

УДК 004.942

<https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2020.3.11>

Г.О. ДИМОВА

Херсонський державний аграрно-економічний університет
ORCID: 0000-0002-5294-1756

РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ АНАЛІЗУ СТІЙКОСТІ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ

В статті розглядаються стійкість систем управління, які знаходяться в стані рівноваги та нестійкі системи. Зроблено аналіз досліджень стосовно стійкості динамічної системи, що описується звичайними диференціальними рівняннями. Важливою частиною теорії стійкості є проблема аналітичного та практичного визначення запасів стійкості складних (багатокомпонентних, динамічних, різнофакторних) систем і процесів. У цій частині теорії стійкості особливої актуальності з розвитком складної техніки набули задачі діагностування та прогнозування запасів стійкості процесів, пов'язаних з експлуатацією великих технічних систем. Такого роду різні прикладні задачі, пов'язані з теорією стійкості двофазних потоків – в розвиток теорії стійкості в її технічних додатках.

Сформульовано мету роботи, якою є реалізація інформаційної технології, що призначена для аналізу стійкості динамічної системи. Також метою є проведення перевірки розробленої інформаційної технології для системи економічної динаміки. Програмний додаток, який входить в інформаційну технологію використовує метод знаходження структури оператора динамічного об'єкта [3]. В роботі викладені основні моменти цього методу, в якому спочатку формується ганкелева матриця та визначаються головні мінори. Завдяки побудові ганкелевих матриць визначається ранг, який дорівнює найбільшому з порядків відмінних від нуля головних мінорів. Через симетричність матриці щодо головної діагоналі отримуються власні значення динамічної системи, проводиться розрахунок коефіцієнтів та коренів характеристичного рівняння. Метод реалізований у вигляді програмного додатку «Streamlining-coefficients-sustainability» з використанням мови програмування Python. Проведений аналіз стійкості системи економічної динаміки за допомогою розробленої інформаційної технології ідентифікації і прогнозування станів динамічних систем [3], в яку входить розроблена комп'ютерна програма. Зроблені висновки за результатами аналізу.

Ключові слова: динамічна система, диференціальне рівняння, аналіз стійкості, Python, інформаційна технологія.

А.О. ДЫМОВА

Херсонский государственный аграрно-экономический университет
ORCID: 0000-0002-5294-1756

РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В статье рассматриваются устойчивость систем управления, которые находятся в состоянии равновесия и неустойчивые системы. Сделан анализ исследований относительно устойчивости динамической системы, описываемой обыкновенными дифференциальными уравнениями. Важной частью теории устойчивости является проблема аналитического и практического определения запасов устойчивости сложных (многокомпонентных, динамических, разнофакторных) систем и процессов. В этой части теории устойчивости особую актуальность с развитием сложной техники приобрели задачи диагностирования и прогнозирования запасов устойчивости процессов, связанных с эксплуатацией крупных технических систем. Такого рода различные прикладные задачи, связанные с теорией устойчивости двухфазных потоков – в развитие теории устойчивости в ее технических приложениях.

Сформулирована цель работы, которой является реализация информационной технологии, предназначенной для анализа устойчивости динамической системы. Также целью является проведение проверки разработанной информационной технологии для системы экономической динамики. Программное приложение, которое входит в информационную технологию использует метод нахождения структуры оператора динамического объекта [3]. В работе изложены основные моменты этого метода, в котором сначала формируется ганкелева матрица и определяются главные миноры. Благодаря построению ганкелевых матриц определяется ранг, равный наибольшему из порядков отличных от нуля главных миноров. Из-за симметричности матрицы относительно главной диагонали получаются собственные значения динамической системы, производится расчет коэффициентов и корней характеристического уравнения. Метод реализован в виде программного приложения

«Streamlining-coefficients-sustainability» с использованием языка программирования Python. Проведенный анализ устойчивости системы экономической динамики с помощью разработанной информационной технологии идентификации и прогнозирования состояний динамических систем [3], в которую входит разработана компьютерная программа. Сделаны выводы по результатам анализа.

