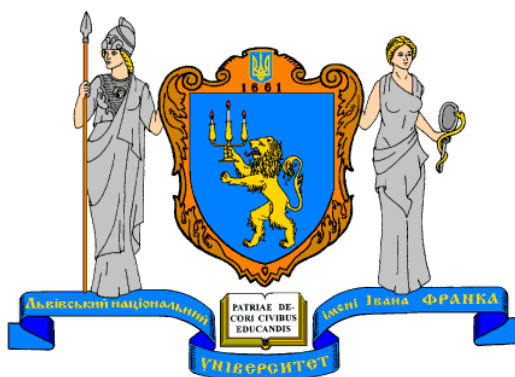


Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет імені Івана Франка

Л.М. Зомчак



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

для проведення семінарських занять
з курсу “Моделювання синергетичних процесів”

Львів 2022

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри економічної кібернетики Львівського національного університету імені Івана Франка (Протокол №1 від 30 серпня 2022 року).

Рецензенти:

Вдовин М. Л.

кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри статистики
(Львівський національний університет імені Івана Франка)

Комар М.І.

кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри економічної кібернетики
(Львівський національний університет імені Івана Франка)

Методичні матеріали для проведення семінарських занять з курсу «Моделювання синергетичних процесів» / Укладач Зомчак Л.М. Львів: Малий видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка. 2022. – 26 с.

© Львів, 2022

ВСТУП

“Моделювання синергетичних процесів” – одна з вибіркових дисциплін, що завершує фундаментальну підготовку магістрів за освітньою програмою “Економічна кібернетика”.

Мета курсу - формування системи теоретичних знань та практичних навичок щодо моделювання структурних і динамічних властивостей економічних систем як засобу дослідження та управління складними явищами у макро-, мезо- й мікроекономічних системах.

Протягом останніх десяти, п'ятнадцяти років відбулися відчутні зміни в розумінні фундаментальних закономірностей економічних систем. Виявилось, що такі складні системи мають універсальні емерджентні властивості, які не знаходять адекватного розуміння у рамках традиційних парадигм. Тому для аналізу фінансово-економічних ринків все активніше використовуються методи та моделі фундаментальних наук, які у поєднанні з сучасними досягненнями в галузі інформаційних технологій та досить ємними базами даних (мільйони записів навіть в базах некомерційного призначення) забезпечили значний прогрес у розумінні та квантифікації природи цих систем. З'явилися нові „кількісні” напрямки економіки: математична економіка, фізична економіка, еконофізика та ін. Об'єднуючим для усіх цих підходів є поняття «синергетична економіка».

Наукову основу курсу складають теоретичні моделі, математичний апарат, сучасні концепції та парадигми, які визначають підходи до вивчення характеристик економічних систем.

Предмет навчальної дисципліни є інструментарій економіко-математичного моделювання: складних економічних об'єктів, процесів, ситуацій; методи та алгоритми проведення модельних

експериментів; методологія математичного моделювання економічних та фінансових систем на основі синергетичного підходу.

Об'єктом вивчення навчальної дисципліни є синергетична економіка, її підрозділи та процеси, що у них відбуваються, конкретні моделі, методи та алгоритми розглядаються у зв'язку з відповідними проблемами аналізу та управління в економічних та фінансових системах з урахуванням синергетичного підходу.

Завдання – навчити студентів застосовувати методи математичного моделювання синергетичної економіки для вирішення прикладних економічних проблем, ознайомити з головними підходами до моделювання економіки.

Основними завданнями дисципліни є:

- засвоєння студентами теоретичних основ побудови економіко-математичних моделей та методів проведення модельних експериментів;

- формування у студентів достатнього уявлення про становлення, функціонування та розвиток систем підтримки прийняття управлінських рішень;

- набуття необхідних знань і вмінь у галузі побудови систем моделей та алгоритмів пошуку оптимальних управлінських рішень;

- набуття практичних навичок використання й адаптації сучасного інструментарію оптимізації управлінських рішень у визначеній предметній сфері.

