

**Міністерство освіти і науки України
Національний лісотехнічний університет України**

Я.І. Соколовський, Ю.В. Шабатура, Я.І. Виклюк та ін.

СЕРІЯ «КОМП'ЮТИНГ»

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ У GPSS WORLD

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

За науковою редакцією д.т.н., професора В. В. Пасічника

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

**Львів
«Новий Світ – 2000»
2020**

УДК 004.94(075.8)
ББК 32.973-018.123.2
С 59

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 Міністерством освіти і науки України
(Лист № 1/11-19170 від 10.12.2013 р.)*

Рецензенти:

В.М. Томашевський – д.т.н., професор кафедри управляючих систем і технологій Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут»;

Є.В. Бодяньський – д.т.н., професор кафедри штучного інтелекту Харківського національного університету радіоелектроніки;

В.В. Пасічник – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних систем і мереж Національного університету «Львівська політехніка».

Авторський колектив:

Я. І. Соколовський, доктор технічних наук, професор;

Ю. В. Шабатура, доктор технічних наук;

Я. І. Виклюк, доктор технічних наук;

І. М. Крошній, кандидат технічних наук;

М. В. Дендюк, кандидат технічних наук, доцент.

Соколовський Я. І., Шабатура Ю. В., Виклюк Я. І. та ін.

С 59 Моделювання систем в середовищі GPSS World : навч. посіб. / Я. І. Соколовський, Ю. В. Шабатура, Я. І. Виклюк [та ін.] ; за ред. В. В. Пасічника. – Львів : «Новий Світ – 2000», 2020. – 288 с.

ISBN 978-966-418-255-0

У навчальному посібнику наведено матеріал, необхідний для вивчення імітаційного моделювання систем в інструментальному середовищі GPSS World для створення імітаційних моделей. Їх застосування показано на конкретних прикладах. Описуються можливості GPSS World для створення та проведення експериментів з моделями. Детально розглянуті методи практичної реалізації моделей систем у лабораторному практикумі.

Посібник розрахований на бакалаврів, що навчаються за напрямками підготовки «Комп'ютерні науки». Ним можуть скористатися магістри, аспіранти та дослідники, які займаються моделюванням та дослідженням конкретних систем. Посібник буде корисним фахівцям у галузі комп'ютерингу та бажаючим самостійно оволодіти методами імітаційного комп'ютерного моделювання.

УДК 004.94(075.8)
ББК 32.973-018.123.2

ISBN 978-966-418-255-0

© Я.І. Соколовський, Ю.В. Шабатура, Я.І. Виклюк та ін., 2020
© «Новий Світ – 2000», ФОП Піча С.В., 2020

Зміст

ПЕРЕДМОВА	7
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	10
РОЗДІЛ 1.	
ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	11
1.1. Моделі процесів і систем	11
1.2. Класифікація моделей	14
1.3. Основні визначення та класифікація систем масового обслуговування	15
1.3.1. Характеристики систем масового обслуговування.....	16
1.3.2. Вхідний потік вимог	19
1.3.3. Стратегії керування потоками вимог	21
1.3.4. Класифікація систем масового обслуговування	23
Контрольні запитання та завдання	25
РОЗДІЛ 2.	
ЙМОВІРНІСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	27
2.1. Метод статистичних випробовувань.....	27
2.2. Генератори випадкових чисел.....	29
2.3. Моделювання випадкових подій та дискретних випадкових величин.....	32
2.4. Моделювання неперервних випадкових величин	36
2.5. Моделювання нормально-розподілених випадкових величин	39
2.6. Моделювання випадкових векторів	40
2.7. Моделювання випадкових функцій.....	41
2.8. Статистична обробка результатів моделювання	42
2.9. Визначення кількості реалізацій під час моделювання випадкових величин.....	44
Контрольні запитання та завдання	45
РОЗДІЛ 3.	
ПРОГРАМНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ GPSS WORLD	47
3.1. Основне меню GPSS World.....	47
3.1.1. Меню File	48
3.1.2. Меню Edit.....	52
3.1.3. Меню Search.....	54
3.1.4. Меню View	54
3.1.5. Меню Command	54
3.1.6. Меню Window і меню Help	55
3.2. Панель інструментів GPSS World	55
3.3. Вікно моделі у системі GPSS World	56
3.4. Інтерактивний перегляд значень виразів	59
3.5. Налаштування параметрів моделювання	61
Контрольні запитання та завдання	64
РОЗДІЛ 4.	
СИСТЕМА ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ GPSS WORLD	65
4.1. Основне меню GPSS World.....	65
4.2. Подання моделей у вигляді блок-діаграм	70
4.3. Основні складові системи GPSSW	73
4.4. Об'єкти обчислювальної категорії	74