Ключевые слова: динамическая система, дифференциальное уравнение, анализ устойчивости, Python, информационная технология.

H. DYMOVA

Kherson State Agrarian and Economic University

ORCID: 0000-0002-5294-1756

IMPLEMENTATION OF INFORMATION TECHNOLOGY FOR ANALYSIS OF DYNAMIC SYSTEM STABILITY

The article discusses the stability of control systems, which are in a state of equilibrium and unstable systems. The analysis of studies on the stability of a dynamical system described by ordinary differential equations is made. An important part of the theory of stability is the problem of analytical and practical determination of the stability margins of complex (multicomponent, dynamic, multi-factor) systems and processes. In this part of the theory of stability, the problems of diagnosing and predicting the stability margins of processes associated with the operation of large technical systems have acquired particular relevance with the development of complex technology. Various applied problems of this kind related to the theory of stability of two-phase flows - in the development of stability theory in its technical applications.

The purpose of the work is formulated, which is the implementation of information technology designed to analyze the stability of a dynamic system. Also, the purpose is to conduct a test developed information technology for the system of economic dynamics. A software application that is part of information technology uses the method of finding the structure a dynamic object's operator [3]. The paper outlines the main points of this method, in which the Hankel matrix is first formed and the major minors are determined. By constructing Hankel matrices, the rank is determined equal to the largest of the orders of nonzero principal minors. Due to the symmetry of the matrix with respect to the main diagonal, the eigenvalues of the dynamical system are obtained, the coefficients and roots of the characteristic equation are calculated. The method is implemented as a software application "Streamlining-coefficients-sustainability" using the Python programming language. The analysis of the economic dynamics system's stability with the help of the developed information technology of identification and forecasting of the states of dynamic systems [3], which includes the developed computer program. Conclusions are made based on the analysis results.

Keywords: dynamic system, differential equation, stability analysis, Python, information technology.

Постановка проблеми

Поняття стійкості системи відноситься до ситуації, коли її вхідні сигнали дорівнюють нулю, тобто зовнішні впливи відсутні. При цьому правильно побудована система повинна знаходитися в стані рівноваги (спокою) або поступово наближатися до цього стану. У нестійких системах навіть при нульових вхідних сигналах виникають власні коливання і, як наслідок, - неприпустимо великі помилки [1].

Одним з перших питань, що виникають при дослідженні і проектуванні лінійних систем управління, є питання про їх стійкість. Лінійна система називається стійкою, якщо при виведенні її зовнішніми впливами зі стану рівноваги (спокою) вона повертається в нього після припинення зовнішніх впливів. Якщо після припинення зовнішнього впливу система не повертається до стану рівноваги, то вона є нестійкою. Для нормального функціонування системи управління необхідно, щоб вона була стійкою, тому що в іншому випадку в ній виникають великі помилки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Стійкість систем управління різного типу визначається різними методами. Точна і строга теорія стійкості систем, що описується звичайними диференціальними рівняннями, створена А. М. Ляпуновим в 1892. Всі стани лінійної системи управління або стійкі, або нестійкі, тому можна говорити про стійкість системи в цілому [2]. При дослідженні стійкості систем управління, що описуються диференціальними рівняннями невисокого порядку (до 4-го), користуються критеріями Рауса і Гурвіца. При дослідженні і проектуванні лінійних стаціонарних систем управління зазвичай застосовують частотні критерії Найквіста і Михайлова. Дослідження стійкості нелінійних систем управління виявляється досить складним навіть при використанні програмних засобів. Для знаходження достатніх умов стійкості часто застосовують метод функцій Ляпунова. Достатні частотні критерії абсолютної стійкості запропоновані математиком В. М. Поповим та ін.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є реалізація інформаційної технології аналізу стійкості динамічної системи з використанням методу знаходження структури оператора динамічного об'єкта та перевірка розробленої інформаційної технології для системи економічної динаміки.

