

СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗА ОПТИМАЛЬНИМ РОЗПОДІЛЕННЯМ ПОЛЮСІВ БАГАТОМАСОВОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Зачена Н.В., аспір., Зачена Ю.В., ст. викл.

*Кременчуцький державний політехнічний університет імені Михайла Остроградського
39600, м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20*

E-mail: nich@polytech.poltava.ua

Вступ. Основні положення теорії електропривода формулюються, виходячи із припущення, що механічні ланки (частини механізмів, передатні органи) не мають пружностей, тобто абсолютно жорсткі [1]. Для більшості механізмів це прийнятно й не вносить істотних погрешностей при дослідженнях. Однак, для цілого ряду механізмів зневажа пружністю механічних ланок може привести до того, що між результатами теоретичних розрахунків і експериментальних досліджень спостерігаються істотні розбіжності. До числа таких механізмів відносяться: кривошипний прес (спочатку станина запасає енергію, а потім віддає її на деформацію деталі й двигуна), прокатний стан (можуть деформуватися й скручуватися окремі ділянки валів), шахтна підймальна машина (пружною ланкою є трос), безперервний прокатний стан і, зокрема, стан холодної прокатки й т.д.

Наявність пружних ланок впливає як на статичні, так і динамічні характеристики. При врахуванні пружних ланок виявляється в окремих випадках здатність системи електропривода до коливальності [2]. У зв'язку з цим зростання вимог до якості керування технологічним процесом і, у першу чергу, до точності стабілізації основних технологічних змінних постійно зростає.

Відомі методи синтезу високоточних систем керування в «чистому виді» звичайно можуть бути застосовані тільки для лінійних або лінеаризованих об'єктів. Аналіз способів виключення впливу пружних зв'язків, які базуються на введенні в систему керування електроприводом спеціальних коригувальних ланок і пристроїв, дозволило зробити висновок, що такі системи є найбільш раціональними з позиції фізичної реалізації й забезпечують необхідну точність регулювання.

Аналіз попередніх досліджень. Синтезу регуляторів передують рішення задачі побудови еталонної моделі системи керування, що відповідає бажаному розподіленню на комплексній площині коренів характеристичного рівняння замкненої системи. Якщо всі складові вектору стану об'єкта можуть бути виміряні, то забезпечення заданого розміщення коренів не викликає труднощів. В цьому випадку виникає питання про те, яке розподілення коренів вибрати. У багатьох випадках поняття оптимального перехідного процесу пов'язують із мінімізацією визначеного функціоналу. Подібні стандартні форми отримані емпірично, а область їх використання обмежується системами невисокого порядку. Однак, більшість електромеханічних систем мають третій порядок та

вище, що викликає деякі труднощі при синтезі системи керування.

Мета роботи. Обґрунтування вибору виду амплітудно-частотної характеристики, що максимально наближується до амплітудно-частотної характеристики ідеального фільтру для об'єкта керування високого порядку, та аналіз особливостей побудови системи керування на основі розподілення полюсів багатомасової електромеханічної системи.

Матеріал і результати дослідження. Розглянемо у якості об'єкта керування електропривод за системою «керований перетворювач – двигун постійного струму», механічна частина якого являє собою двомасову систему. Перехідна характеристика такої системи може бути визначена наступним чином:

$$H(p) = \frac{B(p)}{A(p)} = \frac{K_{\text{п}} \cdot k_{\Phi} \cdot c_{12}}{(T_{\text{п}}p + 1)(T_{\text{е}}p + 1)} \times \frac{1/R_{\text{е}}}{(J_1 J_2 p^3 + (J_1 c_{12} + J_2 c_{12})p)} \quad (1)$$

$$\text{де } A(p) = a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} a_0 &= J_1 J_2 T_{\text{п}} T_{\text{е}}, \\ a_1 &= J_1 J_2 (T_{\text{е}} + T_{\text{п}}), \\ a_2 &= c_{12} T_{\text{п}} T_{\text{е}} (J_1 + J_2) + J_1 J_2, \\ a_3 &= c_{12} T_{\text{е}} (J_1 + J_2) + c_{12} T_{\text{п}} (J_1 + J_2), \\ a_4 &= c_{12} (J_1 + J_2) \end{aligned} \quad (3)$$

Корені характеристичного багаточлена $A(p)$ являються полюсами системи, відповідно нулями системи називаються корені багаточлена $B(p)$, при яких $H(p) = 0$.

Розміщення полюсів на комплексній площині характеризує синтезовану систему, що визначає її перехідні та частотні характеристики, а значить, й динамічні показники якості. Так, наприклад, стійкість системи визначає розміщення полюсів у лівій півплощині. Наявність нулів у замкненій системі в деякій мірі впливає на її динаміку [5].

