

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

На правах рукопису

ДЗІНЬКО АНАСТАСІЯ МИХАЙЛІВНА

УДК 007.51

**МУЛЬТИАГЕНТНИЙ ПІДХІД ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ
ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ МАТЕРІАЛЬНИМИ ПОТОКАМИ В
ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ**

Спеціальність: 05.13.07 – Автоматизація процесів керування

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
Ямпольський Леонід Стефанович,
кандидат технічних наук, професор

Київ – 2016

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ МАТЕРІАЛЬНИМИ ПОТОКАМИ В ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ	13
1.1. Класифікація та місце матеріальних потоків в логістичних системах.....	13
1.2. Аналіз завдань, що вирішуються в рамках керування матеріальними потоками в логістичних системах	21
1.3. Мультиагентні моделі як сучасний підхід до моделювання роботи логістичних систем	31
1.4. Огляд методів моделювання руху матеріальних потоків в логістичних системах.....	34
1.5. Загальна постановка задачі досліджень	44
1.6. Висновки до першого розділу	47
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЬ РУХУ МАТЕРІАЛЬНИХ ПОТОКІВ В ЛОГІСТИЧНІЙ СИСТЕМІ НА БАЗІ АГЕНТНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ	48
2.1. Розробка організаційної структури узагальненої системи управління матеріальними потоками в логістичній системі.....	48
2.2. Розробка мультиагентної моделі середовища руху матеріальних потоків ..	55
2.3. Розробка моделі СДМП на базі економіко-математичної моделі логістичних ланцюжків поставок	58
2.4. Висновки до другого розділу.....	68
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ФУНКЦІЇ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ МАТЕРІАЛЬНИХ ПОТОКІВ ТА АЛГОРИТМІВ УПРАВЛІННЯ	69
3.1. Синтез функції диспетчеризації матеріальних потоків.....	69
3.2. Розробка алгоритмічного втілення поведінки інтелектуального агента диспетчера згідно розробленої функції	75
3.3. Алгоритм диспетчеризації матеріальних потоків з динамічною корекцією шляхом зворотного поширення пріоритетів.....	80
3.4. Прогнозування динаміки зміни пріоритетів та інші шляхи удосконалення алгоритму диспетчеризації матеріальних потоків.....	82
3.5 Висновки до третього розділу	87
4.1. Подання методики проведення імітаційних експериментів та опрацювання їх результатів	88
4.2. Розробка імітаційної моделі ланцюжка поставок.....	91

4.3. Проведення експериментальних досліджень на імітаційній моделі та аналіз отриманих результатів	94
4.4. Висновки до четвертого розділу	105
ВИСНОВОК	106
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	108
ДОДАТОК А	118
ДОДАТОК Б	122
ДОДАТОК В.....	125

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

GPSS	-	General Purpose Simulating System
JiT	-	Just-in-Time
MRP	-	Manufacturing Resources Planning
OPT	-	Optimized Production Technology
АОП	-	агентно-орієнтований підхід
АС	-	автоматизований склад
АСНД	-	автоматизована система наукових досліджень
АСТПВ	-	автоматизована система технологічної підготовки виробництва
АСУВ	-	автоматизована система управління виробництвом
АСУТП	-	автоматизована система управління технологічним процесом
АТЗ	-	автоматизований транспортний засіб
АТМ	-	автоматизований транспортний модуль
АУ	-	алгоритм управління
ВДО	-	виробництво допоміжного обладнання
ВП	-	виробничий процес
ГВС	-	гнучка виробнича система
ДП	-	динамічне програмування
ДМП	-	диспетчеризація матеріальних потоків
ЕОМ	-	електронна обчислювальна машина

