

О. Г. НІКОЛАЄВА, Н. В. МЕЛЬНИКОВА
Харківський національний університет будівництва та архітектури
В. І. ВЕРБИЦЬКИЙ
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

АЛГЕБРАЇЧНІ КРИТЕРІЇ В ДОСЛІДЖЕННІ СТІЙКОСТІ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ

Стаття присвячена обчислювальним аспектам визначення стійкості логістичних систем підприємств на основі використання застосування апарату теорії автоматичного управління (ТАУ) з використанням критеріїв Ляпунова-Шипара, Кларка, Джурі. Дається порівняльна оцінка частотних та алгебраїчних критеріїв стійкості. Наводяться приклади використання алгебраїчних критеріїв під час обчислення стійкості логістичних систем підприємств з урахуванням прямих і зворотних матеріальних потоків.

Ключові слова: пряма і зворотна логістична система, організаційно-економічна стійкість, критерій Гурвіца, критерій Ляпунова-Шипара.

O. G. NIKOLAYEVA, N. V. MELNIKOVA
Kharkiv National University of Construction and Architecture
V. I. VERBITSKIY
Kharkiv National Automobile and Highway University

ALGEBRAIC CRITERIONS IN EXPLORING STABILITY OF LOGISTICS SYSTEMS

The article is devoted to computational aspects of the definition of sustainability logistics systems through the use of enterprise application system theory of automatic control (TAC) using criteria Lienard-Chipart, Clark, Jury. We give a comparative evaluation of frequency and algebraic stability criteria. Examples of use algebraic criteria when calculating stability logistics systems companies considering direct and inverse material flows.

Keywords: direct and reverse logistics system, organizational and economic stability, Hurvits-criterion, Lienard-Chipart-criterion.

Постановка проблеми

Для досягнення конкурентних переваг під час діяльності в агресивному ринковому середовищі сучасні підприємства повинні використовувати ефективні методи управління господарською діяльністю, серед яких одне з найпомітніших міст займає логістичний підхід. Він передбачає створення на підприємствах логістичних систем, тобто інтегрованих управлінських комплексів, що реалізують цілі бізнесу від постачальника до кінцевого споживача. Такі підприємства є складними системами, цільовим призначенням яких є забезпечення їх стійкого розвитку шляхом застосування спеціальних сучасних методів аналізу діяльності підприємств, пов'язаних з дослідженням стійкості логістичних систем. Дана робота присвячена питанням використання алгебраїчних критеріїв для визначення стійкого чи нестійкого стану прямої та зворотної логістичних систем підприємства в межах використання апарату теорії автоматичного управління.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Під організаційно-економічною стійкістю промислового підприємства розуміється здатність підприємства зберігати фінансову стабільність при постійній зміні ринкової кон'юнктури шляхом удосконалення і розвитку його виробничо-технологічної і організаційної структури методами логістико-орієнтованого управління [1]. Дослідженню організаційно-економічної стійкості виробничих та логістичних систем приділяли увагу такі вітчизняні та російські вчені, як Т.С. Клебанова, М.О. Кизим, Ю.Г. Лисенко, В.Л. Иванов, А.О. Колобов, В.Ф. Гамалій, І.В. Ніколаєв, Т.Є. Мельник, А.В. Усов, А.В. Чалков та інші.

Деякі дослідники С. Рубанов, А. Воронов, Е.А. Стоянов і Е.С. Стоянов, М.Д. Пергамент, А.А. Зотов, М.О. Кизим, Г.В. Савицька, М.С. Заюкова [2–5] пропонують проводити оцінку фінансово-економічної стійкості в розрізі ряду показників, що відображають тенденції в фінансово-економічній діяльності підприємства. Недоліком цих моделей є те, що перелік показників в основному складається з фінансових показників підприємств. Ряд вчених: А.О. Колобов, Ю.Г. Лисенко, В.Ф. Гамалій, І.В. Ніколаєв, О.Г. Ніколаєва та Н.В. Барішева [6, 7], – пропонують проводити оцінку ОЕС підприємства на основі використання теорії автоматичного управління в економічних системах. Це відкриває широкі можливості формалізованого опису систем підприємств та застосування до них критеріїв стійкості.

