

ПОТАПОВА Н. А.

Донецький національний університет імені Василя Стуса

<https://orcid.org/0000-0003-4566-4102>e-mail: potapova.nadin@gmail.com

ВОЛОНТИР Л. О.

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0001-9022-9332>e-mail: milavolontyr@ukr.net

ЗЕЛІНСЬКА О. В.

Донецький національний університет імені Василя Стуса

<https://orcid.org/0000-0002-9069-1428>e-mail: zeloksanavlad@gmail.com

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ

В роботі обґрунтовується необхідність використання математичного та комп'ютерного моделювання в аналітиці даних при оцінюванні функціонування логістичних процесів та систем. На основі аналізу існуючих підходів розкриваються особливості використання інтегрованого методу математичного та комп'ютерного моделювання з метою ефективної постановки та реалізації експерименту дослідження процесів. Логістична система формалізована в межах поставок матеріально-технічних ресурсів за централізованим способом розподілу потоків та передачі впливу керування від вищого рівня ієрархії до нижчих рівнів типу філій або відокремлених підрозділів. Конкретизовано основні етапи проведення моделювання функціонування логістичних процесів, що є підставою для уточнення алгоритмічних особливостей комп'ютерного експерименту. Акцентовано увагу на поєднанні імітаційного моделювання як одного із підходів комп'ютерного моделювання з елементами оптимізаційних рішень, що можуть бути отримані як аналітичний розв'язок конкретних прикладних задач логістики різної складності, зокрема, управління запасами.

Ключові слова: математичне моделювання, комп'ютерне моделювання, системний аналіз, логістична система, логістичний процес, імітаційна модель, експеримент.

NADIYA POTAPOVA

Vasyl' Stus Donetsk National University

LUDMILA VOLONTYR

Vinnytsia National Agrarian University

OKSANA ZELINSKA

Vasyl' Stus Donetsk National University

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING OF FUNCTIONING LOGISTICS PROCESSES AND SYSTEMS

The paper substantiates the need of usage mathematical and computer modelling in data analysis in assessing with the functioning of logistic processes and systems. Based on the analysis of existing approaches, the peculiarities of using an integrated method of mathematical and computer modelling in order to effective set up and implement a process research experiment are revealed. The logistic system is formalized within the supply of material and technical resources by a centralized method of flow distribution and transfer of management influence from the highest level of the hierarchy to the lower levels such as branches or separate units. Formal identification of the logistic system of supply of material and technical resources is based on the separation of the main factors of the system and the limits of their impact.

The main stages of modelling the functioning of logistics processes are specified, which is the basis for clarifying the algorithmic features of the computer experiment. It is stipulated that one of the main approaches to the study of these systems is modelling based on the use of methodological principles of queuing theory, which is based on modelling the flow characteristics of processes, orders and the discipline of their service. The procedure for determining the main characteristics of the system is focused on conducting computer simulations by setting up a computer experiment aimed at simulating the behaviour of the system and its evaluation. Probabilistic estimates of the queuing system are obtained under stationary operating conditions, in the established mode, which achieves limiting the impact of the conditions of the initial state. Emphasis is placed on combining simulation modelling as one of the approaches of computer modelling with elements of optimization solutions that can be obtained as an analytical solution to specific applications of logistics of varying complexity, in particular, inventory management.

Keywords: mathematical modelling, computer modelling, systems analysis, logistic system, logistic process, simulation model, experiment.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Загальна теорія систем розглядає математичне моделювання як один із основних методів їх опису та дослідження поведінкових характеристик. На основі декомпозиції складна система розкладається на складові (підсистеми, процеси, елементи), кожен із яких підлягає ідентифікації в обмежених множинах факторів та вибірок даних. Застосовуванням є підхід комплексного інтегрального оцінювання, де в основі цілісної оцінки системи покладено формування єдиного критерію, що утворюється як композиція часткових критеріїв ефективності кожної складової підсистеми [1]. Підсистеми розглядаються окремо в межах концептуальної моделі та її математичної формалізації, що в результаті становить відображення реальної системи в математичних формулах, розрахунках, статистичних спостереженнях. В результаті проведення

комп'ютерного експерименту та обробки багаторазових ітерацій формується висновок про поведінку системи та ефективність її функціонування.

За останній період системні дослідження набули особливої актуальності в різних напрямках, зокрема логістиці. Специфічність логістичної концепції управління полягає у формуванні базової концептуальної моделі на засадах потокових моделей, що обґрунтовує необхідність використання комп'ютеризації обробки даних. Розгляд системи базується на визначенні зовнішнього і внутрішнього середовищ, в межах основних взаємозв'язків факторів (індикатори системи) та величини їх впливу на досліджуваний логістичний процес [2, 3]. Математична формалізація взаємозв'язків надає формальний опис процесу, на підставі якого у подальшому є можливим проведення аналітичної оцінки та обробки даних як з позиції поведінкових характеристик системи, так і оптимізації її критеріїв функціонування [3]. Таким чином, формальна математична модель є основним об'єктом аналізу в ході комп'ютерної обробки даних у поєднанні з методикою обчислень, відповідних до конкретизації параметрів та зв'язків. Специфічність методів обчислень обумовлена необхідністю завдання.

