

ІДЕНТИФІКАЦІЯ НЕЛІНІЙНОСТЕЙ ЕЛЕКТРОГІДРОПРИВОДІВ ПРИ ЇХ ДІАГНОСТИЦІ

Галай П.М., аспірант

Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка

просп. Першотравневий, 24, м. Полтава, 36011

E-mail: oyo@ukr.net

Сільвестров А.М., д.т.н., проф.

Національний технічний університет України «КПІ»

03056, Київ, просп. Перемоги, 37

Вступ. Нелінійності характеристик електрогідроприводів, як і електроприводів [1], приносять багато неприємностей, наприклад, якщо ці приводи використовують в системах автоматизації технологічних процесів, керуванні рухом транспортних засобів, роботів, маніпуляторів [2]. Нелінійності часто знижують чутливість систем, вносять запізнення, зменшують точність керування, погіршують якість динаміки. Паспортні значення нелінійностей враховуються при проектуванні приводів. Але параметри цих нелінійностей за різними причинами можуть суттєво відрізнитися при їх виробництві і не залишаються постійними в процесі експлуатації. Наприклад, до нелінійностей електрогідроприводів рульових машин вантажно-транспортних роботів з адресною доставкою вантажів ставляться досить жорсткі вимоги: зона нечутливості зовнішнього контуру $\leq 4\%$ від максимального розмаху його статичної характеристики; асиметрія статичної характеристики $\leq 10\%$; розкид крутизни статичної характеристики $\leq 30\%$; неточність установлення електричного нуля $\leq \pm 0,1$ В [3].

Для об'єктів і систем, які відповідають гіпотезі фільтра низьких частот (ФНЧ), найзручнішим при розрахунках нелінійностей є метод гармонічної лінеаризації [4]. Електрогідропривод відповідає гіпотезі ФНЧ, тому користуємося цим методом. За цим методом розроблена загальна методика розрахунку параметрів нелінійностей і в літературі з теорії автоматичного керування приводяться формули для розрахунків параметрів простих нелінійностей [4]. Як видно із вище наведених вимог до нелінійностей електрогідропривода, опублікованих формул недостатньо для синтезу алгоритмів ідентифікації нелінійностей. Потрібно врахувати зміщення C_0 центру зони нечутливості, нерівність між собою коефіцієнтів нахилу гілок статичної характеристики ($K_1 \neq K_2$), несиметричність зони насичення ($B_1 \neq B_2$).

Мета роботи. Користуючись методом гармонічної лінеаризації, отримати математичні

залежності першої гармоніки вихідного сигналу від параметрів статичної нелінійності для синтезу алгоритмів її ідентифікації. Використання отриманих формул проілюструвати прикладом синтезу алгоритму ідентифікації зони нечутливості.

Матеріал і результати досліджень. На вхід нелінійної ланки (рис. 1) подаємо гармонічний сигнал $x_{\text{вх}} = A \sin \omega t$. Тоді після розкладання в ряд Фур'є амплітуда першої гармоніки вихідного сигналу (коефіцієнт гармонічної лінеаризації $q(A)$) дорівнює:

$$A_1(A) = q(A) = \frac{1}{p} \int_0^{2p} f(A \sin \omega t) \sin \omega t d\omega t. \quad (1)$$

Із рис. 1 видно, що вихідний сигнал $y_{\text{вих}} = f(x_{\text{вх}})$ являється несиметричним на інтервалах від 0 до p і від p до $2p$, і описується у відповідних інтервалах спостереження у вигляді:

$$y_{\text{вих}} = f(A \sin \omega t) = \begin{cases} K_2(A \sin y - C_2) & \text{при } y \in (0, y_1) \cup (p, y_7); \\ K_1(A \sin y - C_1) & \text{при } y \in (y_2, y_3); \\ B_1 & \text{при } y \in (y_3, p/2); \\ 0 & \text{при } y \in (y_1, y_2); \\ B_2 & \text{при } y \in (y_7, 3p/2); \end{cases} \quad (2)$$

$$y_1 = \arcsin \frac{C_2}{A}; \quad y_2 = \arcsin \frac{C_1}{A};$$

$$y_3 = \arcsin \left[\frac{C_1 + \frac{B_1}{K_1}}{A} \right]; \quad y_4 = p - y_3; \quad y_5 = p - y_2;$$

$$y_6 = p - y_1; \quad y_7 = p + \arcsin \left[\frac{\left| \frac{B_2}{K_2} \right| - C_2}{A} \right];$$

