

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до самостійної роботи з дисципліни  
«Комп'ютерне моделювання динаміки систем» для магістрантів спеціальності  
8.05020101 – комп'ютеризовані системи управління та автоматика

ЗАТВЕРДЖЕНО  
кафедрою системотехніки.  
Протокол № 4 від 21.10.2015 р.

Харків 2016

Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни «Комп'ютерне моделювання динаміки систем» для магістрантів спеціальності 8.05020101 – комп'ютеризовані системи управління та автоматика / Упор. В.В. Безкоровайний. – Харків: ХНУРЕ, 2016. – 32 с.

Рецензент Є.В. Бодянський, д-р техн. наук, професор, професор кафедри ІІІ.

## ЗМІСТ

Вступ .....	4
1 Мета та задачі дисципліни .....	5
1.1 Мета навчальної дисципліни .....	5
1.2 Програма знань і умінь .....	5
2 Робоча програма дисципліни .....	6
2.1 Нормативні дані з дисципліни .....	6
2.2 Розподіл обсягу змістовних модулів за видами занять .....	6
2.3 Лабораторні роботи .....	9
2.4 Самостійна робота .....	9
2.5 Рейтингова оцінка за дисципліною .....	10
2.5.1 Кількісні критерії оцінювання .....	10
2.5.2 Якісні критерії оцінювання .....	11
2.6 Рекомендована література .....	13
3 Характеристика підручників і навчальних посібників .....	14
4 Методичні вказівки із вивчення дисципліни .....	15
4.1 Вступ .....	15
4.2 Аналітичне моделювання динаміки об'єктів .....	16
4.3 Імітаційне моделювання динаміки .....	18
4.4 Динамічна модель виробничо-збутової системи .....	20
4.5 Перспективи розвитку засобів моделювання .....	21
5 Рекомендації з використання обчислювальної техніки .....	22
6 Орієнтовний графік вивчення дисципліни .....	22
7 Приклади розв'язання типових задач .....	23
7.1 Побудова аналітичної моделі динаміки об'єкта .....	23
7.2 Визначення траєкторії руху об'єкта за допомогою аналітичної моделі .....	25
7.3 Визначення неусталених реакцій показникових запізнень імітаційних моделей динаміки .....	25
7.4 Ідентифікація параметрів показникових запізнень імітаційних моделей динаміки .....	29
7.5 Дослідження динаміки виробничо-збутової системи .....	31

## ВСТУП

Як узагальнений об'єкт діяльності фахівців спеціальності 8.05020101 – «комп'ютеризовані системи управління та автоматика» визначено системи планування, автоматизації і управління технічними, технологічними та організаційними об'єктами. Підчас проектування, удосконалення чи управління подібними об'єктами виникає необхідність прогнозування їх властивостей. При цьому для них характерною є контрінтуїтивна поведінка, що не дозволяє досліднику адекватно спрогнозувати їх динаміку. Серед причин такого явища виділяють складність об'єктів, спотворення інформації, запізнення та підсилення, що мають місце в них. Проведення ж натурних експериментів на самому об'єкті, як правило, неможливе (об'єкта ще немає, об'єкт недоступний, небезпека ушкодження об'єкта) або недоцільно (ризик великих втрат). Ефективним засобом аналізу динаміки у таких випадках є комп'ютерне моделювання.

Вивчення дисципліни «Комп'ютерне моделювання динаміки систем» спрямоване на освоєння магістрантами сучасної технології розв'язання задач моделювання із застосуванням сучасних комп'ютерних засобів і пакетів програм моделювання. Для успішного засвоєння матеріалу курсу необхідні знання та навички, отримані студентами при вивченні дисциплін: **вища математика** (лінійна алгебра та аналітична геометрія, диференціальні рівняння); **інформатика** (побудова обчислювальних алгоритмів, мови програмування); **чисельні методи** (методи розв'язання систем алгебраїчних і диференціальних рівнянь, наближення функцій); **математичне моделювання** (принципи побудови моделювальних алгоритмів; побудова моделей систем за методом ідентифікації); **теорія автоматичного управління** (моделі об'єктів у змінних «входи-виходи» та у змінних стану).

Вивчення дисципліни передбачає відвідування циклу лекцій, виконання завдань лабораторних робіт і самостійну роботу студента. Формами проміжного контролю отриманих знань та набутих навичок є контрольні роботи (тести), підсумкового контролю – модульний або комбінований іспит.

Метою лекційних занять є ознайомлення студентів із сучасними засобами математичного і програмного забезпечення технологій моделювання динаміки елементів систем планування і управління технічними, технологічними та організаційними об'єктами. У лекціях розкриваються фундаментальні питання дис-

ципліни, визначається зміст усіх інших видів навчальних занять і самостійної роботи студентів.

Метою виконання лабораторних робіт є набуття студентами навичок побудови чи модифікації моделей та дослідження динаміки функціонування об'єктів методами комп'ютерного моделювання.

Самостійна робота студента передбачає опрацювання лекційного матеріалу та підготовку до виконання індивідуальних типових завдань лабораторних робіт.

У зв'язку із можливими змінами навчальних планів підготовки фахівців за спеціальністю «комп'ютеризовані системи управління та автоматика» можливі відповідні зміни у робочій програмі дисципліни «Комп'ютерне моделювання динаміки систем», про суть яких повідомляється студентам на вступній лекції.

## **1 МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДИСЦИПЛІНИ**

### **1.1 Мета навчальної дисципліни**

Вивчення методології і технології математичного комп'ютерного моделювання динаміки в процесах проектування, дослідження та експлуатації складних систем; набуття практичних навичок використання математичного моделювання в задачах аналізу і синтезу систем планування, автоматизації і управління.

### **1.2 Програма знань і умінь**

У результаті вивчення дисципліни студенти повинні:

**знати:** основні класи моделей, етапи та задачі комп'ютерного моделювання динаміки об'єктів, принципи побудови моделей та моделювальних алгоритмів системної динаміки, методи аналізу аналітичних та імітаційних моделей;

**уміти:** вибирати тип моделі для опису досліджуваного об'єкта, вирішувати основні задачі побудови моделей, вибирати методи її дослідження, програмувати або вибирати програмні засоби та проводити комп'ютерне дослідження моделей динаміки.

## 2 РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

### 2.1 Нормативні дані з дисципліни

	Семестр <u>9</u>					Характеристика дисципліни
Кількість годин	120					Цикл: самостійного вибору ВНЗ Форма навчання: денна Курс: 5 Семестр: 9 Дисципліна вивчається з 2009 р.
Кількість залікових кредитів (ECTS)	3					
Аудиторних занять	56	лк	пз	лб	конс.	
		32	–	16	8	
Самостійна робота	64					
Курсовий проект	–					
Форма контролю	Модульний іспит					

### 2.2 Розподіл обсягу змістовних модулів за видами занять

Таблиця 2.2 – Розподіл обсягу змістовних модулів за видами занять

Залік. кред.	Зміст. мод.	Назва та зміст змістовного модуля	Розподіл часу за видами занять, год.					Рейт. оцінка
			лк	лб	пз	срс		
							кз	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	1	1 Вступ	2	—	—	2		1 – 2
		1.1 Моделювання як метод аналізу динаміки керованих об’єктів. Предмет дисципліни, її мета, завдання та зміст. Основні поняття й визначення: система, структура, динаміка, управління; принципи управління (розімкнене, за збуренням, за відхиленням); закони регулювання (пропорційний, інтегральний, пропорційно-інтегральний, диференціальний). Приклади задач моделювання динаміки. Види моделювання динаміки (аналітичне, імітаційне).						

