

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2021-42-17>

УДК 519.876.5

**Чибіряк Яна Іванівна**, к.т.н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-0634-7609>

**Баранова Ірина Володимирівна**, к.т.н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-3767-8099>

**Ніколаєнко Кароліна Олександрівна**, магістр,

Сумський державний університет, м. Суми, Україна.

## МЕТОД НАСКРІЗНОГО НАВЧАННЯ СТУДЕНТІВ ІТ-СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ ІМІТАЦІЙНОМУ МОДЕЛЮВАННЮ У СЕРЕДОВИЩІ FLEXSIM ДЛЯ ПОШУКУ РЕЗЕРВІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ

**Чибіряк Я. І., Баранова І. В., Ніколаєнко К. О.** Метод наскрізного навчання студентів ІТ-спеціальностей імітаційному моделюванню у середовищі FlexSim для пошуку резервів підвищення ефективності автоматизованих систем. Розглянуто задачу впровадження у навчальний процес університету нової програмної технології FlexSim, призначеної для імітаційного моделювання автоматизованих виробничих, транспортних, обслуговуючих та інших систем. Проаналізовано ринок існуючих програмних продуктів для імітаційного моделювання і стан навчального процесу з питань імітаційного моделювання. Досліджено можливості і переваги програмної технології FlexSim та обґрунтовано доцільність її використання при підготовці ІТ-фахівців. Запропоновано базові навчальні моделі FlexSim для використання їх у навчальному процесі університету. Розроблено систему наскрізної підготовки спеціалістів у сфері ІТ з використанням технології моделювання і дослідження ефективності складних систем у середовищі FlexSim. Розробка може бути корисною університетам, які готують ІТ-фахівців, а також кафедрам, студенти яких вивчають дисципліни, пов'язані з імітаційним моделюванням складних систем.

**Ключові слова:** FlexSim, імітаційна модель, базові навчальні моделі, система, об'єкт моделі, середовище FlexSim, оптимізація, експеримент, дослідження систем, програма наскрізного навчання, професійні компетенції.

**Чибіряк Я. И., Баранова И. В., Николаенко К. А.** Метод сквозного обучения студентов ИТ-специальностей имитационному моделированию в среде FlexSim для поиска резервов повышения эффективности автоматизированных систем. Рассмотрена задача внедрения в учебный процесс университета новой программной технологии FlexSim, предназначенной для имитационного моделирования автоматизированных производственных, транспортных, обслуживающих и других систем. Проанализирован рынок существующих программных продуктов для имитационного моделирования и состояние учебного процесса по вопросам имитационного моделирования. Исследованы возможности и преимущества программной технологии FlexSim и обоснована целесообразность ее использования при подготовке ИТ-специалистов. Предложены базовые учебные модели FlexSim для использования их в учебном процессе университета. Разработана система сквозной подготовки специалистов в сфере ИТ с использованием технологии моделирования и исследования эффективности сложных систем в среде FlexSim. Разработка может быть полезной университетам, которые готовят ИТ-специалистов, а также кафедрам, студенты которых изучают дисциплины, связанные с имитационным моделированием сложных систем.

**Ключевые слова:** FlexSim, имитационная модель, базовые учебные модели, система, объект модели, среда FlexSim, оптимизация, эксперимент, исследования систем, программа сквозного обучения, профессиональные компетенции.

**Chybiriak Ya. I., Baranova I. V., Nikolaenko K. A.** A method of end-to-end training in simulation modeling using FlexSim to find reserves for improving the efficiency of automated systems, offered for IT students. The issue of introducing a new FlexSim software, which is used for simulation modeling of automated production, transport, maintenance and other systems into the educational process at the university is considered. The market of existing software products used for simulation modeling and the state of the educational process on simulation modeling are analyzed. The potential and advantages of FlexSim are investigated and its practicability for IT specialists is justified. Basic FlexSim training models are proposed for the university. A system of end-to-end training of IT specialists using the modeling technology and studying the efficiency of complex systems in FlexSim has been developed. This research can be useful for universities that train IT specialists, as well as departments whose students study disciplines related to simulation modeling of complex systems.

**Keywords:** FlexSim, simulation model, basic training models, system, model object, FlexSim, optimization, experiment, systems research, end-to-end training program, professional competencies.

**Постановка наукової проблеми.** Четверта промислова революція є сучасною технологічною стратегією, що направлена на підвищення ефективності виробничих процесів за рахунок досягнення високої гнучкості і оптимізації ресурсів [1]. Дана концепція ґрунтується на впровадженні у виробництво кіберфізичних систем [2,3]. Технічні об'єкти виробничого середовища, що оснащені комунікаційним інтерфейсом та інтегрованими можливостями обробки інформації, взаємодіючи через мережу Інтернет, оптимально адаптують свою поведінку під конкретні виробничі умови [4]. Даний підхід заснований на технологіях інтелектуального аналізу даних, інтернету речей та доповненої реальності [3-5], визначає появу виробничих систем нового типу, які забезпечують автоматичне управління процесами виробництва і збуту на протязі всього життєвого циклу продукту.

Часто технології навчання студентів не встигають за сучасним прогресом науки і виробництва. Тому сьогодні все частіше ставлять задачі адаптивного навчання [6], а також задачі швидкого варіантного аналізу можливих шляхів підвищення ефективності автоматизованих систем [7].

У зв'язку з цим, постановку задачі даної роботи визначимо таким чином – розробити метод наскрізного навчання студентів, метою якого є оволодіння сучасними засобами аналізу ефективності функціонування складних автоматизованих систем та пошуку можливих шляхів її підвищення з використанням програмного забезпечення FlexSim.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- дослідити актуальність переорієнтації навчального процесу на використання ПЗ FlexSim;
- описати типові проблемні ситуації підтримки прийняття рішень у автоматизованому виробництві і орієнтовані на підготовку фахівців прийоми використання імітаційних моделей FlexSim для їх розв'язання;

- описати досвід впровадження методики наскрізного використання програми FlexSim у навчальному процесі при підготовці студентів ІТ-напряму та подальші перспективи її використання.