ЕС	- експертна система
ІАС	- інформаційно-аналітична система
ІВС	- інтегрована виробнича система
ІКСП	- інгібіторна кольорова сітка Петрі
КД	- конструкторська документація
КСУ	- комп'ютеризована система управління
ЛП	- ланцюжок поставок
ЛС	- логістична система
МеМО	- мережа масового обслуговування
МЛПР	- марківський ланцюг прийняття рішень
МТЗ	- матеріально-технічне забезпечення
ОС	- операційна система
ОТАСУ	- організаційно-технічна автоматизована система управління
ОТП	- організаційно-трудова підготовка
ОУ	- об'єкт управління
ПМЗ	- програмно-математичне забезпечення
ПОІ	- понадоперативні інтервали
ППП	- пакети прикладних програм
РГП	- реалізація готової продукції
САПР	- система автоматизованого проектування
СДМП	- система диспетчеризації матеріальних потоків

СМО	-	система масового обслуговування
СОУ	-	система оперативного управління
СОУ МП	-	система оперативного управління матеріальними потоками
СП	-	сітка Петрі
СППР	-	система підтримки прийняття рішень
СУ	-	система управління
ТВК	-	територіально-виробничий комплекс
ТК	-	технологічна комірка
ТМО	-	теорія масового обслуговування
ТПВ	-	технічна підготовка виробництва
УП	-	управляюча програма
ФБД	-	фінансово-бухгалтерська діяльність
ІІ	-	штучний інтелект

ВСТУП

Економічна глобалізація є одним з найбільш потужних і динамічних факторів впливу на світові ринки, економічні взаємовідносини та виробництво. Серед найбільших змін, спричинених економічною глобалізацією, можна відзначити зростання конкуренції на індустріалізованих ринках, відповідне здешевшання продукції масового вжитку, підвищення доступності світових ринків, та інтернаціоналізацію виробництва та ринкових операцій [60, 38, 58, 78, 98, 54].

В сучасному світі, коли механізми матеріального забезпечення, виробництва, та розподілу готової продукції стали розширюватись і стирати кордони між регіонами, державами, та наддержавними утвореннями, а ланцюги матеріальних потоків стали поступово подовжуватись та ускладнюватись, все більше посилюється їх спеціалізація на різних рівнях. В таких умовах глобалізації необхідний пошук ефективних логістичних рішень, що здатні враховувати складний характер конфігурації ланцюгів поставок, географічні масштаби господарських операцій, багатомірність та інтеграцію матеріальних і фінансових потоків [49, 60, 38].

Поняття матеріального потоку є ключовим в логістичних системах. В спеціалізованих виданнях з логістики можна знайти безліч визначень матеріального потоку, проте всі з них сходяться на тому, що матеріальні потоки виникають в результаті транспортування, обробки, чи складування сировини, напівфабрикатів та готових виробів, починаючи від першоджерела сировини до кінцевого споживача на всіх стадіях матеріального виробництва, торгівельних операцій чи супутнього сервісу [53, 60, 25].

За умов постійного розширення масштабів територіально-виробничих комплексів (ТВК) проблема правильної організації, планування, та контролю матеріальних потоків стоїть дуже гостро. При їх диспетчеризації необхідно водночас враховувати такі властивості як розподіленість обробляючих ресурсів

у часі та просторі, їх масштабність, частоту зміни номенклатури оброблюваних матеріальних одиниць, їх кількісне вираження в кожній номенклатурі, час перебування на позиціях обробних ресурсів, виняткові обмеження та інше, вже не кажучи про можливість швидкого переналаштування чи збої в роботі [53, 30].

Суттю логістичного підходу до управління матеріальними потоками є інтеграція окремих ділянок логістичного процесу в єдину систему, що здатна швидко та економно виконати створення та/або доставку певного товару в потрібне місце та в потрібний час. Учасники логістичного процесу, охопленого єдиною системою управління можуть відноситись до однієї чи декількох організацій. В останньому випадку задача логістичного управління значно ускладнюється, оскільки в рамках єдиної системи необхідно об'єднувати різних власників, тобто суб'єктів з різними економічними інтересами [91, 44].

Існує багато моделей формального подання руху матеріальних потоків, зокрема, теорія масового обслуговування, марківські та напівмарківські процеси, методи імітаційного моделювання (наприклад, GPSS) і розподіленого метакерування в дискретно-подійних системах із застосуванням стратегій синхронізуючих зон, або ж застосуванням графів розподілу заявок і потужностей, апарат процесних алгебр тощо [81, 21, 26].

