

НАЛАГОДЖЕННЯ КОМПЛЕКТНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З ЛІНІЙНИМ І НЕЛІНІЙНИМ КОРИГУВАЛЬНИМИ ПРИСТРОЯМИ

Д. Ю. Шарейко, кандидат технічних наук, доцент

І. С. Білюк, кандидат технічних наук, доцент

А. М. Фоменко, доцент

Національний університет кораблебудування ім. адмірала МакароваА.

В. Козаченко, викладач

Новобузький коледж МНАУ

Розглянуто структурну схему системи керування комплектним електроприводом з лінійним і нелінійним коригувальним пристроєм. Визначено параметри системи керування та її характеристичне рівняння. Розглянуто застосування нелінійного адаптивного регулятора у структурі сучасного комплектного електропривода. Складена математична модель для синтезу нелінійного адаптивного регулятора. Побудовано перехідні характеристики для оцінки параметрів системи з лінійною та нелінійною корекцією. Доведено доцільність використання адаптивного регулятора у структурі сучасного комплектного електропривода.

Ключові слова: адаптивний регулятор, нелінійний закон керування, комплектний електропривод, динамічна корекція, параметри регулятора.

Постановка проблеми. Сучасні комплектні електроприводи (КЕП) на відміну від старих, аналогових не використовують у своїй структурі адаптивний регулятор (АР) [1-5]. Використання АР, як окремих блоків у електроприводах може показатись недоцільним, оскільки до складу сучасного КЕП входить програмований логічний контролер, за допомогою якого програмно задають параметри регуляторів. Але наявність АР дозволяє суттєво покращити показники якості керування, особливо коли цьому регулятору притаманні нелінійні властивості. Крім того, окремий АР розвантажує логічний контролер, який замість установки параметрів регулятора може займатись іншими операціями, наприклад узгодженням роботи декількох двигунів у складі загальнопромислової установки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літератури [1-9] показав, що в сучасних системах керування КЕП вико-

ристовуються такі види регуляторів, як ПД та ПІД-регулятори. Одночасне використання таких регуляторів в системі призводить до того, що параметри регуляторів потрібно пере налаштувати для переходу з одного режиму в інший. Отже постає питання автоматичного переналаштування параметрів регуляторів, зокрема необхідності застосування адаптивного регулятора.

Метою роботи є розробка структури сучасного КЕП з адаптивним нелінійним регулятором та складання математичної моделі для розрахунку коефіцієнтів динамічної структури з подальшим проведенням чисельного експерименту, щодо дослідження роботи КЕП з різними законами регулювання.

Викладення основного матеріалу. Структурна схема системи з лінійним і нелінійним коригувальним пристроєм приведена на рис. 1 [10].

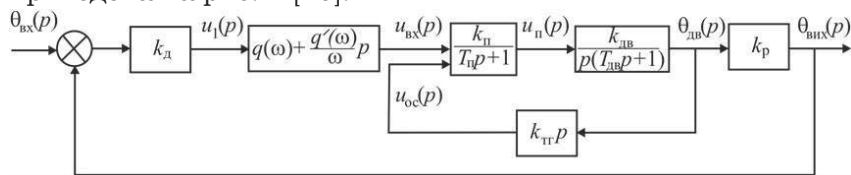


Рис. 1. Система з лінійним і нелінійним коригувальним пристроєм

На схемі позначено k_d – коефіцієнт передачі датчика, $q(\omega)$ – коефіцієнт нелінійного регулятора; k_{ii} та T_{ii} – коефіцієнт передачі та стала часу тиристорного перетворювача відповідно; k_{dvb} та T_{dvb} – коефіцієнт передачі та механічна стала часу двигуна відповідно; k_p – коефіцієнт передачі редуктора; k_{ii} – коефіцієнт передачі тахогенератора; $\theta_{vkh}(p)$, $\theta_{dvb}(p)$, $\theta_{vikh}(p)$ – координати завдання, на виході двигуна та на виході системи відповідно; $u_1(p)$, $u_{vkh}(p)$, $u_{ii}(p)$ – вихідний сигнал датчика, вхідний сигнал тиристорного перетворювача та напруга живлення двигуна відповідно.

Вираз для помилки системи рис. 1 має вид:

$$\delta = \frac{(1 + T_{ii} p)(1 + T_{dvb} p) + k_{oc} p}{p(1 + T_{ii} p)(1 + T_{dvb} p) + k_{oc} p + k \left(q(\omega) + \frac{q'(\omega)}{\omega} p \right)} \theta_{vkh}, \quad (1)$$

де k_{oc} – коефіцієнт передачі за швидкістю ($k_{oc} = k_{\Pi} k_{дв} k_{тр}$).