Аналіз останніх досліджень

Математичне моделювання логістичних процесів сьогодні знаходиться в полі зору багатьох дослідників. При цьому найбільша увага приділяється формалізації та моделюванню транспортних потоків, зокрема, оптимізації розподілу транспортних вузлів, моделей транспортних мереж та їх інформаційного супроводу. Сутність математичної формалізації логістичних систем розглядалась багатьма вченими. Основи визначення системи започатковані Л. Берталанфі, який увів дане поняття та визначив основні характеристики систем [4, 5]. Моделювання, формалізація та використання апарату математичного аналізу в логістиці висвітлюється роботах багатьох вчених, серед яких роботи Горбачука В.М. [6], Горбової А.В. [7], Левкіна Д.А. [8], Федоренко І. [9], Сергієнка О.А. [10] та ін. В роботах висвітлюються питання використання апарату математичного моделювання для вирішення логістичних задач різної складності. Проте, чим складнішою є логістична система та різновиди прикладних завдань, тим більшою є проблема у побудові алгоритму та способу їх вирішення. Зокрема, зосереджуючись на вузькоспеціалізованих задачах, поза увагою залишаються ряд питань щодо висвітлення концептуальних положень та підходів інтеграції методології математичного та комп'ютерного моделювання в аналітику досліджень функціонування логістичних процесів та систем.

Формулювання цілей статті

Метою статті є обґрунтування доцільності використання основних концептуальних положень математичного та комп'ютерного моделювання як інтегрованого методу досліджень логістичних процесів та систем.

Виклад основного матеріалу

Специфіку розробки математичної моделі обумовлює складова предметної галузі, в межах якої вона має існувати. Управління логістичними процесами відбувається в межах організації логістичної системи, побудованої на визначених логістичних функціях та задачах. Ієрархія логістичної системи передбачає як визначення процедури послідовності відповідальності реалізації управлінських функцій, так і взаємозв'язків елементів та підсистем, що генерують управлінський вплив. Обмежимося описом логістичної системи на рівні виконання функції постачання та обслуговування. Така організація ієрархії визначена центральним органом управління та сукупністю господарських організацій, діяльність яких проводиться у відповідності до територіальної належності ринків, правових відносин згідно юридичного статусу і основним видом діяльності якого є постачання, торгівля і обслуговування матеріально-технічних ресурсів. В логістичному середовищі діяльність системи обумовлена складовими руху матеріальних, інформаційних та фінансових потоків, що виникають всередині системи та відображують динаміку основних економічних характеристик.

Направленість матеріальних потоків визначена як зовнішня – від постачальників ресурсів у систему, так і внутрішня – від вищого рівня ієрархії системи до нижчого (з центру розподілу на філії/представництва, з філій/представництв до споживача). Інформаційні потоки відображають рух зовнішньої інформації (зовнішнє середовище надає відповідні інформаційні сигнали) та внутрішньої (обмін інформацією всередині системи). Фінансові потоки є потоки фінансових ресурсів (гроші чи інші фінансові активи), що відтворюють процес розрахунків за отримані товарно-матеріальні цінності, надані послуги як у самій системі (між вищим рівнем ієрархії і нижчим рівнем), так і з боку зовнішнього середовища (розрахунки між системою і постачальниками товарно-матеріальних цінностей).

Розгляд функціонування системи розглядається за умов відносно стійкої рівноваги, тобто зовнішній вплив на зміни структури системи є мінімальним. Так, якщо мова йде про місце окремого постачальника в організації системи глобального ланцюга постачання, то досягти рівноваги можна за рахунок утримання відповідного рівня цін, споживання, обсягів виробництва та рівня інвестування при відповідних умовах контрактів [6]. Стійкість системи в ринкових умовах залежить від її потенційних можливостей витримувати балансову рівновагу і достатню інтенсивність грошових і матеріальних потоків, які йдуть від зовнішнього середовища до неї. Ці потоки можуть бути як взаємозалежними, так і взаємозалежними. Перший вид потоків можна назвати типовим, другий характеризує динамічну стійкість системи і отожднюється з

фінансово-посередницькою діяльністю і матеріальним обміном. Слід зазначити, що отримання динамічної рівноваги залежить від траєкторії розвитку процесів накопичення та витрат ресурсів в системі, яка будується у межах розв'язку класичних та прикладних задач оптимального управління запасами. Залежно від природи імовірнісних чинників, що формують дану систему, вирізняють детерміновані й стохастичні моделі. Проте, їх загальнонаправленість вирішує завдання поповнення та організації надходження запасів, з огляду на накопичення резервів ресурсів в системі [11, 12].