Постановка цілей

Метою роботи є розгляд алгебраїчних критеріїв стійкості, які застосовуються під час розв'язання завдань стійкості складних систем управління в теорії автоматизованого управління (ТАУ). Формулюються умови застосування цих критеріїв для обчислення границь стійкості.

Виклад основного матеріалу

Найважливішою умовою прийняття обґрунтованих і своєчасних рішень, що направлені на

забезпечення стійкості підприємств, являється оцінка їх стійкості більш сучасними, новими, адаптованими до ринкових умов методами.

Одним із таких методів є підхід, запропонований Колобовим А.О., який передбачає застосування апарату теорії автоматичного управління (ТАУ) до оцінки організаційно-економічної стійкості логістичних систем підприємств [1].

В межах логістичного підходу, застосованого для прямих логістичних систем і розглянутого в працях А.О. Колобова, В.Ф. Гамалія, Ю.Г.Лисенка функціонування підприємства повинно здійснюватися в замкненій виробничо-збутовій системі (ВЗС), яка складається із самого підприємства, складів сировини, обладнання і готової продукції з урахуванням транспортних блоків. Як правило, при застосуванні традиційного логістичного підходу розглядається рух матеріальних, енергетичних та інформаційних потоків від виробника до споживача. Такі логістичні системи отримали назву прямих (ПЛС). Розрахунок стійкості подібних систем проводився в роботах В.Ф. Гамалія, І.В. Ніколаєва, О.Г. Ніколаєвої, Н.В. Баришевої.

Досить перспективним і мало розробленим напрямом досліджень є аналіз логістичних процесів, пов'язаних з повторним використанням товарів чи ресурсів. Така діяльність отримала назву реверсивної (зворотної) логістики, оскільки в логістичних системах з блоками переробки чи утилізації відходів та вторинної сировини існують зворотні матеріальні потоки, спрямовані від споживача до виробника. Логістичні системи зі зворотними потоками (зворотні логістичні системи – ЗЛС) розглядаються в роботах Н.В. Баришевої, О.Г. Ніколаєвої, де загальноживана структура логістичної системи доповнюється схемою матеріальних і нематеріальних зворотних потоків. Запропонована зворотна логістична система поєднує в собі споживачів, склад вторинної сировини (промислових відходів) і блок виробництва (рис. 1).

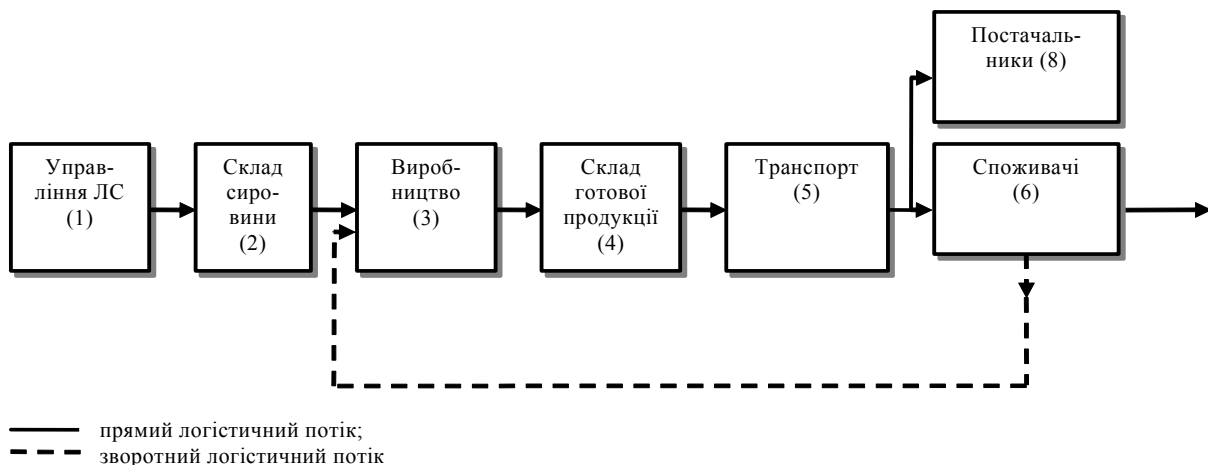


Рис. 1. Зворотна логістична система промислового підприємства (ЗЛС)

