

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
В ЗАДАЧАХ
МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА**

**Навчальний посібник
для студентів технічних спеціальностей**

За редакцією проф. Шелкового О. М.

Рекомендовано вченою радою НТУ «ХПІ»

**Харків
НТУ «ХПІ»
2019**

УДК 621.658
152

Рецензенти:

В. А. Фадєєв, д-р техн. наук, проф., заступник
голови правління з науки ПАТ "ФЄД";
А. П. Тарасюк, д-р техн. наук, проф., проректор,
Українська інженерно-педагогічна академія

Автори:

Г. В. Біловол, канд. техн. наук, *М. І. Гасанов*, канд. техн. наук,
О. О. Клочко, д-р техн. наук, *О. В. Набока*, канд. техн. наук,
А. О. Скоркін, канд. техн. наук, *О. М. Шелковий*, д-р техн. наук

Рекомендовано вченою радою НТУ «ХПІ» як навчальний посібник
для студентів технічних спеціальностей, протокол № 3 від 30.03.2018 р.

The textbook gives a historiography of the emergence and development of simulation. The basic concepts of simulation modeling are formulated and the concepts of simulation models for various machine-building productions are formulated: from technological processes of processing and control to organizational-technical and technological structures of production systems.

The manual is intended for students of technical specialties, as well as graduate students, scientists and industry workers, whose field of activity is related to the search for rational technological and organizational and technical solutions in mechanical engineering.

Abb. 310. Tab. 40. Bibliograp. 371 ben.

152 Імітаційне моделювання в задачах машинобудівного виробництва:
навч. пос. / заред. О. М. Шелкового. – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – 500 с.

ISBN 978-617-05-0284-1

У навчальному посібнику дано історіографію виникнення і розвитку імітаційного моделювання. Сформульовано основні поняття імітаційного моделювання та наведено концепції імітаційних моделей для різних машинобудівних виробництв: від технологічних процесів обробки і контролю до організаційно-технічних й технологічних структур виробничих систем.

Навчальний посібник призначено для студентів технічних спеціальностей, а також аспірантів, науковців і працівників промисловості, сфера діяльності яких пов'язана з пошуком раціональних технологічних і організаційно-технічних рішень у машинобудуванні.

Лл. 310. Табл. 40. Бібліогр. 371 найм.

УДК 621.658

© Колектив авторів, 2019

© Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут», 2019

ISBN 978-617-05-0284-1

ЗМІСТ

ПРИЙНЯТІ СКОРОЧЕННЯ І ПОЗНАЧЕННЯ.....	3
ВСТУП.....	11
1. ІСТОРИОГРАФІЯ СТАНОВЛЕННЯ І ЗАСТОСУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	20
1.1. Історичні аспекти формування імітаційного моделювання як науки в країнах СНД.....	20
1.2. Аналіз сучасного стану імітаційного моделювання та тенденції його розвитку.....	23
Контрольні запитання.....	25
Бібліографія.....	26
2. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	27
2.1. Трактуювання поняття «Імітаційне моделювання».....	27
2.2. Класифікація імітаційних моделей.....	32
2.3. Склад імітаційної моделі.....	33
2.3.1. Структура імітаційної моделі для імовірнісного процесу.....	34
2.3.2. Структура імітаційної моделі з календарем подій.....	47
2.4. Мови моделювання.....	51
Контрольні запитання.....	60
Бібліографія.....	61
3. ПОБУДОВА ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ СКЛАДНИХ МАШИНОБУДІВНИХ ВИРОБНИЦТВ.....	64
3.1. Особливості побудови імітаційних моделей складних систем.....	64
3.2. Опис робочого навантаження, властивості робочого навантаження.....	68
3.3. Двоетапна модель вибору мови моделювання.....	69
3.4. Декомпозиція моделюваної системи.....	70
3.5. Часові шкали в імітаційних моделях.....	71
3.6. Принципи розробки імітаційних моделей механоскладального виробництва.....	72
3.6.1. Етапи розробки імітаційних моделей.....	72
3.6.2. Моделювання паралельних процесів.....	76
3.7. Переваги і недоліки імітаційного моделювання.....	83
Контрольні запитання.....	84
Бібліографія.....	85
4. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ІНЖИНІРИНГУ СИСТЕМ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ РІЗАННЯМ.....	86
4.1. Основні напрямки використання ІМ у завданнях технологічного інжинірингу.....	86
4.2. Програмні продукти імітаційного моделювання.....	102
4.3. Принципи декомпозиції імітаційних моделей металообробного виробництва.....	114
4.4. Технологічний інжиніринг обробки металів різанням методами ІМ на основі 2D-візуалізації.....	126
4.4.1. Загальні положення імітаційного моделювання механообробних систем з використанням 2D-візуалізації.....	131