Відображення взаємодії матеріальних ресурсних потоків здійснюється формалізацією потоку через подачу на вхід системи потоку заявок, які перетворюються за визначеними операційними вимовами та дисципліною обслуговування і поступають на вихід. Стійкість системи будемо розуміти такий внутрішній процес перетворення цих потоків, який забезпечить її існування під впливом зовнішніх чинників. З економічної точки зору, фактори зовнішнього середовища при даній формалізації можна класифікувати за двома основними групами: економічні і природно-кліматичні. Група природно-кліматичних факторів не здійснює суттєвого впливу на функціонування системи (окрім, категорії природних та екологічних ризиків), то в межах даного опису її можна не враховувати. Група економічних факторів, які є мінливими і часто слабо визначеними, впливає як на організаційну, так і на фінансову діяльність системи. Значення деяких із них можна оцінити в прогностичному рішенні, для інших – вивести імовірнісну оцінку, або визначити діапазон можливих значень. Це дозволить забезпечити відносну стійкість для системи ресурсних поставок у зовнішньому середовищі.

Опис предметної області покладено в основу створення математичної моделі, яка за своєю сутністю є описом задачі у вигляді математичних залежностей та рівнянь. Аналіз моделі проводиться за допомогою контрольних даних, які з певною значимістю відповідають інформаційним потокам, та алгоритмом обчислення, закладеним у процес моделювання. Реалізація такого підходу відбувається шляхом використання комп'ютерної техніки та ітераційного обрахунку з подальшим аналізом результату і формуванням кінцевого рішення. Обчислення використовують комп'ютерне моделювання, сама постановка якого може здійснюватись у межах прикладного програмного забезпечення, розробленого або готових пакетів програм. Тобто, математичне та комп'ютерне моделювання є невід'ємно пов'язаними між собою як метод дослідження та технологія обробки даних з використанням конкретних технологічно-алгоритмічних рішень.

Принципи і методи моделювання знайшли широке застосування в інженерних та інших прикладних задачах. Особливу роль вони відіграють в проектуванні і аналізі функціонування логістичних систем [13–16]. За своїми характеристиками модель логістичної системи охоплює структуру та зв'язки, що відображують властивості системи. Розвиток математики обумовив появу складних та агрегованих моделей, що відображують функціонування складних систем на основі визначених характеристик на основі функціонального та структурного підходів. Згідно з структурним підходом, систему розглядають у межах декомпозиції на підсистеми та відносини між ними. Функціональний підхід дозволяє уточнити особливості функціонування системи на основі властивостей (функцій), що виокремлюються згідно сформованого критерію ефективності.

Принципи моделювання логістичних систем можна розглядати як з боку побудови системи моделей і їх адекватності, так і з боку критеріїв, обмежень, змінних, якими описується модель. В першому випадку вирішується питання побудови моделі на основі загальних принципів, в другому, побудована модель порівнюється з реальним об'єктом і вирішується питання, якою вона повинна бути. Спроектвана модель повинна чітко відображувати основні явища і процеси реальної системи, тобто бути коректною з точки зору вибору критеріїв оцінки. Існує взаємозв'язок між складністю побудови моделі та її властивостями. Тобто чим складніша модель, тим якісніше вона прогнозує поведінку об'єкту, але тим важче її зрозуміти. Коли модель є менш складною, вона більш просто відтворює існуючі процеси, але характеристики, які отримані при цьому є менш якісними і точними. Для великих складних систем можливо знайти оптимальну форму, шляхом декомпозиції, яка дозволяє описати систему досить просто. Принцип розділу системи на компоненти може бути застосованим при описі логістичних систем з метою відтворити функціонування конкретних блоків та функцій системи. Математична модель включає основні складові: функцію мети (математичний вираз критерію ефективності), систему обмежень (у разі обмеженості та зміни умов функціонування), параметри моделювання.

Процес моделювання невід'ємно пов'язаний з визначенням інформаційного забезпечення моделі, який передбачає аналіз необхідної кількості статистичної і нормативної інформації, що пов'язана з логістичним об'єктом. Результатом таких дій є встановлення законів розподілу, виведення рівнянь, визначення імовірнісних і стохастичних залежностей. У випадку відсутності конкретних даних, будуються імовірнісні гіпотези, які змінюються і уточнюються у подальшому процесі роботи. Одним із таких підходів є проведення аналізу даних для оцінки відповідності вхідного потоку замовлень в логістичну систему за критерієм χ^2 -квадрат Пірсона [17, с. 368]:

1. Формується дві гіпотези H_0 і H_1 . H_0 – гіпотеза, що експериментальний розподіл відповідає закону Пуасона. H_1 – гіпотеза, що експериментальний розподіл не відповідає закону Пуасона.

