

УДК 681.5.017+681.516.75

М. С. Юхимчук, асп.; С. М. Москвіна, канд. техн. наук., доц.

МЕТОД АНАЛІЗУ СТІЙКОСТІ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ З ЛОГІЧНИМИ УПРАВЛЯЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ ЗА ВПЛИВУ ПАРАМЕТРИЧНИХ ЗБУРЕНЬ

Запропоновано метод аналізу стійкості автоматичних систем з логічними управляючими пристроями за впливу параметричних збурень. Метод дозволяє визначити границі областей стійкості систем у просторі приросту їх параметрів. Математичним моделюванням знайдено допустимі області зміни параметрів нелінійних елементів, за яких зберігається стійкість системи управління, що розглядається.

Вступ та актуальність проблеми

Для подальшого розвитку промисловості в Україні важливою задачею є розробка автоматичних систем управління технологічними процесами, які забезпечують високу надійність управління складними неперервними, нелінійними, нестационарними об'єктами.

Зазвичай промислові неперервні, нестационарні, інерційні об'єкти управління, наприклад, такі як печі випалювання, промислові сушарки тощо, характеризуються нелінійністю, яка зумовлена наявністю одного або декількох релейних елементів в регуляторі для формування логічних законів управління. Це дає можливість суттєво покращити динамічні властивості систем і дозволяє забезпечити здатність системи до стеження та стабілізації технологічних процесів та. Зазвичай такі системи відносять [1, 5] до класу замкнутих автоматичних систем з логічним законом управління, узагальнена схема яких показана на рис. 1. Їх відмінністю є простота управління, настроювання, висока надійність, кращі динамічні властивості у порівнянні з неперервними системами, що пояснює їх широке застосування.

Для реалізації логічних законів управління технологічними процесами в замкнутих автоматичних системах широке застосування знаходять логічні пристрої різних типів [3]. Їх особливістю є можливість здійснювати перетворення вхідної інформації про відхилення регульованого параметра і про вихідні координати об'єкта управління і виконавчого механізму в управляючі команди у відповідності до заданого логічного алгоритму. Основними функціями логічних управляючих пристроїв є контроль за ходом технологічного процесу та станом обладнання, управління виконавчими механізмами в режимах пуску, змінення навантаження, включення регуляторів, розпізнавання аварійних ситуацій, сигналізація про них та їх запобігання.

Зазвичай логічний управляючий пристрій є складовою частиною регулятора, який містить один або декілька релейних елементів (рис. 1).

Особливістю таких систем є їх схильність до автоколивальних процесів. Причому для багатьох систем такого класу, автоколивальний режим є основним робочим режимом. Тому для дослідження їх поведінки використовують метод гармонічної лінеаризації, який дозволяє визначити умови існування та параметри можливих автоколивальних процесів, що відбуваються в системі, та дослідити умови стійкості.

Слід зазначити, що автоматичні системи управління технологічними процесами використовуються у реальних умовах, коли практично неможливо позбутися від таких неконтрольованих

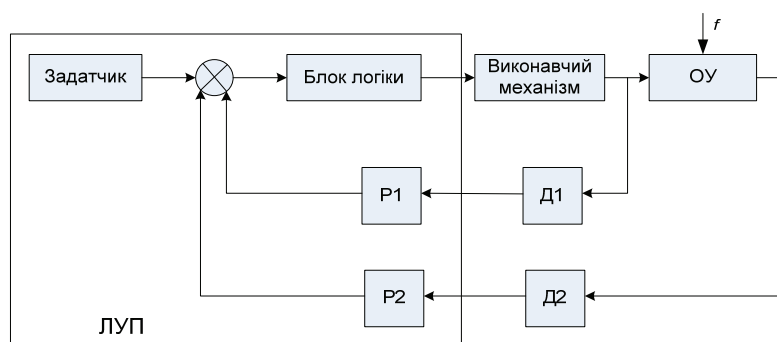


Рис. 1. Схема замкнутої автоматичної системи з логічним управляючим пристроєм

збурень як зміни температури, вологості, запиленості, вібрації, електромагнітні завади, за наявності яких дуже важко забезпечити незмінність параметрів систем. Зміни параметрів системи можуть призвести до того, що автоколивання в системі стають нестійкими, що може призвести до збою в системі, значущість якого набагато більша ніж у звичайних інформаційних системах, тому що управління в таких системах виконується постійно і в реальному часі.