Проте на даний момент не знайдено методу диспетчеризації матеріальних потоків, який би охоплював організацію їх руху на усіх ієрархічних рівнях логістичних систем, і був би максимально гнучким в налаштуванні; наприклад, для методів, які базуються на теорії масового обслуговування, одним з основних недоліків є використання значних спрощень, що у свою чергу веде до неврахування усіх аспектів планування [81, 23].

Подібні задачі можуть виникати як при моделюванні процесів в автоматизованих транспортно-складських системах на виробництві, так і при плануванні розподілу товарів в логістичних системах [17]. Отже, можна стверджувати, що проблема диспетчеризації матеріальних потоків залишається

актуальною.

Актуальність теми. На сьогодні немає розробленого комплексного підходу до моделювання руху матеріальних потоків (МП) в логістичних системах (ЛС), який, з одного боку, дозволяв би описувати рух МП на всіх рівнях ЛС, а з іншого, - дозволяв би виконувати певні задачі оптимізації виконання логістичних функцій таким чином, щоб враховувати властивості МП на різних ієрархічних рівнях системи, адже МП, хоча й мають однаковий фізичний зміст, проте можуть володіти різними властивостями на різних ієрархічних рівнях ЛС.

Варто зазначити, що дослідженнями в напрямку автоматизації процесів керування в логістичних системах займалися такі вчені, як Martha C. Cooper, Douglas M. Lambert, Janus D. Pagh, Thomas C. Jones, Daniel W. Riley, David Lowe, Alan Rushton, Rex Faulks, Paul Fawcett, Martin Christopher, John Oxley, Phil Croucher, Michael B. Stroh, Yossi Sheffi, Gerhard Weiss, Reuben E. Slone, J. Paul Dittmann, Кутах О. П., Аникин Б. А., Никифоров В. С., Тяпухин А. П., Гаджинский А. М., Лукинський В. С., Персианов В. Ф., Пономаренко Л. А., Бакаєв О. О.

Перспектива розробки такого підходу дозволила б абстрагуватись від структури досліджуваних та проєктованих логістичних систем, а з іншого, - дозволила б проводити налаштування їх компонентів в рамках єдиної математичної моделі. Таким чином, незалежно від об'єкта дослідження – виробничого цеху, чи мережі поставок сировини на підприємство зі складами та перевальними пунктами, чи іншого, – можна було б використовувати єдину модель.

Дана дисертаційна робота є продовженням досліджень і розробок методів автоматизації процесів керування рухом матеріальних потоків в логістичних системах.

Об'єктом дослідження є автоматизована система керування

матеріальними потоками.

Предметом дослідження є моделі та методи автоматизації процесів керування матеріальними потоками в логістичних системах.

Мета і задачі дослідження. Підвищення ефективності автоматизації процесів керування матеріальними потоками в логістичних системах за рахунок мінімізації тривалості відхилення від виконання оперативного плану їх роботи, в тому числі в умовах нештатних ситуацій, шляхом застосування мультиагентного підходу.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

Розробка універсальної організаційно-технічної структури системи керування матеріальними потоками в логістичних системах на базі аналізу структур та функцій існуючих систем керування.

Розробка мультиагентної моделі логістичної системи як середовища руху МП з визначенням цільових функцій інтелектуальних агентів.

Розробка математичної моделі руху матеріальних потоків в логістичній системі.

Синтез функції диспетчеризації матеріальних потоків на базі розробленої моделі руху матеріальних потоків та мультиагентної моделі ЛС.

Розробка алгоритмічного втілення запропонованої функції диспетчеризації матеріальних потоків.