2. Приймається рівень значимості 0,05.

3. Розраховують $\chi^2_{\text{практ}}$ і $\chi^2_{\text{теор}}$, практичне і теоретичне значення критерію χ^2 -квадрат Пірсона для перевірки H_0 .

4. Визначається середнє значення сукупності кількості замовлень на ресурси від постачальників до центрального розподільчого центру за формулою:

$$\lambda = \frac{\sum x_i n_i}{\sum n_i} = \frac{1623}{2555} = 0,635 \tag{1}$$

де λ – середнє значення сукупності;
 x_i – елемент сукупності;
 n_i – експериментальна частота x_i .

5. Визначають теоретичні імовірності і частоти по формулі Пуасона:

$$P(X = m) = \frac{\lambda^m e^{-\lambda}}{m!} \tag{2}$$

де $P(X = m)$ – імовірність по закону Пуасона;
 m – значення, що приймає величина X від 0,1,2,3,4... m .

6. Обчислюють значення p_i для кожної ознаки x_i з перевіркою рівняння:

$$\sum_{i=1}^l P(X = m) = 1 \tag{3}$$

7. Визначають теоретичні частоти, як p_i при $n = 2555$. Сума p_i приблизно дорівнює 2555.

8. Визначають $\chi^2_{\text{практик}} = 10,91$.

9. Визначають кількість ступенів свободи за формулою:

$$k = L - 1 - S = 7 - 1 - 1 = 5, \tag{3}$$

де k – кількість ступенів свободи;
 L – число класів (груп, інтервалів) вибірки;
 S – кількість параметрів, використаних для обчислення теоретичних частот.

10. Співставляють табличне значення критерію: $\chi^2_{\text{практик}} < \chi^2_{0,05; 10,91} < 11,1$. Таким чином, експериментальний розподіл співпадає з теоретичним розподілом, тобто відповідає закону Пуасона. Загальні результати розрахунків математичного розподілу заявок на обслуговування тракторів в логістичній системі постачання у Вінницькій області (2021 р.) наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунків вхідного потоку заявок на трактори у Вінницькій області одержані на основі критерію χ^2 -квадрат Пірсона

x_i	n_i	$x_i n_i$	p_i	p_i^n	$(n_i - p_i)^2 / p_i$
0	1352	0	0,529816	1353,68	0,002086
1	862	862	0,336553	859,8918	0,005169
2	281	562	0,106893	273,1124	0,227798
3	50	150	0,022634	57,82928	1,059975
4	7	28	0,003594	9,183651	0,519220
5	3	15	0,000457	1,166737	2,880557
6	1	6	0,000048	0,123523	6,219153
Всього:	2555	1623	0,999947	2554,988	10,91396

Джерело*: розраховано авторами за даними Головного управління статистики у Вінницькій області

Відмітимо, що для полегшення роботи з багатоплановою інформацією і корекцією характеристик, що отримуються, доцільно розробити систему збору, зберігання і аналізу інформації про поведінку об'єкту, методи статистичної обробки інформації, методи прогнозування [19] і програмне забезпечення. Інформаційне забезпечення є основою нових даних для застосування комп'ютерного моделювання, в ході якого відбувається: перехід від суто математичної моделі до створення алгоритму та написання програми [20]; планування та проведення комп'ютерних експериментів; аналіз та інтерпретація результатів. Аналітична складова комп'ютерного моделювання ототожнюється з розробкою математичної моделі, яка в ході експерименту дозволить отримати результат збіжний до відповідного рівня точності. Слід зазначити, що одним із найкращих методів оцінок виявлення змістовності інформаційних потоків та їх причинно-наслідкових впливів є використання математико-статистичних та економетричних методів, в основі яких покладено оцінку та якість апроксимованих функцій зв'язків у системі [21, 22].

Розрізняють наступні підходи до комп'ютерного моделювання [14, с. 93–96]: дискретно-подійне моделювання (процесно-орієнтоване); системна динаміка; агентне моделювання. Дискретно-подійне моделювання розглядає ієрархію системи зверху вниз, ставлячи в основу складові структури. Агентне моделювання досліджує поведінку індивідуальних об'єктів. Системна динаміка передбачає аналіз поведінки з урахуванням часових критеріїв. Спеціальним етапом комп'ютерного моделювання є розробка програмного забезпечення для отримання необхідних в ході моделювання характеристик. У такому випадку створюються алгоритми, які моделюють поведінку системи, алгоритми пошуку оптимальних характеристик системи. Оскільки всі ці процедури виконуються окремими програмними блоками, виникає необхідність у їх систематизації і поєднанні.

Наступним етапом моделювання є оцінка адекватності розробленої моделі досліджуваному об'єкту.

