

УДК 004

**Олександр ВЕЙЦБЛІТ**

[veitsblit@gmail.com](mailto:veitsblit@gmail.com)

**Микола КОРОТАЄВ**

[korotaevnikolay.wismark@gmail.com](mailto:korotaevnikolay.wismark@gmail.com)

м. Херсон

## ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРОЦЕСУ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

*В наші дні для цілей дослідження моделей динамічних систем використовуються популярні системи комп'ютерної алгебри (Maple, Mathematica) які пропонують процедурний підхід для цих цілей що не завжди є доцільним, або також використовуються програмні засоби налаштовані під конкретну модель. У цій роботі пропонується програмний засіб, що дозволяє з максимально зручним сервісом досліджувати моделі малої вимірності, представленими системами різницевих або диференціальних рівнянь, без необхідності написання коду та можливістю редагування в процесі роботи.*

**Ключові слова:** динамічна система, нелінійність модель, бифуркація, десктоп, діаграма класів, віконний інтерфейс, C#, WinForm, CLR, Zedgraph.

### Постановка проблеми

На сучасному етапі розвитку суспільства метод математичного моделювання є одним з ключових при дослідженні різних аспектів людської діяльності. Існує велика кількість моделей різного рівня складності та ступеня їх дослідження, які мають достатньо багато загальних рис, але зберігають специфічні особливості, притаманні кожній з наук, в якій використовуються [1-3].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Основними традиційними рисами моделей, що в наш час застосовуються зарубіжними та вітчизняними вченими для аналізу та управління економічними системами, є їх стійкість, стаціонарність, специфічність, тобто розгляд окремих аспектів складних економічних процесів у статистиці. Але через те, що економічні процеси протікають у часі, то для їх моделювання більш доцільним та адекватним є застосування динамічних моделей. Таким чином, динамічні моделі в економіці поступово стають інструментом практичних розрахунків у повсякденній діяльності з управління економікою в цілому, так і окремими

підприємствами. Аналіз підходів до математичного моделювання в економіці, зокрема для вивчення явищ, що відбуваються в ньому, та управління економічними процесами та об'єктами є актуальним [4-5].

Проблеми моделювання економічних систем методами динаміки є предметом дослідження вітчизняних та зарубіжних вчених В. В. Вітлінський, В. Гейєць, В. Данич, В. Занга, Т. Клебанова, Ю. Лисенко, Н. Максишко, Г. Малінецький, О. Петрова, В. Порожни, Т. По, Л. Сергеева, Ю. Хікс та багато інших. Незважаючи на поглиблене та багатопрофільне дослідження в цій галузі, ряд питань, пов'язаних з аналізом та синтезом підходів до моделювання економічної динаміки, залишається недостатньою [6-7].

### Постановка завдання

Програмний засіб цієї роботи пропонує зручний сервіс підтримки процесу дослідження динамічних систем, з можливістю швидкого редагування та відображення результатів в режимі реального часу. Робота на програмному рівні проходить з динамічними системами як з класами, завдяки цьому користувач має можливість працювати з динамічною системою як текстовим відображен-

ням лінійних або різницевих рівнянь. Цей підхід для роботи з моделями динамічних систем відрізняє даний модуль від популярних систем комп'ютерної алгебри (Maple, Mathematica), які використовують процедурний код для вирішення таких задач [8].

Для реалізації програмного засобу даної роботи використовувалась комбінація технологій мови C#. Графічний інтерфейс був розроблений з використанням API Windows Forms, реалізація алгоритму обчислення на мові C# в комбінації з парсером математичних виразів mXparser, та набір класів ZedGraph [9].

