

Б.І.Приймак, канд.техн.наук, **В.В.Токарчук** (Нац. техн. ун-т України “КПІ”, Київ)

ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ МОНОТОННОГО ХАРАКТЕРУ ПЕРЕХІДНОЇ ФУНКЦІЇ СИСТЕМИ З МОДИФІКОВАНИМ РЕГУЛЯТОРОМ ПОЛОЖЕННЯ

Отримано умову монотонного характеру перехідної функції електропривода підпорядкованої структури з модифікованим регулятором положення. Відсутність перерегулювання в реакції на завдання вимагається від систем керування положенням промислових роботів, металообробних верстатів та ін.

Получено условие монотонного характера переходной функции электропривода подчиненной структуры с модифицированным регулятором положения. Отсутствие перерегулирования в реакции на задание требуется в системах управления положением промышленных роботов, металлообрабатывающих станков и др.

Вступ. У промислових роботах чи металообробних верстатах, як відомо, від систем автоматичного регулювання (САР) положення поряд з достатньо високою швидкістю та точністю керування вимагається забезпечення відсутності перерегулювання при відпрацюванні завдання. Для функціонування системи у лінійній зоні останнє, вочевидь, буде досягнуто при монотонній перехідній функції САР за завданням.

На сьогодні електромеханічні системи (ЕМС) регулювання положення часто будуються за принципом підпорядкованого керування. При цьому в комплектних електроприводах високої якості зазвичай контур швидкості налаштовується на симетричний оптимум (СО), а підпорядкований йому контур регулювання струму – на модульний оптимум (МО) [1,2]. Для таких систем у [3] представлено процедуру синтезу модифікованого регулятора положення (МРП), який, на відміну від налаштованого на МО традиційного регулятора, дозволяє поліпшити динамічні та точнісні показники САР. Проте перехідні функції САР з такими регуляторами мають перерегулювання, хоч і невелике.

Метою статті є виявлення умов отримання монотонної перехідної функції за завданням в САР положення з МРП.

Визначення умови монотонності перехідної функції САР. Узагальнену структуру САР положення ЕМС показано на рис.1, де ω , φ – кутові або лінійні швидкість та положення ЕМС; ω^* , φ^* – завдання швидкості та положення відповідно; ε – помилка системи; M_H – момент навантаження двигуна; $W_\omega(p)$ – передатна функція (ПФ) замкненого контуру регулювання швидкості; $W_{reg}(p)$ – ПФ регулятора положення; k_φ – коефіцієнт передачі давача положення. Якщо контур струму налаштувати на МО, а контур швидкості – на СО, то, згідно з [1], останній в замкненому стані можна описати ПФ

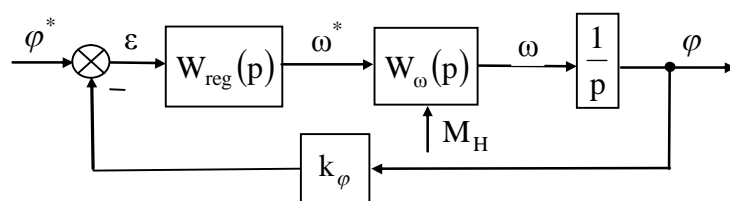


Рис.1

де T_μ – мала некомпенсована стала часу у контурі струму; k_ω – коефіцієнт передачі давача швидкості.

На основі [3] для МРП можна записати ПФ

$$W_\omega(p) = k_\omega^{-1} (8T_\mu p + 1) / (64T_\mu^3 p^3 + 32T_\mu^2 p^2 + 8T_\mu p + 1), \quad (1)$$

$$W_{reg}(p) = K_{reg} d^{-1} B_{reg}(p) / A_{reg}(p), \quad (2)$$

де $K_{reg} = k_{\omega} / 8T_{\mu} k_{\varphi}$ – номінальний коефіцієнт передачі регулятора; $A_{reg}(p) = 8bT_{\mu}^2 p^2 + (8+b)T_{\mu} p + 1$; $B_{reg}(p) = 16T_{\mu}^2 p^2 + 4T_{\mu} p + 1$; b – встановлюваний при синтезі регулятора параметр, d – деяке число, що буде змінюваним параметром в даному дослідженні, ($d > 0$). Параметр b по суті визначає ступінь відповідності між ідеалізованим та реальним (фізично реалізованим) варіантами регулятора, де ПФ ідеалізованого МРП визначається з (2) при $b=0$. Критерії вибору значення b ґрунтуються на отриманих у [3] аналітичних та графічних залежностях від b таких показників якості перехідного процесу як час регулювання, час наростання та перерегулювання у замкненій САР. Аналіз цих залежностей дає рекомендовані межі вибору параметра $0,1 \leq b \leq 1,2$.