ЗМІСТ

4.4.2. Аналіз структури діючого виробництва деталей трактора мод. «Т-150» у цеху «Тракторний-5» Харківського тракторного заводу (ХТЗ).....	185
4.4.3. Аналіз часових і енергетичних показників виробничої системи цеху «Тракторний-5» ХТЗ.....	190
4.5. Приклад синтезу організаційно-технологічної структури ГАД для обробки деталі № 150.00.102-1 «Кронштейн» у цеху «Тракторний-5» Харківського тракторного заводу.....	198
Контрольні запитання.....	208
Бібліографія.....	209
5. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ІНЖИНІРИНГУ СИСТЕМ СКЛАДАННЯ.....	214
5.1. Особливості складання складних машинобудівних виробів (СМВ) в умовах дрібносерійного складання (ДС).....	214
5.2. Принципи функціонування систем дрібносерійного складання (СДС СМВ).....	220
5.3. Принципи розробки організаційно-технологічних структур СДС СМВ.....	228
5.4. Критерії оцінки ефективності функціонування СДС СМВ.....	234
5.5. Структурна модель функціонування СДС СМВ.....	236
5.6. Логіко-лінгвістична модель взаємозв'язку функціональних характеристик СДС СМВ із параметрами процесу складання.....	238
5.6.1. Модель взаємозв'язку функціональних характеристик СДС СМВ з параметрами процесу складання.....	238
5.6.2. Основні організаційно-технічні і конструктивно-технологічні властивості СДС СМВ.....	240
5.7. Моделювання функціональних характеристик СДС СМВ.....	242
5.7.1. Формальний запис умов складання СМВ.....	242
5.7.2. Елементи лінгвістичних засобів опису моделей СДС.....	249
5.8. Модель зміни станів СДС СМВ.....	258
5.9. Приклади аналізу існуючих організаційно-технічних і технологічних структур складального виробництва ДП «ФЕД».....	263
Контрольні запитання.....	273
Бібліографія.....	273
6. ПОБУДОВА ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ.....	277
6.1. Деякі аспекти імітаційного математичного моделювання геометричних параметрів процесу черв'ячного зубофрезерування.....	277
6.2. Математична модель прогнозування структури та параметрів технологічних систем зубообробки великомодульних зубчастих коліс.....	288
6.2.1. Загальні принципи оптимального управління параметрами точності, якості та продуктивності зубообробки загартованих великомодульних зубчастих коліс.....	288
6.2.2. Моделювання процесу зняття припуску при формоутворенні поверхневого шару загартованих великомодульних зубчастих коліс.....	293
6.2.3. Інформаційне моделювання технологічних процесів зубообробки загартованих великомодульних зубчастих коліс.....	300