### Виклад основного матеріалу

Під час нашого дослідження ми створили десктоп модуль для підтримки процесу дослідження, використовуючи обчислювальні експерименти з динамічними системами. Основною метою програми є надання найкращого сервісу для дослідницького циклу: гіпотеза → експеримент → гіпотеза. Для природних експериментів неможливо негайно реалізувати нову ідею новим пристроєм відразу. Однак тут ми можемо це зробити за допомогою вікна програми з відповідними інструментами. Результати нового експерименту створюють нові ідеї, які ми можемо відразу пере-

вірити, використовуючи нові вікна тощо. Нові ідеї повинні негайно втілюватись в експерименти для перевірки. Тому сервіс підтримки інтенсивних дослідження з багатовимірними динамічними системами під час цієї роботи вимагав зусиль для обчислення прискорення застосування. Мета програмного засобу – це максимально можлива підтримка процесу дослідження.

Рис. 1 демонструє основне вікно програми, яке автоматично з'являється при його відкритті.

У центрі вікна розташовано двовимірну проекцію атратора системи Лоренца. На рис. 1 вище в лівому кутку – кнопки меню програми (рис. 2). Зліва направо: 1. Кнопка «Зберегти» використовується для збереження поточної моделі, яка відображається на екрані з усіма значеннями та настройками заданих параметрів під вибраним користувачем. 2. Кнопка редагування використовується для зміни поточної моделі. 3. Відкрита кнопка демонструє список імен збережених моделей з датою їх останньої модифікації, що дозволяє вибрати та відкрити вікно будь-якого з них. 4. Додана кнопка служить для визначення нових моделей. 5. Кнопка «Видалити» дає можливість видалити поточну модель (зображену на екрані) зі списку.

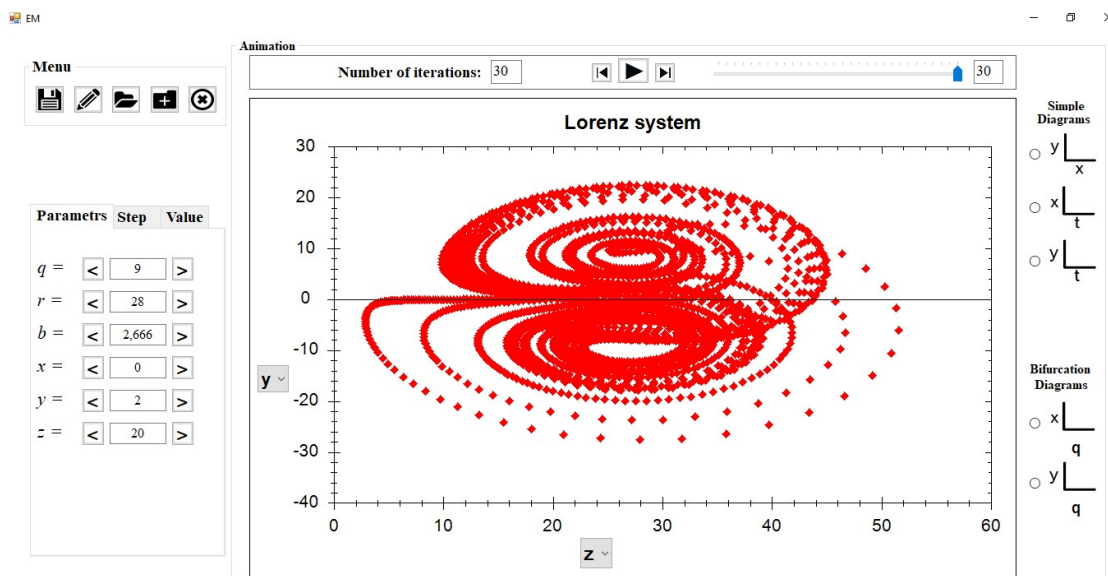


Рис. 1. Головне вікно програми Model



Рис. 2. Меню програми

Праворуч є 5 типів графіків(наприклад біфуркаційна діаграма рис. 3), які найчастіше використовуються; їх приклади наведені далі в документі. Ми можемо встановити параметри моделі та початкові значення траєкторії моделі за допомогою лі-

чильників ліворуч. Після цих налаштувань граф даної моделі автоматично з'являється в центрі вікна. Кількість ітерацій ми можемо встановити на панелі прокрутки над графіком. У центрі вікна також відображається анімація обраного шляху, коли натискається кнопка (біля смуги прокрутки).

