

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Я.І. Виклюк, Р.М. Камінський, В.В. Пасічник

Моделювання складних систем

Посібник

Серія «КОМП’ЮТИНГ»

За загальною редакцією Лауреата державної премії України
в галузі науки і техніки, д.т.н., професора В.В. Пасічника

Львів
«Новий Світ – 2000»
2020

УДК
ББК

Відтворення цієї книги або будь-якої її частини заборонено без письмової згоди видавництва. Будь-які спроби порушення авторських прав будуть переслідуватися у судовому порядку.

*Гриф надано Вченою радою ПВНЗ «Буковинський університет»
(протокол № 4 від 23.02.2017р.)
та вченою радою Інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Національного університету «Львівська політехніка»
(протокол № 12 – 2016/2017 від 11.04.2017р.)*

Рецензенти

Цегелик Г.Г. – доктор фізико-математичних наук, завідувач кафедри математичного моделювання соціально-економічних процесів Львівського Національного університету імені Івана Франка;

Соколовський Я.І. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій Національного лісотехнічного університету України;

Литвин В.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних систем та мереж Національного університету «Львівська політехніка».

Я.І. Виклюк, Р.М. Камінський, В.В. Пасічник

Моделювання складних систем: посібник / – Львів: Видавництво «Новий Світ – 2000», 2020. – 404 с.

Навчальний посібник містить матеріал для вивчення основних засад загальної теорії систем та функціональних можливостей і практичного застосування лінійних та нелінійних методів для побудови математичних моделей складних систем, а також для розроблення прикладних засобів та інформаційних технологій на основі системного підходу. Теоретичний та практичний матеріал викладено у доступній формі. Викладення матеріалу супроводжується докладним поясненням та наведеними прикладами, що полегшує його сприйняття та засвоєння. Кожна тема завершується переліком питань для самоконтролю. Навчальний посібник призначається для студентів, що навчаються за спеціальностями 122 «Комп'ютерні науки та інформаційні технології» та 124 «Системний аналіз» і споріднених спеціальностей, які пов'язані з вивченням чисельних методів в інформатиці та інформаційних технологій. Приведений матеріал може бути використаний аспірантами в якості підґрунтя для наукових досліджень та викладачами в якості дидактичного матеріалу, а також для самостійного вивчення та підвищення кваліфікації. Книга призначена для спеціалістів з дослідження різних систем опрацювання інформаційних ресурсів, науковців у галузі моделювання систем, а також для здобувачів 3-ого (освітньо-наукового) рівня вищої освіти в галузі знань 12 «Інформаційні технології».

ISBN978-617-7519-05-7

© Я.І. Виклюк, Р.М. Камінський,
В.В. Пасічник, 2020
© ФОП Піча С.В.,
«Новий Світ – 2000», 2020

Зміст

Вступ	7
ТЕМА 1. Становлення вчення про системи.....	9
1.1. Системність світу.....	10
1.2. Системність пізнання	12
1.3. Виникнення і розвиток системних ідей.....	15
1.4. Історичний екскурс	17
1.5. Виникнення і розвиток науки про системи	27
ТЕМА 2. Поняття системи	34
2.1. Пізнання системи.....	34
2.2. Роль системотвірних чинників	36
2.3. Системність практичної діяльності людини	43
2.4. Аксиоми, принципи та закони в понятті системи.....	45
2.5. Функція зворотного зв'язку	50
ТЕМА 3. Стан та структура системи	54
3.1. Поняття стану системи.....	54
3.2. Функціонування системи та її характеристики.....	56
3.3. Поняття структури системи	61
3.4. Класифікація та види структур.....	64
3.5. Характеристики структур.....	67
3.6. Аналіз структур в організаційних системах.....	72
ТЕМА 4. Типізація та класифікація систем	77
4.1. Принципи класифікації систем.....	77
4.2. Класифікація систем за походженням	82
4.3. Класифікація систем за типом змінних	85
4.4. Класифікація систем за тип оператора	86
4.5. Класифікація систем за рівнем складності.....	88
4.6. Класифікація за відношенням до зовнішнього середовища	90
4.7. Класифікація систем за характером управління	91
4.8. Класифікація систем за їхніми властивостями	97
4.9. Схеми класифікації систем	103
4.10. Особливості основних типів систем	105
ТЕМА 5. Складні системи.....	107
5.1. Поняття складності системи	107
5.2. Закономірності складних систем.....	109
5.3. Закономірності взаємодії частини і цілого	111
5.4. Закономірності ієрархічної впорядкованості систем	113
5.5. Закономірність «необхідної різноманітності»	115
5.6. Закономірність цілеутворення	116
5.7. Закономірності розвитку систем	119