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
		<b>2 Аналітичне моделювання динаміки об'єктів</b>	10	4	–	24		23–38
		2.1 Диференціальні моделі керованих об'єктів. Опис об'єктів у змінних входи-виходи та змінних стану. Приклади моделей динаміки керованих об'єктів. 2.2 Перетворення моделей динаміки. Схема перетворення моделей. Приведення моделей до форми Коші. 2.3 Методи аналізу моделей динаміки. Аналітичні, обчислювальні та якісні методи аналізу. Методи перетворення Лапласа, розкладання в ряд, Рунге-Кутта*. 2.4 Спеціальні методи аналізу динаміки. Якісні, комбіновані, діакоптичні методи. Моделювання динаміки об'єктів на аналогових обчислювальних машинах (АОМ). 2.5 Побудова моделей за методом ідентифікації*. Ідентифікація лінійних динамічних об'єктів. Стійкість моделей і розв'язків.		4		4 4		
		<b>Підсумок</b>	<b>12</b>	<b>4</b>	<b>–</b>	<b>26</b>		<b>20–34</b>
<b>II</b>	<b>2</b>	<b>3 Імітаційне моделювання динаміки</b>	8	8	–	20		21–35
		3.1 Принципи побудови моделювальних алгоритмів*. Форми зображення моделювальних алгоритмів. 3.2 Принципи побудови та структура імітаційних моделей динаміки. Базова структура моделі. Рівні, темпи, рішення, діаграми потоків. Типи потоків (мереж). 3.3 Системи рівнянь імітаційних моделей динаміки. Символи в діаграмах потоків. Правила і розв'язки в динамічних керованих системах.				2		

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
		3.4 Показникові запізнення динамічних моделей. Оцінка придатності моделей. Агрегування змінних. Екзогенні змінні. 3.5 Програмне забезпечення моделювання динаміки об'єктів. Мови та пакети програм моделювання. Пакети програм для розв'язання обчислювальних задач моделювання. Пакети програм імітаційного моделювання динаміки.		4 4		4 4		
						2	кр	
		<b>Підсумок</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	–	<b>20</b>		<b>22–36</b>
<b>III</b>	<b>3</b>	<b>4 Динамічна модель виробничо-збутової системи</b>	10	4	–	14		14–24
		4.1 Структура виробничо-збутової системи. Мета моделювання і фактори, що включаються до моделі. 4.2 Модель підсистеми роздрібної ланки. Система рівнянь і діаграма потоків моделі. 4.3 Модель підсистеми оптової ланки. Система рівнянь і діаграма потоків моделі. 4.4 Модель підсистеми виробництва. Система рівнянь і діаграма потоків моделі. 4.5 Рівняння початкових умов і параметри моделі. Аналіз динаміки виробничо-збутової системи.						
		<b>5 Перспективи розвитку засобів моделювання</b>	2	–	–	4		1 – 2
		5.1 Шляхи розвитку й вдосконалення методів та засобів моделювання динаміки керованих об'єктів				2	кр	
		<b>Підсумок</b>	<b>12</b>	<b>4</b>	–	<b>18</b>		<b>18–30</b>
		<b>Всього за семестр</b>	<b>32</b>	<b>16</b>	–	<b>64</b>		<b>60–100</b>

**Примітка:** \* – питання для поглибленого самостійного опрацювання.



## 2.3 Лабораторні роботи

№ зміст. модуля	Теми занять	Обсяг, годин	Рейтинг. оцінка	Літер. джер.
1	2	3	4	5
1	Дослідження динаміки об'єктів за допомогою аналітичних моделей	4	5 – 9	[6-9, 11-13]
2	Дослідження характеристик показникових запізнень імітаційних моделей динаміки	4	5 – 9	[2, 11-14]
2	Ідентифікація показникових запізнень імітаційних моделей динаміки	4	5 – 9	[6-9, 11-13]
3	Дослідження динаміки виробничо-збутової системи	4	5 – 9	[2, 6, 11-14]
<b>Загальна кількість</b>		<b>16</b>	<b>20 – 36</b>	–

## 2.4 Самостійна робота студента

№ зміст. модуля	Вид самостійної роботи	Обсяг, годин	Літерні джерела
1 – 3	Опрацювання лекційного матеріалу	32	[1 – 14]
1	Самостійне поглиблене опрацювання лекційного матеріалу: – методи аналізу моделей динаміки (перетворення Лапласа, розкладання в ряд, Рунге-Кутта);	4	[6, 11-13] [9, 11] [10-11]
1			
2	– побудова моделей систем за методом ідентифікації; – принципи побудови моделювальних алгоритмів.	4	
		2	
1 – 3	Підготовка до лабораторних робіт	16	[2, 6-9, 11-14]
1 – 3	Підготовка до контрольних робіт	6	[11]
<b>Загальна кількість</b>		<b>64</b>	–

## 2.5 Рейтингова оцінка за дисципліною

### 2.5.1 Кількісні критерії оцінювання

Для оцінювання роботи студента протягом семестру підсумкова рейтингова оцінка  $O_{сем}$  розраховується як сума оцінок за всі види занять та контрольні заходи.

Рейтингова оцінка	Вид заняття / контрольний захід
5 – 9	Лабораторна робота № 1
15 – 25	Контрольна робота № 1
<b>20 – 34</b>	<b>Контрольна точка 1</b>
5 – 9	Лабораторна робота № 2
5 – 9	Лабораторна робота № 3
12 – 18	Контрольна робота № 2
<b>21 – 35</b>	<b>Контрольна точка 2</b>
5 – 9	Лабораторна робота № 4
13 – 21	Контрольна робота № 3
<b>15 – 25</b>	<b>Контрольна точка 3</b>
<b>60 – 100</b>	<b>Загальна оцінка</b>

Для форми підсумкового контролю у вигляді письмового (комбінованого) іспиту підсумкова оцінка  $O$  обчислюється за формулою:

$$O = (0,6 \times O_{сем} + 0,4 \times O_{ісп}),$$

де  $O_{сем}$  – оцінка за семестр у 100-бальній системі;

$O_{ісп}$  – оцінка за іспит у 100-бальній системі.

Білет для письмового (комбінованого) іспиту складається з п'яти теоретичних запитань та практичного завдання. Теоретичні запитання оцінюються в 15 балів кожне, а практичне завдання – в 25 балів.

## 2.5.2 Якісні критерії оцінювання

### Необхідний обсяг знань для одержання позитивної оцінки.

1. Моделювання як метод аналізу динаміки керованих об'єктів. Основні поняття й визначення: система, структура, динаміка, управління; принципи управління (розімкнене, за збуренням, за відхиленням); закони регулювання (пропорційний, інтегральний, пропорційно-інтегральний, диференціальний). Види моделювання динаміки (аналітичне, імітаційне).

2. Аналітичне моделювання динаміки об'єктів. Диференціальні моделі керованих об'єктів. Опис об'єктів у змінних входи-виходи та змінних стану. Методи аналізу моделей динаміки: перетворення Лапласа, розкладання в ряд, Рунге-Кутта. Моделювання динаміки на АОМ. Побудова моделей за методом ідентифікації. Ідентифікація лінійних динамічних об'єктів.

3. Імітаційне моделювання динаміки. Принципи побудови та структура імітаційних моделей динаміки. Базова структура моделі. Рівні, темпи, рішення, діаграми потоків. Типи потоків (мереж). Системи рівнянь імітаційних моделей динаміки. Символи в діаграмах потоків. Показникові запізнення динамічних моделей. Програмне забезпечення моделювання динаміки об'єктів. Мови та пакети програм моделювання для розв'язання обчислювальних задач та імітаційного моделювання.

4. Динамічна модель виробничо-збутової системи. Структура виробничо-збутової системи. Мета моделювання і фактори, що включаються до моделі. Модель підсистеми роздрібної ланки. Система рівнянь і діаграма потоків моделі. Аналіз динаміки виробничо-збутової системи.

5. Перспективи розвитку засобів моделювання. Шляхи розвитку й вдосконалення методів та засобів моделювання динаміки керованих об'єктів.

### Необхідний обсяг умінь для одержання позитивної оцінки.

1. Уміти розв'язувати задачі параметричної ідентифікації найпростіших об'єктів.

2. Уміти за постановкою задачі визначати клас моделі та обирати метод моделювання динаміки об'єкта.

3. Уміти побудувати програму і виконати моделювання динаміки нескладних об'єктів у середовищі пакетів *MathCAD (MathLab)* та *VenSim*.

### **Критерії оцінювання роботи студента протягом семестру.**

**1. Задовільно, D, E (60-74 бали).** Відпрацювати та захистити всі лабораторні роботи з оцінками не нижче мінімальних. Мати знання основного навчального матеріалу в обсязі, необхідному для подальшого навчання та майбутньої професійної діяльності; бути ознайомленим з основною літературою, рекомендованою програмою; припускатися помилок у відповідях, при тестуванні та при виконанні завдань тощо, які він може усунути самостійно або під керівництвом та за допомогою викладача. Мати навички моделювання у середовищі пакетів *MathCAD (MathLab)* та *VenSim*.

**2. Добре, C (75-89 балів).** Відпрацювати та захистити всі лабораторні роботи з оцінками не нижче середніх. Мати добрі знання навчального матеріалу; засвоїти основну літературу, рекомендовану програмою; показати систематичний характер знань із дисципліни; бути здатним до їх самостійного використання та поповнення в процесі подальшої навчальної роботи і професійної діяльності. Мати стійкі навички програмування і моделювання у середовищі пакетів *MathCAD (MathLab)* та *VenSim*.