Викладення основного матеріалу дослідження

Нехай сигнал $y_o(t)$ виходу автономного об'єкта описується звичайним диференціальним рівнянням m -го порядку з постійними коефіцієнтами і стійкою точкою спокою $y_o = 0$ [3, 4, 5]

$$\frac{d^m y_o(t)}{dt^m} + \sum_{m=0}^{m-1} a_m \frac{d^m y_o(t)}{dt^m} = 0 \quad (1)$$

з початковими умовами $\left\{ \frac{d^m y_o(0)}{dt^m} \right\}$, $m = 0, 1, 2, \dots, m-1$. Припустивши, для простоти, що рівняння (1) не має кратних коренів, отримаємо розв'язок

$$y_o(t) = \sum_{i=1}^m C_i \exp(r_i t), \quad t \geq 0. \quad (2)$$

Характеристичний поліном рівняння (1)

$$a_m r^m + a_{m-1} r^{m-1} + \dots + a_1 r + a_0 = 0, \quad (3)$$

де r^i – корені рівняння (1), $i = \overline{1, m}$.

Рівняння (3) відображає структуру лінійного оператора (1) і встановлює взаємозв'язок між множиною коренів r_i та вектором коефіцієнтів (a_0, a_1, \dots, a_m) [3, 4].

З іншої сторони, при кожному наборі коренів маємо m рівностей:

$$\sum_{i=1}^m C_i r_i^{(m)} = y_o^{(m)}, \quad m = (0, 1, \dots, m-1),$$

що однозначно зв'язують вектори (C_1, C_2, \dots, C_m) та $(y_o^{(0)}, y_o^{(1)}, \dots, y_o^{(m-1)})$.

Кожний запис сигналу $y_o(t)$, дозволяє знайти тільки ті значення r_i , для яких у відповідності з початковими умовами коефіцієнти C_i виявляться відмінними від нуля. Метою є обчислення коефіцієнтів a_i за записами $y_o(t)$, тому можна враховувати, що кожен з векторів $(y_o^{(0)}, y_o^{(1)}, \dots, y_o^{(m-1)})$, для якого всі $C_i \neq 0$, дозволяє без додаткових збуджень досліджувати об'єкт, тобто одне таке початкове відхилення реалізує повний набір збуджень об'єкту. Враховуючи, що взяття різниці та знаходження похідної являються ізоморфними операціями, то можна перейти від рівняння (1) до різницевого рівняння регресії шляхом перетворення вихідного сигналу об'єкта за допомогою операції квантування за часом (з урахуванням теореми Котельникова) та квантування за рівнем до часових рядів [6, 7].

Використовуючи метод Лобачевського-Греффе [8] (або методи Данилевського О.М., Крилова О.М., Леверьє-Фаддеева, метод обертань [9]) можна оцінити корені r_1, r_2, r_3 характеристичного рівняння диференціального оператора (1). У випадку, коли корені характеристичного полінома мають кратність, розглянута процедура може бути вдосконалена з урахуванням того, що при непарному числі коренів завжди є хоча б один дійсний корінь, а комплексні корені завжди зустрічаються як комплексносполучені числа та при від'ємності дійсних частин комплексносполучених коренів знайдене розв'язання буде стійким, крім того, при умові, що модулі всіх коренів $|r_i| < 1$, $i = \overline{1, m}$ забезпечується асимптотична стійкість лінійного оператора (4.1) [3, 8].

Для визначення стійкості динамічної системи будемо використовувати метод знаходження структури оператора динамічного об'єкта [3, 4, 7]. Завдяки цьому методу можна визначити структуру оператора динамічного об'єкта за його вихідним сигналам та упорядкуванню множини цих сигналів, поданням їх у вигляді ганкелевих форм і ганкелевих матриць.