Після завершення цього курсу студент буде:

Знати: структурні та динамічні характеристики економічної системи; моделі прогнозування характеристик економічної системи; основні методи оцінки якості функціонування; методи оцінки структурних змін; методи дослідження та моделювання складних соціально-економічних систем;

Вміти: Збирати, систематизувати й аналізувати інформацію про систему управління економічною системою; Аналізувати соціально-економічні об'єкти і процеси на засадах синергетики і суміжних теорій; Ідентифікувати та дослідити умови виникнення надзвичайних ситуацій, будувати моделі їхнього розвитку, оцінювати їхні соціально-економічні наслідки; Досліджувати стійкість системи згідно теорії її самоорганізації, а також виявляти сценарії переходу до хаосу; Розробляти математичні моделі динаміки розвитку економічних процесів; Моделювати тенденції макро- та мікроекономічного розвитку; Застосовувати або модифікувати існуючі програмні засоби для розв'язування задачі; Алгоритмізувати процес пошуку ефективного рішення; Розробляти економіко-математичні моделі прогнозування розвитку економічних систем, перевіряти їх адекватність; Будувати прогноз динаміки розвитку економічних процесів; Збирати, систематизувати й аналізувати інформацію у вигляді часових рядів, проводити їх аналіз методами синергетичної економіки, реалізовувати реконструкцію атрактора економічних систем; Виявляти фрактальні властивості та нелінійну динаміку в економічних системах, застосовувати методи моделювання хаотичної динаміки в економіці; Моделювати поведінку фінансових посередників на ринку; Здійснювати вибір певного середовища програмування для розв'язування побудованої задачі.

ІНФОРМАЦІЙНИЙ ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ

Тема 1. Концептуальні засади синергетики та нелінійної економіки

Синергетика в контексті посткласичного етапу розвитку науки. Поняття «синергетика». Категорії синергетики. Зв'язок синергетики та кібернетики. Міждисциплінарний характер синергетики. Історичні етапи розвитку синергетичного підходу в науці. Німецька школи синергетики Германа Хакена. Бельгійська школа синергетики Іллі Пригожина, модель феномена самоорганізації (брюсселятор). Московська школа синергетики. Американська школа Інституту досліджень складних адаптивних систем у Санта-Фе. Особливості кожної зі шкіл. Перспективи подальшого розвитку синергетики.

Тема 2. Нелінійні науки

Фрактальна математика. Теорія хаосу. Теорія природних структурних утворень. Солітони. Клітинні автомати. Теорія складних систем.

Тема 3. Економіка як об'єкт моделювання нелінійних наук та теорії хаосу

Особливості економіки як об'єкту моделювання теорії синергетики. Доцільність застосування синергетичних методів в економіці. Еволюційний та революційний розвиток системи. Етапи деградації та руйнування системи. Поняття стійкості системи в теорії її самоорганізації. Моделювання адаптації фірми на основі класичного логістичного відображення. Павутиноподібна модель фірми як логістичне відображення.

Тема 4. Основні поняття теорії синергетики

Поняття відкритих та дисипативних структур. Поняття хаосу та динамічного в синергетиці. Основні типи атракторів,

дивні атрактори. Точки біфуркації.

Тема 5. Теоретичні методи синергетики. Лінійний аналіз стійкості динамічних систем.

Основні поняття якісної теорії диференціальних рівнянь. Фазовий простір. Лінійна система для двох змінних. Власні значення. Динаміка та рівновага. Стійкість за Ляпуновим. Консервативні та дисипативні системи. Лінеаризація нелінійної системи. Прямий метод Ляпунова.

Параметри порядку й принцип підпорядкованості в синергетиці. Принцип порядку Хакена. Показники Ляпунова. Дискретне відображення та його побудова. Сценарій переходу до хаосу по Фейгенбауму.