5.8. Важливі закони і принципи складних систем	120
5.9. Роль часу в ієрархії систем	122
5.10. Принципи становлення	123
5.11. Принцип підпорядкованості та спостережуваності	127
5.12. Головні принципи самоорганізованих систем	129
ТЕМА 6. Ієрархія систем	132
6.1. Загальні положення ієрархічних систем.....	132
6.2. Ієрархічність систем управління	134
6.3. Основні принципи існування ієрархічних систем	137
6.4. Відношення ієрархії.....	140
6.5. Взаємозв'язок цільових функцій з законами ієрархії.....	143
6.6. Багаторівневий системний підхід.....	146
6.7. Основні види ієрархій	147
6.8. Шари	152
6.9. Багатоешелонні системи	156
6.10. Зв'язок між різними поняттями рівня.....	159
6.11. Роль і значення саме ієрархічних структур	163
6.12. Залежність між рівнями та їх координованість	165
6.13. Збір інформації.....	169
ТЕМА 7. Математичний опис систем	172
7.1. Кількісні методи опису систем.....	172
7.2. Якісні методи опису інформаційних систем	175
7.3. Внутрішній опис	178
7.4. Зовнішній опис системи.....	179
7.5. Опис систем з скінченим числом станів.....	180
7.6. Способи опису систем.....	181
7.7. Функціональний опис.....	182
7.8. Морфологічний опис	184
7.9. Інформаційний опис	189
7.10. Кібернетичний підхід до опису систем	195
7.11. Поняття математичної моделі	197
7.12. Основні поняття теорії загальних систем.....	201
7.13. Загальні часові системи.....	202
7.14. Початкові стани і початкові реакції системи.....	204
7.15. Загальні динамічні системи	205
ТЕМА 8. Диференціальні рівняння в моделюванні систем.....	208
8.1. Поняття і суть диференціального рівняння.....	208
8.2. Диференціальні рівняння динаміки систем	209
8.3. Загальні властивості лінійних диференціальних рівнянь	212
8.4. Диференціальні рівняння та математичне моделювання.....	213
8.5. Побудова математичних моделей	217
8.6. Приклади задач на звичайні диференціальні рівняння	219
8.7. Приклади складання диференціальних рівнянь	223

ТЕМА 9. Подання складних систем часовими рядами	225
9.1. Характеристика експериментальних даних	226
9.2. Формування часових рядів.....	228
9.3. Загальні характеристики часових рядів та їх моделей.....	231
9.4. Моделювання тренду часової послідовності	232
9.5. Методи згладжування часових рядів.....	235
9.6. Властивості ковзного середнього	238
9.7. Експоненціальне згладжування.....	241
9.8. Медіанна фільтрація	242
9.9. Оцінювання властивостей часових рядів	244
ТЕМА 10. Методи відновлення пропусків в експериментальних даних	250
10.1. Причини пропущених даних і проблеми їх відновлення.....	251
10.2. Методи заповнення пропусків в таблицях даних	252
10.3. Методи заповнення пропусків в часових рядах.....	259
ТЕМА 11. Моделювання випадкових подій.....	265
11.1. Засади моделювання випадкових величин	265
11.2. Методи моделювання подій	267
11.3. Моделювання випадкових величин	272
11.4. Моделювання базової послідовності випадкових чисел.....	275
11.5. Випадкові числа із заданим законом розподілу	279
ТЕМА 12. Особливості і підходи в моделюванні систем	283
12.1. Моделювання як метод наукового пізнання	283
12.2. Поняття моделі.....	286
12.3. Види моделей	291
12.4. Матеріальні (фізичні) та абстрактні моделі	292
12.5. Класифікація моделей	296
12.6. Побудова моделей	298
12.7. Підходи та принципи в моделюванні систем	300
12.8. Процес моделювання.....	302
12.9. Математичне моделювання.....	306
12.10. Методи моделювання систем.....	315
12.11. Моделі в дослідженні та проектуванні складних систем.....	318
12.12. Моделювання динамічних систем.....	319
ТЕМА 13. Кластерний аналіз.....	322
13.1. Суть кластерного аналізу	323
13.2. Поняття класу.....	326
13.3. Модель кластерного аналізу	327
13.4. Підготовка даних до кластерного аналізу	329
13.5. Агломеративний ієрархічний кластерний аналіз.....	338
13.6. Приклад ієрархічного агломеративного кластерного аналізу.....	341

ТЕМА 14. Фрактальний аналіз часових рядів.....	348
14.1. Самоподібність та фрактальна розмірність.....	349
14.2. Індекс фрактальності в аналізі часових рядів.....	352
14.3. Метод нормованого розмаху.....	354
14.4. Визначення фрактальної розмірності.....	357
14.5. Обчислення показника Херста.....	360
ТЕМА 15. Фазовий аналіз часових рядів.....	365
15.1. Основні поняття фазового аналізу.....	366
15.2. Поняття атрактора.....	368
15.3. Елементи теорії фазових портретів.....	370
15.4. Основа методів нелінійної динаміки.....	373
15.5. Побудова фазового портрету.....	376
15.6. Виділення квазіциклів.....	379
ТЕМА 16. Рекурентний аналіз складних систем.....	385
16.1. Застосування рекурентного аналізу.....	386
16.2. Рекурентність та рекурентні діаграми.....	388
16.3. Аналіз рекурентних діаграм.....	393
16.4. Побудова рекурентної діаграми в MS Excel.....	395
16.5. Кількісний аналіз рекурентних діаграм.....	396
<i>Список літератури.....</i>	<i>400</i>

