; \\ I_n = I_{n0} + \Delta I_n; & M_o = M_{o0} + \Delta M_o; \\ I_a = I_{a0} + \Delta I_a, \end{cases} \quad (6)$$

перейдемо від рівнянь (1)-(4) до рівнянь у відхиленнях від усталеного стану:

$$\begin{cases} \Delta U_y = \Delta I_y r_y + L_y \frac{d(\Delta I_y)}{dt}, \\ E_1 - E_{10} = \Delta I_n r_n + L_n \frac{d(\Delta I_n)}{dt}, \\ E_2 - E_{20} = \Delta I_a r_a + L_a \frac{d(\Delta I_a)}{dt} + k_\omega \Delta \omega, \\ \Delta M_\theta = \Delta M_o + I \frac{d(\Delta \omega)}{dt}, \\ \Delta M_\theta = k_m \Delta I_a. \end{cases} \quad (7)$$

Для лінеаризації рівнянь (7) розкладемо функції $E_1 = f_1(I_y)$ й $E_2 = f_2(I_n)$ у ряд Тейлора відповідно у точках I_{y0} та I_{n0} .

Графіки функцій $f_1(I_y)$ та $f_2(I_n)$ мають вид, аналогічний зображеному на рис. 2. Лінеаризуючи ці функції, будемо мати:

$$\begin{cases} f_1(I_y) = E_{10} + k_1 \Delta I_y, \\ f_2(I_n) = E_{20} + k_2 \Delta I_n, \end{cases} \quad (8)$$

де k_1 й k_2 — кутові коефіцієнти дотичних, проведених до кривих E_1 та E_2 у початку координат.

Враховуючи рівності (8) та виключаючи з системи (7) проміжні змінні $\Delta I_y, \Delta I_n, \Delta M_\theta$ отримаємо лінеаризоване диференціальне рівняння ЕМП-ВД СМС у відхиленнях від усталеного стану:

$$\begin{aligned} & T_m T_a T_y T_n \frac{d^4(\Delta \omega)}{dt^4} + (T_m T_a T_y + \\ & + T_m T_a T_n + T_m T_y T_n) \frac{d^3(\Delta \omega)}{dt^3} + \\ & + (T_m T_a + T_m T_y + T_m T_n + \\ & + T_y T_n) \frac{d^2(\Delta \omega)}{dt^2} + (T_m + T_y + \\ & + T_n) \frac{d(\Delta \omega)}{dt} = k_y \Delta U_y - \\ & - k_f [T_a T_y T_n \frac{d^3(\Delta M_o)}{dt^3} + \\ & + (T_y T_a + T_n T_y + T_a T_n) \frac{d^2(\Delta M_o)}{dt^2} + \\ & + (T_y + T_a + T_n) \frac{d(\Delta M_o)}{dt} + \Delta M_o]. \end{aligned} \quad (9)$$

У рівнянні прийняті позначення: $T_m = \frac{r_a I}{k_m k_\omega}$ — механічна

постійна часу двигуна; $T_y = \frac{L_y}{r_y}$

— постійна часу ланцюга управління; $T_n = \frac{L_n}{r_n}$ — постійна

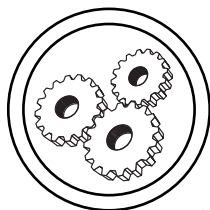
часу поперечного ланцюга; $T_a = \frac{L_a}{r_a}$ — постійна часу якірних

ланцюгів ЕМП-ВД; $k_y = \frac{k_1 k_2}{r_y r_n k_\omega}$ —

передавальний коефіцієнт (коефіцієнт підсилення) ЕМП за управляючим впливом; $k_f = \frac{r_a}{k_m k_\omega}$

— передавальний коефіцієнт ЕМП за збурюючим впливом.

Зазначимо, що лінійне рівняння (9) справедливе не тільки при малих відхиленнях від усталеного стану, але й у досить широкому діапазоні зміни вихідної координати U_y , яка відповідає роботи ЕМП без насичення магнітної системи. Це впливає зі способу лінеаризації характеристик: $E_1 = f_1(I_y)$ та $E_2 = f_2(I_n)$.



МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

Дотичні, котрими при лінеаризації були змінні нелінійні характеристики $E_1 = f_1(I_y)$ та $E_2 = f_2(I_n)$, слабо відрізняються від цих характеристик у досить широкому діапазоні зміни напруги ΔU_y (див. рис. 2).

Постійна часу поперечного ланцюга (T_n) мала у порівнянні з іншими постійними часу і нею можна знехтувати. У цьому випадку рівняння (9) має вид:

$$\begin{aligned} & T_m T_a T_y \frac{d^3(\Delta\omega)}{dt^3} + \\ & + (T_m T_a + T_m T_y) \frac{d^2(\Delta\omega)}{dt^2} + \\ & + (T_m + T_y) \frac{d(\Delta\omega)}{dt} + \Delta\omega = \\ & = k_y \Delta U_y - k_f [T_y T_a \frac{d^2(\Delta M_o)}{dt^2} + \\ & + (T_y + T_a) \frac{d(\Delta M_o)}{dt} + \Delta M_o]. \end{aligned} \quad (10)$$

2. Критерій та оцінка якості коливних і монотонних перехідних процесів СМС з ЕМП-ВД постійного струму.

При аналізі математичної моделі СМС з ЕМП-ВД постійного струму вище було отримане рівняння (9), яке для випадку ($U_y = 0$, $\Delta M_o = 0$) приймає вид:

$$\begin{aligned} & A_4 \frac{d^4(\Delta\omega)}{dt^4} + A_3 \frac{d^3(\Delta\omega)}{dt^3} + \\ & + A_2 \frac{d^2(\Delta\omega)}{dt^2} + A_1 \frac{d(\Delta\omega)}{dt} + \\ & + \Delta\omega = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

де $A_4 = T_m T_a T_y T_n$, $A_3 = (T_m T_a T_y + T_m T_a T_n + T_m T_y T_n)$, $A_2 = (T_m T_a + T_m T_y + T_m T_n + T_y T_n)$, $A_1 = (T_m + T_y + T_n)$.

У прецизійних СМС з ЕМП-ВД постійного струму важливим є не тільки забезпечення стійкості самої слідкуючої системи,

але й отримання перехідного процесу з невеликою здатністю до коливань й малим перерегулюванням самої системи. У особливих випадках перерегулювання взагалі повинні бути відсутніми. Стійкість СМС є необхідною, але недостатньою умовою їх працездатності. Достатньою умовою є якість процесів регулювання СМС, котра оцінюється якістю перехідних процесів й похибками в усталених режимах функціонування системи. До основних показників якості перехідних процесів у СМС відносять: час регулювання, перерегулювання, основну частоту коливань, кількість коливань, максимальну швидкість та максимальне прискорення регульованої величини.

Для оцінки якості як коливних, так і монотонних перехідних процесів СМС з ЕМП-ВД постійного струму пропонується використати так звану покращену квадратичну оцінку [4, 5]:

$$I_{21} = \int_0^{\infty} [(\Delta\omega)^2 + \tau_1^2 \left(\frac{d[\Delta\omega]}{dt}\right)^2] dt, \quad (12)$$

де τ_1 — постійна часу (для надання визначеності інтегральній оцінці I_{21} величину τ_1 задають у відповідності до необхідного часу (t_p) регулювання), тобто:

$$t_p / 6 < \tau_1 < t_p / 3. \quad (13)$$

Якщо прийняти за вхідне збурення/вплив СМС одиничний ступеневий сигнал, то після перетворень із врахуванням припущень вираз (12) може бути поданий у наступному вигляді:

МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

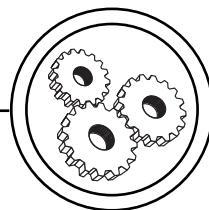
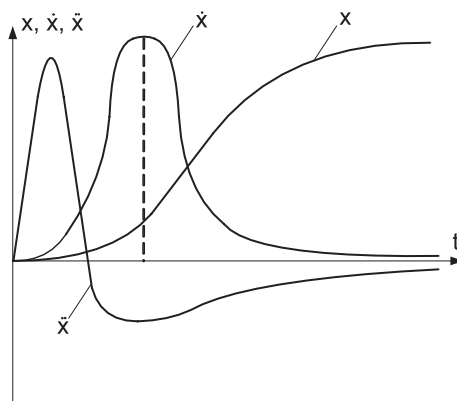