Розробка імітаційної моделі для досліджень працездатності та показників роботи розробленого алгоритму диспетчеризування.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використані: математичний апарат графів, математичний апарат сіток Петрі, теорія систем та мереж масового обслуговування, теорія марківських процесів, методи та підходи динамічного програмування, елементи теорії штучного інтелекту, як, наприклад, агентно-орієнтований підхід до вирішення задач прийняття рішень, теорія інформації та кодування, дискретно-подійне моделювання систем, технологія представлення даних JSON як універсальний засіб збереження та

передачі інформації.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Запропонований комплексний підхід до вирішення задачі диспетчеризування матеріальних потоків, що враховує різні рівні логістичних систем, від масштабу виробничої лінії до масштабу територіально-виробничого комплексу (ТВК);
2. Розроблено модель системи диспетчеризування матеріальних потоків на базі агентно-орієнтованого підходу з використанням елементів математичної теорії графів;
3. Розроблена функція диспетчеризації матеріальних потоків на основі марківських ланцюгів прийняття рішень;
4. Запропонований алгоритм диспетчеризування матеріальних потоків, що базується на використанні методів дискретно-стохастичного динамічного програмування.

Практичне значення отриманих результатів роботи:

5. Розроблена мультиагентна модель представлення динаміки руху матеріальних потоків в логістичних системах на базі економіко-математичної моделі ланцюжків поставок.
6. Розроблений метод диспетчеризування матеріальних потоків на основі дискретно-стохастичного динамічного програмування.
7. Розроблене алгоритмічне втілення представленого методу.
8. Розроблена імітаційна модель системи диспетчеризації матеріальних потоків, що дозволяє застосовувати розроблений алгоритмічний метод, а також аналізувати результати його роботи на цій моделі.
9. Сформований комплексний підхід до організації диспетчеризації матеріальних потоків на різних рівнях логістичних систем: від виробництва до масштабу ТВК.

Особистий вклад здобувача. Автором особисто проведений аналітичний огляд відомих методів представлення руху матеріальних потоків, а також

методів та підходів до диспетчеризації матеріальних потоків в логістичних системах. Було зроблено висновок, що останні мають перспективи на удосконалення, що призвело б до загальносистемного підвищення ефективності керування.

Розроблений алгоритм, а також відповідне програмне забезпечення для моделювання руху матеріальних потоків як в штатному, так і в множині позаштатних режимів роботи. В роботі наведені результати досліджень, що були отримані особисто автором. У випадку, коли використовувалась відома інформація, на неї наводились посилання на відповідні джерела та їх авторів.

Зв'язок з науковими роботами, планами, темами. Робота виконана в рамках дослідницької та науково-методичної роботи кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», а також в рамках участі в міжнародному проекті «Подвійний магістерський диплом з автоматизації / мехатроніки країн ЄС – країн партнерів» №517138-TEMPUS-1-2011-1-CZ-TEMP-JPCR.

Апробація роботи. Головні тези даної дисертації були представлені та обговорені на наступних науково-технічних конференціях: міжнародна науково-технічна конференція «Автоматика: Проблеми, ідеї, рішення», м. Севастополь 5-10 вересня 2013р.; «Конференція молодих вчених», м. Київ, ІПМЕ ім. Пухова, 16-17 січня 2013 р.; конференція «Автоматика: Проблеми, ідеї, рішення», м. Севастополь 5-10 вересня 2014 року.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 10 наукових праць, у тому числі 7 статей у наукових фахових виданнях (усі з них у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз: WorldCat, Google scholar та РІНЦ), 3 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ МАТЕРІАЛЬНИМИ ПОТОКАМИ В ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ

1.1. Класифікація та місце матеріальних потоків в логістичних системах

Потік – це сукупність об'єктів, що сприймаються як єдине ціле. Отже, матеріальний потік – це сукупність матеріальних об'єктів. Матеріальні потоки зустрічаються всюди. До матеріальних потоків можна віднести інформаційні, енергетичні, світлові, магнітні потоки та багато інших. Та найбільш часто цей термін використовують в логістичних системах, що об'єднують в собі всі суб'єкти управління матеріальними потоками, починаючи від першоджерел сировини, і закінчуючи мережами збуту готової продукції, а, відповідно, наукою, що вивчає рух матеріальних потоків є логістика [16].