Метою роботи є розробка методу аналізу стійкості автоматичних систем з логічними управляючими пристроями за впливу параметричних збурень, який дозволив би моделювати та досліджувати параметри автоколивань в автоматичних системах, що керується логічним управляючим пристроєм за зміни параметрів релейних датчиків.

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі задачі: розрахувати лінеаризоване рівняння системи, скласти нелінійне диференціальне рівняння, визначити функції чутливості, побудувати аналоги фазових траєкторій.

Методи аналізу стійкості нелінійних нестационарних систем

В сучасній літературі [1, 3–6] розглядається багато питань, що відносяться до нелінійних нестационарних систем, це особливості їх математичного опису, поведінки в статичі і динаміки, питання стійкості, аналіз особливих режимів таких систем за наявності стійких коливань та автоколивань. Їх дослідження допомагають глибше вивчити природу процесів перетворення сигналів в таких системах та визначити особливості синтезу релейних регуляторів для впливу на частоту автоколивань. Так, для аналізу окремих класів нелінійних систем використовують: асимптотичний метод Крилова і Боголюбова [1], частотні методи для аналізу якості нелінійних систем [5] і визначення амплітуди і фазочастотних характеристик для аналізу їх стійкості [4]. Але ці методи дозволяють аналізувати стійкість, на жаль, частково.

Одним із найпотужніших наближених методів аналізу автоколивань в нелінійних систем є метод гармонічної лінеаризації [6], який також використовується для дослідження автоматичних систем, що керуються логічними управляючими пристроями. Відмінність методу гармонічної лінеаризації для такого класу систем полягає у знаходженні коефіцієнтів гармонічної лінеаризації розкладанням вихідного сигналу у подвійний ряд Фур'є [10]. Така особливість зумовлюється тим, що на вхід логічного управляючого пристрою, зазвичай, надходить сума двох гармонічних сигналів $x(t)$, $y(t)$ з однаковими частотами. Коефіцієнти гармонічної лінеаризації визначаються за допомогою розкладення логічної функції, що описує логічний управляючий пристрій з релейним перетворенням сигналів у подвійний ряд Фур'є, на відміну від класичних методик, які використовують звичайний ряд Фур'є.

Для функції двох дійсних змінних $f(x, y)$, яка має період 2π як для змінної $x(t)$, так і для $y(t)$, яка інтегрується в області $Q = [-\pi, \pi; -\pi, \pi]$ подвійний ряд Фур'є в уявній формі записується у вигляді

$$f(x, y) \approx \sum_{n,m=0}^{\infty} [a_{nm} \cos nx \cos my + b_{nm} \cos nx \sin my + c_{nm} \sin nx \cos my + d_{nm} \sin nx \sin my], \quad (1)$$

де коефіцієнти:

$$a_{n,m} = \frac{1}{\pi^2} \iint_{|Q|} f(x, y) \cos nx \cos my \, dx dy, \quad (2)$$

$$b_{n,m} = \frac{1}{\pi^2} \iint_{|Q|} f(x, y) \cos nx \sin my \, dx dy, \quad (3)$$

$$c_{n,m} = \frac{1}{\pi^2} \iint_{|Q|} f(x, y) \sin nx \cos my \, dx dy, \quad (4)$$

$$d_{n,m} = \frac{1}{\pi^2} \iint_{|Q|} f(x, y) \sin nx \sin my \, dx dy. \quad (5)$$

Розклад логічної функції від двох змінних в ряд Фур'є дозволяє отримати лінеаризоване рівняння логічного управляючого пристрою з релейним перетворювачем сигналів, для формування алгоритму якого використовуються два сигнали з однаковою частотою. В подальшому можна визначити амплітуду та частоту автоколивань, знайти межі стійкості системи та визначити область існування автоколивань.

Однак, слід зауважити, що цей підхід не враховує параметричні збурення в системі. Для визначення їх впливу на параметри автоколивань необхідно використовувати або відомі наближенні методи або проводити багаторазове моделювання за різних значень параметрів системи, що або суттєво ускладнює модель опису поведінки системи, або потребує великих затрат часу.