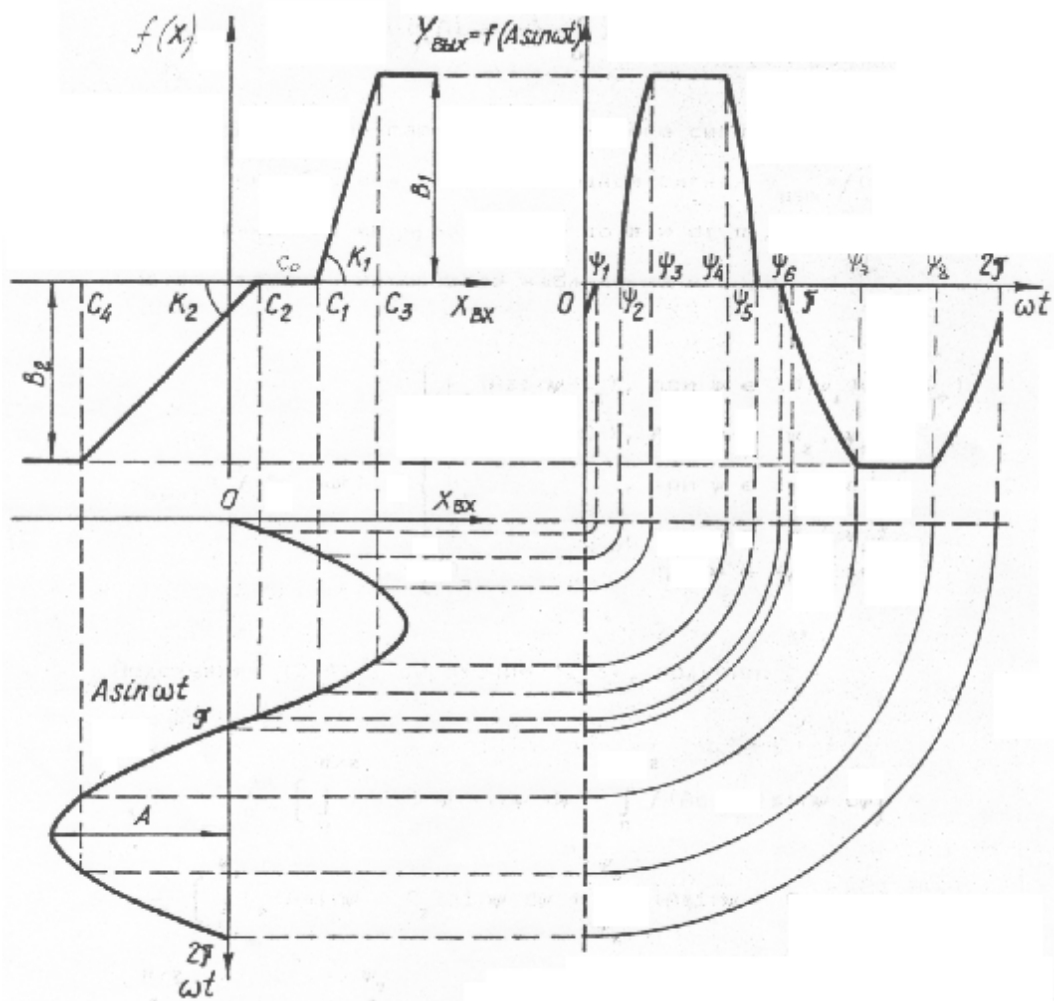


Рисунок 1 – Геометрична інтерпретація проходження гармонічного сигналу через нелінійний елемент

$$y_8 = 2p - \arcsin \left[\frac{\left| \frac{B_2}{K_2} - C_2 \right|}{A} \right];$$

$$C_3 = C_1 + \frac{B_1}{K_1}; \quad C_3 = C_1 - \left| \frac{B_2}{K_2} \right|.$$