З метою ефективного функціонування промислового підприємства у взаємодії із суб'єктами зовнішнього середовища побудовано ЛС для кожної сукупності учасників постачальницько-виробничо-збутового процесу. На базі апарату теорії автоматичного управління (ТАУ) представлено запропоновану ЛС у вигляді схеми організаційно-функціональної структури, яка зображена на рис. 2.

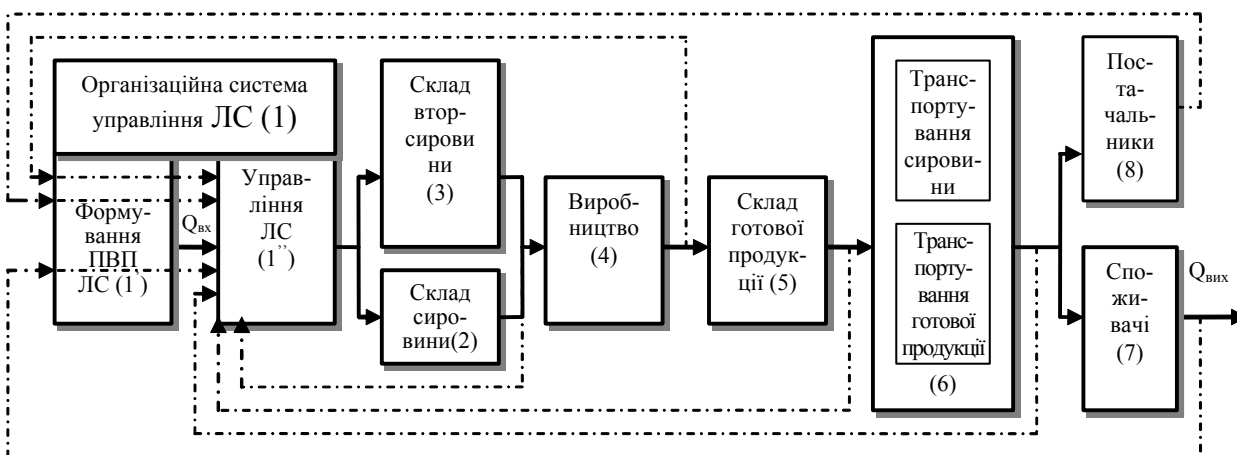


Рис. 2. Схема організаційно-функціональної структури логістичної системи з урахуванням зворотних матеріальних потоків

Наведена ЛС представляє собою складну кібернетичну систему, що керується менеджерами (блок

1) за допомогою системи зворотних зв'язків, за якими поступає оперативна інформація. Така система складається із підприємства (блок 4), складу для нової сировини (блок 2), складу вторинної сировини, відходів (блок 3) і складу готової продукції (блок 5). Готова продукція транспортується до споживачів (блок 7), а також і від постачальників транспортується сировина (блок 8) відповідним видом зовнішнього транспорту (блок 6). Зворотні матеріальні потоки представлені на рис. 3 у вигляді блоку під номером (3), оскільки підприємство виробляє готову продукцію, як і з нової сировини, так і з вторинної сировини. Входом у наведеній системі $\theta_{\text{вх}}$ є прогностичний виробничий план (ПВП), який керується блоком 1. Виходом цієї системи $\theta_{\text{вих}}$ є готова продукція в сфері збуту.

Розглянемо концептуальну схему дослідження стійкості в прямих і зворотних логістичних системах з використанням апарату теорії автоматизованого управління.

1. З використанням ТАУ [9] поелементно представляють запропоновану схему ЛС у вигляді ланцюгу динамічних ланок, з'єднаних між собою. В результаті отримують структурну модель для ЛС з урахуванням зворотних потоків, яка подана на рис. 3.