В роботах [11, 12, 13] запропоновано представляти параметричні збурення релейної ланки з гістерезисом B та ширини зони нечутливості C у вигляді лінійних законів:

$$B(t) = b_0 \pm bt, b \ll b_0; \quad (8)$$

$$C(t) = c_0 \pm ct, c < c_0. \quad (9)$$

Таке представлення зумовлено тим, що релейні елементи систем, що розглядаються, реалізуються за допомогою електронних схем, параметри яких змінюються під впливом зовнішніх неконтрольованих параметричних збурень. Ці зміни неминуче призводять до змін величини зони нечутливості C і вихідного сигналу релейного елемента структурної схеми системи, та можуть призвести до нестійкості таких систем.

Використовуючи (8), (9), в роботах [15, 17] отримані аналітичні залежності коефіцієнтів гармонічної лінеаризації для замкнутих систем управління з логічними управляючими пристроями з урахуванням параметричних збурень. В роботі [17] отримані аналітичні залежності параметрів автоколивань з урахуванням параметричних збурень, які дозволяють проаналізувати стійкість систем, що розглядаються в роботі. Але аналіз стійкості систем до параметричних збурень класичними методами приводить до дуже складних моделей, які для отримання результатів моделювання необхідно суттєво спростувати, тобто зменшувати точність результатів досліджень.

Розглянемо особливості запропонованого авторами статті методу аналізу стійкості систем з логічними управляючими пристроями за впливу параметричних збурень, який дозволяє отримати високу точність результатів дослідження.

Метод аналізу стійкості автоматичних систем з логічними управляючими пристроями за впливу параметричних збурень на основі функцій чутливості

Одним з напрямків спрощення математичних моделей поведінки систем та отримання точніших результатів моделювання є запропонований в роботах С. В. Юхимчука [7] підхід, який на основі узагальненого методу описувальних функцій, [8] дозволяє визначити границі областей стійкості систем у просторі приросту їх параметрів. Знання цих границь областей дає можливість визначити області зміни первинних параметрів систем, у яких зберігаються властивості їх стійкості.

Авторами цей підхід був розширений для аналізу стійкості класу нелінійних систем з двохходовими логічними управляючими пристроями у просторі приросту їх параметрів. В цьому випадку алгоритм аналізу стійкості автоматичних систем з логічними управляючими пристроями включає такі етапи:

- побудова нелінійного диференціального рівняння, яке описує динаміку роботи досліджуваної системи;
- визначення функції чутливості;
- перетворення диференціального рівняння, яке описує динаміку досліджуваної системи, відносно зміни приростів параметрів системи;
- розв'язання отриманої системи диференціальних рівнянь в просторі параметрів системи;
- дослідження та аналіз залежності чутливості досліджуваної системи від параметричних збурень за допомогою функцій чутливості;
- побудова аналогів фазових траєкторій та аналіз умов стійкості системи;

- дослідження меж стійкості системи в просторі параметрів;
- побудова області стійкості системи в просторі параметрів.

Розглянемо алгоритм дослідження та аналізу стійкості автоматичних систем з логічними управляючими пристроями за впливу параметричних збурень на основі функцій чутливості у просторі приростів параметрів на прикладі системи управління температурними режимами печі випалювання цегли, структурну схему якої можна подати як структурну схему замкнутої системи з двохходовим логічним управляючим пристроєм (рис. 1). На вхід логічного управляючого пристрою з релейних датчиків, статична характеристика яких показана на рис. 2, надходять дві координати u_x та u_y , кожна з яких може набувати додатного, від'ємного та нульового значення.

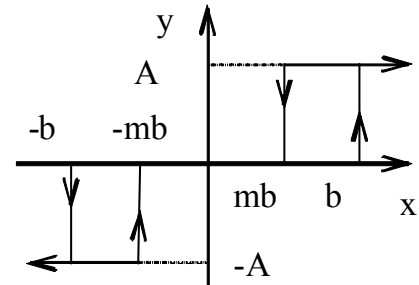


Рис. 2. Статична характеристика нелінійного елемента

Алгоритм логічного управляючого пристрою заданий логічною функцією $U = F(u_x, u_y)$.

Всі дослідження будемо проводити в просторі приростів параметрів двох релейних елементів b_x, A_x, b_y, A_y . Як зазначалося в [15], простір приростів параметрів являє собою простір, по координатних осях якого відкладаються відповідні функції чутливості до зміни первинних параметрів систем і самі значення цих параметрів. Побудова такого простору, в основному, зводиться до алгоритмів знаходження відповідних функцій чутливості.