Рис. 3. Приклад перехідного процесу на виході СМС з ЕМП-ВД постійного струму при подачі ступінчатого вхідного сигналу: $x \equiv \Delta\omega$; $\dot{x} \equiv d(\Delta\omega)/dt$; $\ddot{x} \equiv d^2(\Delta\omega)/dt^2$.



$$I_{21} = 0,5 \left\{ \frac{A_1 + \frac{A_4}{A_3} + \frac{(A_2 A_3 - A_1 A_4)}{A_3}}{\frac{(A_3 \tau_1^2 + A_2 A_3 - A_1 A_4)}{A_1 A_2 A_3} - \frac{-A_1^2 A_4 - A_3^2}{A_1 A_2 A_3}} \right\}. \quad (14)$$

При $I_{21} \rightarrow \min$, тобто $I_{21} = 0$ з (14) можна отримати оптимальне значення τ_1 :

$$\tau_1^2 = \left\{ \frac{(A_1 A_3 + A_4)}{A_1 A_4 - A_2 A_3} + \frac{A_1 A_2 - A_2 + \frac{A_1 A_4}{A_3}}{+A_1^2 A_4 + A_3^2} \right\}. \quad (15)$$

(Зрозуміло, що вираз у (15) з правої сторони повинен бути додатнім).

При підстановці у (14) значень постійних часу і коефіцієнтів підсилення СМС можна кожний черговий раз шукати значення інтегральної оцінки I_{21} при конструктивних параметрах СМС, котрі цікавлять розробника такої системи.

Відомо, що мінімум інтегральної оцінки I_{21} (не нульове значення її!) може відповідати на-

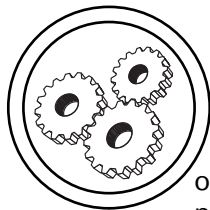
ближенню перехідного процесу СМС до деякого експоненціального процесу з постійною часу τ_1 .

При моделюванні на ПЕОМ, коли параметри СМС даного типу були обрані з умови отримання мінімальної величини I_{21} , перехідний процес має аперіодичний характер (рис. 3), що підтверджує правильність виразів, отриманих для обчислення інтегральної оцінки. Була розроблена програма обчислень інтегралу $I_{21} = I_{\min}$ для СМС з ЕМП-ВД постійного струму. Порівняння таких СМС з іншими аналогічного типу показало, що саме розглянуті у роботі СМС мають найбільшу стійкість і найкращі показники якості при дії збурень малого порядку.

Висновки

1. У результаті проведених досліджень виявлені основні особливості роботи СМС з ЕМП-ВД постійного струму.

2. Для обрання СМС з ЕМП-ВД постійного струму із заданими показниками якості використана покращена квадратична



МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

оцінка, яка оптимізує параметри перехідного процесу.

3. Отримані результати можуть бути у подальшому використані для уточнення та вдосконалення існуючих методів оптимізації перехідних процесів у СМС з ЕМП-ВД постійного струму.

стані для уточнення та вдосконалення існуючих методів оптимізації перехідних процесів у СМС з ЕМП-ВД постійного струму.

1. Иванов В. А. Математические основы теории автоматического регулирования / В. А. Иванов и др. — М. : Высшая школа, 1971. — 808 с. 2. Попов Е. П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах / Е. П. Попов. — М. : Наука, 1973. — 584 с. 3. Попов Е. П. Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем / Е. П. Попов, Н. П. Пальтов. — М. : Гос. изд. физ.-мат. лит., 1960. — 792 с. 4. Тихенко В. Н. Исследование прецизионных следящих гидроприводов / В. Н. Тихенко // Промислова гідравліка і пневматика. — 2005. — № 1(7). — С. 75—77. 5. Тихенко В. Н. Использование интегральных оценок качества при разработке следящих гидроприводов с обратными связями по нагрузке / В. Н. Тихенко, А. П. Гнатюк, А. А. Волков // Праці міжнар. наук.-техн. конф. «Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва». — К. : НТУУ «КПІ», 1998. — Т. 1. — С. 86—89.

Надійшла до редакції 17.09.09