Для регулятора (2) з використанням (1) знайдемо ПФ замкненої САР, схема якої зображена на рис. 1, у вигляді

$$W_{\varphi}(p) = k_{\varphi}^{-1} / (32dbT_{\mu}^3 p^3 + 8d(4+b)T_{\mu}^2 p^2 + 8dT_{\mu} p + 1). \quad (3)$$

Знаменник (3) є характеристичним поліномом замкненої системи. Оскільки поліном має 3-й степінь, то для дослідження САР можна застосувати розширену діаграму Вишнеградського [2]. Ця діаграма дозволяє виявити зони параметрів системи, де забезпечується потрібний характер перехідних процесів. Тут варто зазначити, що даний метод стосується власного руху системи, яким є відпрацювання нею ненульових початкових умов. Поряд з цим на характер вимушеного руху САР за зовнішньою дією можуть впливати і її нулі, якими є корені чисельника ПФ за цією дією. В нашій задачі йдеться саме про вимушений рух при відпрацюванні завдання. Проте, завдяки відсутності в ПФ (3) нулів, цей вимушений рух матиме характер вільного руху САР. Звідси ясно, що необхідна монотонність перехідної функції системи за завданням буде отримана при монотонному чи аперіодичному характері її власного руху.

Із знаменника ПФ (3) отримаємо перетворене характеристичне рівняння

$$p^3 + C_1 p^2 + C_2 p + C_3 = 0, \quad \text{де } C_1 = (4+b) / 4bT_{\mu}; \quad C_2 = 1 / 4bT_{\mu}^2; \quad C_3 = 1 / 32dbT_{\mu}^3.$$

Параметри Вишнеградського X та Y визначатимуться як $X = C_1 / \sqrt[3]{C_3}$; $Y = C_2 / \sqrt[3]{C_3^2}$.

Розкриваючи ці вирази, маємо

$$X = (4+b) \sqrt[3]{4db} / 2b; \quad Y = \sqrt[3]{(4db)^2} / b. \quad (4)$$

У площині $X - Y$ на рис. 2 показана діаграма зон параметрів САР положення. На ньому крива I є гіперболою Вишнеградського, що описується рівнянням $XY = 1$. Ця крива поділяє всю площину на зони I–III, де система стійка ($XY > 1$), та на зону IV, де система нестійка ($XY < 1$). Кривою 2 виокремлюється зона II, що є зоною монотонних перехідних процесів в САР. У зоні III процеси коливальні, а у зоні I, що обмежується кривими 2 та 3, – перехідні процеси в САР аперіодичні. Крива 3 описується рівнянням

$$4(X^3 + Y^3) - 18XY - X^2 Y^2 + 27 = 0. \quad (5)$$

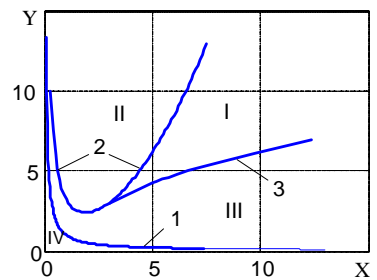


Рис. 2

Підставляючи у (5) вирази (4), отримаємо рівняння для визначення критичного (мінімально можливого) значення d_0 параметра d у вигляді

$$d_0^2 [128b - 8(4+b)^2] + d_0 [4(4+b)^3 - 72b(4+b)] + 54b^2 = 0. \quad (6)$$

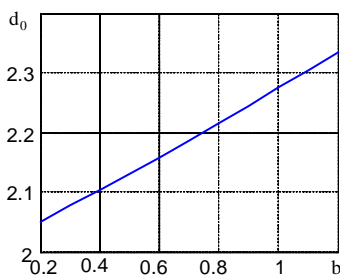


Рис.3

На рис. 3 показана крива $d_0 = f(b)$, що отримана розв'язуванням (6) для $b \in [0,2, 1,2]$. Застосувавши метод поліноміальної апроксимації до цієї кривої, одержимо її аналітичний опис

$$d_0 = 0,025b^2 + 0,25b + 2. \quad (7)$$

З формули (7) та рис. 3 можна зробити висновок, що $\lim_{b \rightarrow 0} d_0 = 2$. Рівність $d = d_0$ відповідатиме кривій 3 на рис. 2, що є межею зон I та III.