Підставивши (2) у вираз (1), отримаємо:

$$\begin{aligned} A_1(A) &= \frac{2}{p} \left(\int_0^{p/2} f(Asiny) \sin y dy + \int_p^{3p/2} f(Asiny) \sin y dy \right) = \\ &= \frac{2}{p} \left(\int_0^{y_1} K_2(Asiny - C_2) \sin y dy + \int_{y_2}^{y_3} K_1(Asiny - C_1) \sin y dy + \int_{y_3}^{p/2} B_1 \sin y dy + \right. \\ &+ \left. \int_p^{y_7} K_2(Asiny - C_2) \sin y dy + \int_{y_7}^{3p/2} B_2 \sin y dy \right) = \frac{2}{p} \left\{ K_1 C_1 \cos y \Big|_{y_2}^{y_3} + K_2 C_2 (\cos y \Big|_0^{y_1} + \cos y \Big|_p^{y_7}) - \right. \\ &- B_1 \cos y \Big|_{y_3}^{p/2} - B_2 \cos y \Big|_{y_7}^{3p/2} + K_1 A (y/2 - 1/4 \sin 2y) \Big|_{y_2}^{y_3} + K_2 A \left[(y/2 - 1/4 \sin 2y) \Big|_0^{y_1} + \right. \\ &+ \left. (y/2 - 1/4 \sin 2y) \Big|_p^{y_7} \right] \Big\} = \frac{K_1 A}{p} \left(\arcsin \frac{C_3}{A} - \arcsin \frac{C_1}{A} + \frac{C_3}{A} \sqrt{1 - (C_3/A)^2} - \frac{C_1}{A} \sqrt{1 - (C_1/A)^2} \right) + \\ &+ \frac{K_2 A}{p} \left(\arcsin \frac{C_2}{A} - \arcsin \frac{C_4}{A} + \frac{C_2}{A} \sqrt{1 - (C_2/A)^2} - \frac{C_4}{A} \sqrt{1 - (C_4/A)^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

при $A \geq C_3$ і $A \geq |C_4|$.

При умові, що $K = K_1 = K_2$ і $C_1 = |C_2|$, $C_3 = |C_4|$, вираз (3) спрощується до частинного вигляду [4]:

$$A_1(A) = \frac{2KA}{p} \left[\arcsin \frac{C_3}{A} - \arcsin \frac{C_1}{A} + \frac{C_3}{A} \sqrt{1 - (C_3/A)^2} - \frac{C_1}{A} \sqrt{1 - (C_1/A)^2} \right],$$

що підтверджує правильність виразу (3), отриманого для загального випадку нелінійної характеристики (рис. 1).

Розглянемо випадок, коли амплітуда вхідного гармонічного сигналу дорівнює меншому із значень C_3 і C_4 і зробимо припущення, що при даній амплітуді настає насичення по симетричній гілці нелінійної характеристики, тобто $A = C_3 = C_4$. Тоді вираз (5) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} A_1(A) &= \frac{2}{p} \left(\int_0^{y_1} K_2 (A \sin y - C_2) \sin y \, dy + \int_p^{3p/2} K_2 (A \sin y - C_2) \sin y \, dy + \int_{y_2}^{p/2} K_1 (A \sin y - C_1) \sin y \, dy \right) = \\ &= \frac{2K_2}{p} \left\{ A \left[\left(\frac{y}{2} - \frac{1}{4} \sin 2y \right) \Big|_0^{y_1} + \left(\frac{y}{2} - \frac{1}{4} \sin 2y \right) \Big|_p^{3p/2} \right] + C_2 \left(\cos y \Big|_0^{y_1} + \cos y \Big|_p^{3p/2} \right) \right\} + \\ &+ \frac{K_1}{p} \left[A \left(\frac{y}{2} - \frac{1}{4} \sin 2y \right) \Big|_{y_2}^{p/2} + C_1 \cos y \Big|_{y_2}^{p/2} \right] = \frac{K_1 + K_2}{2} A - \frac{K_1 A}{p} \left(\arcsin \frac{C_1}{A} + \frac{C_1}{A} \sqrt{1 - (C_1/A)^2} \right) + \\ &+ \frac{K_2 A}{p} \left(\arcsin \frac{C_2}{A} + \frac{C_2}{A} \sqrt{1 - (C_2/A)^2} \right) \end{aligned}$$