Тому, якщо передаточна функція замкненої системи не має нулів, то при виборі її бажаного поліному $A(p)$ можна керуватися стандартними формами (фільтрами), що знайшли достатньо широке застосування на практиці. Стандартні форми визначають коефіцієнти характеристичного полінома $A(p)$ функції $H(p)$, що забезпечують в системі перехідні та частотні характеристики із відомими показниками якості.

Для об'єкта керування із характеристичним поліномом (2) необхідно застосовувати фільтри із гладкими амплітудно-частотними характеристиками (АЧХ), тобто які не мають екстремумів. До цього класу фільтрів відносять [3]:

- біноміальний або із критичним затуханням, в перехідній характеристиці якого при мінімальній можливості її тривалості відсутнє перерегулювання;

- Баттерворта або із максимально гладкою АЧХ, у якого всі похідні від АЧХ за частотою від першої до $(2n-1)$ -ої включно у точці $\omega = 0$ рівні нулю, n – порядок фільтра;

- Бесселя, що в найменшому ступені спотворює сигнал, спектр якого лежить у полосі пропускання завдяки тому, що запізнення вихідного сигналу фільтра відносно вхідного однаково для максимальної кількості гармонік, що, в свою чергу, пояснюється найкращим наближенням фазочастотної характеристики (ФЧХ) фільтра Бесселя до ідеально лінійної;

- Чебишева, у якого в полосі пропускання фільтра відхилення АЧХ від ідеальної не перевищує наперед заданого значення, що, зазвичай, виражається розмахом пульсацій (нерівномірністю) АЧХ в логарифмічному масштабі, а за межами полоси пропускання коефіцієнт подавлення перешкод є максимальним, причому, чим більша нерівномірність, тим крутіший спад АЧХ за полюсою пропускання.

Розподілення Бесселя та біноміальне розподілення найкраще апроксимують бажану лінійну ФЧХ, так як характеризуються відсутністю перерегулювання в перехідних характеристиках. Однак, ФЧХ не описує повністю властивості передачі фільтра, а цим фактором оцінки фільтра є його АЧХ.

Ідеальний фільтр характеризується наступними показниками [4]:

- нульовими втратами та пульсаціями у полосі пропускання;
- нульовою шириною в перехідній області (нескінченна крутизна на частоті зрізу);
- нескінченним затуханням в полосі пропускання.

Найбільш повно сформульованим вимогам відповідає фільтр Баттерворта, що має максимально пласку АЧХ у полосі пропускання та достатньо високу крутизну затухання. Проте, не дивлячись на те, що найгірші показники згідно АЧХ у фільтра Бесселя, що виражається у погіршенні ФЧХ при покращенні АЧХ та навпаки, при синтезі системи керування перехідні характеристики саме цього фільтра дозволяють більш наглядно представити поведінку системи з урахуванням впливу лінійних та нелінійних зовнішніх факторів, а також отримати найкращі показники в часовій області.

Представлені на рис. 1, а, б перехідні характеристики стандартних розподілень підтверджують доцільність вибору фільтра Бесселя як оптимального для об'єкта керування, що являє собою багатомасову систему, про це свідчить забезпечення майже відсутнього перерегулювання та порівняно високої швидкодії.

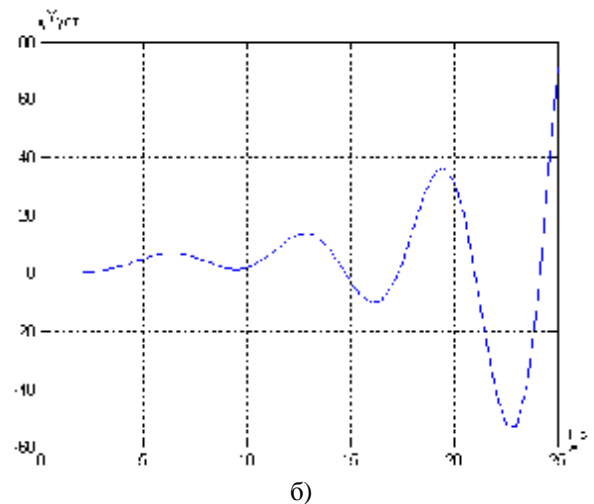
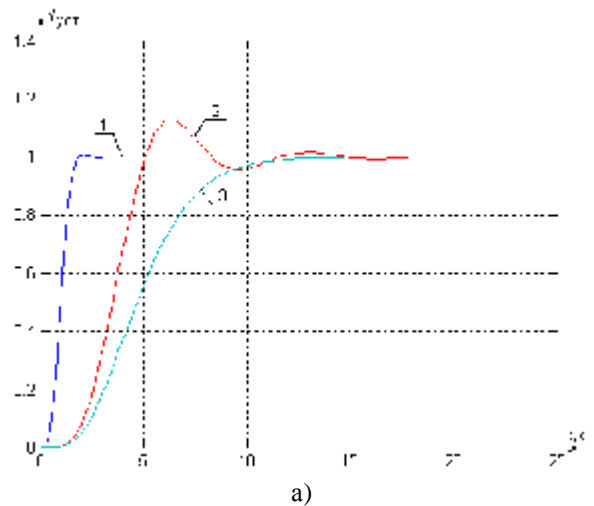