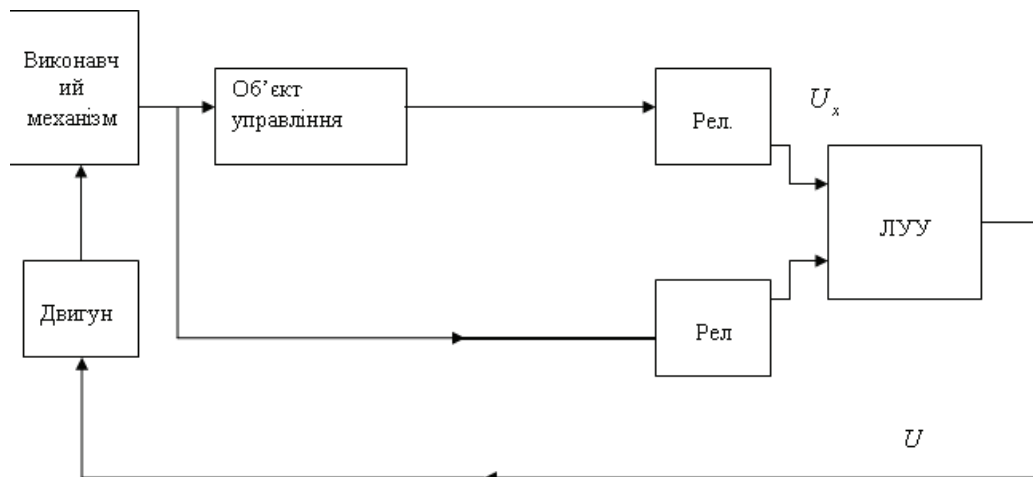


Рис. 3 Схема замкнутої автоматичної системи з логічним управляючим пристроєм після перетворення

Для отримання диференціального рівняння, що зв'язує вхідний сигнал x , та вихідний y , перетворимо структурну схему системи управління температурними режимами печі випалювання цегли (рис. 1) до вигляду, показаному на рис. 3, та скористаємось методом зрівнювальних операторів, в результаті отримаємо нелінійне нестационарне диференціальне рівняння п'ятого порядку відносно вихідного сигналу:

$$\begin{aligned}
 N_5 \frac{d^5 x(t)}{dt^5} + N_4 \frac{d^4 x(t)}{dt^4} + N_3 \frac{d^3 x(t)}{dt^3} + N_2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} - \frac{dx(t)}{dt} + Ka_1(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y) \frac{dx(t)}{dt} + \\
 + a_2(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y) x(t) = a_1(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y) \frac{dy(t)}{dt} + \\
 + a_2(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y) y(t).
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

де $N_5 = T_0 T_1 T_2 T_3$; $N_4 = T_0 T_1 (T_2 + T_3) + (T_0 - T_1) T_2 T_3$; $N_3 = T_0 T_1 + (T_0 - T_1) (T_2 + T_3)$; $K = K_0 K_1 K_2 K_3$; $N_2 = (T_0 - T_1) - (T_1 + T_3)$.

Для релейних елементів з заданою статичною характеристикою (рис. 2) будемо використовувати функції, отримані в [14] методом гармонічної лінеаризації

$$a_1(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y) = \left(\frac{2KU_2}{\pi A_y^2 \omega} - \frac{2b_x U_2 \cos \phi}{\pi A_y^2 M \omega} + \sqrt{1 - \frac{b_x^2}{A_y^2 M^2} \frac{\sin \phi}{\omega}} - 1 \right) \frac{dx(t)}{dt}; \quad (11)$$

$$a_2(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y) = \frac{4K(U_1 - U_2)}{\pi A_y} \sqrt{1 - \frac{b_y^2}{A_y^2}} + \frac{2U_2}{\pi A_y} \left(\frac{b_x}{A_y M} \sin \phi + \sqrt{1 - \frac{b_x^2}{A_y^2 M^2}} \cos \phi \right) x(t), \quad (12)$$

де

$$M = \frac{K_1 \omega}{K_2 K_3} \sqrt{\frac{\omega^2 (T_2 - K_1 T_3)^2 + (1 + \omega^2 T_2 T_3^2)}{1 + \omega^2 T_1^2}}; \quad (13)$$

$$\phi = \arctg \frac{-\omega^3 T_2 T_3 - \omega}{-\omega^2 (T_2 - K_1 T_3)} - \arctg \omega T_1. \quad (14)$$