Для отримання моделі виду «вхід – стан – вихід» розглянуто модель простору станів (**A**, **B**, **C**, **D**), де **A** – матриця коефіцієнтів системи, **B** – матриця управління, **C** – матриця виходу, **D** – матриця обходу.

В результаті обробки вихідних сигналів отримані $2n - 1$ чисел або векторів $s_0, s_1, \dots, s_{2n-2}$. Складено симетричну ганкелеву матрицю, яка має вигляд:

$$\mathbf{S} = \| s_{i+k} \|_0^{n-1} = \begin{pmatrix} s_0 & s_1 & s_2 & \dots & s_{n-1} \\ s_1 & s_2 & s_3 & \dots & s_n \\ s_2 & s_3 & s_4 & \dots & s_{n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{n-1} & s_n & s_{n+1} & \dots & s_{2n-2} \end{pmatrix}.$$

Послідовні головні мінори матриці **S** будемо позначати $\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_n$: $\mathbf{D}_p = \| s_{i+k} \|_0^{p-1}$.

Для розгляду питання розкладеності ганкелевих матриць і отримання моделі в просторі станів (**A**, **B**, **C**, **D**) перейдемо від матриці **S** до матриці $\mathbf{A} = \| a_{ik} \|_1^n$ ($i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n$), тієї ж розмірності. Ця матриця буде розкладеною, якщо вона може бути приведена до виду

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{pmatrix}, \tag{4}$$

де **B** і **D** – квадратні матриці.

Це можливо тоді і тільки тоді, коли можливе деяке розбиття всіх її індексів $1, 2, \dots, n$ на дві додаткові системи (без загальних індексів) $i_1, i_2, \dots, i_\mu; k_1, k_2, \dots, k_\nu$ ($\mu + \nu = n$) $a_{i_\alpha k_\beta} = 0$ ($\alpha = 1, 2, \dots, \mu; \beta = 1, 2, \dots, \nu$). В іншому випадку матриця **A** буде нерозкладною.

В якості динамічної системи оберемо динаміку зміни курсу долара (табл. 1) [10].

Таблиця 1

Дані зміни курсу долара з 01.12.19 по 19.03.20

№	Дата	Курс \$	№	Дата	Курс \$	№	Дата	Курс \$
1	01.12.2019	24,0356	38	07.01.2020	23,6862	75	13.02.2020	24,4966
2	02.12.2019	23,9723	39	08.01.2020	23,6785	76	14.02.2020	24,4795
3	03.12.2019	23,9574	40	09.01.2020	23,8345	77	15.02.2020	24,4795
4	04.12.2019	23,9392	41	10.01.2020	24,1190	78	16.02.2020	24,4795
5	05.12.2019	23,9303	42	11.01.2020	23,9677	79	17.02.2020	24,4470
6	06.12.2019	23,8770	43	12.01.2020	23,9677	80	18.02.2020	24,4456
7	07.12.2019	23,8770	44	13.01.2020	23,9677	81	19.02.2020	24,4431
8	08.12.2019	23,8770	45	14.01.2020	23,9275	82	20.02.2020	24,5106
9	09.12.2019	23,7248	46	15.01.2020	24,0257	83	21.02.2020	24,4777
10	10.12.2019	23,6885	47	16.01.2020	23,9821	84	22.02.2020	24,4777
11	11.12.2019	23,6892	48	17.01.2020	24,0923	85	23.02.2020	24,5000
12	12.12.2019	23,6035	49	18.01.2020	24,0923	86	24.02.2020	24,4530
13	13.12.2019	23,5633	50	19.01.2020	24,0923	87	25.02.2020	24,4995
14	14.12.2019	23,5633	51	20.01.2020	24,2527	88	26.02.2020	24,5307
15	15.12.2019	23,5633	52	21.01.2020	24,3257	89	27.02.2020	24,6490
16	16.12.2019	23,4980	53	22.01.2020	24,2586	90	28.02.2020	24,5610
17	17.12.2019	23,4904	54	23.01.2020	24,3310	91	29.02.2020	24,5610
18	18.12.2019	23,4691	55	24.01.2020	24,5212	92	01.03.2020	24,5610
19	19.12.2019	23,4131	56	25.01.2020	24,5212	93	02.03.2020	24,5900
20	20.12.2019	23,3741	57	26.01.2020	24,5212	94	03.03.2020	24,8180
21	21.12.2019	23,3253	58	27.01.2020	24,3301	95	04.03.2020	24,9386
22	22.12.2019	23,3253	59	28.01.2020	24,5984	96	05.03.2020	24,8908
23	23.12.2019	23,2912	60	29.01.2020	24,7204	97	06.03.2020	24,7413
24	24.12.2019	23,2758	61	30.01.2020	24,8491	98	07.03.2020	24,7413
25	25.12.2019	23,2758	62	31.01.2020	24,9196	99	08.03.2020	24,7413