Більш детально зупинимось на панелі головного графіку, умовно панель можливо поділити на 5 елементів ( рис. 4):

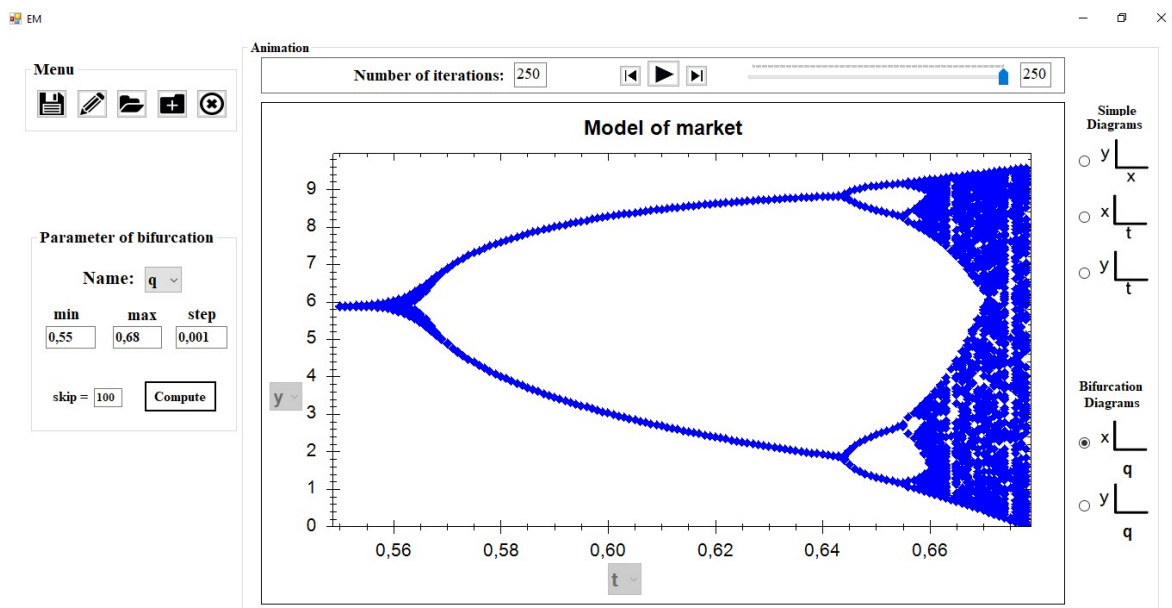


Рис. 3. Тип графіку біфуркаційна діаграма

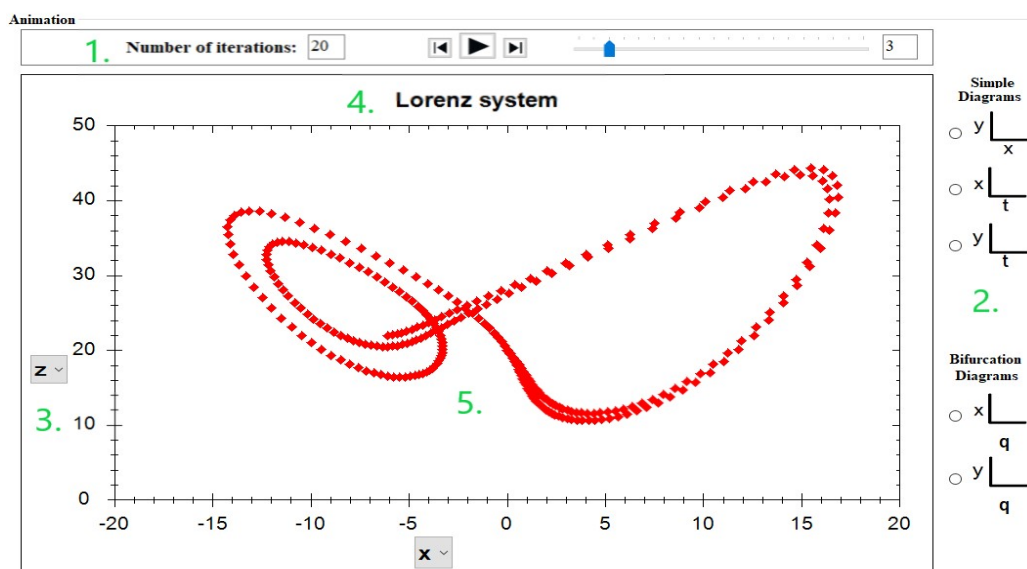


Рис. 4. Панель основного графіку

1. Меню анімації, дозволяє анімувати або дивитися по кроках результати відображень значень моделі. (На рисунку графік демонструє значення на третій ітерації).