Означення 1.1. *Матеріальний потік* - це матеріальні ресурси, що знаходяться в стані руху, незавершене виробництво і готова продукція, до яких застосовуються логістичні операції, пов'язані з їхнім фізичним переміщенням в просторі: завантаження, розвантаження, упакування, перевезення, сортування, консолідація, розукрупнення, накопичення, розподілення, тощо [18].

Означення 1.2. *Логістика* - наука про планування, організацію, управління, контроль і регулювання руху матеріальних та інформаційних потоків в просторі і часі від їх першого джерела до кінцевого користувача [27]. Іншими словами, логістика - це планування, управління та контроль потоку матеріальної продукції, яка надходить на підприємство, та відповідного йому інформаційного потоку [19].

З огляду на широке використання логістики в економіці логістику часто розуміють як сукупність різноманітних видів діяльності, що має за мету отримання з найменшими витратами необхідної кількості продукції у

встановлений час та у встановленому місці, де існує конкретна потреба в даній продукції [18].

Існує багато різних трактувань логістики. Аналізуючи, неважко помітити ряд аспектів, через призму яких розглядається логістика. Найбільшого розповсюдження отримали управлінські, економічні та оперативно-фінансові аспекти [17].

Матеріальний потік - це чинник, який дав змогу інтегрувати всі елементи логістичної системи в чітко функціонуючий механізм. Під матеріальним потоком з огляду на принципи логістики розуміють поєднання і зв'язки всіх процесів та операцій з добування, обробки та переробки, складування, транспортування та розподілу вантажів у сфері матеріального виробництва, на промислових підприємствах, у цехах та на виробничих ділянках [94, 51]. Будь-який потік реалізується на визначеному матеріальному носії, і з цієї точки зору усі потоки є матеріальними. Однак у господарській практиці матеріальні потоки розуміються у більш вузькому, але конкретному змісті, тобто як потоки матеріальних ресурсів, призначені для виробничого або кінцевого споживання. Значну роль відіграють матеріальні ресурси в суспільному виробництві [87, 11, 18].

Розрізняють зовнішні і внутрішні матеріальні потоки. Початковою точкою зовнішнього матеріального потоку є склад готової продукції підприємства-виробника, а кінцевою - склад виробничих запасів підприємства-споживача. Початковою точкою внутрішнього матеріального потоку є склад виробничих запасів підприємства-виробника, а кінцевою — його склад готової продукції. Незважаючи на те, що виробничі запаси мають робити виробничі системи незалежними від впливу зовнішнього середовища, внутрішні потоки перебувають під великим впливом матеріально-технічного постачання, тобто від зовнішніх матеріальних потоків [18].

Стосовно виробництва виділяють зовнішні матеріальні потоки, що циркулюють у сфері обігу, і внутрішні - безпосередньо на підприємстві, тобто у

сфері виробництва [45]. Зовнішні матеріальні потоки реалізують потреби матеріально-технічного забезпечення виробництва чи іншої розумної діяльності людини. Матеріальні потоки в системі МТЗ поділяються на групи засобів виробництва: сировина, основні матеріали, напівфабрикати, комплектуючі вироби, паливо, інструмент, інвентар, устаткування. Для кожної з перелічених груп передбачається ще більш поглиблена диференціація, але з точки зору логістики всі ці матеріальні ресурси утворюють простий потік, і саме такий потік повинен стати об'єктом управління [34, 38].

Подана вище класифікація матеріальних потоків, по суті, не може бути застосована для створення математичних моделей, що характеризують потоки певним чином, і, відповідно, дозволяють працювати з ними. Наукове ж управління потоками вимагає впорядкування та формалізації всієї їх різноманітності.

Основні параметрами, що характеризують потік є параметри, подані в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Формальні властивості матеріальних потоків

Параметр	Умовне позначення
початковий пункт потоку	a
кінцевий пункт потоку	b
траєкторія шляху	F
довжина шляху	D
швидкість переміщення потоку	V
час	t
проміжні пункти	q
інтенсивність потоку	λ

Нехай P – матеріальний потік, а S – логістична система. Тоді стан потоку може бути охарактеризований за допомогою його числових змінних (параметрів) як функція від часу (1.1):

$$P(a, b, F, D, q, V, \lambda) = f(t) \quad (1.1)$$

Основним параметром, що характеризує потік є його *щільність*, що репрезентує собою кількість об'єктів, що перебувають у русі, за одиницю часу.