4.4.1. Константи.....	75
4.4.2. Системні числові атрибути.....	75
4.4.3. Арифметичні і логічні оператори.....	76
4.4.4. Бібліотечні математичні функції.....	77
4.4.5. Змінні користувача.....	77
4.4.6. Вирази в операторах GPSS.....	77
4.4.7. Зберігаючі комірки.....	78
4.4.8. Матриці зберігаючих комірок. Оголошення та ініціалізація матриць.....	79
4.4.9. Арифметичні змінні й арифметичні вирази.....	80
4.4.10. Булеві змінні.....	82
4.4.11. Типи функцій.....	83
Контрольні запитання та завдання.....	85

РОЗДІЛ 5.

МОДЕЛІ СИСТЕМ З ОДНОКАНАЛЬНИМИ ПРИСТРОЯМИ.....	86
5.1. Введення транзактів у модель і вилучення їх із неї.....	86
5.2. Блоки для зміни значень параметрів транзактів.....	91
5.3. Блоки апаратної категорії зайняття та звільнення одноканальних пристроїв.....	92
5.4. Блоки перевірки стану та передавання керування в одноканальних пристроях.....	95
5.5. Блоки статистичної категорії.....	97
5.6. Блоки для зміни послідовності руху транзактів у моделі.....	100
5.7. Блоки апаратної категорії для переривань одноканальних пристроїв.....	106
5.8. Блоки апаратної категорії для переведення одноканальних пристроїв у стан недоступності.....	113
5.9. Створення і застосування списків користувача.....	114
Контрольні запитання та завдання.....	119

РОЗДІЛ 6.

СТВОРЕННЯ І ВІДЛАГОДЖЕННЯ ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ У GPSS WORLD.....	121
6.1. Основні етапи моделювання у системі GPSSW.....	121
6.2. Команди GPSS World.....	126
6.3. Інтерактивні можливості GPSS World.....	128
6.4. Відлагодження моделей у GPSS World.....	133
Контрольні запитання та завдання.....	138

РОЗДІЛ 7.

МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОКАНАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ У GPSS WORLD.....	140
7.1. Блоки зайняття та звільнення багатоканальних пристроїв.....	140
7.2. Блоки апаратної категорії для переведення багатоканальних пристроїв у стан недоступності та відновлення доступності.....	142
7.3. Блоки перевірки стану багатоканальних пристроїв.....	146
7.4. Моделювання перемикачів.....	147
Контрольні запитання та завдання.....	150

РОЗДІЛ 8.

МОВА PLUS ТА PLUS-ПРОЦЕДУРИ.....	151
8.1. Основні елементи мови.....	151
8.2. Побудова виразів.....	152
8.3. Plus-оператори та їх призначення.....	153

8.4. Вбудована бібліотека процедур	154
8.5. Генератори випадкових чисел.....	158
8.6. Реалізація методу Ньютона для розв'язування нелінійних рівнянь за допомогою мови Plus	160
8.7. Налаштування Plus-процедур	162
8.8. Команда INTEGRATE і блок INTEGRATION для моделювання неперервних систем	163
8.9. Використання PLUS-процедур для моделювання неперервних систем	166
8.10. Використання функцій в імітаційних моделях.....	173
8.10.1. Генерування випадкових чисел для дискретних рівномірних розподілів	174
8.10.2. Генерування випадкових чисел для дискретних нерівномірних розподілів....	175
8.10.3. Генерування випадкових чисел для неперервного рівномірного розподілу...	177
8.10.4. Генерування випадкових чисел для неперервних нерівномірних розподілів ...	178
8.10.5. Функції типу E, L і M	180
Контрольні запитання і завдання.....	181

РОЗДІЛ 9.

ТЕХНОЛОГІЇ МОДЕЛЮВАННЯ У GPSS WORLD	184
9.1. Основні відомості з теорії планування експериментів	184
9.1.1. Повний факторний експеримент.....	184
9.1.2. Оцінювання точності результатів моделювання	189
9.2. Дисперсійний аналіз	190
9.2.1. Однофакторний дисперсійний аналіз.....	190
9.2.2. Двофакторний дисперсійний аналіз	193
9.3. Технологія дисперсійного аналізу у GPSS World	195
9.4. Технологія регресійного аналізу у GPSS World	206
9.5. Організація експериментів користувача у GPSS World.....	213
Контрольні запитання і завдання.....	219

РОЗДІЛ 10.