Тема 6. Структурна стійкість і біфуркація динамічних систем

Стійкість за Ляпуновим. Консервативні та дисипативні системи. Лінеаризація нелінійної системи. Прямий метод Ляпунова. Структурна стійкість. Поняття біфуркації. Біфуркації станів рівноваги: біфуркація зриву рівноваги, біфуркація Андронова-Хопфа (народження циклу), біфуркація типу вилки. Біфуркація періодичних розв'язків: біфуркація виникнення або зникнення пари траєкторій, біфуркація подвоєння періода, біфуркація народження тору.

Тема 7. Практичні методи теорії хаосу. Алгоритм реконструкції атратора системи.

Особливості економічних часових рядів. Нелінійність та нестационарність економічних часових рядів. Стохастичні характеристики атракторів: фрактальна розмірність, інформаційна розмірність, кореляційна розмірність. Алгоритм Грасберга-Прокаччі реконструкції атракторів. Методи вибору

часової затримки (методи авто кореляційної функції та взаємної інформації). Методи вибору розмірності простору вкладення (метод кореляційної розмірності та метод фальшивих найближчих сусідів).

Тема 8. Класичні та додаткові алгоритми оброблення економічних часових рядів

Спеціальні методи дослідження нелінійної динаміки часових рядів. Алгоритм Бенеттіна, алгоритм Вульфа обчислення максимального показника Ляпунова. Методи обчислення показника Херста. Класифікація часових рядів на основі показника Херста. R/S аналіз економічних часових рядів. BDS-тест, метод сурогатних даних. Метод рекурентних графіків аналізу економічних часових рядів.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Тема 1. Концептуальні засади синергетики та нелінійної економіки

Перелік питань для обговорення на практичних заняттях:

1. Синергетика як етап посткласичного розвитку науки. Синергетика як новий світогляд.
2. Виникнення та становлення синергетики як науки.
3. Наукові школи в синергетиці: подібності та відмінності
4. Зв'язок синергетики з іншими науками
5. Нелінійні науки: приклади та об'єкти дослідження

Завдання для самостійної роботи:

1. Німецька школа синергетики: ідеї, моделі та представники
2. Бельгійська школа синергетики: ідеї, моделі та представники. Модель Брюсселятора.
3. Американська школа синергетики у Санта Фе: ідеї, моделі та представники.

Контрольні завдання та теми для обговорення:

1. Охарактеризуйте сучасні напрямки розвитку кібернетичних ідей.
2. Що спільного і в чому відмінності у кібернетичному та синергетичному підходах до дослідження складних систем?
3. Що розуміють під поняттям «синергетика»? Хто є автором поняття? Коли воно ввійшло у науковий обіг?
4. Як відрізняється трактування поняття «синергетика» представниками різних шкіл?
5. Які етапи розвитку наукового вчення ви можете назвати? Яке місце серед них займає синергетика?

6. У чому полягає особливість синергетики як наукового напрямку?

7. Що є об'єктом дослідження синергетики як науки?

8. Назвіть наукові напрямки, суміжні із синергетикою, які досліджують схожі об'єкти

9. Які нелінійні науки ви можете назвати? У чому полягають їх ідеї, особливості, відмінності від інших. Назвіть представників кожного із напрямків.

10. Назвіть приклади синергетичних ефектів у різних науках.

Темати рефератів:

Ілля Пригожин: життєвий та науковий шлях

Герман Хакен – засновник синергетики як науки

Роль та місце Хакена, Пригожина, Курдюмова у розвитку концепцій та методів синергетики

Концепція синергетики в методології соціально-гуманітарного знання

Тема 2. Нелінійні науки

Перелік питань для обговорення на практичних заняттях:

1. Фрактальна математика
2. Теорія хаосу
3. Клітинні автомати
4. Теорія складних систем
5. Поняття та прояви самоорганізації у складних системах

Завдання для самостійної роботи:

1. Перетин Пуанкаре

2. Синергетична та еволюційна економіка: порівняльний аналіз

Контрольні завдання та теми для обговорення:

4. Опишіть основні етапи еволюції систем. Наведіть приклади для систем різної природи (фізичних, біологічних, економічних тощо).

5. Наведіть основні чинники, що змушують системи змінювати свої якісні властивості.