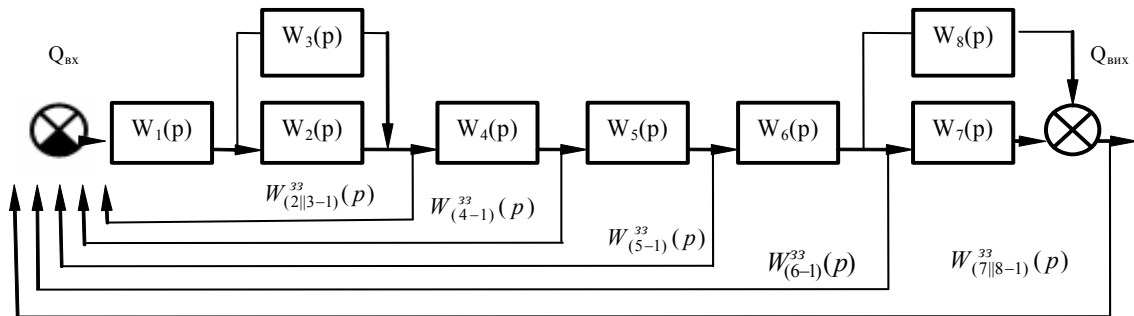


Рис. 3. Структурна модель логістичної системи з урахуванням зворотних матеріальних потоків:

$\theta_{\text{вх}}(p)$ – вхід системи, ПВП; $W_1(p), W_2(p), \dots, W_n(p)$ – передаточні функції блоків наведеної логістичної системи; $W_{(2|3-1)}^{33}(p), W_{(4-1)}^{33}(p), \dots, W_{(n-1)}^{33}(p)$ – передаточні функції ланцюгів зворотного зв'язку; $\theta_{\text{вих}}(p)$ – вихід системи, виконання плану

Кожна динамічна ланка структурної моделі описується диференціальним рівнянням. На основі відомого типу диференціального рівняння можна знайти передаточні функції кожної ланки запропонованої логістичної системи. В ТАУ застосовуються такі основні типи динамічних ланок: аперіодична, реальна диференціальна, запізнювальна, підсилювальна, інтегруюча, коливальна, тощо.

2. З метою дослідження стійкості ЛС з урахуванням зворотних потоків утворюють узагальнену передаточну функцію даної ЛС на підставі проведеного згоргання структурної моделі даної ЛС, яка має вид:

$$W_{1-8}(p) = \frac{\theta_{\text{вих}}(p)}{\theta_{\text{вх}}(p)} = \frac{Ap^4 + Bp^3 + Cp^2}{(a_7p^7 + \dots + a_2p^2 + a_1p + a_0)e^{p\tau} + b_5p^5 + b_4p^4 + b_3p^3 + b_2p^2}, \quad (1)$$

де $W_{1-8}(p)$ – узагальнена передаточна функція ЛС з урахуванням зворотних потоків; $\theta_{\text{вих}}(p)$ – вихід (готова продукція); $\theta_{\text{вх}}(p)$ – вхід (ПВП); $A, B, C, a_7, a_6, \dots, a_0, b_5, b_4, b_3, b_2$ – коефіцієнти узагальненої передаточної функції; p – комплексний оператор Лапласа; τ – час перевезення вантажу.

3. На основі апарату теорії автоматичного управління будують імітаційну модель для оцінки стійкості ЛС. В основу імітаційної моделі даної ЛС покладена узагальнена передаточна функція (1).

4. Дослідження стійкості логістичної системи на базі імітаційної моделі з використанням алгебраїчних або частотних критеріїв.

До алгебраїчних критеріїв дослідження стійкості відносяться критерії Рауса, Гурвіца, Лъенара-Шипара. Подібними до цих критеріїв є критерії Джурі і Кларка, які дають змогу визначити наявність коренів характеристичного полінома в одиничному колі. Алгебраїчні критерії добре відомі з кінця XIX століття, прості в застосуванні, але мають той недолік виникнення точності під час опрацювання поліномів з високими степенями.