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ.....	220
Лабораторна робота 1. Моделювання випадкових подій і дискретних випадкових величин	220
Лабораторна робота 2. Моделювання неперервних випадкових величин	223
Лабораторна робота 3. Моделювання випадкових векторів і функцій.....	225
Лабораторна робота 4. Моделювання дискретних процесів.....	228
Лабораторна робота 5. Моделювання у GPSSW одноканальних розімкнутих СМО та оцінка якості їх функціонування.....	235
Лабораторна робота 6. Моделювання у GPSS World багатоканальних СМО та оцінка якості їх функціонування	240
Лабораторна робота 7. Моделювання у GPSS World багатофазових СМО та оцінка якості їх функціонування	246
Лабораторна робота 8. Моделювання виробничих систем (на прикладі моделювання роботи транспортного конвеєра та моделювання роботи ділянки цеху)	249
Лабораторна робота 9. Моделювання роботи ЕОМ для оброблення завдань з різними пріоритетами.....	253
Лабораторна робота 10. Моделювання роботи вузла комутації повідомлень	255

Лабораторна робота 11. Моделювання неперервних систем (на прикладі поширення вірусу на системному диску)	257
Лабораторна робота 12. Дослідження вагомості впливу змінних користувача на об'єкт моделі за допомогою дисперсійного аналізу	259
Лабораторна робота 13. Дослідження вагомості впливу обраних факторів на об'єкт моделі за допомогою експерименту користувача	262
Лабораторна робота 14. Оптимізація і прогнозування поведінки системи за допомогою регресійного аналізу	264
Додаток 1. Формати і графічні зображення блоків	266
Додаток 2. Системні числові атрибути GPSS	272
Додаток 3. Елементи стандартного звіту	276
Додаток 4. Табличні значення критеріїв	281
Предметний покажчик	284
Література та посилання	287

Передмова

Серед сучасних методів наукового пізнання моделювання є загально признаним та ефективним інструментом дослідження сутності різних об'єктів, процесів та явищ. Такі дослідження є багатоетапними складними процесами, у яких розв'язується низка взаємозв'язаних задач, основними з яких є розроблення моделі, аналіз властивостей, встановлення загальних закономірностей та вироблення управлінських рішень щодо вивчення існуючих та створення нових систем. Область застосування методів комп'ютерного моделювання є надзвичайно широкою і різносторонньою. Це, в свою чергу, породжує і різноманіття методів і програмних засобів, що використовуються у теорії моделювання.

Більшість технічних систем, у тому числі обчислювальних систем і мереж, досліджуються методами імітаційного моделювання з використанням імовірнісних підходів. Під імітаційним моделюванням розуміється розроблення комп'ютерних моделей, постановка і проведення експериментів на них. У цьому аспекті широке застосування знаходять математичні моделі, що відображають структурно-функціональну організацію досліджуваних систем і побудовані на основі теорії систем масового обслуговування.

Визначальним чинником у застосуванні імітаційного моделювання, з точки зору інформаційних технологій, є вибір програмних засобів і мов імітаційного моделювання. Адже програмні системи моделювання оснащені спеціалізованими засобами, які дозволяють скоротити тривалість розроблення імітаційних моделей, використати ефективні можливості щодо організації модельних експериментів на комп'ютері, враховувати у моделях фактор реального часу.

Спеціалізовані програмні інструментарії моделювання, відповідно до видів моделювання, поділяються на три групи: дискретні, неперервні та комбіновані (дискретно-неперервні або неперервно-дискретні). Для моделювання дискретних систем широке застосування отримав програмний продукт фірми Minuteman Software – GPSS World (GPSSW, General Purpose System Simulation World – світова загальноцільова система моделювання). GPSS World розроблена для ОС Windows і максимально орієнтована на використання сучасних інформаційних технологій проектування систем, які забезпечують високу інтерактивність і візуалізацію інформації. Система GPSS World базується на мові імітаційного моделювання GPSS, яка створена у компанії IBM професором Джефрі Гордоном. GPSS World є подальшим розвитком GPSS / PC. Але система GPSS World має розширені можливості, оскільки дозволяє моделювати як дискретні, так і неперервні процеси (блок INTEGRATE). Для усіх класів об'єктів і змінних у GPSS World реалізований динамічний багатовіконний інтерфейс для візуального представлення статистичної інформації у режимі реального часу. Система GPSS World володіє важливими автоматизованими інструментальними засобами проведення дисперсійного (ANOVA) і регресійного аналізів, а також здійснення власного експерименту користувача на основі методології оптимального планування експериментів. Убудована процедурна мова PLUS разом з іншими інструментальними засобами дозволяє будувати моделі під час проведення експериментів і створювати користувачем власні бібліотеки процедур. Система має значний набір команд для керування процесом моделювання. Їх можна використовувати як в інтерактивному режимі, так і включати у моделі.