6. Проаналізуйте основні особливості функціонування економіки України з погляду синергетики.

7. У чому полягає відмінність між еволюційним та революційним етапами розвитку системи?

8. Сформулюйте умови, за яких може відбутись деградація систем. Які умови є загальносистемними? Які умови пов'язані з підсистемою управління?

9. За яких умов можливе руйнування системи?

10. Назвіть найістотніші суперечності в процесі розвитку системи

11. У чому суть процесів самоорганізації?

12. Як реалізуються процеси самоорганізації в економічних системах?

13. У чому полягає «ефект метелика»? За яких умов вперше було вжито цей термін?

14. Для чого у синергетиці використовують перетин Пуанкаре? У чому його суть?

15. Назвіть головні характеристики еволюційної економіки.

Тема 3. Економіка як об'єкт моделювання нелінійних наук та теорії хаосу

Перелік питань для обговорення на практичних заняттях:

1. Обмеженість лінійних моделей економічних систем
2. Приклади синергетичних ефектів у економічних системах
3. Застосування логістичного відображення у моделюванні економіки
4. Процеси ціноутворення в павутиноподібній моделі ринку
5. Ідентифікація швидких змін, стрибків, катастроф в економічних системах за допомогою теорії біфуркації
6. Дослідження моделі «хижак-жертва»
7. Модель самоорганізації ринку праці

Завдання для самостійної роботи:

1. Економічна інтерпретація у моделі «хижак-жертва»
2. Модифікації моделі «хижак-жертва»

Контрольні завдання та теми для обговорення:

1. Наведіть приклади використання логістичного відображення для моделювання економічної динаміки.
2. Проаналізуйте швидкі та повільні змінні у процесі аналізу макроекономічної динаміки для різних часових інтервалів. Наведіть приклади.
3. Які, на ваш погляд, параметри порядку визначають функціонування світової економіки, економічних систем розвинених країн та країн із перехідною економікою, фінансових, товарних, фондових ринків?
4. Проаналізуйте параметри порядку для економіки України в цілому, для окремих секторів та галузей

5. У чому полягає самоорганізація в павутиноподібній моделі ринку?
6. Сформулюйте модель самоорганізації на ринку праці
7. Сформулюйте найпростішу версію моделі «хижак-жертва». Скільки стаціонарних точок ви виявили? Дослідіть систему на стійкість та зобразіть графічно фазовий портрет системи.
8. Які можливості застосування теорії біфуркації в економіці?
9. Назвіть приклади синергетичних ефектів в економічних системах? Чи можуть бути економічні системи об'єктом дослідження синергетики?
10. Чи доцільно застосовувати лінійні моделі до нелінійних процесів та систем? У яких випадках?

Теми рефератів:

Порівняльний аналіз детерміністичного та ймовірнісного підходів у дослідженні еволюції складних систем на прикладі моделі «хижак-жертва»

Роль політичних рішень в умовах нестійкого економічного розвитку

Теорії Шумпетера, Кейнса й Ростоу в контексті синергетичних ідей

Ідеї Фрідріха фон Хайєка в контексті синергетичних підходів

Нелінійні моделі економічних процесів: економічне зростання, ділові цикли, динаміка міст

Тема 4. Основні поняття теорії синергетики

Перелік питань для обговорення на практичних заняттях:

1. Головні поняття теорії систем. Відкриті та закриті системи. Консервативні та дисипативні системи.
2. Поняття ентропії та хаосу.
3. Поняття хаосу. Атрактора, дивного атрактора
4. Процеси самоорганізації у складних системах
5. Точки біфуркації, їх аналіз та види.