**Аналіз досліджень.** Стратегія інтеграції сучасних інтернет-технологій з фізичними процесами у виробництві вперше була ініційована німецькими компаніями, як центральна основа політичної програми Industry 4.0, а пізніше прийнята практично всіма промислово розвиненими країнами [4]. Значна перевага стратегії – це підвищення конкурентоздатності підприємств, неперервний їх розвиток за рахунок індивідуального налаштування виробництва, підвищення ефективності використання ресурсів, зменшення витрат [3-5].

Сучасний стан промисловості України характеризується низькою якістю і конкурентоздатністю продукції та високими виробничими витратами [8,9]. Причини нинішнього відставання полягають у відсутності впровадження новітніх інформаційних технологій, низькій надійності програмного забезпечення, наявності застарілого технологічного обладнання, відсутності висококваліфікованих кадрів. Стан промислових підприємств та високі вимоги до ефективності виробництва створюють необхідність удосконалення виробничих систем, що завжди супроводжуються ризиками і невизначеністю. Виробничі процеси характеризуються великою кількістю елементів, складністю взаємозв'язків. Традиційні методи аналізу не дозволяють будувати моделі та описувати такі важливі характеристики як функція, багаторівнева організація, структура виробництва. У зв'язку з цим великого значення набуває розробка математичних моделей, що базується на системному підході до удосконалення виробничих процесів. Математичні моделі опису виробничих процесів можуть приймати дві основні форми: аналітичні та імітаційні. Аналітичні моделі використовують для дослідження простих систем. Імітаційне моделювання – це потужний метод дослідження стохастичних, складних, систем. Відтворюючи функції системи, імітаційна модель дозволяє врахувати дискретні та неперервні процеси, нелінійні закономірності, випадкові фактори, які не мають аналітичного опису [10]. Проведення експериментів, оптимізація імітаційних моделей за критеріями ефективності з необхідною точністю визначає вплив вхідних даних на показники ефективності.

Технічні системи функціонують по принципу систем масового обслуговування (СМО) [11], що складаються з основних частин: елементів потоку, черг та обслуговуючих пристроїв. Їх характеристики впливають на показники ефективності роботи. Основна задача полягає у відшуванні таких оцінок вхідних даних, за яких параметри ефективності системи набувають оптимальних значень.

У рамках стратегії Industry 4.0 моделювання є однією з ключових технологій [2,5]. Наприклад, у роботі [2] за допомогою імітаційних моделей оцінюється вплив властивостей різної архітектури децентралізованого управління виробництвом на тривалість виробничого циклу та здійснюється їх порівняння. Для досліджень було побудовано імітаційну модель виробничої системи, що складається з чотирьох операційних комплексів та робота-маніпулятора. Експерименти над моделлю проводилися з використанням детермінованих та стохастичних вхідних даних. На основі проведеного аналізу зроблено висновки про те, як різні архітектури підходять для Industry 4.0 та отримано комплекс дій щодо розробки засобів управління виробництвом в умовах Industry 4.0.

Практикою підтверджено, що імітаційне моделювання ефективно застосовують для вирішення таких задач [11]:

- реінжиніринг виробництва (приспосовування виробничих процесів до потреб споживачів; організація виробництва і управління на основі ефективної комп'ютеризації; рівномірний розподіл трудових, технологічних ресурсів);

- планування виробництва (прогнозування цілей та етапів виробничого процесу в умовах динамічних змін; розширення товарного асортименту; впровадження нових продуктів або послуг; застосування нової техніки; усунення слабких місць у виробничій системі);

– управління роботою складу (ліквідація простоїв у відділах складу; ідентифікація товарів; стратегія їх раціонального розміщення та групування; ефективність використання складських площ; мінімізація транспортних витрат);

– управління матеріальними потоками та запасами (регулювання, нормування, контроль запасів, сировини; прогнозування матеріальних потреб; визначення середнього часу доставки та частоти постачань; раціональний розподіл матеріально-виробничих запасів).

Серед набору програм, призначених для імітаційного моделювання і аналізу виробничих процесів, – Excel/Solver, Arena, MatLab/Simulink, GPSSWorld, Enterprise Dynamics та ін., найбільш сучасним інструментом, який підтримує сучасні методи моделювання (статистичне, неперервне, дискретне, агентне) є програмне забезпечення FlexSim.

У працях авторів [10-12] наведено приклади імітаційних моделей, розроблених у середовищі FlexSim і призначених для роботи зі студентами у європейських університетах. Зокрема, програма використовується у навчальних процесах польського Державного Східно-Європейського університету у Пшемислі, в університеті Ліхай (штат Пенсільванія, США), у Віндзорському університеті (Віндзор, Канада) та ін. [11]. За кордоном теоретичні та практичні аспекти імітаційного моделювання, широко впроваджуються на етапах проектування і оперативного управління виробничих процесів. Відома практика застосування FlexSim для оптимізації виробничих процесів відомими автомобільними компаніями Daimler-Chrysler, Audi, Toyota, Fiat [10].

Необхідно відмітити, що трансформація виробництва ставить нові задачі перед освітою. Передбачається, що майбутні випускники стикатимуться зі складними проблемами у промисловому середовищі на рівні управління [13]. Майбутній спеціаліст повинен володіти новими компетенціями у відповідності до вимог четвертої промислової революції [14,15]. У зв'язку з цим важливо звертати увагу на появу нових технологій, пов'язаних з Industry 4.0 та враховувати їх під час підготовки студентів інженерних і комп'ютерних спеціальностей з метою формування необхідних професійних навичок та компетенцій. У роботі [5] зазначається, що важливу роль для реалізації концепції Industry 4.0 відіграють людські ресурси. Дослідження, проведені у [5] визначають групу ключових компетенцій, необхідних для розвитку Industry 4.0, також автори доводять, що використання програмного забезпечення FlexSim у навчальному процесі, дослідницьких проектах, дипломних та курсових роботах сприяє розвитку професійних компетенцій у напрямку Industry 4.0.