В групу частотних частотних критеріїв входять критерії Найквіста та Михайлова. У критерії Михайлова в якості визначаючої використовується крива, яку описує кінець вектору:

$$F(j\omega) = a_6(j\omega)^6 + a_5(j\omega)^5 + a_4(j\omega)^4 + a_3(j\omega)^3 + a_2(j\omega)^2 + a_1j\omega + a_0$$

при зміні ω від $-\infty$ до $+\infty$.

Критерій стійкості Михайлова формулюється наступним чином: для того щоб лінійна система автоматичного регулювання, що має характеристичне рівняння n -го порядку, була стійкою, необхідно і достатньо, щоб при зміні ω від 0 до ∞ повна зміна аргументу вектору $F(j\omega)$ дорівнювала $n \frac{\pi}{2}$, де n –

ступінь характеристичного рівняння [9]. Даний критерій було використано І.В.Ніколаєвим для визначення стійкості прогностичного плану тваринницького комплексу [6]. І.В.Ніколаєв відмічає, що «графоаналітичний критерій стійкості Михайлова дає значно більше інформації про стійкість прогностичного виробничого плану. Крім того, він дозволяє встановлювати вплив кожної ланки системи на стійкість процесу в ній, а це видається дуже важливим, зважаючи на кількість ланок ВЗС. У той же час, якщо ставиться задача тільки встановити факт стійкості або нестійкості плану, то найкраще підійде алгебраїчний критерій Гурвіца».

Графоаналітичний критерій Найквіста використовує годограф допоміжної функції $W1(j\omega)=1+W(j\omega)$, де W має вигляд (1). Для стійкості замкненої системи годограф вектора допоміжної функції не повинен охоплювати початок координат. Недоліком цього методу є те, що його не можна застосовувати для розімкнених систем.

5. На останньому етапі концептуальної схеми відбувається оцінка стійкості промислового логістичної системи за рядом інших методик для підтвердження правильності результатів імітаційної моделі

Розглянемо особливості застосування алгебраїчних критеріїв Рауса, Гурвіца та Льєнара-Шипара для оцінки стійкості ЛС. Ці алгебраїчні критерії дозволяють швидко визначити факт стійкості або нестійкості системи, навіть не вирішуючи характеристичного рівняння

Критерій Рауса представляє собою алгоритм, на основі якого складається таблиця, в котрій записуються коефіцієнти характеристичного рівняння. Характеристичні рівняння ПЛС [2,3] і ЗЛС [6, 9] представлені у вигляді (3) і (4):

$$a_6 p^6 + a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad (3)$$

$$a_7 p^7 + a_6 p^6 + a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad (4)$$

де n – порядок характеристичного рівняння, що залежить від порядку відповідної системи диференціальних рівнянь, які описують перехідні процеси в складових блоках ПЛС і ЗЛС.

Алгоритм побудови таблиці Рауса наступний:

перші два рядки утворюють коефіцієнти характеристичного рівняння (парні і непарні відповідно);

елементи наступних рядків обчислюються за формулою: $c_{ik} = (c_{i-2,k+1} - (l_i \times c_{i-1,k+1}))$, $l_i = (c_{i-2,1}/c_{i-1,1})$,

де i – номер рядка, k – номер стовпця.

Умови стійкості Рауса: щоб система була стійкою необхідно і достатньо, щоб всі коефіцієнти першого стовпця таблиці Рауса були позитивними.

За критерієм Гурвіца система є стійкою, якщо корені характеристичних рівнянь системи (3) або (4) мають від'ємні дійсні частини. Ця умова виконується, якщо визначник Гурвіца та всі діагональні мінори додатні.