Як зазначалося в [16], щоб оцінити вплив зміни параметрів нелінійних елементів на вихідний сигнал цієї системи перейдемо від опису (10) до опису динаміки системи у просторі приростів параметрів. Для цього запишемо рівняння динаміки відносно функції чутливості вихідного сигналу системи до зміни вихідних сигналів першого релейного елемента:

$$\begin{aligned} & N_5 \frac{d^5 \left(\frac{\partial x}{\partial b} \right)}{dt^5} + N_4 \frac{d^4 \left(\frac{\partial x}{\partial b} \right)}{dt^4} + N_3 \frac{d^3 \left(\frac{\partial x}{\partial b} \right)}{dt^3} + N_2 \frac{d^2 \left(\frac{\partial x}{\partial b} \right)}{dt^2} + \frac{d \left(\frac{\partial x}{\partial b} \right)}{dt} + \\ & + K \frac{\partial a_1(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial b_x} \frac{d \left(\frac{\partial x}{\partial b} \right)}{dt} + \frac{\partial a_2(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial b_y} \left(\frac{\partial x}{\partial b} \right) = \\ & = \frac{\partial a_1(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial b_x} \frac{dy(t)}{dt} + \frac{\partial a_2(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial b_y} y(t) \end{aligned} \quad (15)$$

Якщо внести позначення функції чутливості вихідного сигналу U_{xb} до зміни зони нечутливості b_x першого релейного (нелінійного) елемента як $U_{xb} = \left(\frac{\partial x}{\partial b_x} \right)$, то отримаємо опис поведінки системи, що розглядається, у просторі приростів параметрів першого релейного елемента зі статичною характеристикою, показаною на рис. 2, вигляду:

$$\begin{aligned} & N_5 \frac{d^5 U_{xb}}{dt^5} + N_4 \frac{d^4 U_{xb}}{dt^4} + N_3 \frac{d^3 U_{xb}}{dt^3} + N_2 \frac{d^2 U_{xb}}{dt^2} + \frac{d U_{xb}}{dt} + \frac{\partial a_1(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial b_x} \frac{d U_{xb}}{dt} + \\ & + \frac{\partial a_2(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial b_y} U_{xb} = \frac{\partial a_1(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial b_x} \frac{dy(t)}{dt} + \frac{\partial a_2(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial b_y} y(t). \end{aligned} \quad (16)$$

Якщо внести позначення функції чутливості вихідного сигналу U_{xc} до зміни параметра A_x першого релейного елемента як $U_{xc} = \left(\frac{\partial x}{\partial c} \right)$, то вираз (15) буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} & N_5 \frac{d^5 U_{xc}}{dt^5} + N_4 \frac{d^4 U_{xc}}{dt^4} + N_3 \frac{d^3 U_{xc}}{dt^3} + N_2 \frac{d^2 U_{xc}}{dt^2} + \frac{d U_{xc}}{dt} + \frac{\partial a_1(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial c_x} \frac{d U_{xc}}{dt} + \\ & + \frac{\partial a_2(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial c_y} U_{xc} = \frac{\partial a_1(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial c_x} \frac{dy(t)}{dt} + \frac{\partial a_2(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial c_y} y(t). \end{aligned} \quad (17)$$

Аналогічно (15) неважко отримати рівняння опису поведінки системи, що розглядається, у просторі приростів параметрів другого нелінійного елемента b_y , A_y зі статичною характеристикою, представленою на рис. 2.

Визначимо вирази для частинних похідних функції, що описує, першого релейного елемента, які входять в (15), (16). В результаті отримуємо вираз

$$\frac{\partial a_1(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial b_x} = \left(\frac{-2U_2 \cos \phi}{\pi A_y^2 M \omega} \right) + \frac{\sin \phi b_x}{A_y M \omega \sqrt{A_y^2 M^2 - b_x^2}}, \quad (18)$$

а для другого релейного елемента отримуємо вираз частинної похідної функції, що описує, вигляду

$$\frac{\partial a_2(\omega, t, A_y, U_1, U_2, b_x, b_y)}{\partial b_y} = \frac{-4K(U_1 - U_2)b_y}{\pi A_y^2 \sqrt{A_y^2 - b_y^2}}. \quad (19)$$

Спільне розв'язання рівнянь (15), (16) з урахуванням (18), (19) числовими методами в середовищі MathCad дозволяє отримати залежності зміни вихідного сигналу і відповідних функцій чутливості у просторі приростів параметрів двох нелінійних елементів зі статичною характеристикою, показаною на рис. 2.