Таким чином, очевидно що:

– одним з найбільш сучасних програмних середовищ імітаційного моделювання складних систем є програма FlexSim;

– сучасне автоматизоване виробництво швидкими темпами запроваджує підходи варіантного імітаційного моделювання з використанням технологій FlexSim;

– побудова навчального процесу для підготовки студентів IT-напряму у найбільш рейтингових університетах світу орієнтується на використанні технологій імітаційного моделювання FlexSim, про що свідчать окремі публікації;

– в Україні відсутній, як практичний досвід використання FlexSim, так і систематичні дослідження з питань методології і методики впровадження даної програмної технології у навчальний процес університетів.

#### **Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.**

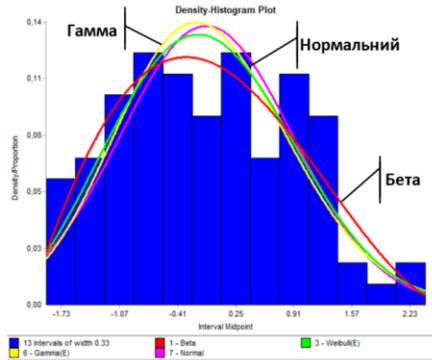
Проведемо аналіз доцільності навчання студентів прийомом прийняття рішень з використанням FlexSim у задачах управління складними автоматизованими системами.

Програма FlexSim – інтегроване середовище побудови і дослідження імітаційних моделей. На початкових етапах моделювання значна увага приділяється встановленню законів розподілу ймовірностей, що характеризують вхідні дані, зібрані з модельованої системи. Невірно визначений закон розподілу призводить до помилкової оцінки параметрів ефективності системи [11]. FlexSim містить вбудований інструмент ExpertFit, який в автоматичному режимі аналізує вхідні дані та оцінює їх на відповідність певному закону розподілу. Процес аналізу складається з таких етапів: побудова гістограми частот; підбір закону розподілу; статистичне уточнення параметрів закону розподілу.

У виробничих системах закони розподілу відображають стохастичні процеси: швидкість виконання операцій (обробки, упакування, зборки), інтенсивність надходження комплектуючих та сировини на робочу дільницю, час ремонту обладнання та ін. На рис. 1, а зображено гістограму частот, побудовану засобами ExpertFit за числовими даними, що описують тривалість перебування деталей у проміжній зоні перед обробкою. Аналіз графіків показує, що закон розподілу Beta краще відповідає шаблону гістограми. Розрахунок за критеріями Колмогорова-Смірнова та  $\chi$ -квадрат уточнює відповідність обраної функції розподілу та її параметрів. Якщо випадковий процес не вдається описати

параметричним законом розподілу, програмою FlexSim передбачено використання даних у табличному форматі без функціонального опису (рис. 1, б).

На етапі побудови імітаційної моделі відтворюється структура системи. 3D-об'єкти FlexSim, призначені для побудови моделей, містяться у наборі стандартних бібліотек програми, розділені по категоріях за функціональністю, що визначає зручність їх використання для реалізації як дискретних так і неперервних процесів. При побудові моделей реалізується принцип візуального програмування, відповідно до якого, користувач, з набору стандартних блоків, створює модель і здійснює розрахунки. Для кожного об'єкту встановлюються відповідні параметри, що відповідають вимогам модельованої системи.



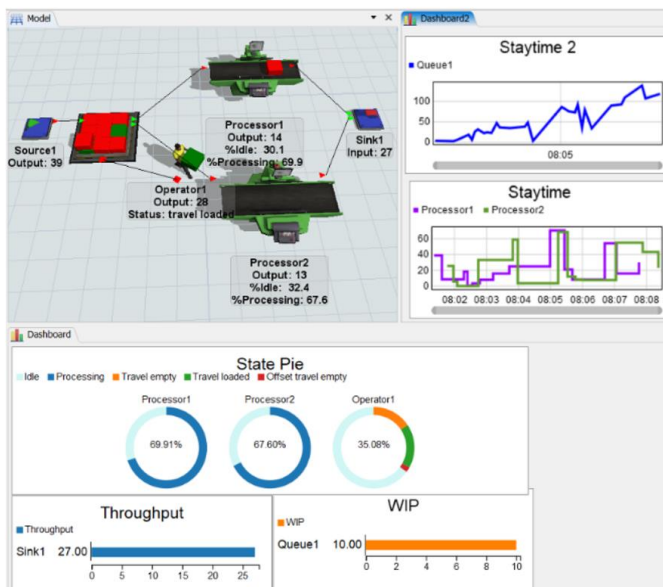
а

Row	Percent	ProcessTime
Row 1	0	0
Row 2	3	1
Row 3	3	4
Row 4	12	5
Row 5	16	7
Row 6	19	10
Row 7	20	11
Row 8	22	15
Row 9	10	16
Row 10	7	12

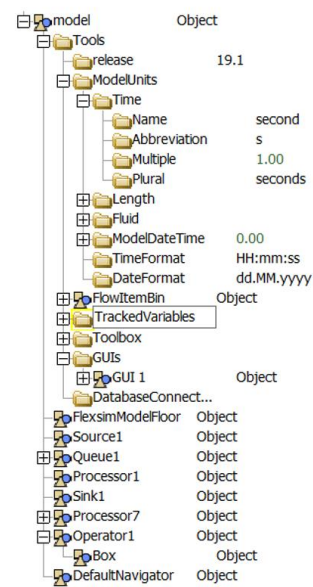
б

Рис. 1. Ідентифікація закону розподілу вибірових даних: підбір параметричного закону (а), опис емпіричних даних таблицею значень (б)

На рис. 2, а представлено модель, що складається із джерела надходження деталей (Source); фіксованих ресурсів (Processor 1, 2, що здійснюють обробку), черги (місце очікування елементів потоку перед виконанням обробних операцій); мобільного ресурсу (оператор, який переміщує деталі на обробку). З'єднання між фіксованими ресурсами задають напрямок руху матеріальних потоків. У текстовому режимі відображаються статистичні дані по кожному об'єкту. Більш детальну статистику демонструють графіки та діаграми, розташовані на інформаційних панелях. Тип і вид графіків задаються користувачем та залежать від досліджуваних показників ефективності системи.