Рисунок 1 – Перехідні характеристики а) фільтра Бесселя 1, розподілення Баттерворта 2, біноміального розподілення 3; б) фільтра Чебишева при $n=5$, де n – порядок характеристичного рівняння об'єкта керування

При синтезі регуляторів вирішують зазвичай два завдання. Перше завдання полягає в забезпеченні необхідних динамічних показників якості спроектованої системи, а друге - в досягненні заданої статичної точності цієї системи. Перше є складним інженерним завданням, тому що збільшення швидкодії системи приводить до підвищення коливального характеру перехідних процесів. Використання фільтрів, що згладжують, усувають сплески сигналів приводить до зменшення швидкодії та, відповідно, до підвищення тривалості перехідного процесу, а також до ускладнення системи. Друге завдання в порівнянні з першим є більш простим. Забезпечення необхідної точності може досягатися за рахунок зміни коефіцієнта передачі розімкнутого контуру, за рахунок збільшення порядку астатизму або за рахунок введення в алгоритм керування зв'язків, що компенсують збурюючий вплив та вплив, що задається. Тому, враховуючи ще й той факт, що більшість електромеханічних систем (ЕМС) являють собою багатомасові системи, які, на додачу до вище згаданих недоліків, характеризуються високим порядком системи, знаходження оптимального співвідношення між швидкодією й коливальним характером процесів,

що протікають, перебуваючи при цьому в рамках технічного завдання, і є досить складною і актуальною інженерною задачею.

Синтез систем керування дозволяє при заданій структурі САК вибрати її параметри, що забезпечують необхідну якість процесу регулювання. Однак більшість існуючих методик дають задовільні результати лише у випадку, якщо кількість регульованих параметрів складає не більше трьох. Вирішення даної проблеми можливе із застосуванням кореневих методик синтезу САК, що базуються на бажаному розподіленні полюсів та коренів замкнутої системи. Розміщення коренів у будь-які задані положення забезпечує необхідні динамічні характеристики незалежно від порядку системи, що являє собою предмет теорії модального керування. При цьому задача зводиться до визначення коефіцієнтів відповідних зворотних зв'язків за станом об'єкта, а не шляхом застосування коригуючих ланок у прямому каналі САК.

Якщо вектор стану об'єкта може бути обмірюваний повністю, то забезпечення заданого розташування коренів не викликає труднощів. Це досягається в тому випадку, якщо матриця зв'язку вектора вимірюваних змінних і вектора стану керованого об'єкта має розмірність, а її ранг дорівнює порядку системи диференціальних рівнянь, що описують об'єкт. При цьому складовими вектора вимірюваних змінних можуть бути не тільки вимірювані змінні стану, але й вимірювані лінійні комбінації цих змінних.

При синтезі систем модального керування використовується метод стандартних коефіцієнтів, при якому задається оптимальний розподіл коренів. Найкращі результати при використанні методу стандартних коефіцієнтів досягаються для систем, чисельник передатної функції яких не містить нулів. Однак і при іншому виді чисельника ці форми можуть бути корисні, тому що можуть служити відправною крапкою при відшуванні оптимального розподілу коренів.

При керуванні положенням коренів у випадку повної інформації про змінні стану розглядається лінійний стаціонарний об'єкт, описуваний рівняннями виду:

$$\begin{cases} y(t_0, t) = g[x(t_0, t); v(t_0, t)]; \\ x(t) = f[x(t_0, t); v(t_0, t)]. \end{cases} \quad (4)$$

Розглянемо замкнену систему, тобто додамо до рівнянь об'єкта керування регулятор виду:

$$U(t) = -P \cdot X(t), \quad (5)$$

де P – матриця зворотних зв'язків.

Об'єднуючи (5) та рівняння об'єкта, представимо систему у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{cases} s \cdot X(s) = A \cdot X(s) + B \cdot U(s); \\ Y(s) = C \cdot X(s) + D \cdot U(s), \end{cases} \quad (6)$$

отримаємо:

$$\frac{dX(t)}{dt} = (A - B \cdot P) \cdot X(t). \quad (7)$$

Матриця зворотних зв'язків вибирається таким чином, щоб додати матриці $(A - B \cdot P)$ заздалегідь запропоноване розташування власних значень,

тобто коренів характеристичного рівняння матричного рівняння (7).