На найвищому рівні всі матеріальні потоки можна класифікувати на дві великі групи – детерміновані та стохастичні [46, 95, 1].

Означення 1.3. *Детермінований матеріальний потік* – це потік, значення параметрів якого є визначеними в будь-який конкретний момент часу, як зображено на рис. 1.1, а. Інтервали між подіями є строго однаковими і рівними певній не випадковій величині. Такі потоки ще називають *регулярними* [1, 4].

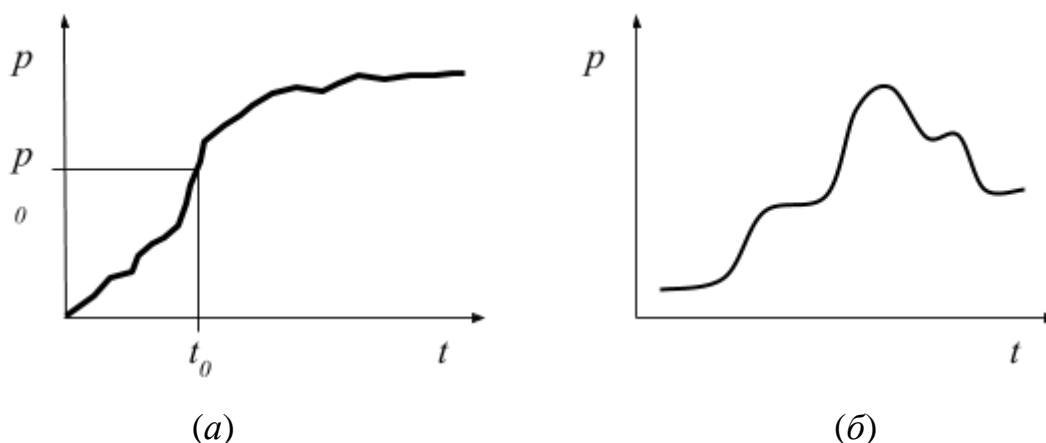


Рис. 1.1. Детермінований матеріальний потік

Означення 1.4. *Стохастичний матеріальний потік* – це потік, значення параметрів якого є випадковими величинами (рис. 1.1, б) [1].

Детерміновані потоки зустрічаються на практиці досить рідко і представляють собою певний інтерес як крайній випадок для інших потоків. Взагалі, в природі не існує абсолютно не випадкових потоків, але є потоки, на хід яких випадкові фактори впливають настільки слабо, що при опису стану

системи ними можна знехтувати. З іншого боку, існують процеси, в яких випадковість грає ключову роль [29].

Повну класифікацію матеріальних потоків, їх загальний вигляд та модель, подано в додатку А.

На виробництві матеріальні потоки представлені в першу чергу як рух деталей чи ремкомплекту між технологічними комірками (ТК) та між складами і ТК, тоді як в мережах збуту матеріальні потоки в першу чергу представлені як рух товарів між складами, перевальними базами та кінцевими споживачами чи точками продажу товарів кінцевим споживачам [3, 45].

В процесі роботи систем, що вивчаються в рамках логістики, на матеріальні потоки здійснюються впливи у вигляді керуючих сигналів диспетчера [8, 58, 82]. Ці впливи зумовлені:

- *необхідністю слідування календарному плану виробництва;*
- *реакцією на нештатні ситуації, пов'язані зі зміною планового ходу роботи таких систем:*
 - *зміну виробничих планів;*
 - *зміну пріоритетів операцій;*
 - *вихід з ладу обладнання;*
 - *тощо.*

Всі ці впливи неможливо передбачити, отже, робимо висновок, що надалі в роботі будемо використовувати лише стохастичні моделі матеріальних потоків [102, 51, 22].

Разом всі вищезгадані об'єкти (склади, виробництва, та ін., в рамках яких відбувається рух матеріальних потоків) можна об'єднати в єдину систему, яку називатимемо логістичною системою, в рамках якої і виконується власне управління матеріальними потоками.