**3. Відмінно, A, B (90-100 балів).** Відпрацювати та захистити всі лабораторні роботи з оцінками не нижче, ніж "добре". Уміти логічно, чітко, стисло та ясно трактувати навчальний матеріал; мати систематичні та глибокі знання навчального матеріалу з даної дисципліни вище середнього рівня; уміти вільно виконувати завдання, передбачені робочою програмою; засвоїти літературу, рекомендовану програмою; засвоїти взаємозв'язок основних понять дисципліни та їх значення для подальшої професійної діяльності.

### **Критерії оцінювання знань та вмінь студента на комбінованому іспиті.**

**1. Задовільно, D, E (60-74 бали).** Показати необхідний мінімум теоретичних знань. Знати шляхи та методи розв'язання практичного завдання та вміти застосовувати їх на практиці.

**2. Добре, C (75-89 балів).** Твердо знати мінімум теоретичних знань. Показати; вміння розв'язувати практичне завдання та обґрунтування всі етапи запропонованого рішення.

**3. Відмінно, A, B (90-100 балів).** Показати повні знання основного та до-

даткового теоретичного матеріалу. Безпомилково розв'язати практичне завдання, пояснити та обґрунтувати обраний метод розв'язання.

## **2.6 Рекомендована література**

**1.** Конспект лекцій із дисципліни «Динамічне моделювання» для студентів спеціальностей 7.080402 – інформаційні технології проектування та 7.091401 – системи управління і автоматики / Упоряд. В.В. Безкоровайний. – Харків: ХНУРЕ, 2008. – 84 с.

**2.** Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. Пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.

**3.** Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг: Пер. с англ. – М.: Наука, 1991. – 432 с.

**4.** Воронов А.А. Введение в динамику сложных управляемых систем / А.А. Воронов. – М.: Наука, 1985. – 352 с.

**5.** Основы моделирования сложных систем / Л.М.Дыхненко, В.Ф. Кабаненко, И.В. Кузьмин и др. / Под общ. ред. И.В. Кузьмина. – К.: Вища шк., 1981. – 360 с.

**6.** Калиткин Н.Н. Чисельні методи / Н.Н. Калиткин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 592 с.

**7.** Советов, Б.Я. Моделирование систем / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.

**8.** Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия / Дж. Форрестер. – М.: Прогресс, 1971. – 340 с.

**9.** Экономико-математическое обеспечение управленческих решений в менеджменте / Под ред. В.М.Вартаняна. – Харьков: ХГЭУ, 2001. – 288 с.

**10.** Томашевский В.М. Моделювання систем / В.М. Томашевский. – К.: Видавнична група ВНУ, 2005. – 352 с.

**11.** Глушков С.В., Жакин И.А., Хачиров Т.С. Математическое моделирование: Учебный курс / С.В. Глушков, И.А. Жакин, Т.С. Хачиров. – Харьков: Фолио, М.: АСТ, 2001. – 524 с.

**12.** Методические указания к лабораторным работам по дисциплинам «Динамика управляемых систем» для студентов специальности 7.091401 – системы управления и автоматики и «Динамическое моделирование» для студентов специальности 7.080401 – информационные технологии проектирования [Текст] / Сост. В.В. Бескоровайный, Е.В. Назаренко. – Харьков: ХНУРЭ, 2004. –

44 с.

**13.** Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Комп'ютерне моделювання динаміки систем» для магістрантів спеціальності 8.05020101 – комп'ютеризовані системи управління та автоматика / Упор. В.В. Безкоровайний. – Харків: ХНУРЕ, 2015. – 42 с.

**14.** ДСТУ 3008–95. Документація. Звіти в сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Введено в дію 23.02.95. – К.: Держстандарт України, 1995. – 36 с.

**15.** ГОСТ 19.701–90 (ИСО 5807–85). Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. – Введен 01.01.92. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 26 с.

### **3 ХАРАКТЕРИСТИКА ПІДРУЧНИКІВ І НАВЧАЛЬНИХ ПОСІБНИКІВ**

Матеріал конспекту лекцій [1] містить матеріал, що охоплює всі теми, передбачені робочою програмою дисципліни та є достатнім для теоретичної підготовки за робочою програмою дисципліни «Комп'ютерне моделювання динаміки систем».

Наукові монографії [2–4] містять об'ємний матеріал із математичного моделювання об'єктів з чисельними прикладами із різних сфер людської діяльності і рекомендуються тим, хто прагне ознайомитись з проблемами моделювання динаміки об'єктів поза межами робочої програми дисципліни.

У роботі [4], зокрема, міститься матеріал щодо подання моделей у формах змінних «входи-виходи» та змінних стану, а також детально описано процедуру переходу від моделей у змінних стану до моделей у змінних «входи-виходи».

Підручник [5] буде корисним під час вивчення матеріалу розділу 2 «Аналітичне моделювання динаміки об'єктів», зокрема, за темами «Приведення моделей до форми Коші», «Аналітичні методи аналізу динаміки» (методи перетворення Лапласа, розкладання в ряд), «Моделювання динаміки об'єктів на АОМ», «Побудова моделей за методом ідентифікації».

Підручник [6] буде корисним при вивченні методів аналітичного моделювання динаміки об'єктів шляхом чисельного розв'язання систем звичайних диференціальних рівнянь, зокрема, методом Рунге-Кутта.

У підручнику [7] викладено теорію математичного моделювання систем. Він стане в нагоді для поновлення знань у галузі імітаційного моделювання, зокрема, у ньому детально описано суть принципів побудови моделювальних ал-

горитмів та описано основні форми подання моделювальних алгоритмів: графічні схеми, граф-схеми, операторні схеми (з висвітленням їх переваг і недоліків).

Крім того в ньому подано матеріал щодо перспектив розвитку засобів моделювання.

У монографії [8] міститься оригінальний матеріал, що подає детальний опис методології системної динаміки (розділ 3) та приклад моделювання динаміки виробничо-збутової системи (розділ 4). Зокрема, в ній сформульовано принципи побудови імітаційних моделей динаміки, описано їх базову структуру, системи рівнянь та символи, що використовуються в діаграмах потоків.

Підручник [9] слід розглядати як джерело скороченого подання моделі виробничо-збутової системи, детально описаної в монографії [8].

Роботу [10] слід розглядати як ще одне додаткове джерело поновлення знань у галузі теорії та практики математичного моделювання. Крім того в ній подано матеріал щодо перспектив розвитку засобів моделювання.

Навчальний курс [11] опис та технологію роботи з пакетами програм розв'язання обчислювальних задач моделювання *MathCAD*, *MatLab*, що можуть бути використані для розв'язання завдань лабораторних робіт.

Методичні вказівки [12 – 13] містять достатній матеріал для підготовки та виконання завдань лабораторних робіт із дисципліни, а також детальний опис меню і технології роботи з пакетом програм імітаційного моделювання *VenSim*.

Крім наведеної вище літератури, при оформленні звітів із лабораторних робіт рекомендується використовувати стандарти [14 – 15].

## **4 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ З ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ**

### **4.1 Вступ**

Починати вивчення дисципліни доцільно з усвідомлення того, що комп'ютерне моделювання в наш час є обов'язковою складовою всіх етапів проектування, створення й експлуатації технічних, організаційно-технічних і економічних об'єктів. При цьому доцільно з'ясувати основні поняття та визначення, що складають термінологічну основу дисципліни: *об'єкт, система, структура, стан, динаміка, моделювання, модель (математичні, аналітичні, імітаційні моделі)*.

Враховуючи те, що динаміка антропогенних об'єктів визначається керуючим впливом (сигналами), який здійснюється системою керування (регулято-

ром), відповідно до їх мети, впливу збурення, стану та обраного закону керування, слід пригадати основні види керування: *розімкнене, за збуренням, за відхиленням*, а також закони керування, що використовуються під час керування за відхиленням (*пропорційний, інтегральний, пропорційно-інтегральний, пропорційно-інтегрально-диференціальний*).

На завершення вивчення розділу слід розглянути приклади задач моделювання динаміки об'єктів.

Література: [1, с. 5–9; 2, с. 21–35; 3, с. 15–19].

### **Контрольні запитання та завдання**

1. З якою метою здійснюється моделювання об'єктів?
2. Надайте приклади задач моделювання динаміки об'єктів.
3. Дайте визначення системи як форми подання об'єкта.
4. Дайте визначення динаміки об'єкта.
5. Чим визначається динаміка керованого об'єкта?
6. Надайте визначення основних принципів управління.
7. Перерахуйте закони управління, які використовують у сучасних системах управління.
8. Запишіть рівняння моделі для пропорційного закону управління.
9. Запишіть рівняння моделі для інтегрального закону управління.
10. Запишіть рівняння моделі для пропорційно-інтегрального закону управління.
11. Запишіть рівняння моделі для пропорційно-інтегрально-диференціального закону управління.
12. Назвіть та дайте визначення методів моделювання динаміки.