Аналіз результатів дослідження

Розв'язок системи (15), (16) з урахуванням (18), (19) відносно b_x , A_x , b_y , A_y отримано за таких наборів первинних параметрів: $\omega = 0,01$; $A_y = 0,1 \cdot 10^{-2} \div 3,2 \cdot 10^{-6}$; $U_1 = U_2 = 1$; $b_y = 0,8 \cdot 10^{-6} \div 2,7 \cdot 10^{-1}$; $b_x = 0,8 \cdot 10^{-4} \div 2,1$.

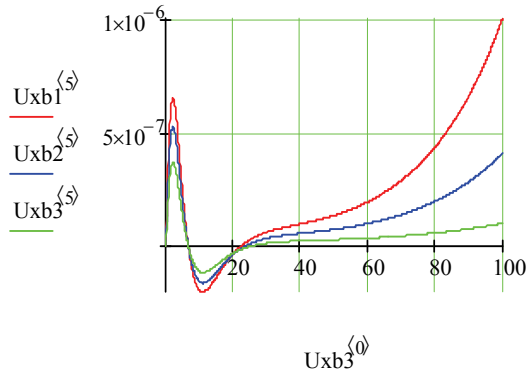


Рис. 4. Графіки зміни функції чутливості вихідного сигналу системи, що розглядається, до зміни зони нечутливості b_x першого нелінійного елемента

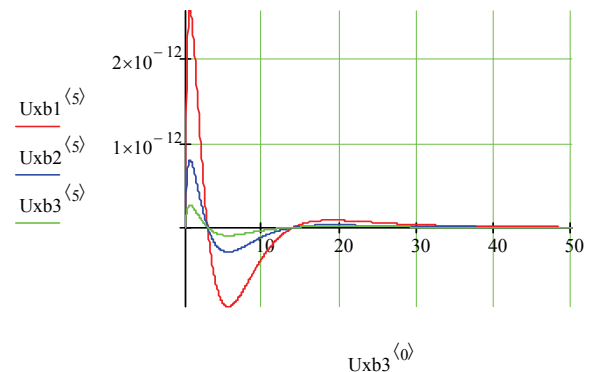


Рис. 5. Графіки зміни функції чутливості вихідного сигналу системи, що розглядається, до зміни параметра b_x першого нелінійного елемента

Результати дослідження показали, що відповідні зміни параметрів нелінійних елементів b_x , A_x , b_y , A_y в системі, що розглядається в роботі, не виводять систему із стійкого стану, коли b_y змінюється в межах $0,1 \div 4,2$, A_y в межах $0 \div 600$, $\omega = 0,002 \div 0,1$. Якщо $b_x < 0,1$ та $A_y > 600$ система стає нестійкою

Підкреслимо, що використання нового простору опису поведінки класу систем, що розглядається, дозволяє ввести в розгляд аналогії фазових траєкторій, які задаються залежністю $U_{xb1}^{(5)}$, $U_{xb1}^{(4)}$, показаною на рис. 8, 9. Такі аналогії дозволяють використовувати розроблений метод аналізу нелінійних стаціонарних систем для розв'язку задач стійкості нелінійних нестаціонарних систем.

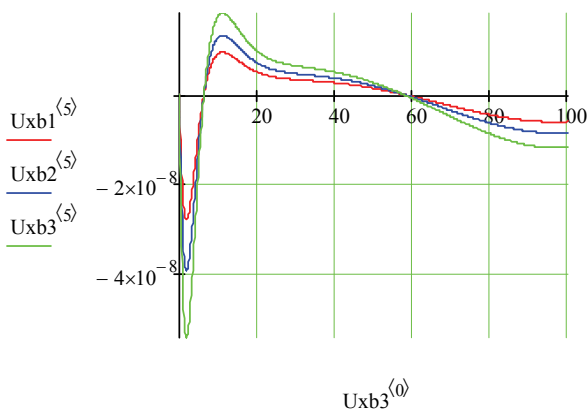


Рис. 6. Графіки зміни функції чутливості вихідного сигналу системи, що розглядається, до зміни зони нечутливості b_x другого нелінійного елемента