а



б

Рис. 2. Приклад імітаційної моделі у середовищі FlexSim: модель з показниками статистики (а), дерево моделі (б)

Кругові діаграми відображають завантаженість ресурсів та дозволяють виявити періоди з більшим робочим навантаженням. Графіки показують середній час очікування деталей у черзі (Staytime 2); тривалість процесу обробки (Staytime); незавершене виробництво (WIP) та продуктивність системи (Throughput). Зручний програмний інтерфейс, підтримка тривимірної анімації та реалістичної графіки дозволяє аналізувати виробничі процеси на предмет ризиків, залучати інших спеціалістів та експертів з організації до пошуку проблем, взаємодіяти із замовниками проекту, враховувати пропозиції експертів та робочих груп щодо покращення роботи системи, вносити відповідні зміни до моделі та оцінювати ефективність цих змін.

Роботою моделі керують дані. У FlexSim можливий імпорт/експорт інформації з інших програмних середовищ (наприклад, з MS Excel), зчитування з баз даних (MySQL, Oracle, SQLite та ін.), створення глобальних таблиць з даними.

Слід відмітити, що моделі систем у середовищі FlexSim розробляються на основі об'єктно-орієнтованого підходу, тому крім тривимірного вигляду модель можна представити у вигляді деревовидної структури ієрархічно підпорядкованих об'єктів. Дерево забезпечує ефективний засіб пошуку та звернення до робочих змінних, які використовуються під час запуску, експериментів та оптимізації моделей. Рис. 2, б демонструє дерево моделі, зображеної на рис. 2, а. Вузли дерева містять дані і функції об'єктів, що визначають їх властивості і дії. Назви та символічне позначення вузлів залежать від типу даних, які зберігаються.

Підтримка об'єктно-орієнтованого підходу надає можливість реалізації агентного моделювання. У FlexSim відсутні спеціальні бібліотечні блоки, що забезпечують функціональність агентів. Для опису правил взаємодії і стану агентів системи використовується вбудована мова сценаріїв FlexScript та мова програмування C++. За допомогою програмних команд також налаштовується обмін повідомленнями між об'єктами, – це забезпечує ефективну координацію та управління роботою моделі. Таким чином, існує можливість налагодження інформаційних потоків і зворотніх зв'язків між структурними елементами складних систем.

Імітаційні моделі можуть будуватися для одноразового використання, наприклад, при вирішенні задачі оптимального розподілу ресурсів між підрозділами або для багаторазового використання – при розробці паралельних та альтернативних маршрутів виготовлення і обробки виробів. З одноразовими моделями, як правило, працюють досвідчені користувачі, обізнані з імітацією. З багатоцільовими моделями працюють спеціалісти та експерти певної предметної сфери. Це створює необхідність реалізації графічного інтерфейсу, призначеного для зручного введення даних та отримання результатів у зрозумілому форматі. Приклад моделі системи підтримки прийняття рішень на основі імітаційної моделі (рис. 3) був розроблений державним університетом штату Міссісіпі для оцінювання ефективності роботи виробничої системи у рамках впровадження концепції ошадливого виробництва (Leanproduction). Система розроблена у середовищі FlexSim з використанням GUI-компонувальника [11].

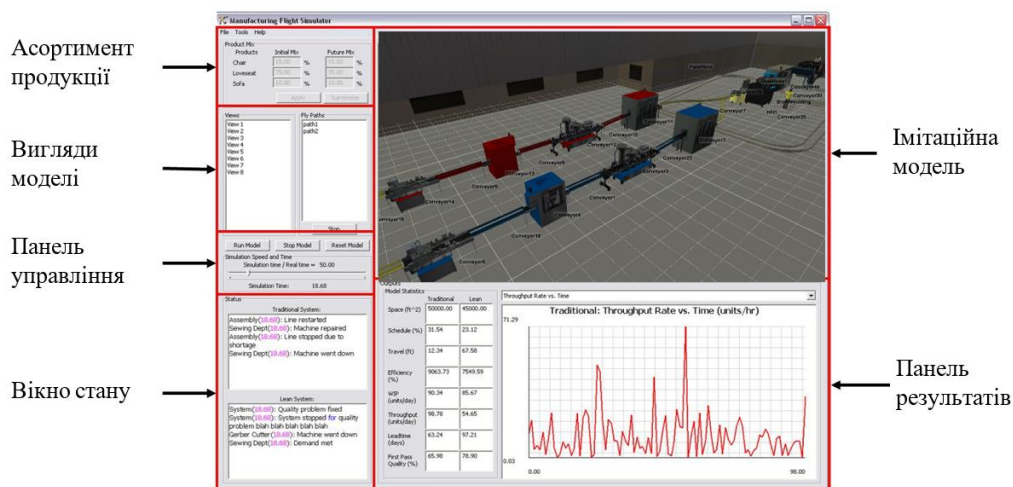


Рис. 3. Приклад побудови моделі СППР у середовищі FlexSim

У центрі зображена модель, до лівої частини інтерфейсу вводяться вхідні дані, нижня частина призначення для виведення показників ефективності системи у графічному і табличному форматах.



Дана модель взаємодіє з базами даних, з процедурами аналізу і оптимізації для підтримки пошуку ефективних рішень.