У випадку дослідження стійкості логістичної системи з прямими потоками маємо визначник Гурвіці 6-го порядку, а при урахуванні зворотних потоків – 7-го порядку. Нижче показано приклад розрахунку діагональних мінорів Гурвіца для логістичної системи підприємства ЗАТ «Будінвест» з урахування зворотних матеріальних потоків [8]. В цьому випадку значення коефіцієнтів характеристичного поліному були такими:

$$a_7 = 2.426 \times 10^{12}, a_6 = 2.491 \times 10^{14}, a_5 = 4.369 \times 10^{14}, a_4 = 9.189 \times 10^{13}, a_3 = 2.741 \times 10^{12}, a_2 = 2.756 \times 10^{10},$$

$$a_1 = 8.811 \times 10^7, a_0 = 1 :$$

$$\Delta_7 = \begin{bmatrix} a_6 & a_4 & a_2 & a_0 & 0 & 0 & 0 \\ a_7 & a_5 & a_3 & a_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_6 & a_4 & a_2 & a_0 & 0 & 0 \\ 0 & a_7 & a_5 & a_3 & a_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_6 & a_4 & a_2 & a_0 & 0 \\ 0 & 0 & a_7 & a_5 & a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_6 & a_4 & a_2 & a_0 \end{bmatrix} \quad |\Delta_7| = 5.513 \times 10^{73}; \quad \Delta_6 = \begin{bmatrix} a_6 & a_4 & a_2 & a_0 & 0 & 0 \\ a_7 & a_5 & a_3 & a_1 & 0 & 0 \\ 0 & a_6 & a_4 & a_2 & a_0 & 0 \\ 0 & a_7 & a_5 & a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_6 & a_4 & a_2 & a_0 \\ 0 & 0 & a_7 & a_5 & a_3 & a_1 \end{bmatrix} \quad |\Delta_6| = 5.513 \times 10^{73};$$

$$\Delta_5 = \begin{bmatrix} a_6 & a_4 & a_2 & a_0 & 0 \\ a_7 & a_5 & a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_6 & a_4 & a_2 & a_0 \\ 0 & a_7 & a_5 & a_3 & a_1 \\ 0 & 0 & a_6 & a_4 & a_2 \end{bmatrix} \quad |\Delta_5| = 6.258 \times 10^{65}; \quad \Delta_4 = \begin{bmatrix} a_6 & a_4 & a_2 & a_0 \\ a_7 & a_5 & a_3 & a_1 \\ 0 & a_6 & a_4 & a_2 \\ 0 & a_7 & a_5 & a_3 \end{bmatrix} \quad |\Delta_4| = 2.559 \times 10^{55};$$

$$\Delta_3 = \begin{bmatrix} a_6 & a_4 & a_2 \\ a_7 & a_5 & a_3 \\ 0 & a_6 & a_4 \end{bmatrix} \quad |\Delta_3| = 9.813 \times 10^{42}; \quad \Delta_2 = \begin{bmatrix} a_6 & a_4 \\ a_7 & a_5 \end{bmatrix} \quad |\Delta_2| = 1.086 \times 10^{29}; \quad \Delta_1 = a_6 \quad |\Delta_1| = 2.491 \times 10^{14}.$$

Таким чином умови стійкості Гурвіца виконано:

$$\Delta_7 > 0, \Delta_6 > 0, \Delta_5 > 0, \Delta_4 > 0, \Delta_3 > 0, \Delta_2 > 0, \Delta_1 > 0.$$

Наведений підхід до оцінювання стійкості логістичних систем реальних підприємств Харківської області: ЗАТ «Будінвест» та ПАТ «Харківський плитковий завод» за допомогою критеріїв Рауса-Гурвіца було реалізовано в [7, 8], де досліджувався сам факт існування стійкості чи не стійкості, але не досліджувалося питання визначення діапазонів стійкості в залежності від змінювання параметрів логістичної системи, тобто випадок залежності значень діагональних мінорів, чи коефіцієнтів характеристичного рівняння від параметру.

Якщо потрібно встановити границі змінювання будь-якого параметра α із умов існування стійкості, треба розглядати залежності $a_k(\alpha)$ та $\Delta_m(\alpha)$ і визначити діапазон варіювання α , що відповідає умовам Гурвіца. Скоротити обсяг обчислювальних операцій під час визначення границь областей стійкості дозволяє використання інших алгебраїчних критеріїв, зокрема Льенара-Шипара, та Джурі.