при $A \geq C_1$ і $A \geq |C_2|$.

Отримані вирази співпадають з (4), що і треба було довести. При умові $K = K_1 = K_2$, $C_1 = |C_2| = C$, вираз спрощується до вигляду:

$$\begin{aligned} A_1(A) &= \frac{K_1 + K_2}{p} A - \\ &- \frac{K_1 A}{p} \left(\arcsin \frac{C_1}{A} + \frac{C_1}{A} \sqrt{1 - (C_1/A)^2} \right) + \\ &+ \frac{K_2 A}{p} \left(\arcsin \frac{C_2}{A} + \frac{C_2}{A} \sqrt{1 - (C_1/A)^2} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

оскільки $\arcsin \frac{C_3}{A} = \arcsin 1 = \frac{p}{2}$.

Такий же результат отримуємо при виводі значення $A_1(A)$ для подібного нелінійного елемента із зоною нечутливості, що не має зони насичення. Вивід формули в цьому випадку спрощується, так як інтервали (y_3, y_4) і (y_7, y_8) вироджуються відповідно в точки $p/2$ і $3p/2$. В результаті маємо:

$$y_{\text{вих1}} = \begin{cases} K_1 (A \sin y - C_1) & \text{при } y \in (y_2, p/2); \\ 0 & \text{при } y \in (y_1, y_2); \\ K_2 (A \sin y - C_2) & \text{при } y \in (0, y_1) \cup (p, 3p/2). \end{cases} \quad (5)$$

Підставляючи (5) у вираз (1), отримаємо:

$$A_1(A) = KA - \frac{2KA}{p} \left(\arcsin \frac{C}{A} + \frac{C}{A} \sqrt{1 - (C/A)^2} \right). \quad (6)$$

Розкладемо функцію (4) в степеневий ряд при $|C_1/A| \leq 1$ і $|C_2/A| \leq 1$:

$$\begin{aligned} A_1(A) &= A \left\{ \frac{K_1 + K_2}{2} - \frac{K_1}{p} \left[\frac{C_1}{A} + \frac{1}{2 \cdot 3} \left(\frac{C_1}{A} \right)^3 + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4 \cdot 5} \left(\frac{C_1}{A} \right)^5 - \frac{1}{2} \left(\frac{C_1}{A} \right)^3 + \frac{C_1}{A} - \frac{1}{2 \cdot 4} \left(\frac{C_1}{A} \right)^5 - \dots \right] + \right. \\ &+ \left. \frac{K_2}{p} \left[\frac{C_2}{A} + \frac{1}{2 \cdot 3} \left(\frac{C_2}{A} \right)^3 + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4 \cdot 5} \left(\frac{C_2}{A} \right)^5 + \dots + \frac{C_2}{A} - \frac{1}{2} \left(\frac{C_2}{A} \right)^3 - \frac{1}{2 \cdot 4} \left(\frac{C_2}{A} \right)^5 - \dots \right] \right\} = \\ &= A \left\{ \frac{K_1 + K_2}{A} - \frac{K_1}{p} \left[\frac{2C_1}{A} - \frac{1}{3} \left(\frac{C_1}{A} \right)^3 - \frac{1}{20} \left(\frac{C_1}{A} \right)^5 - \dots \right] + \frac{K_2}{p} \left[\frac{2C_2}{A} - \frac{1}{3} \left(\frac{C_2}{A} \right)^3 - \frac{1}{20} \left(\frac{C_2}{A} \right)^5 - \dots \right] \right\}. \end{aligned}$$