Ключовим аспектом 4-ї промислової революції є створення «цифрових двійників» (Digital Twin) систем, що виконують функцію віддаленого моніторингу та управління виробничим процесом у режимі реального часу. Використання FlexSim для практичної реалізації даного підходу забезпечується можливістю інтеграції програми з інформаційними системами підприємства SAP (ERP, MRP, CRM та ін.), з базами даних, підтримка стандартів CALS-технологій [5,10,12].

До переваг FlexSim слід віднести наявність зручних засобів проведення експериментів та розрахунку їх результату. Вбудований модуль ExpertFit за одне виконання здійснює запуск множини сценаріїв та прогонів моделі у межах кожного сценарію.

Для проведення експериментів необхідно задати:

- кількість сценаріїв (експериментів);
- кількість прогонів (запусків моделі) та їх тривалість у межах кожного сценарію;
- період прогріву моделі.

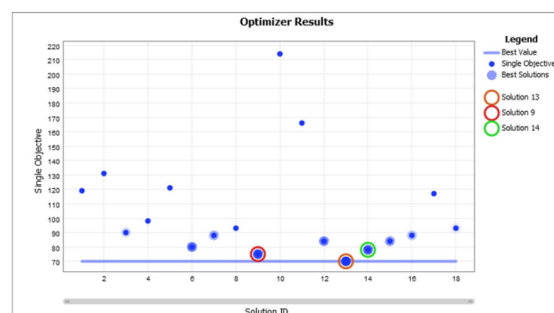
На рис. 4, а наведено приклад проведення експериментів з моделлю при дослідженні впливу кількості асортименту оброблюваних деталей на продуктивність системи. З моделлю виконано 3 експерименти по 20 прогонів. Період прогріву триває 80 год., тривалість прогонів – 160 год. Результати експерименту дозволили встановити, що найбільша продуктивність буде забезпечена при відсоткових співвідношеннях асортименту продукції 33%-33%-34% 1-го, 2-го та 3-го типів деталей відповідно. Таким чином, за результатами проведених експериментів обираються кращі параметри системи шляхом аналізу можливих альтернатив. Для організацій такий підхід типу «що буде, якщо...» забезпечує значну економію часових і грошових витрат при прийнятті рішень. За необхідності отримані результати можна експортувати у форматі html, csv для створення, друку звітів та подальшого їх аналізу.

Експериментатор FlexSim під час роботи автоматично виконує розподіл програмних потоків між наявними комп'ютерними ядрами процесора, внаслідок чого прогони моделі виконуються паралельно. Тому реалізація експериментів для складних систем зі значною кількістю вхідних даних потребує мінімального часу. Експерименти призначені для оцінювання окремих сценаріїв моделі будуються аналітиками для встановлення значень вхідних даних. Тому результати експериментів залежать від практичного досвіду експертів.

Інструмент оптимізації OptQuest, вбудований у FlexSim використовує еволюційні алгоритми пошуку оптимальних рішень за визначеними критеріями. Рис. 4, б демонструє результат роботи оптимізатора.



а



б

Рис. 4. Приклад дослідження моделі: результати експериментів (а), результати оптимізації (б)

У якості цільової функції обрано тривалість виробничого циклу, досліджувані параметри системи – розмір буферної зони та дисципліна обслуговування в черзі. Програмою було знайдено 18 рішень. На графіку зазначено порядок, у якому вони отримані. Оптимальним є рішення 13, при якому тривалість виробничого циклу набуває мінімального значення –71 хв.

Робота оптимізатора продовжується, доки не виконано одну з умов [11]:

- розглянуто усі можливі значення змінних рішення;
- завершився інтервал часу, відведений на пошук рішень;
- отримано задану кількість рішень.

Проведений аналіз показує, що FlexSim є ведучим програмним інструментом для моделювання і дослідження систем. До суттєвих функціональних можливостей програмного забезпечення FlexSim відносять:

- моделювання складних виробничих ситуацій;
- аналіз завантаження робочих ресурсів;
- підтримка стандартів CALS-технологій;
- інтеграція моделей з інформаційними системами підприємства та з базами даних;
- оптимальний розподіл ресурсів між підрозділами;
- мультиагентне моделювання;
- реалістична 3D-анімація та візуалізація процесів;
- наявність зручних засобів аналізу, проведення експериментів та оптимізації систем.

Враховуючи потребу організацій у кваліфікованих спеціалістах, здатних застосовувати сучасні інформаційні технології для вирішення виробничих задач, у Сумському державному університеті вперше впроваджено комплексну навчальну програму, що забезпечує наскрізну підготовку спеціалістів з використанням програмного забезпечення FlexSim. У структурі кафедри комп'ютерних наук створено навчально-науковий центр імітаційного моделювання та аналізу систем (НЦ ІМАС), діяльність якого полягає у вдосконаленні навчального процесу при підготовці студентів. Створення навчального центру стало можливим завдяки грантовій діяльності польського фонду InterMarium, представниками якого було організовано і проведено навчальний тренінг для закладів вищої освіти України та надано ліцензоване програмне забезпечення FlexSim для впровадження у навчальний процес. Комплексна програма апробована при підготовці студентів бакалаврського та магістерського циклу спеціальності комп'ютерні науки. Основна мета – підготовка ІТ-спеціаліста, що володіє практично-орієнтованими компетенціями, необхідними для вирішення задач, актуальних в умовах виробництва.

У табл. 1 наведено перелік дисциплін і тем, необхідних для забезпечення програми наскрізної підготовки.