2. Елементи для швидкого перемикачання поміж типами графіків. (числові ряди, фазовий простір, біфуркаційна діаграма).

3. Елемент перемикачання аргументу осі, дозволяє дивитися будь яку проекцію поміж змінними моделі.

4. Заголовок графіку, назва моделі.

5. Основний графік, представлений на елементі zedGraphControl.

Якщо натиснути кнопку «Step» ліворуч, ви можете встановити крок зміни для списку параметрів. Якщо ви натиснете кнопку Значення, ви зможете отримати таблицю з координатами траєкторії моделі для заданих ітерацій (рис. 5).

|     | x       | y       |  |
|-----|---------|---------|--|
| 1:  | 4,31624 | 2,01464 |  |
| 2:  | 8,54893 | 4,24722 |  |
| 3:  | 2,17459 | 1,07262 |  |
| 4:  | 9,40531 | 4,7123  |  |
| 5:  | 0,47284 | 0,23703 |  |
| 6:  | 6,50574 | 3,2586  |  |
| 7:  | 5,54447 | 2,7771  |  |
| 8:  | 6,92291 | 3,46766 |  |
| 9:  | 4,89093 | 2,44973 |  |
| 10: | 7,73989 | 3,87694 |  |
| 11: | 3,52942 | 1,76769 |  |
| 12: | 9,02038 | 4,51844 |  |
| 13: | 1,2105  | 0,60605 |  |
| 14: | 8,6313  | 4,32374 |  |
| 15: | 1,936   | 0,96958 |  |
| 16: | 9,33188 | 4,67457 |  |
| 17: | 0,61673 | 0,30865 |  |
| 18: | 7,1271  | 3,57037 |  |
| 19: | 4,55944 | 2,28385 |  |
| 20: | 8,10953 | 4,06217 |  |
| 21: | 2,88137 | 1,44308 |  |
| 22: | 9,35312 | 4,68516 |  |

Рис. 5. Значення координат траєкторії моделі

Але головним інструментом для підтримки обчислювальних досліджень в *Model application* є легка модифікація поточної моделі після натискання кнопки «Редагування» (рис. 6).

Вікно модифікації розташоване над поточним вікном моделі, що дозволяє одночасно використовувати обидва вікна. Клацнувши лівою кнопкою миші на рівнянні моделі в полі Динамічна система перейде до поля *Equation*, де його можна змінити. Після натискання Додати модифіко-

ване рівняння повернеться назад. Подібна процедура може бути зроблена за параметрами. Ми також можемо додати нові рівняння та параметри та видалити попередні. У полі *Назва системи* можна вказати назву нової модифікації моделі. Після натискання кнопки «Зберегти» нова модель потрапляє до збереженого списку. Якщо ви натиснете кнопку Змінити, нова зміна буде збережена під назвою поточної моделі, яка буде видалена. Коли ви натискаєте кнопку Назад, модифікація тимчасово призупинено, і ми повернемося до поточного вікна. Кнопка перегляду відображає інформацію про модель (рівняння, параметри та налаштування).

**Приклад застосування додатку Model.** Нехай в моделі ринку при плануванні адаптивні очікування використовуються з ймовірністю  $p$ , наївні з ймовірністю  $q = 1 - p$ .