Характеристичне рівняння системи:

$$p^3 + A_1 p^2 + A_2 p + A_3 = 0, \quad (2)$$

де $A_1 = \frac{T_{дв} + T_{\Pi}}{T_{дв} T_{\Pi}}$; $A_2 = \frac{1 + k_{oc} + k \frac{q'(\omega)}{\omega}}{T_{дв} T_{\Pi}}$; $A_3 = \frac{kq(\omega)}{T_{дв} T_{\Pi}}$; k – коефіцієнт

передачі розімкнутої системи ($k = k_{\Pi} k_{дв} k_{д} k_{р}$).

Використаємо критерій стійкості Гурвіца:

$$\frac{T_{дв} + T_{\Pi}}{T_{дв} T_{\Pi}} \left(1 + k_{oc} + k \frac{q'(\omega)}{\omega} \right) - kq(\omega) = 0;$$

$$\omega^2 = \frac{kq(\omega)}{T_{дв} + T_{\Pi}}. \quad (3)$$

Для чисельних значень сталих часу $T_{дв} = 0,15$ с, $T_{\Pi} = 0,05$ с та динамічних коефіцієнтів згідно номограм [10] отримаємо:

$$26,67 \left(1 + k_{oc} + k \frac{q'(\omega)}{\omega} \right) - kq(\omega) = 0;$$

$$\omega^2 = \frac{kq(\omega)}{0,2}. \quad (4)$$

З першого рівняння системи (4) отримаємо вираз для k_{oc} , а з другого рівняння – для k :

$$k_{oc} = \frac{kq(\omega)}{26,67} - 1 - k \frac{q'(\omega)}{\omega}; \quad k = \frac{0,2\omega}{q(\omega)}.$$

Задаючись різними значеннями ω будемо залежність $k = f_1(k_{oc})$ (рис. 2).

Для оцінки якості перехідних процесів системи при спільному використанні лінійної і нелінійної корекції запишемо:

$$\zeta = -\frac{A_1 A_2 - A_3}{2(A_2 + (A_1 + 2\zeta)^2)}; \quad \omega^2 = \frac{A_3}{A_1 + 2\zeta} - \zeta^2,$$

де ζ – коефіцієнт загасання.

Підставляючи значення A_1, A_2, A_3 отримаємо:

$$k_{oc} = -\frac{0,0075kq(\omega)}{0,2 + 0,015\zeta} - 1 - k \frac{q'(\omega)}{\omega} - 2\zeta(0,2 + 0,015\zeta);$$

$$k = \frac{(\omega^2 + \zeta^2)(0,2 + 0,015\zeta)}{q(\omega)}. \quad (5)$$

Задаючись різними значеннями ζ і ω будемо залежності $k=f_1(k_{oc})$ при різних ζ і $\omega = \text{const}$ (рис. 2).

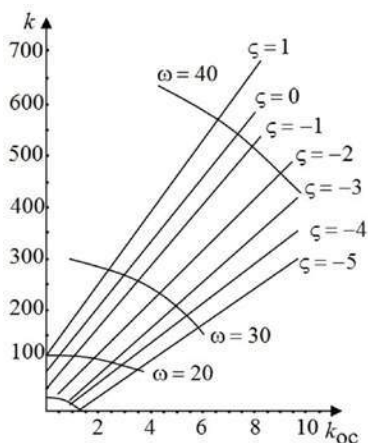


Рис. 2. Залежність $k=f_1(k_{oc})$ при різних значеннях ω

Для системи з нелінійним динамічним коригувальним пристроєм, що реалізує закон $[0 \psi_1^{\psi_2}]$, де $\psi = \text{arctg} \omega \cdot T_{дв}$, і зворотним зв'язком за швидкістю при $k_{oc} = 3$, коефіцієнт загасання дорівнює $\zeta = -4 \text{ с}^{-1}$, частота вільних коливань $\omega = 23,7 \text{ с}^{-1}$, $f = \omega/2\pi = 3,8 \text{ Гц}$, стала часу перехідного процесу $T = 1/|\zeta| = 1/4 = 0,25 \text{ с}$. Час регулювання $t_{пер} = 0,7 \text{ с}$, число коливань $m=3$, перерегулювання $\sigma = 55\%$ [10].

Використовуючи вираз (1) будемо залежності помилки від величини коефіцієнта зворотного зв'язку за швидкістю k_{oc} .