### **4.2 Аналітичне моделювання динаміки об'єктів**

Аналітичні моделі динаміки об'єктів представляють собою системи диференціальних рівнянь. Тому, починаючи вивчення цієї теми, доцільно повторити основні поняття і визначення диференціального та інтегрального числення. Потім необхідно ознайомитися з формами подання таких моделей у змінних входи-виходи та змінних стану та розглянути приклади моделей задач аналізу динаміки об'єктів [1–3].

Для виконання аналізу аналітичної моделі у змінних стану її, зазвичай, не-



обхідно привести до канонічної форми (задачі Коші) [1, 5]. З цією метою використовується прийом зниження порядку рівнянь шляхом заміни змінних. Іншим випадком є перехід від моделей у змінних стану до моделей у змінних входи-виходи [1, 4].

Слід звернути увагу, що аналітичні методи аналізу застосовні лише до найпростіших моделей. У загальному випадку використовуються чисельні методи (розкладання в ряд, Рунге-Кутта), точність яких підвищується із зменшенням кроку інтегрування.

У тих випадках, коли часова складність методів чисельного інтегрування не дозволяє отримувати рішення заданої точності за визначений час доцільно використовувати спеціальні методи аналізу динамки (якісні, комбіновані, діакоптичні), які дозволяють суттєво зменшити час моделювання [1].

Моделювання динаміки об'єктів на аналогових обчислювальних машинах доцільно почати з вивчення структури машин цього класу, їх переваг та недоліків щодо цифрових комп'ютерів, етапів і завдань аналогового моделювання. Після цього можна переходити до вивчення методу програмування аналогових машин і вивчення прикладів програм для дослідження моделей (розв'язання диференціальних рівнянь та їх систем) [1, 5].

Вивчення процедури побудови моделей за методом ідентифікації доцільно почати зі з'ясування суті процесу ідентифікації [1, 5] і ознайомлення з переліком основних завдань, починаючи з вибору класу і структури моделі і, закінчуючи оцінкою точності та адекватності моделі. При цьому слід чітко розрізняти задачі структурної та параметричної ідентифікації.

Після ознайомлення з класифікацією методів ідентифікації важливо докладно розібрати методи найменших і найменших зважених квадратів, які найчастіше використовуються на практиці. На закінчення доцільно ознайомитись із задачею ідентифікації лінійних динамічних об'єктів [1–4].

Література: [1, с. 31–38, 84–107; 4, с. 11–16, 47, 54; 5, с. 10–25; 6, с. 279–284].

### **Контрольні запитання та завдання**

1. У яких формах подаються диференціальні моделі динаміки об'єктів?
2. Наведіть приклад диференціальної моделі динаміки об'єкта.
3. З якою метою здійснюються перетворення диференціальних моделей

динаміки?

4. У чому суть процедури перетворення моделей у змінних стану до форми Коші?

5. Запишіть співвідношення для переходу від моделей у змінних стану до моделей у змінних входи-виходи.

6. Опишіть процедуру аналізу динаміки об'єкта за методом перетворення Лапласа.

7. Запишіть співвідношення для визначення траєкторії руху об'єкта за методом розкладання в ряд.

8. Запишіть співвідношення для визначення траєкторії руху об'єкта за методом Рунге-Кутта.

9. З якою метою використовують спеціальні методи аналізу динаміки? Назвіть приклади таких методів.

10. У чому полягає суть якісних методів аналізу динаміки?

11. Що входить до складу аналогових обчислювальних машин?

12. Опишіть основні етапи підготовки моделювання та програмування АОМ для розв'язання звичайного диференційного рівняння  $n$ -порядку.

13. Опишіть суть процедури ідентифікації об'єкта.

14. Яким чином забезпечуються умови ідентифікуємості та спостерігаємості об'єкта?

15. Запишіть співвідношення для ідентифікації лінійного динамічного об'єкта.

#### **4.3 Імітаційне моделювання динаміки**

Почати вивчення цього розділу слід із з'ясування суті поняття «імітаційне моделювання» і його принципової відмінності від аналітичного моделювання, ознайомлення з принципами побудови моделювальних алгоритмів. Після цього необхідно повторити основні форми подання моделювальних алгоритмів: графічні схеми, граф-схеми, операторні схеми, відзначаючи їх переваги і недоліки [1–2, 7].

У курсі розглядаються імітаційні моделі динаміки, що побудовані на основі методології Дж. Форрестера. Почати вивчення моделей цього класу слід з розгляду базової структури моделі, що представляє собою мережу з рівнів і правил рішення з інформаційними зв'язками між ними [1, 8–9]. Після цього можна переходити до вивчення форм основних рівнянь (рівнів, темпів, допоміжних,

додаткових, початкових умов) та порядку їх розв’язання, а також символів діаграм потоків. Слід звернути увагу на специфічні рівні, що отримали назву запізнювань, вивчити системи рівнянь для опису показових запізнювань різних порядків, їх характеристики (постійні запізнювання і неусталені реакції) [1, 8].

Вивчення теми «Програмне забезпечення моделювання динаміки об’єктів» доцільно почати з вимог, що пред’являються до мов моделювання та класифікації мов, що використовуються для розв’язання задач моделювання. В якості основної можна використовувати класифікацію, запропоновану в [1, 7]. При цьому необхідно чітко усвідомити переваги і недоліки мов загального призначення та мов імітаційного моделювання.

Вивчення питань побудови та застосування пакетів програм моделювання доцільно почати зі з’ясування причин їх появи та широкого розповсюдження, виявлення задач моделювання, для автоматизації розв’язання яких вони призначені [1, 7]. Потім можна розглянути типову структуру пакета програм моделювання та коротко ознайомитись із можливостями сучасних пакетів розв’язання обчислювальних задач моделювання (*MathCAD*, *MatLab*, *Mathematica*) та імітаційного моделювання (*Simulink*, *Stella*, *Think*, *Powersim*) [1, 7, 10–11]. Більш детально рекомендується ознайомитися з широко розповсюдженим пакетом імітаційного моделювання динаміки бізнес-процесів *VenSim* [12–13].

Література: [1, с. 32–53; 7–11; 12, с. 31–41].

### **Контрольні запитання та завдання**

1. Назвіть основні принципи побудови моделювальних алгоритмів. Опишіть їх суть.
2. Опишіть основні форми подання моделювальних алгоритмів.
3. Які характерні риси повинна мати імітаційна модель динаміки об’єкта?
4. Опишіть базову структуру імітаційної моделі динаміки?
5. Назвіть види рівнянь імітаційних моделей динаміки.
6. У якому порядку розв’язуються рівняння імітаційних моделей динаміки?
7. Яким чином визначається інтервал розв’язання рівнянь (крок моделювання)  $dt$  ?
8. Наведіть символи, що використовуються для подання діаграм потоків моделей динаміки.

9. Наведіть діаграму потоків показникового запізнювання третього порядку.
10. Запишіть систему рівнянь для показникового запізнювання третього порядку.
11. Наведіть реакції показникових запізнювань на імпульсний та ступінчастий вхідні сигнали.
12. Що називають «хвостами» показникових запізнювань?
13. Наведіть схему та опишіть суть процесу прийняття рішень на основі аналізу рівнів стану.
14. Які рекомендації використовуються підчас агрегування змінних моделей динаміки?
15. Дайте загальну характеристику мов, які використовуються для моделювання динаміки об'єктів.
16. Які пакети програм використовуються для моделювання динаміки об'єктів?

#### **4.4 Динамічна модель виробничо-збутової системи**

Вивчення цього розділу доцільно почати зі знайомства з описом об'єкта моделювання, його структурою, прийнятою технологією обслуговування замовлень, метою моделювання [1, 8–9]. Після цього слід детально вивчити перелік факторів, що включаються до моделі. Повторивши матеріал, присвячений складанню рівнянь і діаграм потоків динамічних моделей, можна переходити до розгляду моделей окремих підсистем, детально розібравши модель роздрібної ланки. Паралельно з розглядом системи основних рівнянь моделі слід вивчати відповідну діаграму потоків [1, 8–9].

Після вивчення системи основних рівнянь необхідно розглянути систему рівнянь, що визначають початкові умови та вхідний вплив. Завершити вивчення розділу слід детальним аналізом результатів моделювання перехідних процесів системи при зміні попиту на товар.

Література: [1, с. 53–80; 8, с. 17–169; 9, с. 120–143].

#### **Контрольні запитання та завдання**

1. Опишіть виробничо-збутову систему як об'єкт моделювання.
2. З якою метою здійснюється моделювання виробничо-збутової систе-

ми?