Отже, ми отримали умову забезпечення відсутності перерегулювання в перехідній функції САР положення ЕМС з МРП. Ця умова полягає у тому, що визначений при синтезі системи номінальний коефіцієнт передачі регулятора K_{reg} слід зменшити в $d \geq d_0$ раз, де d_0 визначається за графіком на рис. 3 або за виразом (7) як функція параметра b регулятора.

Треба відзначити, що в разі істотних варіацій параметрів САР може статися так, що реальні значення X та Y на рис. 2 переміщуватимуться в зону коливальних процесів III. Для уникнення такого результату слід вибирати $d = d_0 + \Delta d$, де $\Delta d > 0$ – коефіцієнт запасу. У цьому випадку при проектуванні системи рекомендується попередньо провести дослідження натурної або математичної моделі САР при максимально можливих варіаціях її параметрів і визначити потрібне для забезпечення монотонності перехідної функції значення Δd . Приклад такого дослідження наведено нижче.

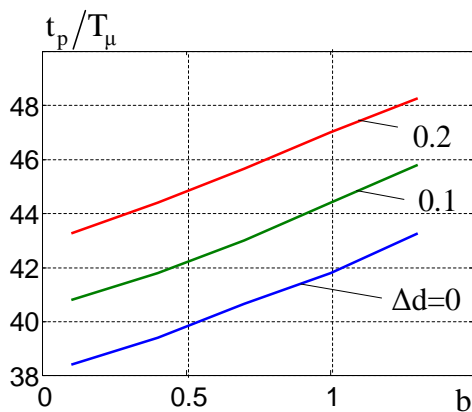


Рис. 4

Чисельні дослідження. Для виявлення деяких важливих характеристик системи було проведено чисельні дослідження шляхом математичного моделювання. На рис. 4 показано залежності часу регулювання t_p САР положення з МРП, що описується ПФ (3) та має монотонну перехідну функцію, від параметра b регулятора та коефіцієнта запасу Δd . При цьому під час моделювання в (3) задавалося $d = d_0 + \Delta d$, а значення $d_0 = f(b)$ визначалося за (7). Аналіз рис. 4 виявляє тенденцію до монотонного зростання часу регулювання t_p при збільшенні b , а також засвідчує збільшення t_p внаслідок зростання Δd .

Другим завданням чисельних досліджень було отримання оцінки реальних значень коефіцієнта запасу Δd при визначенні $d = d_0 + \Delta d$ для забезпечення монотонності перехідної функції САР в разі варіацій її параметрів. Для цієї задачі було вибрано об'єкт регулювання (ОР) у вигляді двигуна постійного струму з незалежним збудженням, якірне коло якого живиться від напівпровідникового перетворювача напруги. Структурна схема ОР показана на рис. 5, де u – керувальна дія, що задає напругу на виході перетворювача; I – струм якоря двигуна; M , M_H – електромагнітний момент двигуна та момент його навантаження відповідно; ω , φ – кутові швидкість та положення привода. САР положення побудована за принципом підпорядкованого керування. При цьому у контурі регулювання струму якоря застосовано ПІ-регулятор із налаштуванням на МО, а у контурі регулювання швидкості привода – ПІ-регулятор із налаштуванням на СО.