Умови стійкості в формі Льенара-Шипара передбачають додатність коефіцієнтів характеристичного полінома і додатність непарних мінорів головної діагоналі визначника Гурвіца. Як видно, цей критерій виконується для розглянутого прикладу визначення стійкості логістичної системи.

Запишемо умови для рівнянь границь стійкості за критерієм Льенара-Шипара для прямої логістичної системи, якій відповідає характеристичне рівняння (3).

$$a_5 = 0; \tag{5}$$

$$a_5 a_4 a_2 + a_1 a_5 a_6 - a_5 a_2^2 - a_2 a_5^2 = 0; \tag{6}$$

$$a_1^0 (a_1^4 a_1^1 a_1^5 a_1^2 - a_1^4 a_1^5 a_1^3 a_1^2 + a_1^5 a_1^3 - a_1^3 a_1^3 + a_1^1 a_1^5 a_1^4 - 2a_1^1 a_1^3 a_1^6) - a_1^1 a_1^2 (a_1^4 a_1^2 + a_1^6 a_1^2 - a_1^2 a_1^6 + a_1^3 a_1^4 a_1^6) + a_1^1 (a_1^2 a_1^3 a_1^4 - a_1^2 a_1^5 a_1^6 - a_1^5 a_1^2 a_1^2 + a_1^2 a_1^6 a_1^3 a_1^2) = 0. \tag{7}$$

За допомогою рівнянь (5)–(7) можливо досліджувати діапазони змінювання стійкості ЛС залежно від змінювання будь-якого параметру ЛС (інтенсивності попиту, вартості зберігання однієї одиниці сировини або готового товару тощо). Однак оскільки входження параметрів в коефіцієнти характеристичного полінома теж описуються громіздкими функціями в перспективі треба використовувати пакети символьних обчислень

Критерій Джурі дозволяють виявити, чи знаходяться корені характеристичного полінома усередині одиничного кола. Для розглянутих логістичних систем ці критерії не виконуються.

Для перевірки критерію Джурі на імітаційних моделях логістичних систем підприємств Харківської області: ЗАТ «Будінвест» та ПАТ «Харківський плитковий завод» обиралася таблична форма цього критерію. Алгоритм критерію Джурі полягає в тому, що складається таблиця коефіцієнтів Джурі.

Таблиця 1

Коефіцієнти Джурі

| | | | | | |
|-------------|-------------|-----|-----------------|-------|---|
| a_n | a_{n-1} | ... | a_1 | a_0 | $q_n = \frac{a_0}{a_n}$ |
| a_0 | a_1 | ... | a_{n-1} | a_n | |
| a_0^{n-1} | a_1^{n-1} | ... | a_{n-1}^{n-1} | | $q_{n-1} = \frac{a_0^{n-1}}{a_1^{n-1}}$ |
| a_0^{n-2} | a_1^{n-2} | ... | a_{n-2}^{n-2} | | $q_{n-2} = \frac{a_0^{n-2}}{a_1^{n-2}}$ |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| a_0^0 | | | | | |

$$a_1^{k-1} = a_1^k - q_k a_1^{k-1}; \quad q_k = \frac{a_0^{k-1}}{a_1^{k-1}}$$

Перший і другий рядки – це коефіцієнти характеристичного полінома в прямому і зворотному порядку. Третій рядок отримано множення другого рядку на $q_n = \frac{a_0}{a_n}$ і відніманням добутку від першого рядку. Останній елемент третього рядку дорівнює нулю. Схема повторюється до $(2n+1)$ -го рядку, причому останній рядок складається з одного елемента.

Якщо $a_n > 0$, то всі корені характеристичного рівняння лежать у середині одиничного кола тоді і тільки тоді, коли всі a_k^k ; $k=1, \dots, n-1$ – додатні. Для жодного періоду часу на розглянутих реальних підприємствах критерій Джурі не виконувався. Але він може бути корисним під час синтезу нових систем.