3. Які фактори повинні бути включені до моделі виробничо-збутової системи?
4. Опишіть діаграму потоків для ланки роздрібної торгівлі.
5. Дивлячись на діаграму потоків, запишіть систему рівнянь для підсистеми роздрібної ланки.
6. Накресліть діаграму потоків для ланки оптової торгівлі.
7. Дивлячись на діаграму потоків, запишіть систему рівнянь для підсистеми оптової ланки.
8. Опишіть діаграму потоків для ланки виробництва.
9. Дивлячись на діаграму потоків, запишіть систему рівнянь для підсистеми виробництва.
10. Яким чином доцільно встановлювати початкові значення змінних моделі.
11. Опишіть реакцію виробничо-збутової системи на ступінчасту зміну попиту на товар.
12. Опишіть реакцію виробничо-збутової системи на періодичну зміну потоку замовлень.

#### **4.5 Перспективи розвитку засобів моделювання**

Розвиток і удосконалення засобів моделювання динаміки об'єктів базується на успіхах у розвитку математики, обчислювальної техніки, інформаційних технологій, засобів телекомунікацій. При цьому основними напрямками розвитку й вдосконалення методів та засобів моделювання динаміки керованих об'єктів є удосконалення існуючих і розробка нових:

- математичних моделей, що більш адекватно описують досліджувані процеси;
- більш точних і економічних методів;
- більш зручних програмних засобів;
- більш потужних технічних засобів.

При розгляді напрямів розвитку та вдосконалення методів і засобів моделювання систем планування, автоматизації і управління слід розрізняти чотири аспекти: моделі, методи, програми та технічні засоби, що використовуються для їх дослідження [1].

Література: [1, с. 81–83; 7, с. 322–331; 10, с. 9–19, 336–339].

## Контрольні запитання та завдання

1. У чому полягає необхідність подальшого розвитку засобів моделювання динаміки?
2. У яких напрямках здійснюється розвиток й вдосконалення методів та засобів моделювання динаміки керованих об'єктів?
3. У чому полягає суть діакоптичних методів аналізу динаміки?
4. Опишіть властивості інтелектуальних паралельних комп'ютерів на прикладі *Інпарком*.

## 5 РЕКОМЕНДАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

При вивченні дисципліни рекомендується завдання лабораторних робіт виконувати на персональних комп'ютерах, що функціонують під керуванням операційної системи *Windows* із застосуванням пакетів програм для розв'язання обчислювальних задач моделювання (*MathCAD*, *MatLab* тощо) [11] та пакету програм імітаційного моделювання *VenSim* [12–13].

## 6 ОРІЄНТОВНИЙ ГРАФІК ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

Таблиця 6.1 – Навчальний графік із дисципліни "Моделювання систем"

Види занять		Навчальні тижні																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Лекції	обсяг, год	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	–	2	–	2	–
Лабораторні роботи	обсяг, год					4	4			4	4						4		
Практичні заняття	обсяг, год																		
Самостійна робота студентів	обсяг, год	1	1	5	5	6	6	1	4	5	5	3	1	1	1	1	5	3	
Точки контролю							кр+					кр+						кр+	
Курсовий проект	консультація																		
	точки контролю																		
Консультації				1		1		1		1		1		1		1		1	
Строки проведення заліків, іспитів																			мод ісп.

## 7 ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ТИПОВИХ ЗАДАЧ

### 7.1 Побудова аналітичної моделі динаміки об'єкта

**Постановка задачі 1.** Необхідно розв'язати задачу параметричної ідентифікації об'єкта у такій постановці.

За результатами спостереження у моменти часу  $t = \{t_i\} = \{0, 1, 2, 3\}$  над вихідними змінними об'єкта  $y(t_i)$  (табл. 7.1) необхідно побудувати найкращу за критерієм найменших квадратів її математичну модель у вигляді полінома 2-го ступеня

$$y(t) = q_0 t^2 + q_1 t + q_2, \quad (7.1)$$

де  $q_i, i = \overline{0,2}$  – коефіцієнти полінома.

Таблиця 7.1 – Значення вихідних сигналів об'єкта

$t_i$	1	2	3	4
$y(t_i)$	1	3	10	15

**Розв'язання задачі 1.** Позначимо вихід моделі у моменти часу  $t_i, i = \overline{0,3}$  через  $y_m(t_i), i = \overline{0,3}$ . З урахуванням цього критерій найменших квадратів матиме вигляд:

$$K[y(t_i), y_m(t_i)] = \sum_{i=0}^3 [y(t_i) - y_m(t_i)]^2 \rightarrow \min_q, \quad (7.2)$$

де  $q = [q_0, q_1, q_2]$  – вектор параметрів моделі (7.1).

Відомо, що найкращі значення параметрів моделі  $q = [q_0, q_1, q_2]$  визначаються із умов мінімуму критерію ідентифікації

$$\frac{dK[y(t_i), y_m(t_i)]}{dq_0} = 0; \quad \frac{dK[y(t_i), y_m(t_i)]}{dq_1} = 0; \quad \frac{dK[y(t_i), y_m(t_i)]}{dq_2} = 0$$

і для моделі виду (7.1) є розв'язками системи лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned}
q_0 \sum_{i=0}^3 t_i^4 + q_1 \sum_{i=0}^3 t_i^3 + q_2 \sum_{i=0}^3 t_i^2 &= \sum_{i=0}^3 t_i^2 y(t_i); \\
q_0 \sum_{i=0}^3 t_i^3 + q_1 \sum_{i=0}^3 t_i^2 + q_2 \sum_{i=0}^3 t_i^1 &= \sum_{i=0}^3 t_i^1 y(t_i); \\
q_0 \sum_{i=0}^3 t_i^2 + q_1 \sum_{i=0}^3 t_i^1 + q_2 \sum_{i=0}^3 t_i^0 &= \sum_{i=0}^3 t_i^0 y(t_i).
\end{aligned} \tag{7.3}$$

Після підстановки даних із табл. 7.1 в (7.3) отримаємо систему рівнянь

$$\begin{aligned}
354q_0 + 100q_1 + 30q_2 &= 343; \\
100q_0 + 30q_1 + 10q_2 &= 97; \\
30q_0 + 10q_1 + 4q_2 &= 29,
\end{aligned}$$

розв'язок якої  $q = [0,75; 1,15; -1,25]$  дає найкращі значення коефіцієнтів моделі

$$y(t) = 0.75 t^2 + 1.15 t - 1.25.$$

Протокол розв'язання задачі у середовищі пакету програм *MathCAD* поданий на рис. 7.1.

$$\begin{aligned}
t &:= \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} & y &:= \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \\ 10 \\ 15 \end{pmatrix} \\
A &:= \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^3 (t_i)^4 & \sum_{i=0}^3 (t_i)^3 & \sum_{i=0}^3 (t_i)^2 \\ \sum_{i=0}^3 (t_i)^3 & \sum_{i=0}^3 (t_i)^2 & \sum_{i=0}^3 (t_i)^1 \\ \sum_{i=0}^3 (t_i)^2 & \sum_{i=0}^3 (t_i)^1 & \sum_{i=0}^3 (t_i)^0 \end{bmatrix} & b &:= \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^3 [(t_i)^2 \cdot y_i] \\ \sum_{i=0}^3 [(t_i)^1 \cdot y_i] \\ \sum_{i=0}^3 [(t_i)^0 \cdot y_i] \end{bmatrix} \\
q &:= A^{-1} \cdot b & q &= \begin{pmatrix} 0.75 \\ 1.15 \\ -1.25 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$



Рисунок 7.1 – Протокол розв'язання задачі 1 у середовищі *MathCAD*

## 7.2 Визначення траєкторії руху об'єкта за допомогою аналітичної моделі

**Постановка задачі 2.** Модель динаміки вільного руху об'єкта у формі Коші подана системою звичайних диференціальних рівнянь виду:

$$\dot{z} = Az(t), \quad (7.4)$$

з початковими умовами  $z(t_0) = z^{(0)}$ ,

де  $z(t)$  – шукана вектор-функція координат (станів) об'єкта розмірністю 3;

$A$  – матриця постійних коефіцієнтів розмірністю  $3 \times 3$ ;

$z^{(0)}$  – вектор початкових умов розмірністю 3.

Необхідно визначити динаміку об'єкта на відрізку часу  $0 \leq t \leq 10$ . За початкові умови  $z(t_0)$  вибрати один із власних векторів матриці  $A$  (такий, що відповідає раціональному власному значенню, та має всі ненульові компоненти).

**Розв'язання задачі 2.** Для визначення власних векторів матриці необхідно попередньо обчислити власні значення  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , що є коренями характеристичного рівняння

$$\det(A - \lambda E) = 0, \quad (7.5)$$

де  $E$  – одинична матриця.