Визначаємо залежність швидкісної помилки від коефіцієнта зворотного зв'язку по швидкості в сталому режимі.

$$\delta_{ск} = \frac{(1+k_{oc})p\theta_{вх}}{kq(\omega)} = \frac{(1+k_{oc}) \cdot 1,22}{k},$$

та будемо графіки $\delta=f_1(k_{oc})$ та $\delta_{ск}=f_2(k_{oc})$ представлені на рис. 3.

Проведемо дослідження системи з нелінійним коригувальним сигналом типу $[-1 \psi_1^{\psi_2}]$ та зворотним зв'язком за швидкістю. Виведемо для цього випадку коефіцієнти гармонійної лінеаризації нелінійності. В цьому випадку ті частини синусоїди, які «вирізалась» в попередньому випадку, використовуватимуться для керування, але з протилежним знаком. Таким чином:

$$q = 1 - \frac{2\psi}{\pi} + \frac{1}{\pi} \sin 2\psi, \quad q' = \frac{2}{\pi} - \frac{2}{\pi} \sin 2\psi.$$

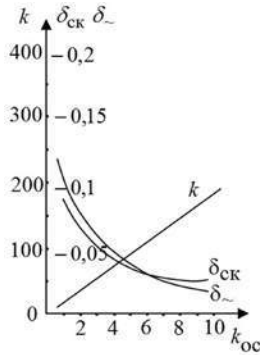


Рис. 3. Залежність $\delta = f_1(k_{oc})$

Оскільки $\psi = \arctg \omega \cdot T_{дв}$, то, задаючись різними значеннями знаходимо залежності $q = f_1(\omega)$ і $q' = f_2(\omega)$ (рис. 4).

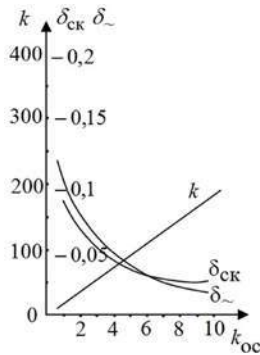


Рис. 4. Залежності $q = f_1(\omega)$ і $q' = f_2(\omega)$

Порівнюючи залежності $q = f_1(\omega)$ і $q' = f_2(\omega)$ для випадків коригувальних сигналів типу $\begin{bmatrix} 0 \\ \psi_1 \end{bmatrix}$ і $\begin{bmatrix} -1 \\ \psi_1 \end{bmatrix}$ (рис. 4) бачимо, що при коригувальному сигналі $\begin{bmatrix} -1 \\ \psi_1 \end{bmatrix}$ з зростанням частоти ω функція $q(\omega)$ зменшується більш різко; але $q(\omega)$ являє собою коефіцієнт передачі нелінійної ланки, отже, у другому випадку буде більша розбіжність між коефіцієнтами q і q' системи і більш різке приборкання коливань.

У той же час при коригувальному сигналі $[0 \psi_1]$ коефіцієнт $q=f(\omega)$ має в два рази більше значення, ніж при коригувальному сигналі $[-1 \psi_1]$ отже, і вплив похідної в законі регулювання буде більше.

Оскільки амплітудно-фазова характеристика нелінійної ланки не виходить за межі першого квадранта комплексної площини ($q'(\omega)>0$), передавальну функцію ланки необхідно представити у вигляді [10]:

$$W(p) = q(\omega) + \frac{q'(\omega)}{\omega} p = q(\omega) \left(1 + \frac{q'(p)}{\omega q(\omega)} p \right) = k_3 (1 + r_3 p), \quad (6)$$

де $k_3 = q(\omega)$; $r_3 = \frac{q'(\omega)}{\omega q(\omega)}$; – коефіцієнти передачі нелінійної ланки.

Визначимо залежність $r_3 = f(\omega)$ для обох випадків (див. рис. 5). Із порівняння кривих $r_3 = f(\omega)$ при коригувальних сигналах $[0 \psi_1]$ та $[-1 \psi_1]$ видно, що при сигналі $[0 \psi_1]$ зі збільшенням частоти ω еквівалентний коефіцієнт передачі за першою похідною r_3 спочатку різко зростає, а потім починає зменшуватися. У той же час r_3 при коригувальному сигналі $[-1 \psi_1]$ зі збільшенням частоти спочатку зростає, а потім залишається постійним та в три рази перевищує значення r_3 при коригувальному сигналі $[0 \psi_1]$ [10].

Таким чином, введення коригувального сигналу $[-1 \psi_1]$ дає більший ефект, ніж введення коригувального сигналу $[0 \psi_1]$.