Продовження таблиці 1

№	Дата	Курс \$	№	Дата	Курс \$	№	Дата	Курс \$
26	26.12.2019	23,2552	63	01.02.2020	24,9196	100	09.03.2020	24,7413
27	27.12.2019	23,2929	64	02.02.2020	24,9196	101	10.03.2020	24,9215
28	28.12.2019	23,6862	65	03.02.2020	25,0294	102	11.03.2020	25,3135
29	29.12.2019	23,6862	66	04.02.2020	25,0836	103	12.03.2020	25,6240
30	30.12.2019	23,6862	67	05.02.2020	24,8523	104	13.03.2020	25,8580
31	31.12.2019	23,6862	68	06.02.2020	24,7959	105	14.03.2020	25,8580
32	01.01.2020	23,6862	69	07.02.2020	24,5794	106	15.03.2020	25,8580
33	02.01.2020	23,6862	70	08.02.2020	24,5794	107	16.03.2020	26,0890
34	03.01.2020	23,6862	71	09.02.2020	24,5794	108	17.03.2020	26,5249
35	04.01.2020	23,6862	72	10.02.2020	24,5370	109	18.03.2020	27,0566
36	05.01.2020	23,6862	73	11.02.2020	24,5188	110	19.03.2020	27,2685
37	06.01.2020	23,6862	74	12.02.2020	24,4236			

Для аналізу стійкості динамічної системи застосуємо інформаційну технологію ідентифікації і прогнозування стану динамічної системи [3, 11]. Вона включає в себе комп'ютерну програму «Streamlining-coefficients-sustainability», що написана з використанням мови програмування Python [12], яка дозволяє побудувати графік вхідних даних (рис. 1), сформувати розрахункову матрицю, визначити головні мінори матриці, її власні значення, коефіцієнти та корені характеристичного рівняння. На рисунку 1 ось абсцис показує номер даних, а ось ординат курс долара.