Завдання для самостійної роботи:

1. Типові сценарії переходу до хаосу
2. Види та приклади біфуркацій станів рівноваги
3. Види та приклади біфуркацій періодичних розв'язків

Контрольні завдання та теми для обговорення:

1. Як ви розумієте терміни «динамічний хаос», «дивний атрактор», «дисипативна структура», «точки біфуркації», «фрактали»?
2. Які класифікації систем ви знаєте?
3. Як поділяють динамічні системи? Назвіть властивості дисипативних систем.
4. У чому полягає ідея введення фрактальної розмірності? Наведіть приклади фракталів.
5. Чим характеризуються нерівноважні стани систем?
6. Чим відрізняються детерміновані, стохастичні та хаотичні процеси?
7. Чим відрізняють перехідна та асимптотична поведінки дисипативних систем?
8. Назвіть характерні властивості хаотичних режимів

9. Що розуміють під поняттям «самоорганізація» в теорії синергетики?
10. Що розуміють під поняттями «хаос», «детермінований хаос» в теорії синергетики?
11. Як дослідити структурну стійкість динамічних систем? Яку зміну називають біфуркацією?
12. У чому суть біфуркації зриву рівноваги?
13. Біфуркація Андронова-Хопфа або біфуркація народження циклу як один із найпоширеніших видів біфуркації станів рівноваги
14. Біфуркація типу вилки: приклад та геометрична інтерпретація
15. Назвіть види та приклади біфуркацій періодичних розв'язків

Теми рефератів:

Теорія фракталів Бенуа Мандельброта

Фрактали у технічних, природних та соціальних системах

Теорія флуктуацій: суть, ідея, представники

Методи дослідження процесів самоорганізації в складних динамічних системах

Тема 5. Теоретичні засади синергетики. Лінійний аналіз стійкості динамічних систем

Перелік питань для обговорення на практичних заняттях:

1. Фазовий простір динамічної системи
2. Системи нелінійних диференціальних рівнянь із одним або двома ступенями вільності, автономні системи.
3. Дослідження стійкості системи

4. Аналіз фазових траєкторій.
5. Види розв'язків лінійних диференціальних систем другого порядку. Класифікація особливих точок

Завдання для самостійної роботи:

1. Системи нелінійних диференціальних рівнянь із трьома ступенями вільності
2. Неавтономні системи.
3. Методологія переходу від диференціальних рівнянь до скінчено-різницевих

Контрольні завдання та теми для обговорення:

1. Сформулюйте визначення положення рівноваги, стійкого за Ляпуновим
2. Сформулюйте визначення асимптотично стійкого положення рівноваги
3. Назвіть головні характеристики динамічних систем. Щорозуміють під поняттями «фазовий простір», «фазова точка», «фазовий потік», «фазовий портрет».
4. Запишіть закон еволюції динамічної системи у загальному вигляді. Запишіть закони еволюції для системи із двома динамічними змінними.
5. Запишіть закон еволюції автономної та неавтономної систем у загальному вигляді, у чому відмінність? Як перейти від неавтономної до автономної системи?
6. Сформулюйте ідею дослідження системи на стійкість
7. Запишіть лінеаризовану систему рівнянь
8. Яке рівняння називають характеристичним? Яка інтерпретація коренів характеристичного рівняння?
9. Назвіть можливі види особливих точок

10. Зобразіть графічно локальні фазові потоки для усіх видів особливих точок

11. Яке положення рівноваги називають нестійким?

Теми рефератів:

Ляпунов як основоположник теорії стійкості систем

Візуалізація фазових траєкторій динамічних систем із неперервним часом

Тема 6. Структурна стійкість і біфуркації динамічних систем

Перелік питань для обговорення на практичних заняттях:

1. Сучасні напрямки дослідження в синергетиці та нелінійній динаміці
2. Поняття катастрофи в синергетиці
3. Принцип підпорядкування Хакена
4. Теоретичний та практичний підхід у синергетиці
5. Методи обчислення та інтерпретація показника Ляпунова
6. Одномірні дискретні відображення. Приклад.
7. Логістичне відображення: аналіз та дослідження

Завдання для самостійної роботи:

1. Універсальність в поведінці нелінійних систем (універсальність Фейгенбаума)
2. Теорема Шарковського.

Контрольні завдання та теми для обговорення:

1. У чому полягає принцип підпорядкування Хакена?
2. Як ви розумієте термін «параметри порядку»? Наведіть приклади.