Розглянуті критерії більш економічні з точки зору обчислювальних операцій в порівнянні з критеріями Рауса-Гурвіца. Даний факт відображує таблиця 2, де наводиться максимальна кількість умов стійкості, що ураховується під час використання різних алгебраїчних критеріїв (n – ступінь характеристичного полінома) [10].

Кількість умов, що виникають під час застосування алгебраїчних критеріїв стійкості

| Критерій | Кількість умов |
|----------------|----------------|
| Джурі | $n+1$ |
| Кларка | $n+3$ |
| Гурвіца | $2n$ |
| Рауса | $2n$ |
| Льєнара-Шипара | n |

Висновки

Розглянуті в роботі алгебраїчні критерії є універсальними засобами дослідження стійкості систем управління, зокрема логістичних систем, якщо вони розглядаються як лінійні системи автоматизованого управління. Вибір того чи іншого критерію під час дослідження стійкості логістичних систем залежить від завдань, що поставлені перед дослідником. Критерії Рауса і Гурвіца краще застосовувати в тих випадках, коли треба встановлювати стійкість системи на якісному рівні. Якщо досліджуються границі стійкості та їх залежність від параметрів логістичної системи, то слушно використовувати більш економічний з точки зору обчислень критерій Льєнара-Шипара. При цьому таке дослідження рекомендується проводити з використанням пакетів символьних обчислень.

Література

1. Колобов А.А. Логистико-ориентированное управление организационно-экономической устойчивостью промышленных предприятий в рыночной среде / А.А. Колобов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 205 с.
2. Зотов А.А. Оценка устойчивости функционирования и развития предприятий нефтегаза : автореф. на соиск. уч. ст. к.э.н. / Зотов А.А. – Пермь, 2003. – 25 с.
3. Оцінка і діагностика фінансової стійкості підприємства / [М.О. Кизим, В.А. Забродський, В.А. Зінченко]. – Х. : ВД«ІНЖЕК», 2003. – 144 с.
4. Савицька Г.В. Економічний аналіз діяльності підприємств : навч. посіб. / Савицька Г.В. – 3-є вид., випр. і доп. – К. : Знання, 2007. – 668 с.
5. Заюкова М.С. Теорія фінансової стійкості підприємства : монографія / М.С. Заюкова, О.В. Мороз та ін. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2004. – 155 с.
6. Гамалій В.Ф. Стійкість виробничого плану тваринницького комплексу / В.Ф. Гамалій, І.В. Ніколаєв // Модели управления в рыночной экономике : сб. науч. тр. – Донецк : ДонНУ, 2005. – Т. 1. Спец. вып. – С. 104–109.
7. Барішева Н.В. Побудова імітаційної моделі виробничої системи з прямими і зворотними логістичними потоками / Н.В. Барішева, О.Г. Ніколаєва // Вісник СХУ ім. В. Даля. – Луганськ, 2010. – № 8(150). – С. 23–29.
8. Ніколаєва О.Г. Застосування теорії автоматизованого управління для дослідження стійкості логістичних систем / О.Г. Ніколаєва, Н.В. Барішева (Мельникова) // Моделювання економіки: проблеми, тенденції, досвід : тези доп. Міжн. наук.-метод. форум-конф. молодих економістів-кібернетиків, 23–25 вересня 2010 р. – Львів : ВЦ ЛНУ ім. І. Франка, 2010. – С. 39–41.
9. Зайцев Г.Ф. Основы автоматического управления и регулирования / Г.Ф. Зайцев, В.И. Костюк, П.И. Чинаев. – К. : Техніка, 1975. – 496 с.
10. Вартамян В.М. Алгебраические критерии локализации корней полинома в заданных областях комплексной плоскости / В.М. Вартамян, Н.М. Федоренко, Ю.А. Романенков, И.В. Дронова, А.В. Кононенко // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков, 2005. – № 3 (19). – С. 82–87.

Надійшла 03.09.2015; рецензент: д. ф.-м. н. Янцевич А. А.