Власні вектори  $x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}$  матриці  $A$  є розв'язками систем лінійних алгебраїчних рівнянь, що мають вигляд

$$(A - \lambda_i \cdot E) x^{(i)} = 0, \quad i = 1, 2, 3 \quad (7.6)$$

і визначаються з точністю до постійного множника.

Для розв'язання задачі скористаємось методом Рунге-Кутта 4-го порядку, що реалізований у пакеті програм *MathCAD*.

Протокол розв'язання задачі 2 у середовищі пакету програм *MathCAD* поданий на рис. 7.2.

## 7.3 Визначення неусталених реакцій показникових запізнень імітаційних моделей динаміки

**Постановка задачі 3.** Визначити неусталені реакції показникових запізнень першого, другого та третього порядків на імпульсну (амплітуда – 100%, тривалість – 3 одиниці часу) та ступінчасту амплітудою + 50 % зміну темпу вхідного потоку. Інтервал дослідження – 100 одиниць часу, початкове значення

усталеного темпу вхідного потоку – 1000 одиниць за одиницю часу, стала запізнення –  $PZ=30$  одиниць часу.

$$A := \begin{pmatrix} 0.2 & 0 & 0 \\ -0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & -0.2 \end{pmatrix}$$

$$\lambda := \text{eigenvals}(A) \quad \lambda = \begin{pmatrix} -0.2 \\ 0.1 \\ 0.2 \end{pmatrix} \quad x := \text{eigenvec}(A, 0.2) \quad x = \begin{pmatrix} 0.223 \\ -0.893 \\ -0.391 \end{pmatrix}$$

$$h := \begin{pmatrix} 0.223 \\ -0.893 \\ -0.391 \end{pmatrix} \quad D(t, h) := A \cdot h$$

$$z := \text{rkfixed}(h, 0, 10, 100, D) \quad n := 0, 1 \dots 100$$

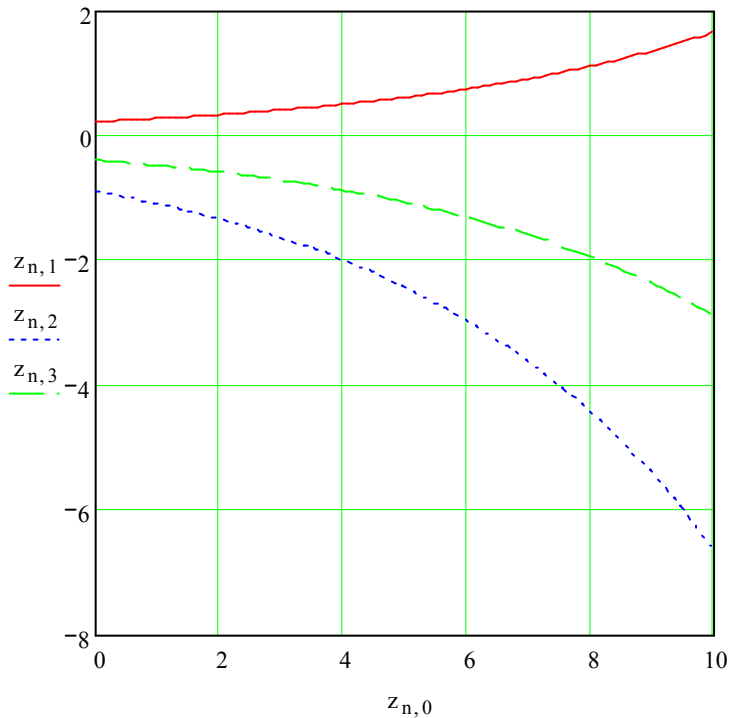


Рисунок 7.2 – Протокол розв'язання задачі 2 у середовищі *MathCAD*

**Розв'язання задачі 3.** Показникове запізнення першого порядку складається з рівня (що поглинає різницю темпів вхідного і вихідного потоків) і темпу вихідного потоку, що залежить від величини рівня і середнього запізнення (сталої). Система рівнянь, що описує його динаміку має вид:

$$\begin{aligned}(1-U): U.K &= U.J + DT * (IN.JK - OUT.JK); \\(2-T): OUT.KL &= U.K / PZ; \\(1-N): U &= IN * PZ,\end{aligned}\tag{7.7}$$

де  $U$  – рівень, що знаходиться у запізненні;  
 $DT$  – крок моделювання (інтервал розв'язання рівнянь);  
 $IN$  – темп вхідного потоку;  
 $OUT$  – темп вихідного потоку;  
 $PZ$  – стала запізнення.

Показникове запізнення другого порядку складається з двох послідовно з'єднаних запізнень першого порядку. Його модель подається системою рівнянь:

$$\begin{aligned}(3-U): U1.K &= U1.J + DT * (IN.JK - F12.JK); \\(4-T): F12.KL &= U1.K / (PZ / 2); \\(5-U): U2.K &= U2.J + DT * (F12.JK - OUT.JK); \\(6-T): OUT.KL &= U2.K / (PZ / 2); \\(2-N): U1 &= U2 = IN * PZ / 2,\end{aligned}\tag{7.8}$$

де  $U1, U2$  – рівні, що знаходяться в запізненні;  
 $DT$  – крок моделювання;  
 $IN, F12, OUT$  – темпи вхідних і вихідних потоків;  
 $PZ$  – стала запізнення.

Показникове запізнення третього порядку складається з трьох послідовно з'єднаних запізнень першого порядку (рис. 7.3).

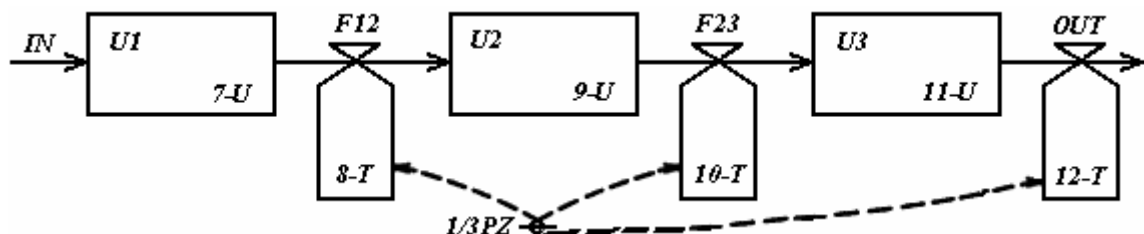


Рисунок 7.3 – Діаграма потоків показникового запізнення третього порядку

Модель показникового запізнення третього порядку подається системою рівнянь:

$$\begin{aligned}
(7-U): U1.K &= U1.J + DT * (IN.JK - F12.JK); \\
(8-T): F12.KL &= U1.K / (PZ / 3); \\
(9-U): U2.K &= U2.J + DT * (F12.JK - F23.JK); \\
(10-T): F23.KL &= U2.K / (PZ / 3); \\
(11-U): U3.K &= U3.J + DT * (F23.JK - OUT.JK); \\
(12-T): OUT.KL &= U3.K / (PZ / 3); \\
(3-N): U1 &= U2 = U3 = IN * PZ / 3,
\end{aligned}
\tag{7.9}$$

де  $U1, U2, U3$  – рівні, що знаходяться в запізненні;

$DT$  – крок моделювання;

$IN, F12, F23, OUT$  – темпи вхідних і вихідних потоків ланок;

$PZ$  – стала запізнення.

Крок моделювання виберемо з урахуванням того, що він повинен бути меншим за половину довжини імпульсу  $DT = 1 < \frac{3}{2}$ .

Запрограмувавши системи рівнянь (7.7) – (7.9) мовою високого рівня або в пакеті програм *VenSim*, після виконання програми отримаємо шукані таблиці та графіки перехідних процесів. Результати розв'язання задачі за допомогою пакету програм *DynMod*, створеного на кафедрі системотехніки, наведені на рис. 7.4 – 7.5.