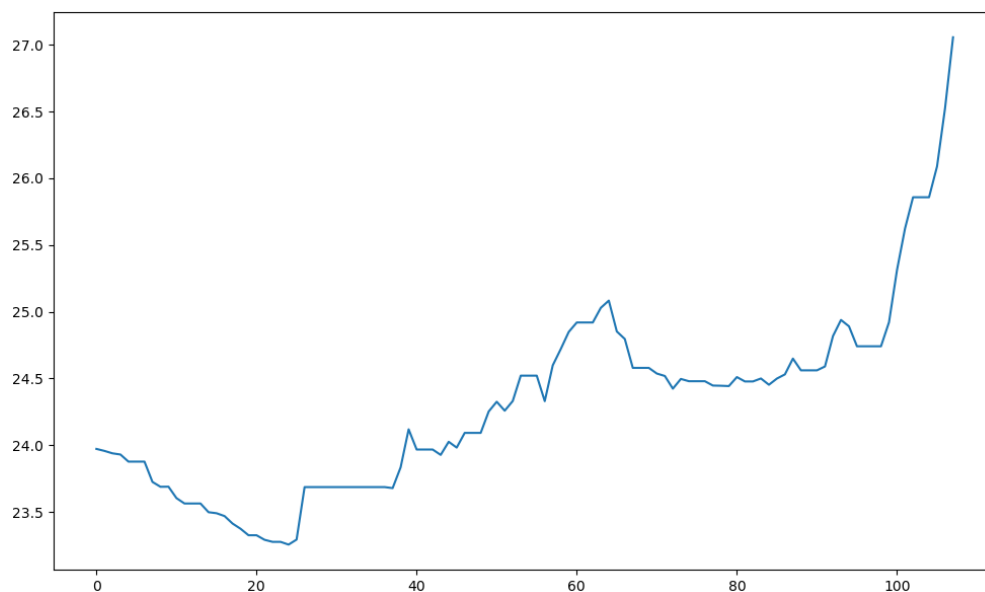


Рис. 1. Графік вхідних даних, побудований за допомогою комп'ютерної програми «Streamlining-coefficients-sustainability»

Будуємо ганкелеву матрицю. Для цього в комп'ютерній програмі задаємо початкове значення (Index of first item – 1) та розмір матриці (Matrix size – 55). Ця матриця буде охоплювати всі відомі дані. Натискаємо кнопку «Start», таким чином комп'ютерна програма запускає розрахунок параметрів (рис. 2-3).

Для оцінки стійкості стаціонарної лінійної системи лінійних рівнянь, що описується звичайними диференціальними рівняннями, необхідно і достатньо, щоб всі корені відповідного характеристичного рівняння мали від'ємні дійсні частини, тоді система управління асимптотично стійка.