Саме тому, далі слід розглянути поняття логістичної системи, в контексті якої існують матеріальні потоки.

Означення 1.5. *Логістична система (ЛС)* - це адаптивна система зі зворотними зв'язками, яка виконує ті чи інші логістичні функції (операції), складається із підсистем і має розвинуті внутрішньо-системні зв'язки та зв'язки із зовнішнім середовищем. В західній літературі частіше зустрічається термін *система управління ланцюжками поставок*, а терміну логістика надається вужче поняття, пов'язане лише з проблемами транспортування. Надалі в даній роботі обидва ці терміни вживатимемо синонімічно [60, 64, 75].

Рух потоків у будь-якій логістичній системі за Ламбертом можна подати як показано на рис 1.2.

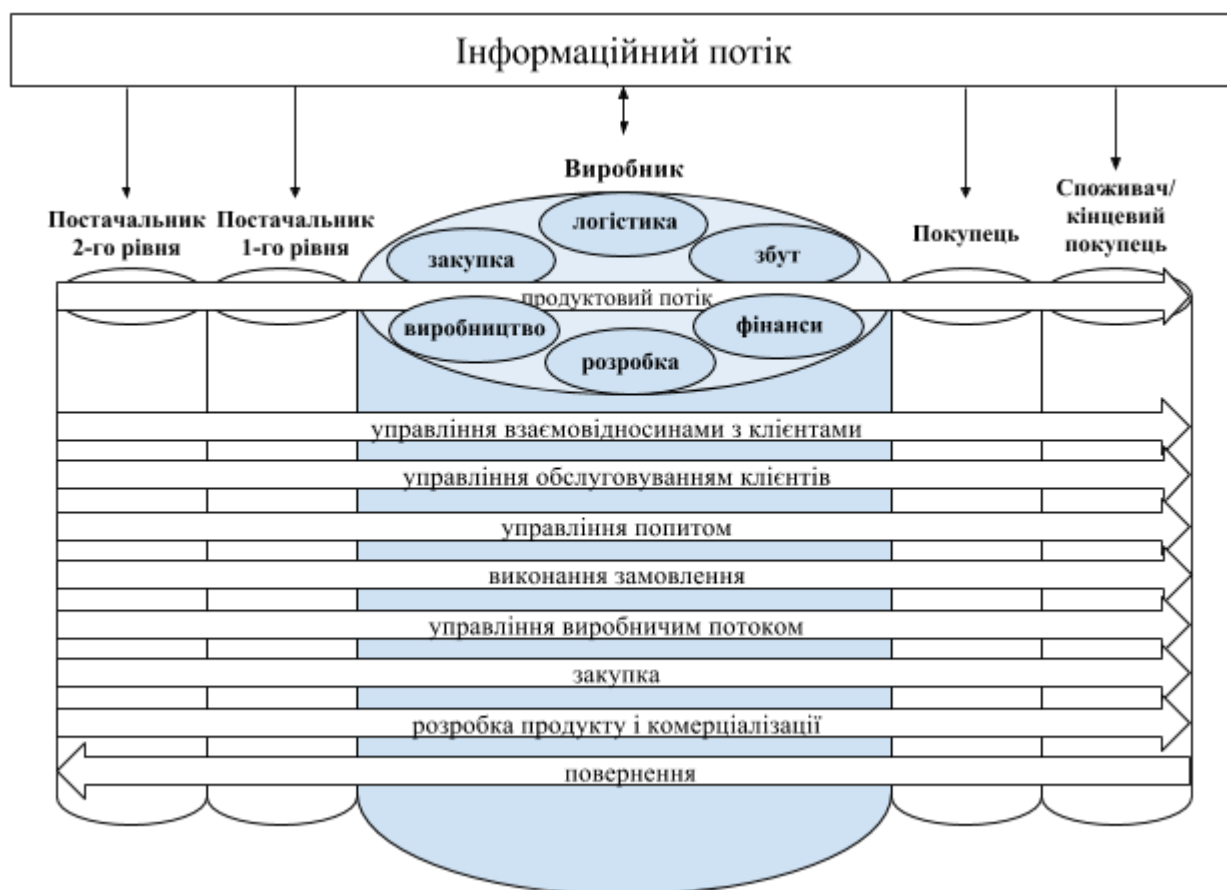


Рис. 1.2. Рух матеріальних потоків в ЛС за Ламбертом

Логістична операція являє собою відособлену сукупність дій, скеровану на перетворення матеріального та інформаційного потоку. Традиційними логістичними операціями вважаються: складування, транспортування, комплектація, навантаження, розвантаження, внутрішні переміщення сировини,

матеріалів, напівфабрикатів у виробничому процесі, а також збір, збереження та обробка даних інформаційного потоку [100, 2, 19].

Метою логістичної системи є забезпечення наявності необхідного товару в необхідній кількості і асортименті, заданої якості, в потрібному місці й у потрібний час, в максимально можливому ступені підготовлених до виробничого процесу або особистому споживанню при заданому рівні логістичних витрат [19].

Управління потоками в логістиці пов'язане з плануванням оперативним регулюванням, обліком, контролем та аналізом. Кожна з цих функцій поділяється на завдання, а останні - на операції. Номенклатура і склад завдань по кожній функції управління також визначаються сутністю керованих потоків [18, 71, 54].

В якості ЛС можна розглядати промислове підприємство, торгівельне підприємство, мережу магазинів тощо. Проте найбільш масштабною логістичною системою тут і надалі розглядатимемо територіально-виробничий комплекс (ТВК), – багаторівневу ієрархічну структуру, що охоплює повний цикл руху матеріальних потоків – від отримання сировини з її першоджерела до доставки готової продукції кінцевому споживачеві [6].