Це досягається шляхом порівняння теоретичних характеристик моделі з характеристиками реального об'єкту. Останнім етапом моделювання є отримання характеристик системи і змістовний їх аналіз у залежності від завдань, які ставились дослідженням.

Взаємозв'язки, що складають структуру логістичної системи з одного боку ініціюють процес обслуговування на рівні центрального розподільчого постачання відносно філій, з другого – процес надходження матеріальних ресурсів до розподільчого центру. Ці види процесів можуть бути зведені до задач масового обслуговування. Основа таких задач зведена до наявності клієнта, що має певну заявку і прилади виконання, які забезпечують виконання цієї заявки. Основними характеристиками, які описують систему постачання ресурсів як мережу масового обслуговування, є вид вхідного потоку, характер виконання та вибору заявок, кількість каналів виконання, обмеженість потоку замовлень.

Основними параметрами системи при цьому можуть бути імовірність простою каналу виконання, імовірність того, що в системі знаходиться певна кількість заявок; середня кількість заявок, що знаходяться в системі; середня кількість заявок, що знаходяться в черзі; середній час очікування заявок в черзі; середній час перебування заявки в системі; середня кількість вільних від виконання каналів; середня кількість зайнятих каналів. Базова класифікація моделей систем масового обслуговування була створена англійським вченим Кендалом. Відносно класифікації Кендала модель системи масового обслуговування представлена у такому вигляді: вид вхідного потоку / розподіл тривалості обслуговування / кількість приладів виконання. Згідно цієї класифікації система постачання ресурсів може бути представлена у загальному вигляді як $M/G/s/$, модель системи з s обслуговуючими приладами, пуасонівським розподілом вхідного потоку і довільним розподілом інтервалів часу між замовленнями. Модель може бути приведена до функціонування мережі по типу $M/M/s$, модель системи з s обслуговуючими приладами, пуасонівським розподілом вхідного потоку і експоненціальним інтервалів часу між замовленнями, а в найпростішому вигляді, до моделі типу $M/M/1$, модель системи з 1 обслуговуючим приладом, розподілом вхідного потоку за законом Пуасона і експоненціальним розподілом інтервалів часу. Основним при розгляді системи масового обслуговування є її функціонування в умовах стаціонарності, тобто у встановленому режимі. Розгляд нестаціонарного режиму поведінки системи пов'язаний зі значними математичними викладками і обчислювальними труднощами. Тому, при проектуванні моделі логістичної системи постачання розглядаємо її роботу в стаціонарному режимі. Статична рівновага системи при цьому визначається, як встановлений процес з ймовірностями, що не залежать від часу, у випадку, коли система функціонує досить тривалий час і вплив початкового стану системи на її поточний стан зникає.

У складних системах при визначенні стану стаціонарності цей параметр необхідно адекватно визначити. Таким чином, описуючи поведінку логістичної системи як функціонування мережі масового обслуговування розглядаємо детальний механізм процесу забезпечення на вищому рівні ієрархії. Визначення характеристик мережі дозволяє проконтролювати кількість виконаних замовлень і їх виконання за інтервал часу. При прогнозуванні поведінки системи рівня філій доцільно використовувати математичні викладки на основі результатів одержаних при експериментальних спостереженнях. З цією метою проводиться комп'ютерна імітація процесу на основі формалізованої моделі за допомогою комп'ютерної техніки, засобів програмування. Процес спостереження за поведінкою системи і оцінка її роботи на основі моделі є комп'ютерним імітаційним моделюванням. Серед переваг імітаційного моделювання: розв'язання задач великої складності, що містять громіздкі аналітичні співвідношення; досліджувана система одночасно може містити в собі дискретні і безперервні елементи; легка зміна початкових умов і параметрів системи; низькі витрати при проведенні експерименту на ЕОМ порівняно з реальним експериментом та ін. Одночасно метод імітаційного моделювання має суттєвий недолік: моделювання проводиться при зафіксованих початкових умовах і визначених параметрах системи. Це потребує багатократного проведення експерименту при заданих початкових умовах (метод Монте-Карло). Результатом такого дослідження є опосередковані дані по певній кількості проведених іспитів. Статистично такий підхід залежить від визначення обсягу експериментів для адекватної оцінки реального об'єкту (з точки зору мінімальної похибки).

Імітаційна модель функціонує на основі моделюючого алгоритму. Алгоритм будується на базі аналітичних моделей. Його основою є процес обліку системного часу. Відомими принципами побудови імітаційних моделей є: "принцип Δt ", принцип "особливих станів", "принцип послідовного проведення замовлень" [23, 24]. Відмітимо, що імітаційні моделі рідко обмежуються лише одним вибраним принципом побудови алгоритму. В більшості випадків їх побудова поєднує декілька вищевказаних принципів. На даному етапі можливо виділити дві основні групи імітаційних моделей: 1) імовірно-автоматні моделі і 2) структурно-функціональні моделі.