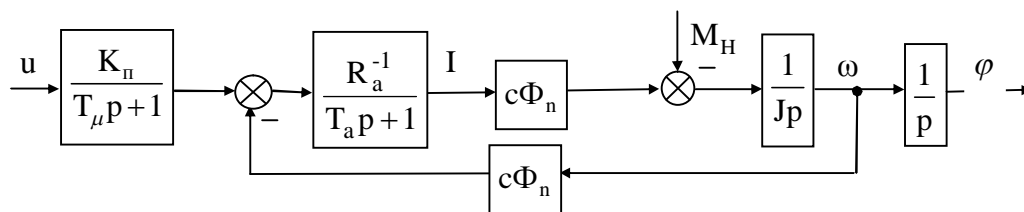


Рис. 5

Тобто замкнений контур швидкості тут описувався ПФ (1). У контурі регулювання положення привода застосовано МРП з ПФ (2). Номінальні значення параметрів ОР дорівнюють (у відповідних одиницях системи СИ): $K_H = 42,5$; $L_a = 0,046$; $R_a = 0,61$; $T_a = L_a/R_a = 0,0754$; $c\Phi_n = 3,67$; $J = 1$; $T_\mu = 0,005$. При дослідженні впливу варіацій параметрів на властивості системи параметри

об'єкта відхилялися у більшу або меншу сторону від своїх номінальних значень, а всі регулятори були налаштовані на номінальні параметри ОР. Варіація ΔX деякого параметра X обчислювалася як $\Delta X = [(X - X_n) / X_n] \times 100\%$, де X , X_n – реальне та номінальне значення варійованого параметра.

На першому етапі дослідження ставилося за мету визначити діапазони варіацій параметрів, де зберігається монотонний характер перехідної функції САР без введення коефіцієнта запасу, тобто при $\Delta d = 0$. Для активного опору обмотки якоря двигуна R_a та сумарного моменту інерції привода J отримано такі діапазони їхніх варіацій ΔR_a та ΔJ при $b = 0.1$ ($b = 1.2$): $-90\% \leq \Delta R_a \leq +160\%$ ($-135\% \leq \Delta R_a \leq +167\%$); $-20\% \leq \Delta J \leq +47\%$ ($-25\% \leq \Delta J \leq +49\%$). Як видно, допустимі межі змін параметрів при нульовому коефіцієнті запасу є досить істотними, причому вони розширюються при зростанні b .

На другому етапі дослідження, результати якого наведено в таблиці, розглядався варіант, коли варіації параметру виходили за межі, що допустимі при нульовому коефіцієнті запасу, а монотонність перехідної функції САР забезпечувалася шляхом вибору відповідного $\Delta d > 0$. Зокрема

ΔJ	b			
	0.1	0.4	0.8	1.2
-40%	$\frac{0.3}{48}$	$\frac{0.27}{42.8}$	$\frac{0.23}{40.6}$	$\frac{0.18}{40.2}$
+60%	$\frac{0.26}{43.2}$	$\frac{0.25}{44.4}$	$\frac{0.22}{45.4}$	$\frac{0.17}{46}$

тут малося на меті для варіацій $\Delta J = -40\%$ та $\Delta J = +60\%$ визначити Δd та t_p у залежності від параметра b .

Отримані дані представлено у таблиці у вигляді дроби, де чисельником є величина Δd , а знаменником – відносне значення часу регулювання t_p / T_μ . Аналізуючи

табличні дані, можна відзначити тенденцію до зменшення Δd при збільшенні b . Що стосується часу регулювання, то при додатній варіації J має місце аналогічне рис. 4 зростання t_p при збільшенні b . Проте, що цікаво, при від'ємній варіації J спостерігається зворотна тенденція. При цьому для деяких значень b час регулювання є меншим для варійованого об'єкту, ніж для не варійованого. Наприклад, з рис. 4 при $b = 1.2$, $\Delta d = 0$ отримуємо $t_p / T_\mu = 42.8$, а з таблиці при $\Delta J = -40\%$, $b = 1.2$ маємо $t_p / T_\mu = 40.2$.

Підсумки. Визначено умову монотонного характеру перехідної функції електропривода підпорядкованої структури з модифікованим регулятором положення шляхом використання розширеної діаграми Вишнеградського. Проведено чисельні дослідження впливу варіацій параметрів об'єкта на властивості системи. Забезпечення монотонності в реакції на завдання є важливим для систем автоматичного керування положенням промислових роботів, маніпуляторів та металообробних верстатів.

1. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов : учебник для вузов. – М. : Машиностроение, 1990. – 304 с.

2. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування : підруч. для студ. вищ. техн. навч. закл. – К. : Либідь, 2007. – 656 с.

3. Приймак Б.І. Модифікований регулятор положення для електроприводів підпорядкованої структури з типовим налаштуванням контурів // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2008. – № 1 (19). – С. 70–73.

Надійшла 10.09.2009