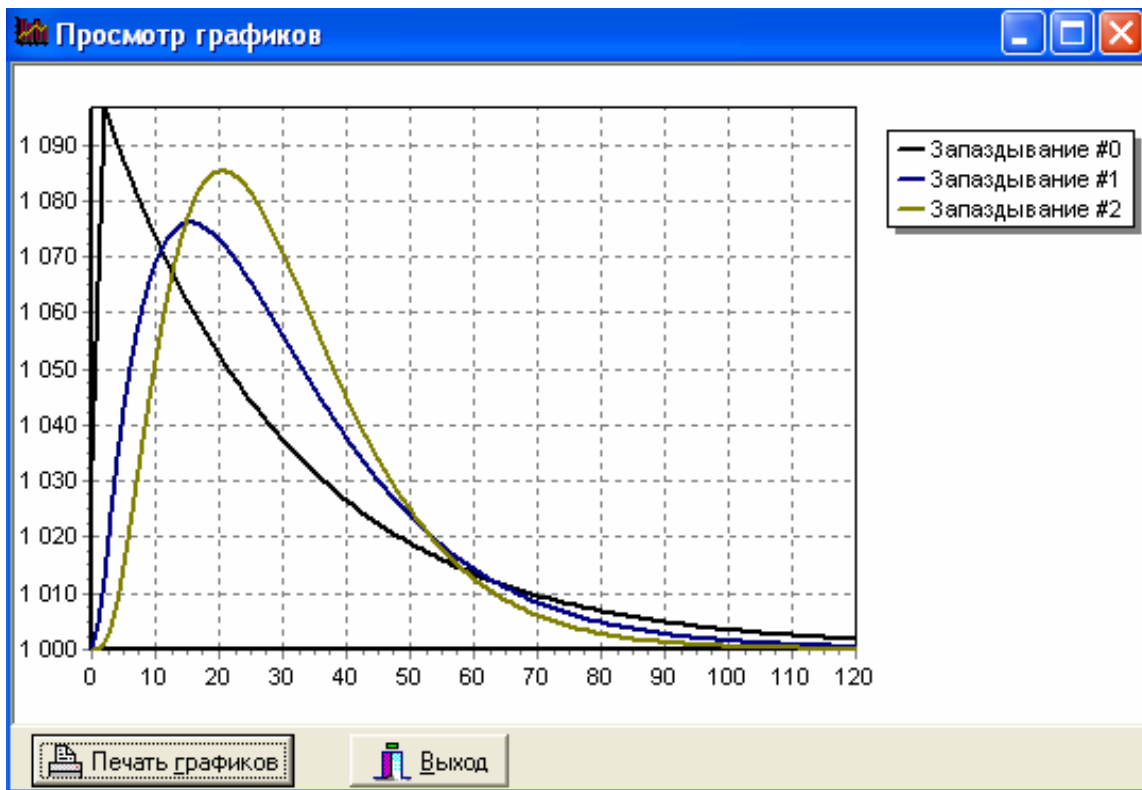


Рисунок 7.4 – Неусталена реакція показникових запізнень першого, другого та третього порядків на імпульсну (амплітуда – 100%, тривалість – 3 одиниці часу) зміну темпу вхідного потоку

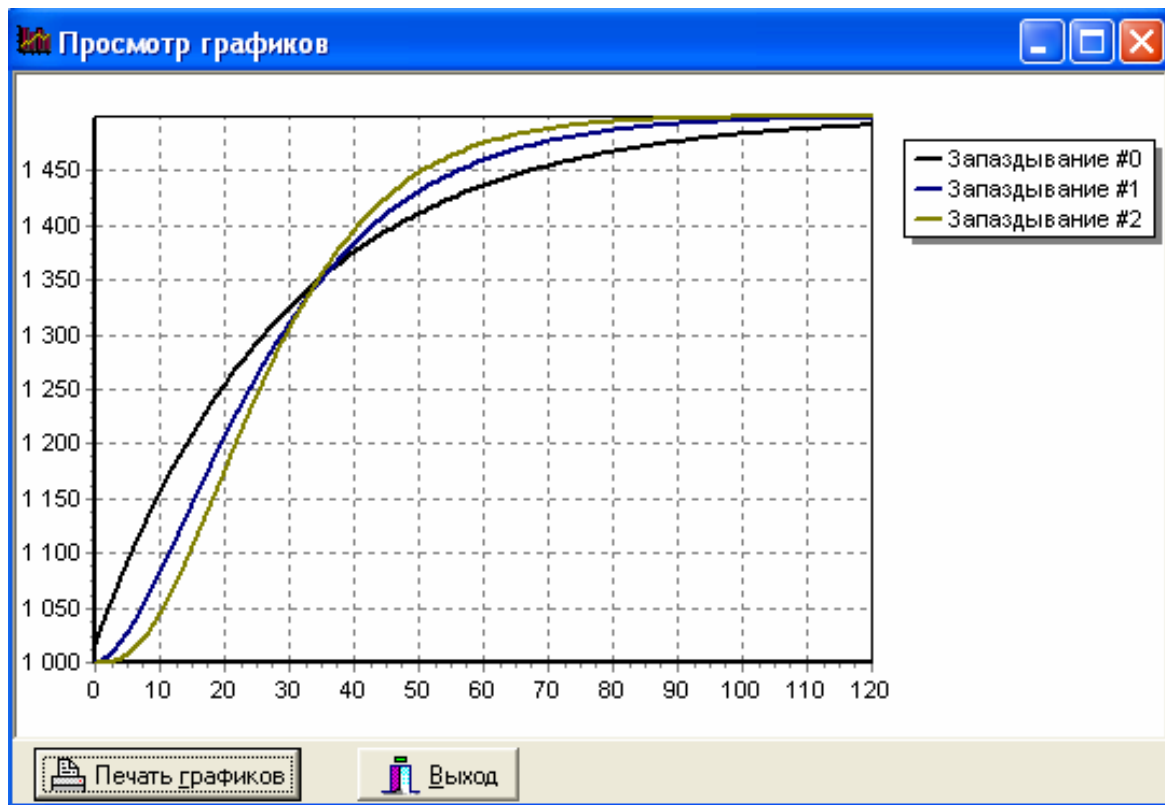


Рисунок 7.5 – Неусталена реакція показникових запізнень першого, другого та третього порядків на ступінчасту амплітудою + 50 % зміну темпу вхідного потоку

#### 7.4 Ідентифікація параметрів показникових запізнень імітаційних моделей динаміки

**Постановка задачі 4.** Об'єктом дослідження є фрагмент виробничо-збутової системи, що складається з виробничого підприємства та десяти оптових баз. З підприємства в момент часу  $t = t_0$  починається відправка до оптових баз по 1000 одиниць товару за кожну годину (порівну до кожної бази). Час транспортування товарів до оптових баз відповідно складає: 15, 21, 25, 30, 35, 42, 5, 55, 60 та 75 години. За результатами спостереження над вхідними  $u(t)$  і вихідними  $y(t)$  (надходження товару до оптових баз) темпами потоків об'єкта необхідно вибрати оптимальні параметри (порядок та сталу) показникового запізнення, що адекватно описує процес транспортування товарів.

**Розв'язання задачі 4.** Закон зміни темпу вхідного потоку для об'єкта ( $u(t_0) = 0$ ;  $u(t) = 1000$  для  $t \geq t_0$ ) є екзогенною змінною. Темп вихідного потоку об'єкта  $y(t)$  визначається у моменти часу  $t_1, t_2, \dots, t_{10}$ , що відповідають запізненням в кожному з елементарних каналів, шляхом підсумовування їх зважених ви-

хідних темпів потоків в усіх каналах.

Вибір моделі будемо здійснювати на множині показникових запізнень від першого до шостого порядку, що дозволяють адекватно описувати подібні процеси. Як критерій близькості використаємо мінімум суми модулів відхилень для значень темпів вихідних потоків об'єкта і моделі.

Інтервал дослідження  $t^*$  повинен бути більшим за найтриваліше запізнення по всім каналам. Виходячи з цього  $t^* = 104 > 75$ .

Відповідно до існуючих вимог крок моделювання повинен бути не більшим за  $1/6$  запізнювання третього порядку. Виходячи з цього, він становитиме  $DT = 3 \leq 15/6$ .

Результати розв'язання задачі за допомогою пакету програм *DynMod* наведені на рис. 7.6 – 7.7.

За результатами розрахунків встановлено, що найкраще процес транспортування товарів до заданої мережі оптових баз описується показникових запізненням четвертого порядку з параметром (сталою) 40,8.

4. Идентификация параметров показательных запаздываний

Количество каналов: 10

Входной темп: 1000

Шаг моделирования: 3,00

Время моделирования: 104

Рассчитать

№	Запаздыв...	Весовой К...
1	15	0,1
2	21	0,1
3	25	0,1
4	30	0,1
5	35	0,1
6	42	0,1
7	50	0,1
8	55	0,1
9	60	0,1
10	75	0,1

Порядок оптимального запаздывания: 4

константа запаздывания: 40,80

Графики и отчет ...