В основі синтезу імовірно-автоматних моделей [25] лежать методи моделювання агрегованих систем і теорія дискретних автоматів. Основними визначеннями є імовірнісний автомат і система імовірнісних автоматів. Імовірнісний автомат – об'єкт, який описується внутрішнім станом, набором вхідних і вихідних сигналів. Аналіз системи складається із чіткого визначення взаємозв'язків між окремими автоматами, які описує матриця алфавітів.

Структурно-функціональні моделі будуються за блочним принципом. Кожен операційний блок відтворює виконання конкретної функції в технологічному процесі. Формалізація моделі менш складна з математичної точки зору. Такий підхід вимагає детального вивчення потоків вхідних даних, чіткого визначення критеріїв оцінки, аналізу технологічного процесу. Особлива увага приділяється інформаційному

забезпеченню (руху інформації по структурним одиницям системи і методу кодування).

Функціонування логістичної системи не описується лише інформаційним процесом надходження замовлення та його виконанням, пов'язаного з матеріальними потоками ресурсів. В такому випадку розглядається не тільки процес руху замовлення в системі з отриманням часових характеристик, а й інші процеси. Вони описуються: обсягом закуплених ресурсів; цінами виробників; витратами на зберігання; грошовими коштами, що вкладають у процес закупки; витрати, пов'язані з відсутністю замовлених ресурсів. Ці процеси відносяться до класу задач управління запасами. Задачі утворення і зберігання запасів вирішуються за допомогою методики ведення складського господарства. Ця методика вирішує питання – яка кількість ресурсу має бути в наявності на складах для того, щоб забезпечити процес поставок. Для оптимізації маршрутів перевезень найбільш доцільним є використання транспортних задач та їх модифікацій [26].

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Використання методів математичного та комп'ютерного моделювання при аналізі функціонування логістичних систем дозволяє провести їхню формалізацію, описати структурні елементи, внутрішні і зовнішні зв'язки, проаналізувати механізми потокового управління поставок та закупівель ресурсів, оцінити поведінку в ринкових умовах при співвідношенні параметрів за конкретизованих початкових умов і визначити при цьому оптимальні показники критеріїв ефективності системи.

В основу формалізації покладено опис предметної області (логістики постачання) визначеною обмеженою множиною причино-наслідкових чинників, взаємний вплив яких відтворює структуру системи та можливу апроксимацію описових функцій. Основу функціонування системи складає процес обслуговування замовлень в розрізі конкретних видів та номенклатур матеріальних ресурсів. Поточкові процеси можуть бути формалізовані у вигляді системної моделі на основі методів обробки та аналізу даних: математичної статистики, теорії масового обслуговування, теорії управління запасами, теорії оптимальних рішень. Вхідні потоки даних, що відповідають надходженням замовлень, є незалежними, ординарними і стаціонарними. Експериментально і теоретично може бути обґрунтовано, що закон розподілу вхідних даних – пуасонівський. Виходячи з цього можна при формалізації використати теорію масового обслуговування. Показники ефективності системи мають економічну складову, що потребує розробки функції ефективності з урахуванням специфіки фінансово-економічної діяльності логістичної системи.

Поведінковий аналіз системи слід проводити у межах побудованого комп'ютерного експерименту із використанням імітаційної моделі, яка має реалізувати потоковий процес обслуговування замовлень у системі з оптимальними економічними характеристиками.

Література

1. Potapova N. A. Systematic approach in formation of conceptual principles of agrilogistics. Вісник національного університету «Львівська політехніка». Проблеми економіки та управління. 2014. № 799. С. 89–95.
2. Малярець Л.М., Місюра Є.Ю., Койбічук В.В. та ін. Математичні методи і моделі в управлінні економічними процесами : монографія. Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. 420 с.
3. Лисенко С.О. Основні риси моделей та моделювання. URL: <http://vabb.com.ua/news/trisy-modeley-modeluvania.html>.
4. Bertalanffy L. Das biologische Weltbild, Bd. 1. Bern, 1949.
5. Bertalanffy L. General System Theory. Foundations, Development, Applications. NY, 1969.
6. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Морозов О.О. Характеристики рівноваг ланцюгів постачання. Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. Випуск 19. 2019. С. 31–37.
7. Горбова А.В. Моделирование работы парка прибытия железнодорожной станции. Транспортні системи та технології перевезень : збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. 2017. Вип. 13. С. 19–25.
8. Левкін Д.А., Бережна Н.Г., Макаров О.А., Кутя О.В. Математичне моделювання технічних систем. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. № 1. Том 32 (71) Ч. 1. С. 98–102.
9. Тараненко Ю., Федоренко І. Імітаційне моделювання логістичних процесів. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка: Економіка. 2016. № 8(185). С. 38–44.
10. Сергієнко О.А., Голофаєва І.П., Швець А.Д. Розроблення оптимізованої моделі логістичних ланцюгів постачання-розподілу підприємств. Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство. 2019. Випуск 28. С. 98–105.
11. Харченко Ю.А., Михайленко А.С. Економіко-математичне моделювання рівня запасів товарів торговельного підприємства. Економічний простір. 2018. № 136. С. 202–213.
12. Ковтун Т.А., Смокова Т.М. Формування складу учасників проекту створення транспортно-логістичного центру. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. 2020. № 2. С. 32–43.
13. Попов О.І. Теоретичні питання вибору економіко-математичних моделей для логістичної діяльності підприємств харчової промисловості. Інвестиції: практика та досвід. 2009. № 19. С. 29–31.