ЗМІСТ

6.2.4. Моделювання технологічного забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь загартованих великомодульних зубчастих коліс за допомогою системної оптимізації.....	304
6.3. Моделювання технологічних взаємозв'язків при зубообробці, що впливають на якість зубчастого зачеплення великомодульних коліс.....	309
6.3.1. Методика вибору і призначення технологічного забезпечення системи параметрів поверхневого шару циліндричних великомодульних зубчастих коліс.....	309
6.3.2. Вибір метрологічного забезпечення контролю параметрів поверхневого шару циліндричних великомодульних зубчастих коліс.....	314
6.3.3. Комплексні параметри стану поверхонь загартованих великомодульних зубчастих коліс.....	319
6.3.4. Комплексний параметр оцінки довговічності загартованих великомодульних зубчастих коліс.....	321
6.3.5. Оцінка за комплексним параметром пластичних деформацій зубів загартованих великомодульних зубчастих коліс при їхньому функціонуванні.....	326
6.3.6. Оцінка якості поверхневого шару зубів при чистовій обробці зубців великомодульних загартованих коліс.....	329
6.3.7. Багатокритерійна оптимізація двоступеневого технологічного забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь загартованих великомодульних зубчастих коліс на основі застосування комплексних параметрів їх стану.....	333
6.4. Технологічне оснащення інтенсивної високоякісної зубообробки загартованих великомодульних зубчастих коліс.....	343
6.4.1. Аналіз схем різання і технологічного оснащення для інтенсивної і високоякісної зубообробки.....	343
6.4.2. Технологічні особливості зубообробки загартованих коліс за одношпindelною і двошпindelною схемами різання.....	353
6.4.3. Інструментальне оснащення інтенсивної високоякісної зубообробки загартованих коліс.....	356
6.5. Імітаційне моделювання технологій пошарового синтезу в машинобудуванні.....	357
Контрольні запитання.....	372
Бібліографія.....	373
7. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАВДАННЯХ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ.....	380
7.1. Актуальність застосування сучасних засобів вимірювання.....	380
7.2. Будова і принцип дії КВМ.....	381
7.3. Методи координатних вимірювань.....	385
7.4. Класифікація вимірювальних перетворювачів.....	387
7.5. Завдання моделювання точності в машинобудівному виробництві.....	389
7.5.1. Моделювання механізму утворення похибок.....	394
7.5.2. Моделювання точності механічної обробки різанням.....	404

ЗМІСТ

7.6. Математичні моделі та узагальнені структурні схеми вимірювальних перетворювачів і вимірювальних приладів.....	415
7.6.1. Енергія систем. Узагальнені сили, що діють у системі. Узагальнені швидкості.....	417
7.6.2. Міри у вимірювальній техніці.....	418
7.7. Синтез вимірювальних приладів.....	420
7.7.1. Прилади зі зрівноваженням механічних сил і моментів.....	421
7.7.2. Динамічні властивості вимірювальних перетворювачів та приладів.....	428
7.7.3. Корекція динамічних характеристик вимірювальних перетворювачів.....	434
7.7.4. Вимірювальні прилади із зрівноваженням електричних величин.....	437
7.7.5. Компенсатори постійної напруги.....	438
7.7.6. Компенсатори змінної напруги.....	439
7.7.7. Вимірювальні мости.....	441
7.7.8. Цифрові вимірювальні прилади.....	445
7.7.9. Застосування мікропроцесорів у вимірювальних приладах.....	449
7.8. Конструкції і функціональні параметри контрольно-вимірювальних модулів.....	451
7.8.1. Конструкція базової частини КВМ і її функціональні параметри.....	451
7.8.2. Портальні компонування КВМ.....	453
7.8.3. Приклади сучасних КВМ портального типу.....	456
7.8.4. Мостові компонування КВМ.....	460
7.8.5. Приклади сучасних ІСВМ мостового типу.....	460
7.8.6. Консольні компонування КВМ.....	463
7.8.7. Стоякові компонування КВМ.....	463
7.8.8. Приклади сучасних КВМ стоякового типу з горизонтальною піноллю.....	466
7.9. Засоби реалізації вимірювань у КВМ.....	468
7.9.1. Пристрої взаємодії з вимірюваною деталлю.....	468
7.9.2. Вимірювальні системи для КВМ виробництва компанії Renishaw plc (Великобританія).....	471
7.10. Програмне забезпечення КВМ.....	486
Контрольні запитання.....	494
Бібліографія.....	495
ВИСНОВОК.....	497