Даний посібник відповідає навчальній дисципліні «Моделювання систем», а також значній частині змістових модулів навчальної дисципліни «Прикладне програмне забез-

печення в інженерній справі». У ньому розглядаються методи побудови імітаційних моделей з використанням сучасного ефективного інструментального засобу GPSS World. Поданий у посібнику матеріал має практичну спрямованість.

Посібник складається з десяти розділів, додатку, предметного іменного покажчика. У **першому розділі** наведено основні поняття і визначення параметрів та характеристик дискретних систем, класифікацію систем і моделей, коротку характеристику систем масового обслуговування. **Другий розділ** присвячено розгляду методів ймовірнісного моделювання дискретних і випадкових неперервних величин, які дозволяють враховувати вплив випадкових факторів на систему у процесі моделювання. У **третьому розділі** наведено структуру та опис системи меню інтегрованого середовища імітаційного моделювання GPSS World. Розглядається навчальна версія GPSS World, яку можна безкоштовно отримати за адресою <http://www.minutemansoftware.com/downloads.asp> (сайт фірми Minuteman Software). У **четвертому розділі** подані основи побудови мови імітаційного моделювання. Методам створення імітаційних моделей з одноканальними пристроями присвячено **п'ятий розділ**. Наведені основні засоби GPSS World для моделювання таких систем. Їх застосування показано на конкретних прикладах. У **шостому розділі** описано етапи створення та відлагодження програм у GPSS World, інтерактивні можливості системи. У **сьомому розділі** розглядається побудова моделей систем з багатоканальними пристроями. У **восьмому розділі** описується мова PLUS. Показано її застосування у PLUS-процедурах, а також для моделювання неперервних процесів. **Дев'ятий розділ** охоплює проблематику технологій моделювання у GPSS World. Наведено основні поняття теорії планування експериментів. Розглянуті вбудовані автоматизовані генератори проведення дисперсійного та регресійного аналізів. Показано можливості GPSS World для створення власних оптимізаційних експериментів користувачем. **Десятий розділ** включає завдання для виконання лабораторного практикуму. Аналіз застосування комп'ютерних систем моделювання для проведення лабораторних занять і курсового проектування під час викладання дисципліни «Моделювання систем» і споріднених з нею дисциплін у вищих навчальних закладах підтверджують важливість GPSS World (www.gprs.ru).

Кожний розділ завершується запитаннями і завданнями для самоперевірки та контролю засвоєння знань.

У **додатках** представлено матеріали, які доповнюють та ілюструють основний текст посібника.

У кінці посібника є **предметний покажчик** з посиланнями на сторінки, які містять основні терміни і поняття, що використовуються у посібнику.

– Наведений бібліографічний список не претендує на повноту і містить перелік літературних джерел, які у тій або іншій мірі використовувалися для написання посібника, а також можуть допомогти у поглибленому вивченні курсу.

Для успішного засвоєння матеріалу необхідно мати базові знання з основ дискретної математики, програмування, матричного аналізу, теорії ймовірностей та математичної статистики.

Посібник призначений, перш за все, для студентів, які навчаються за програмою бакалаврів з напрямку «Комп'ютерні науки» і вивчають дисципліну «Моделювання систем» та сумісні з нею дисципліни. Матеріали посібника можуть використовуватися бакалаврами і магістрами у процесі підготовки випускних кваліфікаційних робіт, у яких

необхідно виконати моделювання і дослідження конкретної системи. Крім того, посібник може бути корисним фахівцям у галузі комп'ютерингу та усім бажаючим оволодіти мистецтвом імітаційного моделювання.

Автори висловлюють подяку усім колегам, співпраця з якими позитивно впливала на написання посібника. Окрему вдячність автори висловлюють шановним рецензентам – д.т.н., проф. Томашевському В.М., д.т.н., проф. Бодянському Є.В., д.т.н., проф. Пасічнику В.В. за цінні поради та зауваження, які сприяли покращенню посібника. Ми будемо вдячні всім, хто знайде за можливе подати свої зауваження та конструктивні відгуки про посібник за адресою sokolowskyu@ukr.net. Вони слугуватимуть добрим підґрунтям нашої подальшої роботи.

З повагою – автори.

Перелік скорочень

GPSS World (GPSSW) – General Purpose Simulation System

PLUS – Programming Language Under Simulation

СМО – система масового обслуговування

ОКП – одноканальний пристрій

БКП – багатоканальний пристрій

СЧА – системні числові атрибути (System Numerical Attributes – SNA)

МСВ – метод статистичних випробовувань або метод Монте-Карло

СПП – список поточних подій

СМП – список майбутніх подій

ПФЕ – повний факторний експеримент

ДФЕ – дробовий факторний експеримент