Выход

Рисунок 7.6 – Екранна форма вхідних даних та результатів розв'язання задачі 4 у пакеті *DynMod*

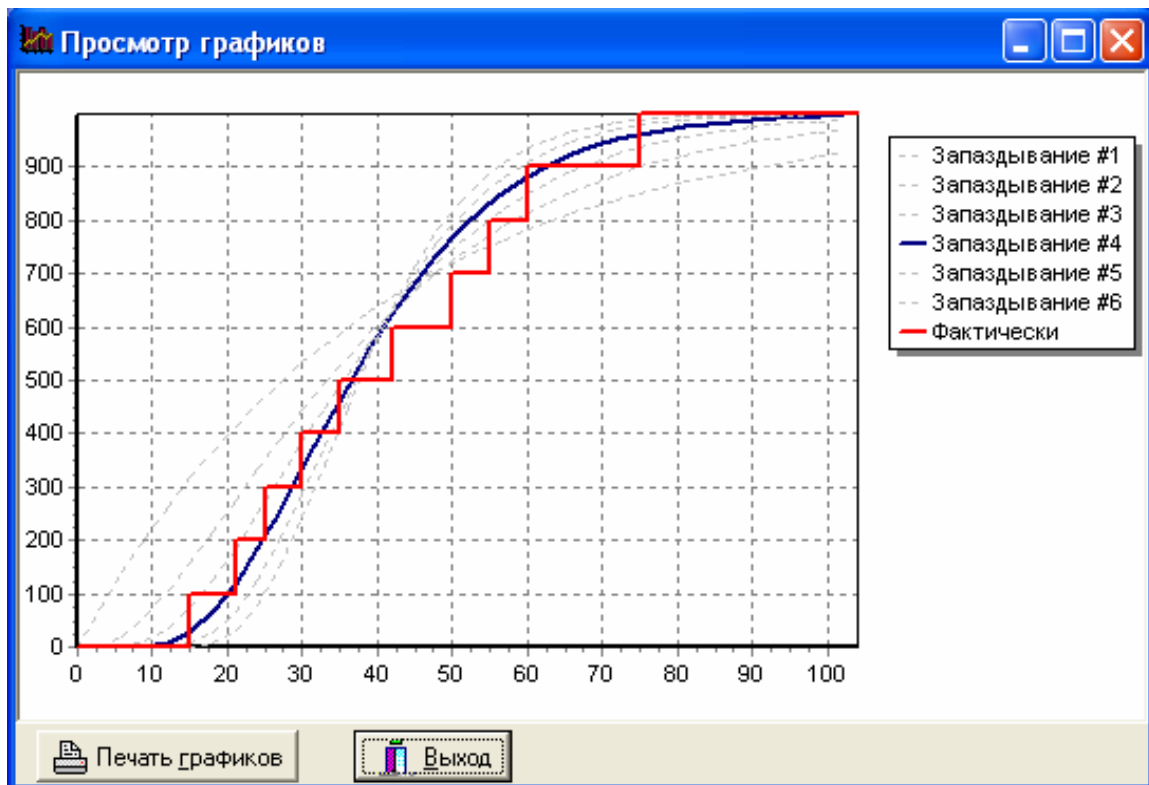


Рисунок 7.7 – Графіки зміни темпів вихідних потоків об'єкта і моделі у пакеті *DynMod*

## 7.5 Дослідження динаміки виробничо-збутової системи

**Постановка задачі 5.** Як об'єкт дослідження розглядається виробничо-збутова система складної побутової техніки. Система складається з ланок виробництва, оптової та роздрібної торгівлі. Процес її функціонування описується системою рівнянь, що подані в [1, 8–9, 13].

У систему надходять від покупців запити на 1000 одиниць товару щотижня. Необхідно визначити зміни у часі на відрізку 104 тижні (2 роки) рівня запасів, рівня невиконаних замовлень у роздрібній ланці та кількості замовлень, які знаходяться на стадії виробництва, що виникнуть унаслідок зростання на 30% за 12 тижнів потоку замовлень на товари від покупців.

**Розв'язання задачі 5.** Для розв'язання задачі необхідно подати однією з мов програмування або у середовищі пакета моделювання (*VenSim*, *MathCad*, *MatLab* тощо) систему рівнянь динаміки виробничо-збутової системи (4.1) – (4.53), що наведена в [1].

Відповідно до існуючих вимог крок моделювання повинен бути не більшим за  $1/6$  самого короткого запізнювання третього порядку. Виходячи з цього, крок моделювання становитиме  $DT = 0.05 \leq 0,5/6$ .

Екранна форма вхідних даних та результатів розв'язання задачі у пакеті *DynMod* подані на рис. 7.8 – 7.9.

The screenshot shows a window titled "FormLab5" with a subtitle "5. Исследование динамики рознечного звена ПСС". It contains several input fields and a group box for simulation parameters. The "Входной темп" field is set to 1000. The "Шаг моделирования" field is set to 0,10. The "Время моделирования" field is set to 104. The "моделирование воздействия" group box has four radio buttons: "Не изменно", "Ступенькой", "Импульсом", and "Линейно", with "Линейно" selected. The "Амплитуда воздействия %" field is set to 30. The "Длительность" field is set to 12. At the bottom, there are three buttons: "Рассчитать", "Графики...", and "Выход".

Рисунок 7.8 – Екранна форма вхідних даних задачі 5 у пакеті *DynMod*

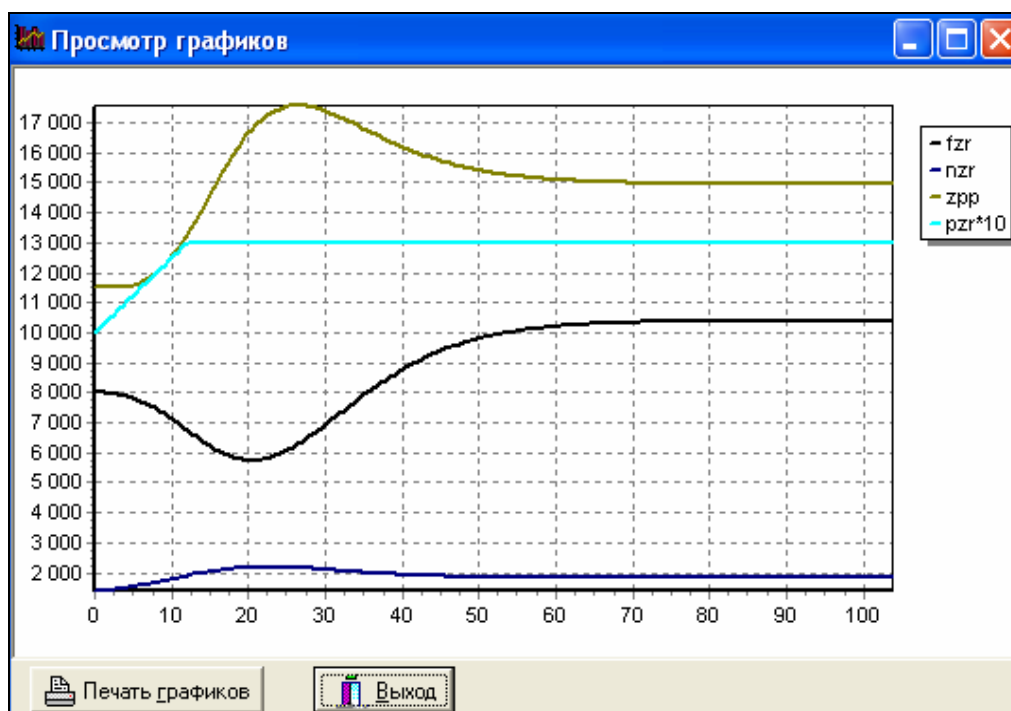


Рисунок 7.9 – Графічне подання результатів розв'язання задачі 5 у пакеті *DynMod*



На рис. 7.9 змінні, що підлягають аналізу мають такі позначення:  $fzr$  – рівень запасів у роздрібній ланці;  $nzr$  – рівень невиконаних замовлень у роздрібній ланці;  $zpp$  – кількість замовлень, які знаходяться на стадії виробництва;  $pzr$  – темп потоку замовлень, що надходять до роздрібної ланки.

Навчальне видання

Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни «Комп'ютерне моделювання динаміки систем» для магістрантів спеціальності 8.05020101 – комп'ютеризовані системи управління та автоматика.

Упорядник            БЕЗКОРОВАЙНИЙ Володимир Валентинович

Відповідальний випусковий    І.В. Гребеннік

Редактор    Б.П. Косіковська

Комп'ютерна верстка

План 2016 (перше півріччя), поз. \_\_\_\_

Підп. до друку \_\_\_\_\_.15.    Формат 60x84 1/16.    Спосіб друку – ризографія

Умов. друк. арк. \_\_\_\_\_    Облік.-вид. арк. \_\_\_\_\_    Тираж 30 прим.

Зам. № \_\_\_\_\_    Ціна договірна.

-----  
ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14  
-----

Віддруковано в навчально-науковому  
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ  
61166, Харків, просп. Леніна, 14