3. Що характеризують показники Ляпунова?
4. Що розуміють під поняттям «катастрофа» у теорії синергетики?
5. Діагностика хаотичних режимів за допомогою показника Ляпунова
6. Які методи обчислення показника Ляпунова ви знаєте?
7. Запишіть та дослідіть логістичне відображення? Для моделювання яких систем воно може бути використане?
8. Назвіть приклади одномірних дискретних відображень.
9. Сформулюйте ідею та методи теоретичного підходу в синергетиці
10. Сформулюйте ідею та методи практичного підходу в синергетиці
11. Сформулюйте ідею принципу універсальності Фейгенбаума.
12. Опишіть сценарій Фейгенбаума переходу до хаосу.
13. Сформулюйте теорему Шарковського.

Теми рефератів:

Мітчел Фейгенбаум та його вклад у теорію хаосу

Теорія катастроф: ідея та представники

Обчислення показника Ляпунова за допомогою нейронних мереж

Тема 7. Практичні методи теорії хаосу. Алгоритм реконструкції атрактора.

Перелік питань для обговорення на практичних заняттях:

1. Виявлення хаотичних режимів у емпіричних рядах економічної динаміки

2. Теорема Такенса. Алгоритм реконструкції атрактора. Прокляття розмірності
3. Методи визначення оптимальної часової затримки
4. Методи визначення розмірності простору вкладення
5. Топологічні характеристики атрактора

Завдання для самостійної роботи:

Контрольні завдання та теми для обговорення:

1. Чим відрізняється фрактальна розмірність атракторів від імовірнісної розмірності?
2. Доведіть, що інформаційна, кореляційна та фрактальна розмірності є частинним випадком розмірності Реньї.
3. У чому полягає ідея методів реконструкції атракторів? Алгоритм реконструкції атрактора.
4. Сформулюйте теорему Такенса. Яке її застосування у процесі реконструкції атрактора?
5. Якими методами можна визначити оптимальну часову затримку при реконструкції атрактора? Назвіть переваги та недоліки кожного із методів.
6. Якими методами можна визначити оптимальну розмірність простору вкладення при реконструкції атрактора? Назвіть переваги та недоліки кожного із методів.
7. Графічна інтерпретація методів визначення оптимальної часової затримки та розмірності простору вкладення у ході реконструкції атрактора.
8. Як розраховується і що дає змогу з'ясувати статистика Херста?
9. Який зв'язок можна спостерігати між показником перса та топологічними характеристиками атрактора?

10. У чому полягає прокляття розмірності при дослідженні нелінійної динаміки часових рядів? Чи можливий прогноз у таких випадках?

Теми рефератів:

Фрактальний аналіз хаотичної динаміки економічних часових рядів

Сучасні методи виявлення нелінійної динаміки у часових рядах

Тема 8. Моделювання фінансово-економічних систем на основі принципу підпорядкування

Перелік питань для обговорення на практичних заняттях:

1. Спеціальні методи дослідження нелінійної динаміки часових рядів.
2. Алгоритм Бенеттіна, алгоритм Вульфа обчислення максимального показника Ляпунова.
3. Методи обчислення показника Херста.
4. Класифікація часових рядів на основі показника Херста.
5. R/S аналіз економічних часових рядів. BDS-тест, метод сурогатних даних.
6. Метод рекурентних графіків аналізу економічних часових рядів.

Завдання для самостійної роботи:

1. Ідея BDS-тесту та особливості його застосування
2. Рекурентні графіки як сучасний підхід у виявленні хаотичної динаміки
3. Сурогатні дані: ідея методу та алгоритм застосування

Контрольні завдання та теми для обговорення:

1. Як інтерпретувати значення показника Ляпунова
2. Які алгоритми обчислення показника Ляпунова ви знаєте?
3. З якою метою обчислюють показник Херста?
4. Як класифікувати часові ряди за значенням показника Херста?
5. У чому суть методу рекрентних графіків?
6. Які паттерни можна спостерігати на рекуретних графіках?