Лінеаризуємо отримані вирази, для чого члени зі степенем вище одиниці відкинемо:

$$A_1(A) = A \left(\frac{K_1 + K_2}{2} - \frac{2K_1 C_1}{pA} + \frac{2K_1 C_2}{pA} \right). \quad (7)$$

Введемо наступні позначення (рис. 1)

$$\Delta C = \frac{C_1 - C_2}{2}, \quad K = \frac{K_1 + K_2}{2}, \quad \Delta K = K_1 - K_2,$$

$$C_0 = C_2 + \Delta C = C_1 - \Delta C.$$

З врахуванням нових позначень перепишемо вираз (7) у вигляді:

$$\begin{aligned}
A_1(A) &= A \left[K - \frac{2K_1(C_0 + \Delta C)}{pA} + \frac{2K_2(C_0 - \Delta C)}{pA} \right] = \\
&= KA - \frac{2C_0(K_1 - K_2)}{p} - \frac{2\Delta C(K_1 + K_2)}{p} = KA - \quad (8) \\
&\quad - \frac{2C_0\Delta K}{p} - \frac{4\Delta CK}{p} = K \left[A - \frac{2}{p} C \left(1 + \frac{C_0\Delta K}{C \cdot K} \right) \right].
\end{aligned}$$

Із виразу (8) витікає, що залежність амплітуди першої гармоніки вихідного сигналу і амплітуди вхідного гармонійного сигналу являє собою пряму, зміщену по осі абсцис вправо на величину $\frac{2C}{p} \left(1 + \frac{\Delta K C_0}{K C} \right)$. Для реальних систем зазвичай $\Delta K \ll K$ і $C_0 < C$, тому зміщення можна переписати рівним величині $\frac{2C}{p}$. Отриманий вираз дозволяє оцінити величину зони нечутливості C , побудувавши залежність

$$A_1(A) = K \left(A - \frac{2C}{p} \right) \quad (9)$$

за даними експериментів. Розраховані аналітично графіки залежності $A_1(A)$ для виразів (9) і (6) при співставленні з даними експерименту показують, що при $A \geq 2C$ значення амплітуд $A_1(A)$ і $A_1^*(A)$ першої гармоніки вихідного сигналу відрізняються на $\approx 0,1\%$, а графіки практично зливаються.

Для підвищення точності оцінювання зони нечутливості доцільно скористатися методом найменших квадратів для амплітуд перших гармонік вихідних сигналів рівних амплітудам

вхідних. Тоді оцінка величини зони нечутливості C має вигляд $C = \frac{p b_0}{2 b_1}$, де b_0, b_1 – коефіцієнти лінійної апроксимації експериментальних даних: $A_1^* = b_1 A_1 + b_0$, де A_1^* – виміряна амплітуда першої гармоніки вихідного сигналу; A_1 – виміряна амплітуда вхідного сигналу.

Висновки. Для синтезу алгоритмів ідентифікації нелінійностей отримано формули залежності першої гармоніки вихідного сигналу від їх параметрів. Можливість синтезу ілюструє алгоритм ідентифікації зони нечутливості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Калінов А.П. Апарат діагностики параметрів синхронних двигунів / А.П. Калінов, Д.Й. Родькін // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Вип. 2/2003(19). Т.1. С.159-166.
2. Сильвестров А.Н. Идентификация и оптимизация автоматических систем / А.Н. Сильвестров, П.И. Чинаев – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.
3. Черноуцкий Г.С. Следящие системы автоматических манипуляторов / Г.С. Черноуцкий, А.П. Собрин, В.С. Жабреев // Следящие системы автоматических манипуляторов. – М.: Наука, 1987. – 272 с.
4. Теория автоматического управления: в 2 ч. / Под ред. А.А. Воронова. – М.: Высш. школа, 1986. – Ч.1-2. – 655 с.