Табл. 1. Дисципліни, що входять до програми наскрізного навчання засобам імітаційного моделювання (фрагмент)

Дисципліни	Курс викладання	Назви тем
Організація та обробка електронної інформації	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>– аналіз програмного забезпечення для моделювання</li> <li>– інтегроване середовище імітаційного моделювання FlexSim</li> <li>– використання імітаційного моделювання для вирішення практичних задач</li> </ul>
Основи об'єктно-орієнтованого програмування	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ієрархічна архітектура програмного забезпечення FlexSim</li> <li>– базові основи мови програмування FlexScript</li> <li>– об'єктно-орієнтоване програмування мовою C++</li> <li>– програмування об'єктів та агентів у середовищі FlexSim</li> </ul>
Комп'ютерна графіка	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>– розробка 3D-об'єктів імітаційних моделей та їх імпорт у середовище FlexSim</li> </ul>
Платформи корпоративних інформаційних систем	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>– методи та засоби інтеграції імітаційних моделей із корпоративними системами SAP (ERP, MRP, CRM та ін.)</li> </ul>
Моделювання систем	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>– моделювання та аналіз систем масового обслуговування</li> <li>– моделювання випадкових подій;</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>– дискретно-подійне моделювання у середовищі FlexSim</li> <li>– моделювання неперервних процесів засобами FlexSim</li> <li>– побудова логіки моделі засобами ProcessFlow</li> <li>– багатосценарні експерименти та оптимізація моделей</li> </ul>
Організація баз даних та знань	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>– способи організації вхідних даних імітаційної моделі</li> <li>– інтеграція програмного середовища FlexSim із базами даних</li> </ul>
Управління ІТ-проектами	4	<ul style="list-style-type: none"> <li>– життєвий цикл імітаційного моделювання та аналізу (ІМА)</li> <li>– розподіл ролей та обов'язків у проекті ІМА</li> <li>– управління проектом моделювання</li> </ul>
Теорія прийняття рішень	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>– системи підтримки прийняття рішень, засновані на імітаційних моделях</li> </ul>

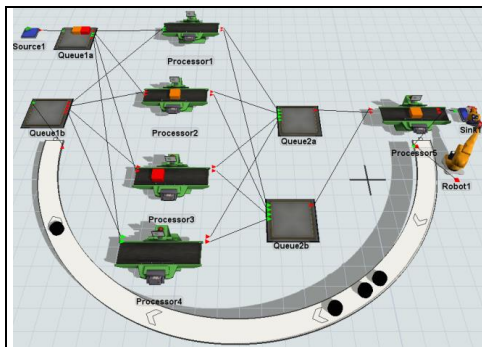
Модель наскрізної підготовки об'єднує ключові дисципліни професійно-практичного спрямування з 1-го по 6-й курс включно та реалізується наступними видами діяльності: комплексна теоретична підготовка; комплексна практична підготовка; курсове проектування; дипломне проектування; науково-дослідні проекти.

У межах програми наскрізної підготовки значна увага приділяється практичній складовій. Для забезпечення навчального процесу, у середовищі FlexSim розроблено набір 25-ти базових імітаційних моделей виробничих та обслуговуючих систем. Фрагмент моделей та їх короткий опис наведено у табл. 2.

Табл. 2. Бібліотека імітаційних моделей FlexSim для навчального процесу (фрагмент)

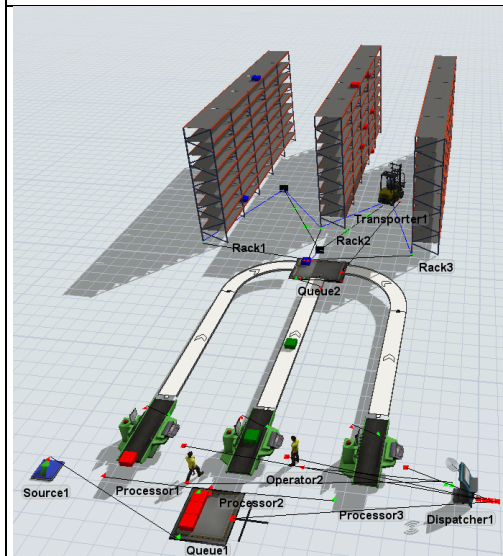
<b>Модель 1</b>	
	<p><i>Сфера застосування:</i> обслуговування.</p> <p><i>Опис:</i> модель відображає комплектацію продукції для клієнтів, кожен з яких має свій профіль замовлення. Постачання окремих видів продукції та надходження клієнтів – стохастичні величини.</p> <p><i>Результати:</i> визначено режим роботи обслуговуючих ресурсів системи при яких мінімізується час формування замовлень.</p>
<b>Модель 2</b>	
	<p><i>Сфера застосування:</i> виробництво.</p> <p><i>Опис:</i> три типи виробів надходять до системи, потрапляють до буферної зони 1, обробляються операторами на верстатах, через стрічку конвеєра доставляються до буферної зони 2 та вивозяться транспортером із системи.</p> <p><i>Результати:</i> досліджено вплив різних дисциплін упорядкування виробів у черзі (LIFO, FIFO) на продуктивність системи.</p>
<b>Модель 3</b>	





*Сфера застосування:* виробництво.  
*Опис:* 4 типи деталей надходять до системи, у залежності від типу обробляються на одному із 4-х верстатів. Робот-маніпулятор виконує контроль якості деталей. Браковані деталі повертаються на повтор технологічних операцій та обробляються поза чергою.  
*Результат моделювання:* виявлення вузьких місць у роботі системи: простоїв обладнання, місць накопичення незавершеного виробництва.

Модель 4



*Сфера застосування:* виробництво.  
*Опис:* оператори виконують обробку 3-х типів деталей, які транспортерною стрічкою доставляються до буферної зони, звідки переміщуються навантажувачом до стелажів складського приміщення та у залежності від типу деталі розташовуються на відповідних полицях. Оператори та обладнання мають простої в роботі.  
*Результати:* встановлено, яка кількість робочих ресурсів (операторів та навантажувачів) потрібна для забезпечення необхідної продуктивності системи; досліджено, як впливає заміна ручного труда автоматизованим на пропускну здатність системи.