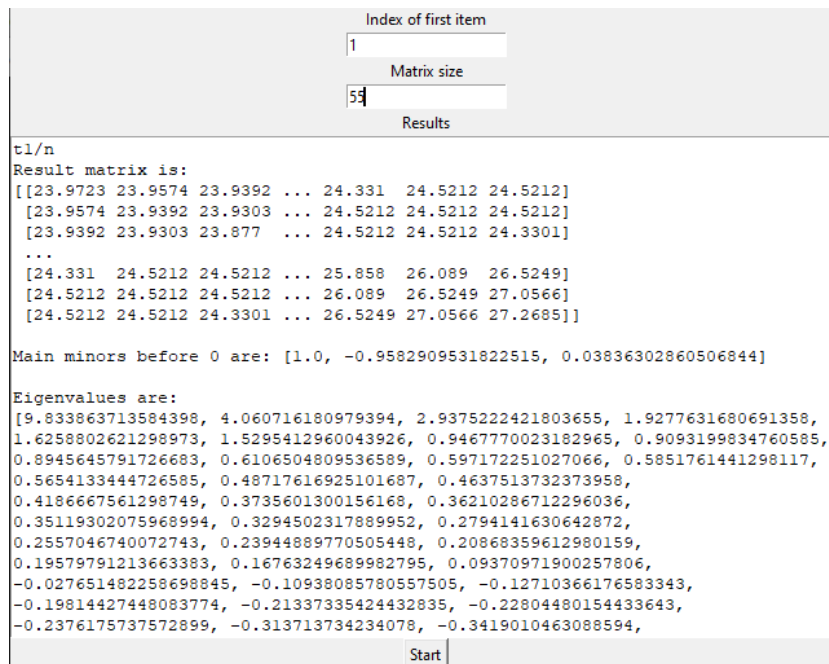


Рис. 2. Результати побудови матриці, розрахунку мінорів та власних значень

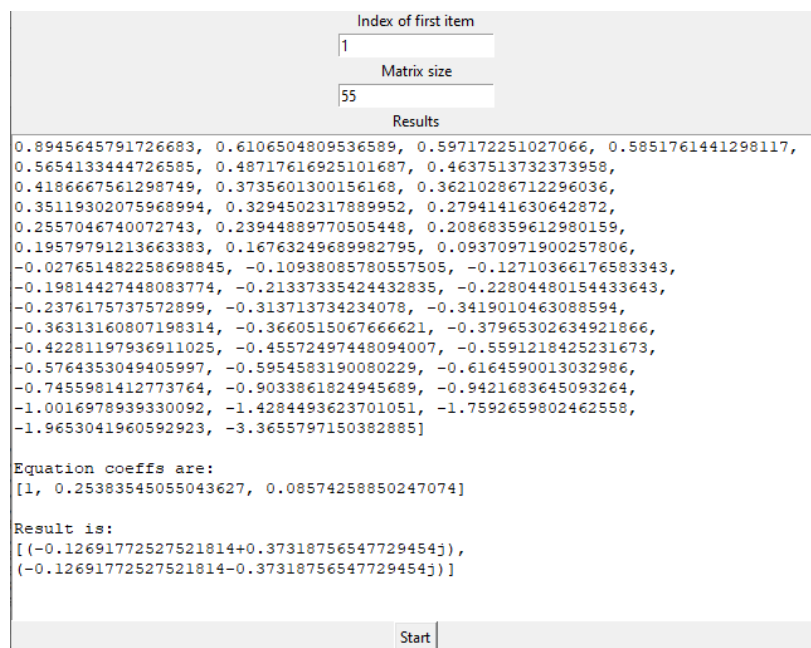


Рис. 3. Результати розрахунку коефіцієнтів та коренів характеристичного рівняння

Висновки

Реалізована інформаційна технологія для досліджування стійкості динамічної системи з розробкою комп'ютерної програми «Streamlining-coefficients-sustainability», що основана на методі знаходження структури оператора динамічного об'єкта. Проведений аналіз стійкості на прикладі зміни курсу долара. Досліджувана система являється стійкою, тому що дійсні частини коренів характеристичного рівняння від'ємні. Інформаційна технологія, що використовувалась для побудови матриці і розрахунку діє швидко на відміну від стандартних математичних додатків.

Список використаної літератури

1. Теория автоматического управления. URL: http://scask.ru/a_book_tau.php (дата звернення 30.04.20).
2. Определение устойчивости систем автоматического управления промышленными роботами.

- URL: <https://habr.com/ru/post/340554> (дата звернення 30.04.20).
3. Димова Г.О. Методи і моделі упорядкування експериментальної інформації для ідентифікації і прогнозування стану безперервних процесів: монографія. / Ганна Олегівна Димова. Херсон: Видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2020. 176 с.
 4. Марасанов В.В. Евристичні підходи до аналізу динамічних об'єктів по вихідним сигналам / В.В. Марасанов, Г.О. Димова. *Проблеми інформаційних технологій*. 2017. №1(022). С. 134-141.
 5. Гамецкий А.Ф. Математическое моделирование макроэкономических процессов / А.Ф. Гамецкий, Д.И. Соломон. Кишинев: Эврика, 1997. 313 с.
 6. Калман Р. Очерки по математической теории систем / Р.Калман, П.Фалб, М.Арбиб. М.: Едиториал УРСС, 2004. 400 с.
 7. Дымова А.О. Проекционные методы описания структуры оператора линейных динамических систем / А.О. Дымова. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. Випуск 6/2019 (119). С. 152-160. DOI: 10.30929/1995-0519.2019.6.152-160
 8. Демидович Б.П. Основы вычислительной математики / Б.П. Демидович, И.А. Марон. М.: Наука, 1966. 664 с.
 9. Виллемс Ян К. От временного ряда к линейной системе / Ян К. Виллемс. *Теория систем. Математические методы и моделирование*. Сборник статей. М.: Мир, 1989. 384 с.
 10. Курси валют. URL: <https://finance.i.ua> (дата звернення 19.03.20).
 11. Димова Г.О. Реалізація інформаційної технології ідентифікації і прогнозування стану безперервних виробництв / Г.О. Димова, В.С. Димов. *Стратегії, моделі та інформаційні технології в системах управління: колективна монографія*. Ред. Райко Г.О. Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2019. С. 103-113.
 12. Python 3.6.0 documentation. *Python Software Foundation*. 2017. URL: <https://docs.python.org/3> (дата звернення 10.01.20).