14. Соколовська З.М., Андрієнко В.М., Івченко І.Ю. та ін. Математичне та комп'ютерне моделювання економічних процесів : монографія ; за заг. ред. З.М. Соколовської. Одеса : Астропринт, 2016. 308 с.
15. Каут О.В. Аналіз сучасних технологій моделювання автоматизованих виробничих логістичних процесів. Східна Європа: економіка, бізнес та управління. 2018. Випуск 2 (13). С. 274–277.
16. Оболенцев В. Ф. Базові засади системного аналізу системи держави України монографія. Харків : Право, 2018. 98 с.
17. Опря А.Т. Статистика (модульний варіант з програмованою формою контролю знань). Навч. посіб. К. : Центр учбової літератури, 2012. 448 с.
18. Зінкевич Т., Лісовська В., Мельник О. Логістичні моделі в задачах економічної динаміки. Ринок цінних паперів в Україні. URL: <http://securities.usmdu.org/?p=22&n=91&s=948>.
19. Хорошун В.В., Науменко І.А. Економіко-математичні методи та моделі прогнозування збутової логістики торговельного підприємства. Причорноморські економічні студії. 2018. Випуск 28-2. С. 179–183.
20. Павленко П.М., Філоненко С.Ф., Чередніков О.М., Трейтjak В.В. Математичне моделювання систем і процесів : навч. посіб. К. : НАУ, 2017. 392 с.
21. Потапова Н.А. Економетричний аналіз причинно-наслідкових зв'язків компонентів структури реалізації зернових культур в збутовій агрологістиці. Формування ринкової економіки в Україні : збірник наукових праць. 2017. Випуск 38. С. 139–145.
22. Volontyr L., Zelinska O., Potapova N. Econometric modeling in formation of optimal price for implementation of agricultural products. Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики. 2019. № 5. С. 83–93.
23. Shannon, R.E. 1975. Systems Simulation the Art and Science, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
24. Savory P. and Mackulak G.T. (1994), "The Science of Simulation Modeling," International Conference on Simulation in Engineering Education (ICSEE '94), Volume 26, № 1, ed. Knadler and Vakilzadian, pp. 115-119, Tempe, Arizona, January 1994.
25. Бакаев А. А., Костина Н. И., Яровицкий Н. В. Имитационные модели в экономике : монография. Киев : Наукова думка, 1978. 304 с.
26. Славич В.П., Добрава К.Д. Модель та метод знаходження опорного та оптимальних планів модифікованої транспортної задачі у випадку групування постачальників вантажу. Прикладні питання математичного моделювання. 2020. № 1. Т. 3. С. 187–194.