Теоретична та практична частина програми крім вивчення методів розробки, побудови імітаційних моделей, їх дослідження та оптимізації також спрямована на формування вмінь працювати із замовниками, готувати технічну і користувацьку документацію, здійснювати валідацію, верифікацію та технічну підтримку імітаційних моделей.

З метою забезпечення міжпредметних зв'язків, проведено роботу по узгодженню робочих програм навчальних курсів та відпрацьовано методіку організації навчального процесу. При цьому враховано рекомендації ради роботодавців, до складу якої входять спеціалісти ведучих підприємств Сумського регіону. У рамках виконання дипломних та науково-дослідницьких робіт особлива увага приділяється проектам, теми яких є актуальними, а результати можуть бути впроваджені у практику підприємств і організацій.

Випускники, які засвоїли комплексну програму підготовки, можуть працювати бізнес-аналітиками виробничих систем. Такий спеціаліст здатен у рамках обраної методології розробити, реалізувати імітаційну модель, перевірити її на правильність та використати для аналізу і оптимізації виробничих процесів. Успішна робота в області моделювання бізнес-процесів забезпечується сформованими практичними вміннями. Реалізація та дослідження імітаційних моделей, пов'язаних з виробничими та обслуговуючими процесами розвиває у студентів практичні компетенції, пов'язані з цими сферами та дозволяє отримати необхідні навички роботи з програмним забезпеченням.

У ході навчального процесу рекомендується надавати студентам можливість проводити експерименти з моделями, реалізовувати власні пропозиції та ідеї щодо покращення роботи систем, які можуть полягати у зміні взаємного розташування обладнання, зменшенні або збільшенні їх кількості, зміні статистичних розподілів та параметрів системи. Висока гнучкість і зручність програмного середовища дозволяє швидко оцінювати результати виконаних змін та викликає зацікавленість у процесі навчання.

Моделювання є важливим інструментом для підтримки процесів прийняття рішень при вирішенні задач, пов'язаних з удосконаленням систем. Побудова та дослідження розроблених типових моделей у середовищі FlexSim (табл. 2) сприяє розвитку професійних компетенцій студентів.

**Висновки.** У зв'язку зі зростанням потужності комп'ютерних систем, з'являється можливість переходу від складних, недосконалих і мало зрозумілих аналітичних методів до моделей імітаційного моделювання. Існує множина інформаційних середовищ побудови моделей. Серед них найбільшого розповсюдження набули програми MatLab/Simulink, Arena, AnyLogic. Одним із найбільш нових і перспективних засобів імітаційного моделювання є система FlexSim.

Проведені дослідження показали:

- застосування програмного забезпечення FlexSim у навчальному процесі сприяє формуванню у випускників ключових компетенцій у напрямку Industry 4.0;
- на Україні відсутній практичний досвід впровадження програми FlexSim у закладах вищої освіти.

У зв'язку з цим виникає потреба у ефективному навчанні студентів різних курсів базовим концепціям та можливостям імітації. На кафедрі комп'ютерних наук Сумського державного університету було розроблено комплексну програму наскрізного навчання засобом імітаційного моделювання з використанням новітнього програмного забезпечення FlexSim.

Основний вклад цієї роботи полягає у наданні отриманого практичного досвіду та навчальної інформації по використанню сучасних комп'ютерних технологій імітаційного моделювання.

Набутий досвід дозволяє стверджувати, що:

- 1) Використання FlexSim є можливим при наскрізній підготовці студентів комп'ютерних спеціальностей з 1-го по 5-й курси включно.
- 2) При підготовці бакалаврів навчальний процес рекомендується спрямовувати на:
  - методи збору та аналізу інформації про систему;
  - встановлення законів розподілу вхідних даних;
  - побудову концептуальної моделі системи;
  - визначення способів зберігання вхідних даних;
  - розробку та реалізацію імітаційних моделей системи;
  - розробку інтерфейсів користувача;
  - збір статистики та аналіз результатів моделювання.
- 3) У магістерському циклі рекомендовано більшу увагу приділяти питанням:
  - валідації та верифікації імітаційних моделей;
  - плануванню та проведенню експериментів з моделями;
  - одно- та багатокритеріальній оптимізації систем;
  - інтерпретації результатів моделювання;
  - розробці рекомендацій щодо підвищення ефективності функціонування систем.
- 4) Найбільш перспективними та придатними для набуття практичного досвіду роботи з програмою FlexSim вважаються моделі, що відображають виробничі і обслуговуючі процеси.

Застосування розроблених базових імітаційних моделей, як елементу фахової підготовки, дозволяє систематизувати знання з урахуванням їх ролі і місця у вирішенні прикладних задач певної галузі. З'являється можливість будувати практико-орієнтовану підготовку спеціалістів, спрямовану на аналіз та дослідження, що забезпечує розвиток аналітичного мислення, формування умінь по застосуванню отриманих навичок у нових умовах діяльності, пов'язаних із запровадженням концепцій Індустрії 4.0.

Розроблені типові імітаційні моделі у середовищі FlexSim та методи їх дослідження можуть бути рекомендовані для масового розповсюдження і впровадження у навчальний процес закладів вищої освіти, що здійснюють підготовку фахівців для IT-сфери.