З ростом ймовірності наївних очікувань  $q$ , тобто до убування  $p$ , ринок втрачає стабільність, проходячи еволюцію від простої динаміки з єдиною стійкою точкою рівноваги до непередбачуваного поведінки системи. Нестійкість ринку прямо пропорційна  $n$  – числу фірм на ринку. Тому при фіксованому  $q$  нестійкість ринку зростає з ростом  $n$ . Таким чином, в моделі є два параметри – число фірм  $n$  і ймовірність наївного підходу до планування  $q$  – зростання яких веде до нестійкості. Процес переходу від стійкості до хаосу такий же в обох випадках. У цьому прикладі буде продемонстровано тільки випадок параметра  $q$ .

Нехай  $n = 20$ ,  $k = 6$ ,  $b = 200$ ,  $v = 2$ ,  $\alpha = 0.9$ ,  $q = 0.5$ . Траєкторія динамічної системи з такими параметрами і з початковою точкою  $x_0 = 0.1$ ,  $y_0 = 0.1$  показана на рис. 7.

При  $q = 0.648$  відбувається біфуркація і замість точки рівноваги з'являється стійкий цикл із чотирьох точок. (рис. 8.) Обчислення показують, що з ростом параметра  $q$  біфуркації подвоєння циклу тривають, слідуючи шкалою Шарковського.

При  $q \approx 0.676$  відповідно до цієї шкали виникає стан динамічного хаосу (рис. 9).

Зауважимо, що співвідношення між обсягами випуску продукції фірмою-огоїстом і фірмою-реціпрокатором при цьому залишається майже незмінним. Детально процес втрати стабільності і переходу до хаосу динамічною системою вид-

но на наступній бифуркаційній діаграмі. (рис. 10).

Аналогічні наведеним вище і виглядають практично так само приклади і діаграми можна побудувати, використовуючи в якості змінного параметра  $n$ .