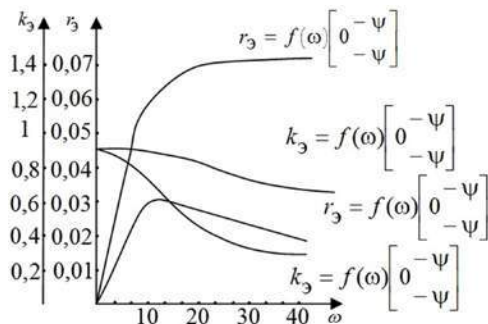


Рис. 5. Залежності $r_3 = f(\omega)$ при різних типах коригувальних сигналів

Вище були виведені залежності $k=f(\omega)$ та $k_{oc}=f(\omega)$ при різних коефіцієнтах загасання ζ для системи зі спільною корекцією. Ці залежності справедливі і в даному випадку.

Для оцінки параметрів системи з лінійною та нелінійною корекцією побудуємо залежності представлені на рис. 6.

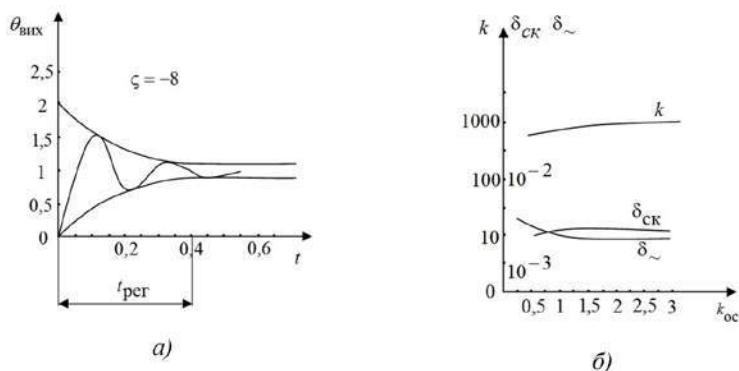


Рис. 6. Перехідна характеристика системи з лінійною та нелінійною корекцією а) та залежність систем лінійної і нелінійної корекції від коефіцієнту зворотного зв'язку б)

Наведені на рисунках 2-6 залежності дозволяють визначити наступне:

1) Застосування одного коригувального сигналу типу $[0_{\psi_1}^{\psi_2}]$ не дозволяє отримати істотного виграшу по відношенню до лінійної корекції зворотного зв'язку за швидкістю;

2) Застосування спільної лінійної і нелінійної корекції при коригувальному сигналі $[0_{\psi_1}^{\psi_2}]$ дозволяє зменшити синусну та швидкісну помилки в порівнянні з лінійною системою, приблизно, вдвічі. При збільшенні коефіцієнта зворотного зв'язку за швидкістю k_{oc} , до значення $k_{oc}=3$ синусна та швидкісна помилки як нелінійної, так і лінійної систем різко зменшуються за абсолютною величиною. Подальше збільшення коефіцієнта зворотного зв'язку на абсолютну величину помилок майже не позначається. Тому найбільш підходящим для системи зі спільною корекцією при коригуючому сигналі $[0_{\psi_1}^{\psi_2}]$ буде $k_{oc}=3$. При цьому статичний коефіцієнт системи $k_{ст} = 124 \text{ с}^{-1}$, частота $\omega=21,8 \text{ с}^{-1}$, коефіцієнт загасання $\zeta = -4 \text{ с}^{-1}$ синусна помилка $\delta=0,0453$ рад, швидкісна помилка $\delta_{ск}=0,0475$;

3) Застосування спільної лінійної і нелінійної корекції при коригувальному сигналі $[-1_{\psi_1}^{\psi_2}]$ дозволяє зменшити синусну і швидкісну помилки в порівнянні з лінійною системою при однаковій якості перехідного процесу на 2-3 порядки (синусну

на 2 порядки, швидкісну – на 3). Якщо вибирати коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю для цієї системи рівним $k_{oc} = 1,5$, то при цьому для нелінійної системи статичний коефіцієнт підсилення $k_{ст} = 1120 \text{ сек}^{-1}$, коефіцієнт загасання $\varsigma = -8 \text{ с}^{-1}$, синусна помилка $\delta_{ac} = 0,0036 \text{ рад}$, швидкісна $\delta_{склас} = 0,0041 \text{ рад}$, частота $\omega = 48,5 \text{ с}^{-1}$, динамічний коефіцієнт підсилення $k_{дин} = 1,92 \text{ с}^{-1}$;

4) З усіх розглянутих систем найкращою за точністю і якістю перехідного процесу є система зі спільною корекцією з нелінійним коригувальним пристроєм, що реалізовує закон $[-1 \frac{\psi_2}{\psi_1}]$, і коефіцієнтом лінійного зворотного зв'язку за швидкістю, який дорівнює $k_{oc} = 1,5$.