Теми рефератів:

Підхід Петерса до фрактального моделювання фінансових ринків

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Білоус В. С. Синергетика та самоорганізація в економічній діяльності. Навч. посіб.. К. : КНЕУ, 2007. 376 с
2. Вітлінський, В. В., Діордіца, С. Г., Захарченко, П. В., Іванов, М. М., Кібальник, Л. О., Курбанов, К. Р., ... & Якимчук, Б. Б. Емерджентні методи для емерджентної економіки. 2017. 324 с.
3. Вознюк, О. В. (2013). Синергетика економічних систем: навчальний посібник.
4. Дербенцев, В. Д., Сердюк, О. А., Соловійов, В. М., & Шарапов, О. Д. (2010). Синергетичні та еконофізичні методи дослідження динамічних та структурних характеристик економічних систем.
5. Методологія наукових досліджень у статистиці : навч. посібник / [Матковський С. О., Вдовин М. Л., Гринькевич О. С., Зомчак Л. М., Лагоцький Т. Я., Панчишин Т. В.] – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2015. – 280 с.
6. Рогоза, М. Є., Рамазанов, С. К., & Мусаєва, Е. К. (2010). Нелінійні моделі та аналіз складних систем: навчальний посібник: в 2 ч.
7. Черняк, О. І., Захарченко, П. В., & Клебанова, Т. С. Теорія хаосу в економіці. Бердянськ, 2014. 244 с.
8. Zhang, W. B. (2013). *Synergetic economics: time and change in nonlinear economics* (Vol. 53). Springer Science & Business Media.
9. Rosser, J. B. (2013). *From catastrophe to chaos: a general theory of economic discontinuities*. Springer Science & Business Media
- 10.

Додаткова література:

11. Бакурова А. В. Самоорганізація соціально-економічних систем: моделі і методи : монографія. Класич. приват. ун-т. - Запоріжжя : КПУ, 2010. 328 с.
12. Козик В.В. Застосування біофізичних моделей у практичній економіці: монографія . Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 180 с.
13. Коляда, Ю. В., & Коляда
14. Кузьмін О.Є., Сидоров Ю. І., Козик В.В. Досягнення і проблеми еволюційної економіки: монографія . Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 252
15. Шарапов О.Д., Дербенцев О. Д., Семьонов Д.І. Економічна кібернетика: Навч. посібник. К.:КНЕУ, 2004. 231 с.
16. Arthur В. Complexity and the economy . SCIENCE. 1999. Vol. 284. P. 107-109.
17. Arthur, W. В. (2013). Complexity economics. *Complexity and the Economy*.
18. Arthur, W. В. (2021). Foundations of complexity economics. *Nature Reviews Physics*, 1-10.
 1. Ausloos M. Econophysics of stock and foreign currency exchange markets.
 2. Brock W. A. Heterogeneous beliefs and routes to chaos in a simple asset pricing model. *Journal of Economic Dynamics and Control*. 1998. № 22. P.1235-1274.
 3. Chiarella C. The dynamics of speculative behavior. *Annals of operations research*. 1992. № 37. P. 669-700.
 4. Hommes C. Financial markets as nonlinear adaptive evolutionary system . *Quantative finance*. 2001. № 1. P. 149-167.
 5. Hsieh D. Chaos and nonlinear dynamics: application to financial markets: application to financial markets. *Journal of finance*. 1991. № 46(5). P. 1839-1877.

6. Sornette D. Why Stock Markets Crash. Critical Events in Complex Financial Systems. Princeton, 2003.

7. Test for independence based on the correlation dimension / W.A. Brock; W.D. Dechert; J.A. Sheinkman, B. LeBaron // Econometric Reviews. 1996. №15(3). P. 197-235.

Підписано до друку 01.09.2022. Формат 60x90/16.
Умовн. друк. арк. 1,8 Тираж 50. Зам.
Надруковано у Малому видавничому центрі
Львівського національного університету імені Івана Франка
79008, м. Львів, проспект Свободи, 18