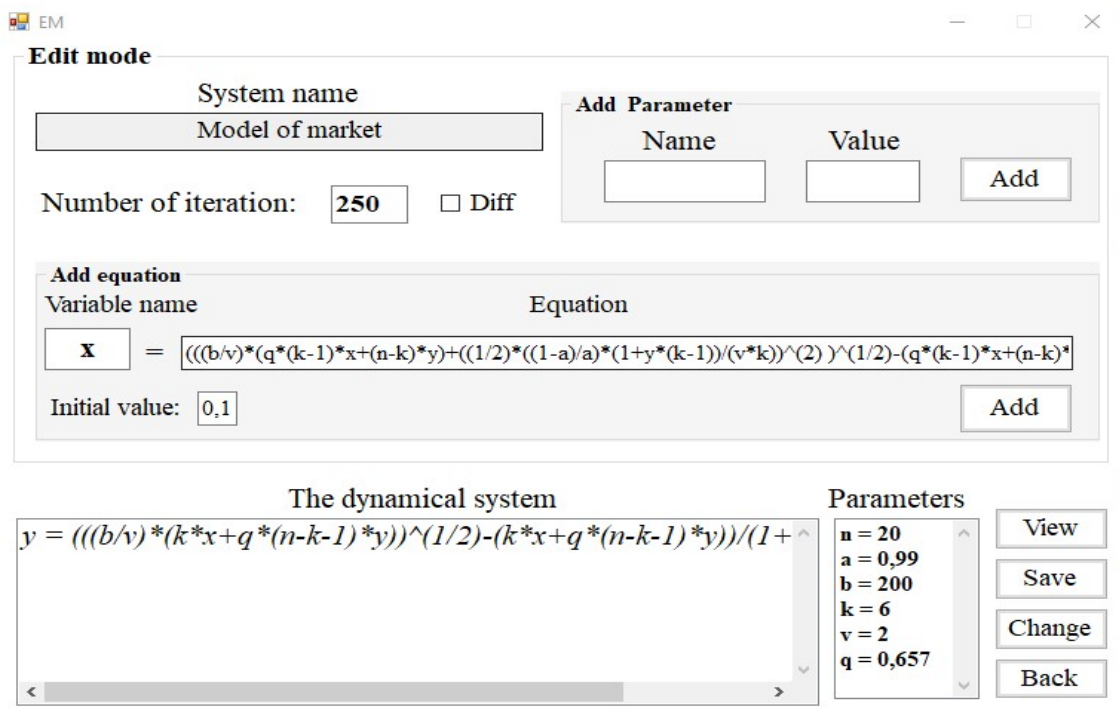


Рис. 6. Вікно задання або редагування динамічної системи

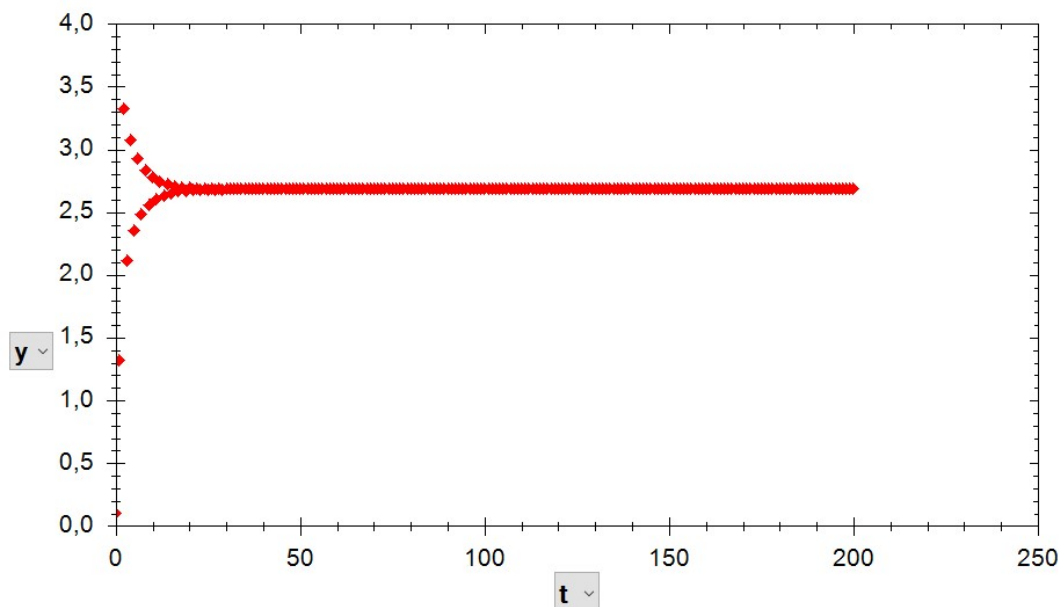


Рис. 7. Траекторія системи  $y(t)$  при  $q = 0.5$

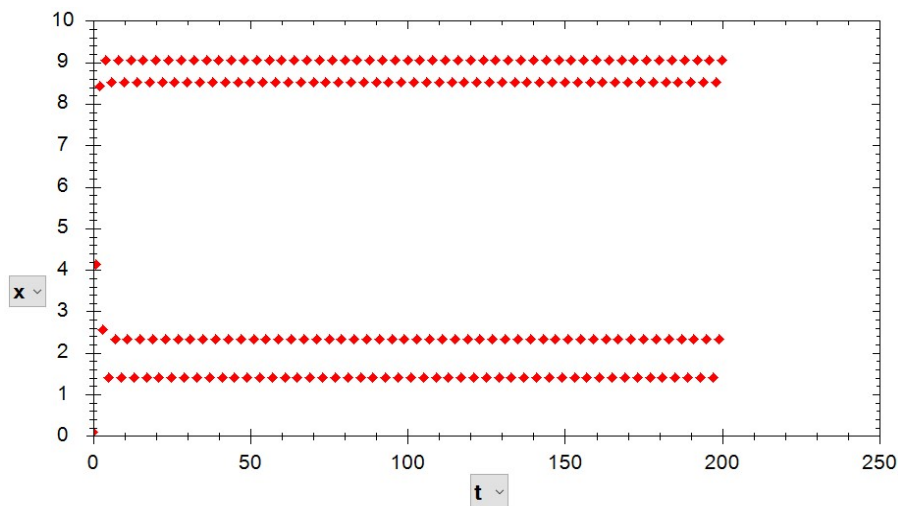


Рис. 8. Траєкторія системи  $x(t)$  при  $q = 0.648$

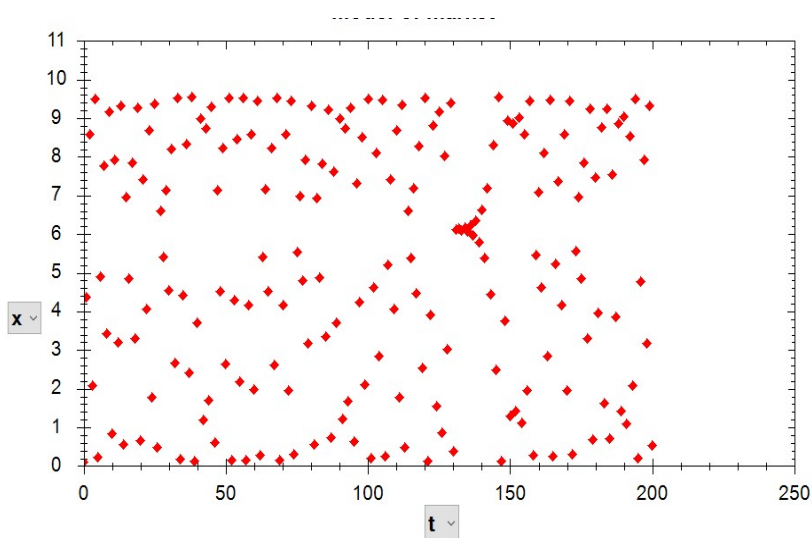


Рис. 9. Траєкторії системи при  $q = 0.676$

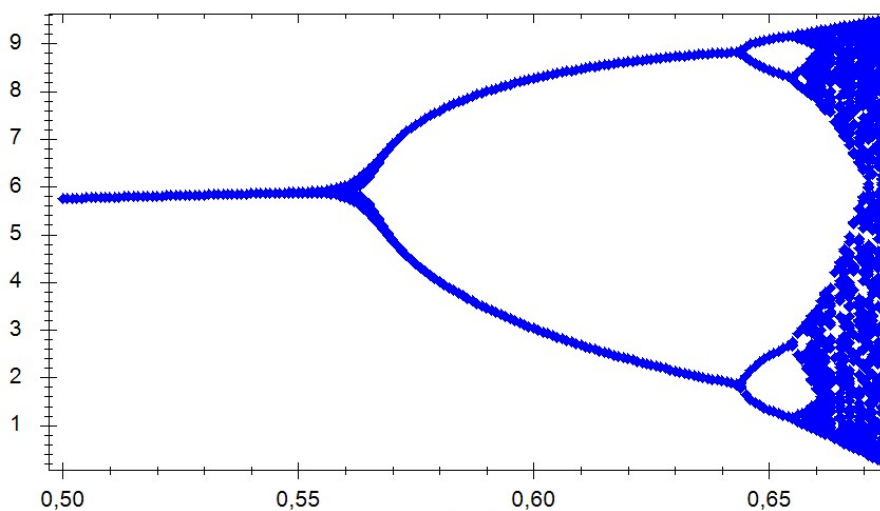


Рис. 10. Біфуркаційна діаграма

### Висновки і перспективи досліджень

Однією з перспективних і швидко розвиваються областей застосування математичного моделювання є динаміка інноваційних процесів. Її роль все більше зростає в зв'язку з ускладненням перебігу реальних інноваційних процесів, які, очевидно, являють собою рушійну силу будь-якої країни. Дослідження в цій області показують, що кризові явища мають не випадковий, а систематичний характер, який визначається детермінованими механізмами. Тому багато особливостей поведінки інноваційних процесів можуть описуватися в рамках детермінованих систем диференціальних рівнянь. Складну поведінку цих систем, включаючи процеси самоорганізації, піддається опису завдяки обліку нелінійних членів, присутніх в математичних моделях динамічних систем. Для підтримки процесу дослідження моделей динамічних сис-

тем був розроблений програмний засіб який представлений в даній роботі. Реалізація програми відбувалась в середовищі Microsoft Visual Studio на мові програмування C#. Основною метою програми є надання найкращого сервісу для дослідницького циклу: гіпотеза → експеримент → гіпотеза. Даний засіб дозволяє проводити чисельні експерименти, модифікувати та візуалізувати моделі динамічних систем максимально зручним способом.