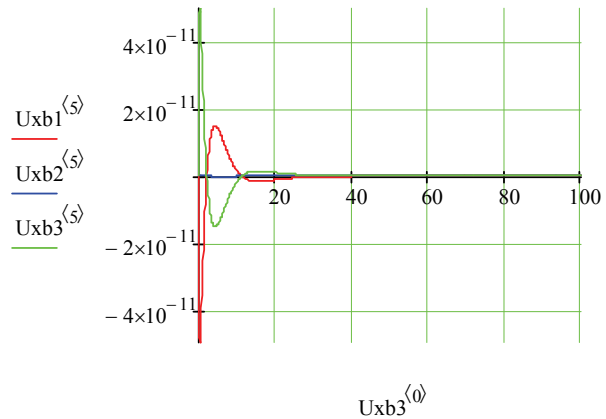


Рис. 7. Графіки зміни функції чутливості вихідного сигналу системи, що розглядається, до зміни зони нечутливості b_y другого нелінійного елемента

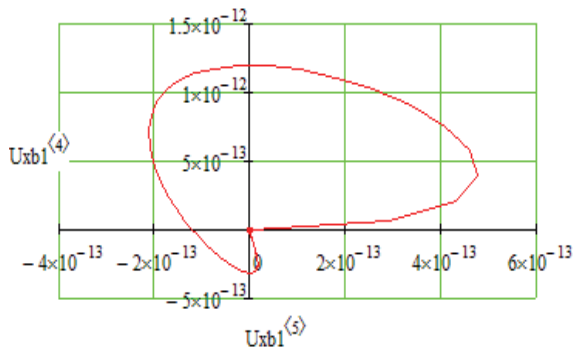


Рис. 8. Графік аналога фазової траєкторії вихідного сигналу системи, що розглядається, коли $b_y = 0,1$

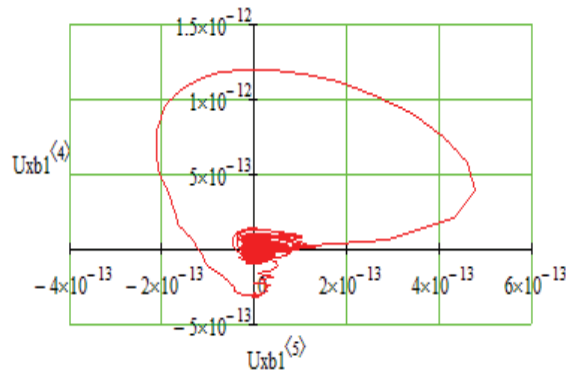


Рис. 9. Графік аналога фазової траєкторії вихідного сигналу системи, що розглядається, коли $b_x = 0,1 \cdot 10^{-2}$

Отримані аналоги фазових траєкторій для таких наборів початкових даних показали, що система, яка розглядається, стійка за визначених за допомогою запропонованого методу аналізу стійкості діапазонів первинних параметрів системи з урахуванням їх неконтрольованих змін. Однак, якщо взяти $b_0 = 15$, то аналоги фазових поверхонь, як впливає з наведених результатів [рис. 8, 9], свідчать про нестійкість таких систем. Отже, існує така область зміни первинних параметрів, коли системи, що розглядаються, стійкі.

Таким чином, запропонована методика описання нелінійних систем за допомогою апарату теорії чутливості дозволяє перейти від нелінійних нестационарних диференціальних рівнянь, що описують поведінку систем у просторі зміни стану, до лінійних нестационарних диференціальних рівнянь, які описують зміну первинних параметрів системи. Як показано вище, це полегшує моделювання поведінки такого класу систем.

Висновки

1. За допомогою методології моделювання поведінки нелінійних нестационарних систем, запропонованої в роботах С. В. Юхимчука [7–14] розроблений метод аналізу стійкості автоматичних систем з логічними управляючими пристроями, який дозволяє визначити границі областей стійкості систем у просторі приросту їх параметрів.

2. Шляхом математичного моделювання знайдено допустимі області зміни параметрів нелінійних елементів за яких зберігається стійкість системи управління, що розглядається.