References

1. Potapova N. A. Systematic approach in formation of conceptual principles of agrilogistics. Visnyk natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Problemy ekonomiky ta upravlinnia. 2014. № 799. S. 89–95.
2. Maliarets L.M., Misiura Ye.Yu., Koibichuk V.V. ta in. Matematychni metody i modeli v upravlinni ekonomichnymy protsesamy : monohrafiia. Kharkiv : KhNEU im. S. Kuznetsia, 2016. 420 s.
3. Lysenko S.O. Osnovni rysy modelei ta modeliuvannia. URL: <http://vabb.com.ua/news/risy-modeley-modeluvania.html>.
4. Bertalanffy L. Das biologische Weltbild, Bd. 1. Bern, 1949.
5. Bertalanffy L. General System Theory. Foundations, Development, Applications. NY, 1969.
6. Horbachuk V.M., Dunaievskiy M.S., Morozov O.O. Kharakterystyky rivnovah lantsiuhiv postachannia. Matematychnie ta komp'uterne modeliuvannia. Seria: Tekhnichni nauky. Vypusk 19. 2019. С. 31–37.
7. Horbova A.V. Modelyrovane raboty parka prybytyia zheleznodorozhnoi stantsyy. Transportni systemy ta tekhnologii perevezen : zbirnyk naukovykh prats DNUZT im. akad. V. Lazariana. 2017. Vyp. 13. S. 19–25.
8. Levkin D.A., Berezna N.H., Makarov O.A., Kutia O.V. Matematychnie modeliuvannia tekhnichnykh system. Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seria: Tekhnichni nauky. 2021. № 1. Tom 32 (71) Ch. 1. S. 98–102.
9. Taranenko Yu., Fedorenko I. Imitatsiine modeliuvannia lohistrychnykh protsesiv. Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka: Ekonomika. 2016. № 8(185). S. 38–44.
10. Serhiienko O.A., Holofaieva I.P., Shvets A.D. Rozroblennia optymizovanoi modeli lohistrychnykh lantsiuhiv postachannia-rozpodilu pidpriemstv. Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu. Seria: Mizhnarodni ekonomichni vidnosny ta svitove gospodarstvo. 2019. Vypusk 28. S. 98–105.
11. Kharchenko Yu.A., Mykhailenko A.S. Ekonomiko-matematychnie modeliuvannia rivnia zapasiv tovariv torhovelnoho pidpriemstva. Ekonomichniy prostir. 2018. № 136. S. 202–213.
12. Kovtun T.A., Smokova T.M. Formuvannia skladu uchasykiv proiektu stvorennia transportno-lohistrychnoho tsentru. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seria: Stratehichne upravlinnia, upravlinnia portfeliamy, prohramamy ta proektamy. 2020. № 2. S. 32–43.
13. Popov O.I. Teoretychni pytannia vyboru ekonomiko-matematychnykh modelei dla lohistrychnoi diialnosti pidpriemstv kharchovoi promyslovosti. Investytsii: praktyka ta dosvid. 2009. № 19. S. 29–31.
14. Sokolovska Z.M., Andriienko V.M., Ivchenko I.Yu. ta in. Matematychnie ta komp'uterne modeliuvannia ekonomichnykh protsesiv : monohrafiia ; za zah. red. Z.M. Sokolovskoi. Odessa : Astroprynt, 2016. 308 s.
15. Kaut O.V. Analiz suchasnykh tekhnologii modeliuvannia avtomatyzovanykh vyrobnychnykh lohistrychnykh protsesiv. Skhidna yevropa: ekonomika, biznes ta upravlinnia. 2018. Vypusk 2 (13). S. 274–277.
16. Obolentsev V. F. Bazovi zasady systemnoho analizu systemy derzhavy Ukrainy monohrafiia. Kharkiv : Pravo, 2018. 98 s.
17. Opra A.T. Statystyka (modulnyi variant z prohramovanoi formoiu kontroliu znan). Navch. posib. K. : Tsentr uchbovoi literatury, 2012. 448 s.
18. Zinkevych T., Lisovska V., Melnyk O. Lohistrychni modeli v zadachakh ekonomichnoi dynamiky. Rynok tsinnykh paperiv v Ukraini. URL: <http://securities.usmdu.org/?p=22&n=91&s=948>.
19. Khoroshun V.V., Naumenko I.A. Ekonomiko-matematychni metody ta modeli prohnozuvannia zbutovoi lohistryky torhovelnoho pidpriemstva. Prychornomorski ekonomichni studii. 2018. Vypusk 28-2. S. 179–183.
20. Pavlenko P.M., Filonenko S.F., Cherednikov O.M., Treitjak V.V. Matematychnie modeliuvannia system i protsesiv : navch. posib. K. : NAU, 2017. 392 s.
21. Potapova N.A. Ekonometrychnyi analiz prychnynno-naslidkovykh zv'iazkiv komponentiv struktury realizatsii zernovykh kultur v

zbutovii ahrolohistytsi. Formuvannia rynkovoï ekonomiky v Ukraini : zbirnyk naukovykh prats. 2017. Vypusk 38. S. 139–145.

22. Volontyr L., Zelinska O., Potapova N. Econometric modeling in formation of optimal price for implementation of agricultural products. *Ekonomika. Finansy. Menedzhment: aktualni pytannia nauky i praktyky*. 2019. № 5. S. 83–93.

23. Shannon, R.E. 1975. *Systems Simulation the Art and Science*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

24. Savory P. and Mackulak G.T. (1994), "The Science of Simulation Modeling," International Conference on Simulation in Engineering Education (ICSEE '94), Volume 26, № 1, ed. Knadler and Vakilzadian, pp. 115-119, Tempe, Arizona, January 1994.

25. Bakaev A. A., Kostyna N. Y., Yarovytskyi N. V. *Ymytatsyonnye modely v ekonomike : monohrafyia*. Kyev : Naukova dumka, 1978. 304 s.

26. Slavych V.P., Dobrova K.D. Model ta metod znakhodzhennia opornoho ta optymalnykh planiv modyfikovanoi transportnoi zadachi u vypadku hrupuvannia postachalnykiv vantazhu. *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuвання*. 2020. № 1. T. 3. S. 187–194.

Рецензія/Peer review : 23.03.2022 р.

Надрукована/Printed : 29.04.2022