Даний програмний засіб може використовуватися дослідниками для спрощення процесу дослідження моделей динамічних систем. Подібні моделі дуже розповсюджені у сучасному світі вони описують процеси в економіці (ринки цінних паперів, управління компаніями і т.п.), в екології (зростання і розвиток популяцій, поширення епідемій), в хімії (автоволнові процеси в каталітично активних середовищах) в фізиці (турбулентність), та в інших областях.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Арнольд, В.И. Дополнительные главы теории обыкновенных дифференциальных уравнений [Текст] / В.И. Арнольд. – М.: Наука, 1978. – 306 с
2. Анищенко, В.С. Сложные колебания в простых системах: Механизмы возникновения, структура и свойства динамического хаоса в радиофизических системах [Текст] / В.С. Анищенко. – М.: Наука, 1990. – 312 с.
3. Биркгоф, Дж. Динамические системы [Текст] / Дж. Биркгоф. – И.: «Удмуртский университет», 1999. – 408 с.
4. Барабашин, Е.А. Введение в теорию устойчивости: уч. пособие [Текст] / Е.А. Барабашин. – М.: Наука, 1967. – 223 с.
5. Бенькович, Е.С. Практическое моделирование динамических систем: уч. пособие [Текст] / Е.С. Бенькович, Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сениченков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 464 с.
6. Puu, T. Nonlinear economic dynamics [Text] / T. Puu, A. Panchuk. – New York: Nova Science Publishers, 2011. – 288 p.
7. Schulz, A.W. Beyond the Hype: The Value of Evolutionary Theorizing in Economics [Text] / A.W. Schulz. – Philosophy of the social sciences, 43(1). – 2013. – P. 46-72.
8. Божокин, С.Ф. Фракталы и мультифракталы: навч. посібник [Текст] / С.Ф. Божокин, Д.А. Паршин. – І.: НВЦ «Регулярна та хаотична динаміка», 2001. – 129 с.
9. Агуров, П.В. C#. Сборник рецептов [Текст] / П.В.Агуров. – С.-П.: БХВ-Петербург, 2000. – 432 с.

*Alexander VEITSBLIT, Nikolay KOROTAEV*  
Kherson

#### A SOFTWARE TOOL TO SUPPORT THE PROCESS OF RESEARCHING DYNAMIC SYSTEMS

*Nowadays, for the purpose of studying the models of dynamic systems, popular systems of computer algebra (Maple, Mathematica) are proposed that propose a procedural approach for these purposes, which is not always appropriate, or also software tools are configured for a particular model. In this paper, a software tool is proposed that allows us to explore, with the most convenient service, small-dimensional models presented by systems of differential or differential equations, without the need to write code and the possibility of editing in the process of work.*

**Keywords:** *dynamic system, nonlinearity model, bifurcation, desktops, class diagrams, window interface, C #, WinForm, CLR, Zedgraph.*

*Александр ВЕЙЦБЛИТ, Николай КОРОТАЕВ*  
Херсон

#### ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ПРОЦЕССА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*В настоящее время для изучения моделей динамических систем предлагаются популярные системы компьютерной алгебры (Maple, Mathematica), которые предлагают процедурный подход для этих целей, что не всегда уместно, или также программные средства, настроенные для конкретной модели, В этой статье предлагается программный инструмент, позволяющий исследовать с помощью наиболее удобного обслуживания малогабаритные модели, представленные системами дифференциальных или дифференциальных уравнений, без необходимости писать код и возможность редактирования в процессе работы.*

**Ключевые слова:** *динамическая система, модель нелинейности, бифуркация, рабочие столы, диаграммы классов, оконный интерфейс, C #, WinForm, CLR, Zedgraph.*

Стаття надійшла до редколегії 30.09.2018