References

1. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Automatic control theory] Available at: http://scask.ru/a_book_tau.php (accessed 30 April 2020).
2. Opredeleniye ustoychivosti sistem avtomaticheskogo upravleniya promyshlennymi robotami [Determination of the stability of automatic control systems for industrial robots] Available at: <https://habr.com/ru/post/340554> (accessed 30 April 2020).
3. Dymova H.O. Metody i modeli uporyadkuvannya eksperymental'noyi informatsiyi dlya identyfikatsiyi i prohnozuvannya stanu bezperervnykh protsesiv: monohrafiya [Methods and models for ordering experimental information for identifying and predicting the state of continuous processes] Kherson: Publishing house FOP Vyshemirsky V.S., 2020. 176 p.
4. Marasanov V.V., Dymova H.O. Evrystychni pidkhody do analizu dynamichnykh ob"yektiv po vykhidnym syhnam [Heuristic approaches to the analysis of dynamic objects by output signals]. *Problemy informatsiynykh tekhnolohiy. Kherson's'kyy natsional'nyy tekhnichnyy universytet* [Problems of Information Technologies. Kherson National Technical University], 2017, no.1(022), pp. 134-141.
5. Gametskiy A.F., Solomon D.I. Matematicheskoye modelirovaniye makroekonomicheskikh protsessov [Mathematical modeling of macroeconomic processes]. Chisinau: Eureka, 1997. 313 p.
6. Kalman R., Falb P., Arbib M. Ocherki po matematicheskoy teorii sistem [Essays on the mathematical theory of systems]. Moscow: Editorial URSS, 2004. 400 p.
7. Dymova A.O. Proyektzionnyye metody opisaniya struktury operatora lineynykh dinamicheskikh sistem [Projection methods for describing the structure of an operator of linear dynamical systems]. *Vіsник KrNU імені Михайла Остроградського* [Bulletin of Mykhailo Ostrohradskyi KrNU], no.6/2019 (119), pp. 152-160. DOI: 10.30929 / 1995-0519.2019.6.152-160.
8. Demidovich B.P. Osnovy vychislitel'noy matematiki [Fundamentals of Computational Mathematics]. Moscow: Nauka, 1966. 664 p.
9. Willems Jan K. Ot vremennogo ryada k lineynoy sisteme [From time series to linear system]. *Teoriya sistem. Matematicheskiye metody i modelirovaniye. Sbornik statey* [Systems theory. Mathematical methods and modeling. Digest of articles], Moscow: Mir, 1989. 384 p.
10. Kursy valyut [Exchange rates] Available at: <https://finance.i.ua> (accessed 19 March 2020).
11. Dymova H.O., Dymov V.S. Realizatsiya informatsiyanoi tekhnolohiyi identyfikatsiyi i prohnozuvannya stanu bezperervnykh vyrobnystv [Implementation of information technology for identification and forecasting of continuous production]. *Stratehiyi, modeli ta informatsiyni tekhnolohiyi v systemakh upravlinnya: kolektyvna monohrafiya* [Strategies, models and information technologies in control systems: a collective monograph]. Kherson: Book publishing house FOP Vyshemirsky V.S., 2019. Pp. 103-113.
12. Python 3.6.0 documentation. *Python Software Foundation*. Available at: <https://docs.python.org/3> (accessed 10 January 2020).