Висновки. У роботі було розглянуто структурну схему системи керування сучасного КЕП з лінійним і нелінійним коригувальним пристроєм. Отримано математичну модель, яка дозволяє виконати синтез нелінійного адаптивного регулятора та отримати перехідні характеристики системи керування. Аналіз динаміки системи показав, що найкращу якість перехідного процесу забезпечує спільна корекція з нелінійним коригувальним пристроєм, що реалізовує закон $[-1 \frac{\psi_2}{\psi_1}]$, і коефіцієнтом лінійного зворотного зв'язку за швидкістю, який дорівнює $k_{oc} = 1,5$.

Список використаних джерел:

1. Шарейко Д. Ю. Поліпшення динамічних характеристик комплектних електроприводів [Текст] / Д. Ю. Шарейко, І. О. Шведененко // Перспективна техніка і технології : матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (м. Миколаїв, 22-24 вересня 2014 року) – Миколаїв, 2014. – С. 24-32;
2. Фоменко А. М. Комплектні електроприводи [Текст] : у 3ч. Ч. 1: Аналогові комплектні електроприводи : навчальний посібник з грифом МОНУ / Фоменко А. М., Шарейко Д. Ю. – Миколаїв : НУК, 2010. – 144 с.
3. Фоменко А. М. Комплектні електроприводи [Текст] : у 3ч. Ч. 2: Цифрові комплектні електроприводи : навчальний посібник з грифом МОНУ. / Фоменко А. М., Шарейко Д. Ю. – Миколаїв : НУК, 2014. – 143 с.
4. Краснодубец Л. А. Применение новых адаптивных регуляторов в системах стабилизации скорости двигателей постоянного тока [Текст] / Л. А. Краснодубец // Вестник СевНТУ. Автоматизация процессов и управление : сб. науч. тр. – Севастополь, 2010. – Вып. 108 – С. 213-217.
5. Шарейко Д. Ю. Адаптивный регулятор у структурі сучасного комплектного електроприводу [Текст] / Д. Ю. Шарейко, І. О. Шведененко // Вісник аграрної науки Причорномор'я – 2014. – Вип. 1 (77). – С.м191-198.
6. Белов М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов [Текст] / М. П. Белов – М. : Академия, 2007. – 576 с.

7. Попович М. Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи [Текст] / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
8. Краснодубец Л. А. Аналитическое конструирование адаптивных регуляторов на основе концепций обратных задач динамики и локальной оптимизации [Текст] / Л. А. Краснодубец // Вестник СевНТУ. Автоматизация процессов и управление: сб. науч. тр. – Севастополь, 2010. – Вып. 108 – С. 5-9.
9. Krzysztof Szabat and Teresa Orłowska-Kowalska. Adaptive control of the electrical drivers with the elastic coupling using Kalman filter. // Wroclaw University of Technology. Poland. 2009 – 372 pages.
10. Хлыпало Е. И. Нелинейные корректирующие устройства в автоматических системах [Текст] / Е. И. Хлыпало. – Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1973. – 344 с.

*Д.Ю. Шарейко, И.С. Билюк, А.Н. Фоменко, А.В. Козаченко. **Наладка комплектных электроприводов с линейным и нелинейным корректирующими устройствами.***

Рассмотрена структурная схема системы управления комплектным электроприводом с линейным и нелинейным корректирующим устройством. Определены параметры системы управления и ее характеристическое уравнение. Рассмотрено применение нелинейного адаптивного регулятора в структуре современного комплектного электропривода. Составлена математическая модель для синтеза нелинейного адаптивного регулятора. Построены переходные характеристики для оценки параметров системы с линейной и нелинейной коррекцией. Доказана целесообразность использования адаптивного регулятора в структуре современного комплектного электропривода.

Ключевые слова: адаптивный регулятор, нелинейный закон управления, комплектный электропривод, динамическая коррекция, параметры регулятора.

*D. Shareiko, I. Bilyuk, A. Fomenko, A. Kozachenko. **Tuning the complete electric drives with linear and non-linear compensating devices.***

The structural scheme of the control system of the complete electric drive with linear and nonlinear compensating devices is considered. The values of the control system and its characteristic equation are defined. The use of the nonlinear adaptive regulator in the structure of the modern complete electric drive is reviewed. A mathematical model for the synthesis of the nonlinear adaptive regulator is constructed. The transient characteristics are built to assess the values of the system with the linear and nonlinear compensation. The expediency of using the adaptive regulator in the structure of the modern complete electric drive is proved.

Key words: Adaptive regulators, nonlinear control law, complete electric drive, dynamic compensation, values of the regulator.