#### Список бібліографічного опису

1. Eichinger, P., Hofig, B., & Richter, C. (2017). Education 4.0 for mechatronics – agile and smart. 2017 International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM), 1–7. <https://doi.org/10.1109/REM.2017.8075231>
2. Meissner, H., Ilsen, R., & Aurich, J. C. (2017). Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 62, 165–169. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.113>
3. Matzler, S., & Wollschlaeger, M. (2017). Interchange format for the generation of functional elements for industrie 4.0 components. *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 5453–5459. <https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8216944>
4. Lang, D., Friesen, M., Ehrlich, M., Wisniewski, L., & Jasperneite, J. (2018). Pursuing the Vision of Industrie 4.0: Secure Plug-and-Produce by Means of the Asset Administration Shell and Blockchain Technology. 2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 1092–1097. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2018.8471939>

5. Werner-Lewandowska, K., Grzelczak, A., Pawlewski, P., & Kosacka-Olejnik, M. (2019). FlexSim Use in Didactics, Thesis, and Research in the Context of Competences for the Industry 4.0 (pp. 3–16). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-04519-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-04519-7_1)
6. Lavrov, E., Pasko, N., Siryk, O., Kisel, N., & Sedova, N. (2020). The method of teaching IT students computer analysis of ergonomic reserves of the effectiveness of automated control systems. *E3S Web of Conferences*, 166, 10017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016610017>
7. Lavrov, E., Pasko, N., & Siryk, O. (2020). Information technology for assessing the operators working environment as an element of the ensuring automated systems ergonomics and reliability. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 570–575. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235497>
8. Иванова, М. В., & Санникова, С. Ф. (2016). Скрытые тенденции экономического развития промышленности Украины. *Траектория Науки*, 2, № 4, 2.127-2.138. [www.pathofscience.org](http://www.pathofscience.org)
9. Omelyanenko, V. (2019). Analysis of Institutional and Evolutionary Aspect of High-tech Sectors Development on Instrument Engineering Example. *Herald of the Economic Sciences of Ukraine*, 2(37), 93–100. [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2019.2\(37\).93-100](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2019.2(37).93-100)
10. Kaczmar, I. (2019). *Komputerowe modelowanie i symulacje procesów logistycznych w środowisku FlexSim*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA.
11. Beaverstock, Malcolm Greenwood, A., & Nordgren, W. (2017). *Applied Simulation: Modeling and Analysis Using Flexsim*. FlexSim Software Products. <https://www.amazon.com/Applied-Simulation-Modeling-Analysis-Flexsim/dp/0983231974>
12. Kaczmar, I. (2016). Poprawa ekonomiki struktury produkcji na podstawie symulacji zdarzeń dyskretnych. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie / Politechnika Śląska*, z. 92, 131–141.
13. Greenwood, A. G. (2017). Striving for ubiquity of simulation in operations through educational enhancements. 2017 Winter Simulation Conference (WSC), 4252–4263. <https://doi.org/10.1109/WSC.2017.8248131>
14. Korytkowski, P. (2017). Competences-based performance model of multi-skilled workers with learning and forgetting. *Expert Systems with Applications*, 77, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.02.004>
15. Palšaitis, R., Čižiūnienė, K., & Vaičiūtė, K. (2017). Improvement of Warehouse Operations Management by Considering Competencies of Human Resources. *Procedia Engineering*, 187, 604–613. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.420>

#### References

1. Eichinger, P., Hofig, B., & Richter, C. (2017). Education 4.0 for mechatronics – agile and smart. 2017 International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM), 1–7. <https://doi.org/10.1109/REM.2017.8075231>
2. Meissner, H., Ilsen, R., & Aurich, J. C. (2017). Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 62, 165–169. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.113>
3. Matzler, S., & Wollschlaeger, M. (2017). Interchange format for the generation of functional elements for industrie 4.0 components. *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 5453–5459. <https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8216944>
4. Lang, D., Friesen, M., Ehrlich, M., Wisniewski, L., & Jasperneite, J. (2018). Pursuing the Vision of Industrie 4.0: Secure Plug-and-Produce by Means of the Asset Administration Shell and Blockchain Technology. 2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 1092–1097. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2018.8471939>
5. Werner-Lewandowska, K., Grzelczak, A., Pawlewski, P., & Kosacka-Olejnik, M. (2019). FlexSim Use in Didactics, Thesis, and Research in the Context of Competences for the Industry 4.0 (pp. 3–16). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-04519-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-04519-7_1)
6. Lavrov, E., Pasko, N., Siryk, O., Kisel, N., & Sedova, N. (2020). The method of teaching IT students computer analysis of ergonomic reserves of the effectiveness of automated control systems. *E3S Web of Conferences*, 166, 10017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016610017>
7. Lavrov, E., Pasko, N., & Siryk, O. (2020). Information technology for assessing the operators working environment as an element of the ensuring automated systems ergonomics and reliability. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 570–575. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235497>
8. Ivanova, M.V., & Sannikova, S.F. (2016). Latent tendencies of economic development of industry in Ukraine. *Trajectory of Science*, 2, № 4, 2.127-2.138. [www.pathofscience.org](http://www.pathofscience.org)
9. Omelyanenko, V. (2019). Analysis of Institutional and Evolutionary Aspect of High-tech Sectors Development on Instrument Engineering Example. *Herald of the Economic Sciences of Ukraine*, 2(37), 93–100. [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2019.2\(37\).93-100](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2019.2(37).93-100)
10. Kaczmar, I. (2019). *Komputerowe modelowanie i symulacje procesów logistycznych w środowisku FlexSim*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA.
11. Beaverstock, Malcolm Greenwood, A., & Nordgren, W. (2017). *Applied Simulation: Modeling and Analysis Using Flexsim*. FlexSim Software Products. <https://www.amazon.com/Applied-Simulation-Modeling-Analysis-Flexsim/dp/0983231974>
12. Kaczmar, I. (2016). Poprawa ekonomiki struktury produkcji na podstawie symulacji zdarzeń dyskretnych. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie / Politechnika Śląska*, z. 92, 131–141.
13. Greenwood, A. G. (2017). Striving for ubiquity of simulation in operations through educational enhancements. 2017 Winter Simulation Conference (WSC), 4252–4263. <https://doi.org/10.1109/WSC.2017.8248131>
14. Korytkowski, P. (2017). Competences-based performance model of multi-skilled workers with learning and forgetting. *Expert Systems with Applications*, 77, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.02.004>
15. Palšaitis, R., Čižiūnienė, K., & Vaičiūtė, K. (2017). Improvement of Warehouse Operations Management by Considering Competencies of Human Resources. *Procedia Engineering*, 187, 604–613. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.420>