Для об'єкта керування електропривод за системою «керований перетворювач – двигун постійного струму», механічна частина якого являє собою двомасову систему, рівняння руху у просторі стану мають вигляд:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{a_4}{a_5} x_1 + x_2; \\ \dot{x}_2 = -\frac{a_3}{a_5} x_2 + x_3; \\ \dot{x}_3 = -\frac{a_2}{a_5} x_3 + x_4; \\ \dot{x}_4 = -\frac{a_1}{a_5} x_4 + x_5; \\ \dot{x}_5 = -\frac{b_0}{a_5} u; \\ y = x_1, \end{cases} \quad (8)$$

де a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – коефіцієнти характеристичного рівняння об'єкта керування; b_0 – коефіцієнт підсилення прямого каналу розімкнутої системи.

Для того, щоб замкнута система мала необхідний характеристичний поліном з бажаними властивостями, додатково вводиться еталонна модель. Рух замкнутої системи повинен збігатися з рухом еталонної, яка вибирається на основі виду бажаного перехідного процесу.

Відшукавши матрицю лінійних стаціонарних зв'язків, на основі рівняння типу Сильвестра, та виконавши моделювання, маємо наступні результати, що приведені на рисунку 2.

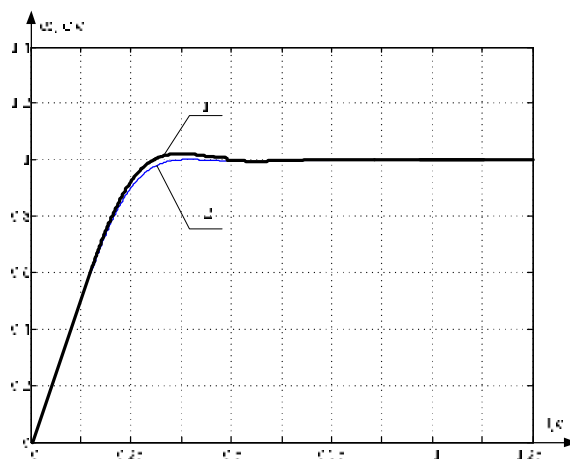


Рисунок 2 – Характеристики перехідного процесу за швидкістю механізму:
1 – фактичне розподілення для об'єкта керування (5); 2 – розподілення Бесселя для об'єкта п'ятого порядку (бажане)

Представлені на рис. 2 характеристики свідчать про максимальне відтворення системою керування бажаного перехідного процесу, що забезпечує максимальну точність та швидкодію.

Висновки. Доцільність вибору фільтра Бесселя як оптимального для об'єкта керування, що являє

собою багатомасову систему, дозволяє наблизити перехідні характеристики системи керування до бажаних, які б забезпечували ідеальне відтворення перехідного процесу, проте, вплив нелінійних елементів, що властиві майже всім багатомасовим системам, є невід'ємною складовою при побудові систем керування.

Підвищення якісних показників систем керування багатомасовими об'єктами є досить складною задачею, що певною мірою може бути вирішена системою з модальним керуванням. Проте у ряді випадків при проектуванні САК не завжди доступний вимір весь вектор стану об'єкта керування. Це може бути пов'язане з конструктивними особливостями об'єкта керування. Тому перспективою розвитку у даному напрямку є синтез динамічного регулятора.

ЛІТЕРАТУРА

1. Теория автоматического управления. Учеб. для вузов по спец. "Автоматика и телемеханика". В

2-х ч. / Н.А. Бабаков, А.А. Воронов и др.: Под ред. А.А. Воронова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1986. - 367 с., ил.

2. Егоров К.В. Основы теории автоматического регулирования. Учебное пособие для вузов, изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Энергия, 1967. - 648 с., ил.

3. Куропаткин П.В. Теория автоматического управления. Учеб. пособие для электротехн. спец. вузов. - М.: Высшая школа, 1973. - 528 с., ил.

4. Основы линейной теории автоматического управления в задачах электроэнергетики. Учебное пособие с компьютерным лабораторным практикумом АОС-ТАУ/ В.Ф. Коротков; Иван. гос. энерг. ун-т. - Иваново, 1994. - 392 с.

5. Григорьев В.В., Журавлёва Н.В., Лукьянова Г.В., Сергеев К.А. Синтез систем автоматического управления методом модального управления. - С-Пб: СПбГУ ИТМО, 2007. - 108 с.