Результати досліджень показали можливість аналітичного дослідження впливу параметричних збурень на параметри автоколивальних і стійкість системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ципкин Я. З. Релейные автоматические системы // Я. З. Ципкин. — М. : Наука 1974. — 576 с.
2. Андронов А. А. Теория колебаний // А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин. — М. : Наука, 1981. — 568 с.
3. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы : учеб. пос. / Д. П. Ким. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 464 с. — ISBN 5-9221-0534-5.
4. Фалдин, Н. В. Релейные системы автоматического управления / Р. В. Фалдин // Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления ; под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. — М. : МГТУ им. Баумана, 2004. — С. 573—636.
5. Попов Е. П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления / Е. П. Попов. — М. : Наука, 1979. — 255 с.
6. Топчиева Ю. И. Методы гармонической линеаризации в проектировании нелинейных систем автоматического управления / Ю. И. Топчиева. — М. : Машиностроение. — 1970. — 567 с.
7. Мокін Б. І. Математичні моделі робастної стійкості та чутливості нелінійних систем // Б. І. Мокін, С. В. Юхимчук. — Вінниця : Універсум-Вінниця, 1999. — 122 с.
9. Yukhimchuk S. Modeling of influence of interferences on parameters of auto-oscillations and stability of non-linear non-stationary systems // S. Yukhimchuk, M. Khazin // Development and Application Systems, — 2002. — P. 255—260.
9. Porter R. Robust rotation-invariant texture classification: Wavelet, Gabor filter and GMRF based schemes / Porter R., Canagarajah N. // Proc. Inst. Elect. Eng. — 2003. — V. 15. — P. 180—188.
10. Gaylord R. C. Attitude Control System Using logically Controlled Pulses. Progr. Astronaut and Rocketry/ Gaylord R. C., Keller W. N. v. 8, New York-London. Acad. Press, 1992. — P. 629—643.
11. Acker A. Stability criteria for time-varying systems in Hilberts space/ Acker A. // SIAM.J.Control. — 1995. — Vol. 13, № 3. — P. 1156—1171.
12. Юхимчук С. В. Визначення меж зміни первинних параметрів одного класу нелінійних нестационарних систем, які забезпечують їх стійкість / С. В. Юхимчук, М. Б. Хазін // Вестник ХГТУ. — 2004. — №1(19). — С. 371—377.
13. Юхимчук С. В. Розробка алгоритму для розв'язку задачі аналізу поведінки нелінійних нестационарних систем з релейними елементами, що самоналаштовуються / С. В. Юхимчук, Р. Р. Гільманов, М. Б. Хазін // Автоматика-2004 : праці міжнар. конфер. — Київ. — 112 с.
14. Юхимчук С. В. Підхід до визначення параметрів автоколивальних нелінійних нестационарних систем управління рухом літальних апаратів // С. В. Юхимчук // Автоматика-2004 : праці міжнар. конфер. — Т. 5. — Львів : Державний НДІ інформаційної інфраструктури, 2000. — С. 105—109.
15. Юхимчук М. С. Метод аналізу стійкості САУ з логічними управляючими пристроями в системах пожежогашінням в залізничному транспорті // М. С. Юхимчук, С. М. Москвіна. — АКІТ-2012 : конфер. — Київ, 19—20 квітня 2012 р.
16. Юхимчук С. В. Исследование влияния изменения параметров релейного звена на выходной сигнал в информационно-измерительных системах // С. В. Юхимчук, Б. І. Мокін // Электронная техника. Сер. 10. Микроэлектронные устройства. — 1993. — Вып. 3, 4 (97, 98). — С. 31—33.
17. Юхимчук-Войтко М. С. Гармонічна лінеаризація САУ, що керується кінцевим автоматом під час дії параметричних збурень [Електронний ресурс] // М. С. Юхимчук-Войтко // Наукові праці ВНТУ. — 2009. — № 3. — Режим доступу : http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2009-3/2009-3.files/uk/09msyopp_ua.pdf, вільний. — Загол. з екрана. — Мова укр.

Рекомендована кафедрою комп'ютерних систем управління

Стаття надійшла до редакції 13.07.12
Рекомендована до друку 27.08.12

Юхимчук Марія Сергіївна — аспірантка, **Москвіна Світлана Михайлівна** — доцент.

Кафедра комп'ютерних систем управління, Вінницький національний технічний університет, Вінниця