Вступ

Одним з основних сучасних підходів до пізнання оточуючого нас світу є методи і технології математичного моделювання складних систем. Складні системи мають універсальні емерджентні властивості, які не знаходять адекватного розуміння у рамках традиційних парадигм. Тому для аналізу таких систем все активніше використовуються методи та моделі фундаментальних наук, які у поєднанні з сучасними досягненнями в галузі інформаційних технологій та досить ємних баз даних забезпечують значний прогрес у глибокому розумінні їх природи. Можна з впевненістю вважати, що значний поступ в розвитку інформаційних технологій та програмного забезпечення зумовлений, в першу чергу, потребами моделювання таких систем. Математичне моделювання, здійснене на основі теорії систем, а відтак і системного підходу, значно підвищує ефективність процесів проектування та управління.

Моделювання складних систем, як наукова дисципліна, перебуває в постійному розвитку та пошуку нових методів та інформаційних технологій, як для оброблення даних, так і для побудови, на основі отриманих результатів, математичних моделей об'єктів дослідження.

Мета даного курсу зосереджена на формуванні системи теоретичних знань та практичних навичок щодо моделювання структурних і динамічних властивостей складних систем на основі різноманітних даних спостережень за системними показниками. Запропоновані методи дослідження складних систем набули широкого застосування в різноманітних галузях не лише наукового пізнання, але і безпосередньо для вирішення завдань практики. За останні два – три десятиліття суттєво змінилося розуміння фундаментальних закономірностей функціонування систем.

Метою даного посібника є ознайомлення студентів з одним з базових підходів до моделювання складних систем, а саме, на підставі результатів експериментальних досліджень поданих у формі часових рядів. Даний підхід полягає у вивченні функцій досліджуваного об'єкта на основі побудованої його математичної моделі, а вже за допомогою цієї моделі отримують результати, для обґрунтованого прийняття відповідальних рішень. Основна увага зосереджена саме на методах формування математичного опису поведінки системи. Для цього використовуються математичні моделі розподілів, параметри та моделі часових рядів, диференціальні рівняння, методи відновлення пропущених значень, кластерний аналіз. Особливим є те, що в даний посібник включені такі методи нелінійної динаміки: визначення фрактальних характеристик, побудови та аналізу фазових портретів, побудови і обчислення характеристик рекурентних діаграм.

Основною задачею, для даного посібника є підготувати студентів до аналізу та моделювання складних систем на основі отриманих експериментальних даних, особливою яких є наявність хаотичної складової.

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

Курс базується на знаннях, одержаних при вивченні дисциплін математичного

циклу, інформатики, основи теорії систем та системного аналізу, моделювання.

Завдання курсу – оволодіння теоретичними знаннями та інструментарієм моделювання, дослідження й аналізу складних систем, методів прогнозування їхнього розвитку та функціонування цих систем за різних умов.

Предметом курсу є математичні моделі складних систем, основані на експериментальних даних, поданих часовими рядами, диференціальними рівняннями, фазовими портретами фрактальними характеристиками.

У результаті вивчення дисципліни студент повинен:

знати структурні та динамічні характеристики системи; основні методи оцінки якості функціонування; методи оцінки структурних змін; методи дослідження та моделювання та прогнозування складних систем;

вміти здійснювати класифікацію характеристик досліджуваної системи, проводити порівняльний аналіз методів прогнозування; оцінити якість функціонування ієрархічної системи;

дослідити та проаналізувати комплекс моделей складної системи.

Система контролю якості навчання студентів містить такі заходи: організація самостійної роботи студентів передбачає підготовку до семінарських та лабораторних занять, проведення індивідуальних консультацій, виконання курсової роботи.

Існуючі підручники і методичні посібники з курсу „Моделювання складних систем” багато в чому повторюють традиційну структуру викладення матеріалу чим спонукали авторів розробити методичні підходи до впровадження методів нелінійної динаміки, орієнтуючись на експериментальний матеріал спостережень за досліджуваною системою.

Структура посібника відображає таку концепцію авторського бачення: основні поняття теорії систем, доповнення методів описової статистики методами аналізу часових рядів, використання апарату теорії множин та диференціальних рівнянь, введення практичних вказівок до застосування методів нелінійної динаміки – фрактального, фазового та рекурентного аналізів.

Посібник складається з 16 тем, які завершуються контрольними питаннями. Автори будуть вдячні за конструктивні зауваження спрямовані на покращення змісту та методики викладання даної дисципліни.