Що стосується ТВК, система диспетчеризації матеріальних потоків (СДМП) повинна вирішувати дві основні задачі:

- планування руху матеріальних потоків;
- диспетчеризація руху матеріальних потоків.

Кожен з рівнів логістичних систем виконує певну роль в структурі загальної логістичної системи і досліджується різними галузями науки, зокрема, логістики [27]:

- логістика закупівель;
- логістика збуту;
- транспортна логістика;
- складська логістика;

- інформаційна логістика;
- оперативна диспетчеризація на виробництві.

Традиційно, оперативна диспетчеризація як процес управління матеріальними потоками використовується в термінах гнучких виробничих систем, де матеріальні потоки представлені рухом деталей та ремкомплекту між ТК та автоматизованими складами (АС), а задачі управління потоками поставлені на систему оперативного управління (СОУ) ГВС [45, 46]. І, хоча, терміни, різняться, проте характер задач, що вирішуються, а також об'єкти досліджень є однаковими.

Ще одним підрозділом науки, на який варто звернути увагу, є логістика закупівель, в рамках якої велике значення надається оперуванню інформаційними потоками [39, 42].

Слід зазначити, що інформаційні потоки також можна віднести до матеріальних потоків, оскільки вони володіють всіма властивостями останніх, які було розглянуто в попередньому підрозділі. Для прикладу, розглянемо інформаційний потік, що утворюється на базі опитування клієнтів (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

Приклад наявності спільних властивостей інформаційного та матеріального потоків на базі процесу опитування клієнтів

Властивість матеріального потоку	Властивість інформаційного потоку
початковий пункт потоку (<i>a</i>)	Той, кого опитують
кінцевий пункт потоку (<i>b</i>)	Відповідальний за аналіз даних опитування
траєкторія шляху (<i>F</i>)	Шлях, що проходить інформація від того, кого опитують до відповідального за аналіз даних
довжина шляху (<i>D</i>)	Кількість опитаних
швидкість переміщення потоку (<i>V</i>)	Швидкість опитування

Закінчення табл. 1.2

час (t)	Час
проміжні пункти (q)	Ті, хто опитує
інтенсивність потоку (λ)	Кількість анкет за одиницю часу

Для того, щоб зрозуміти особливості руху матеріальних потоків в масштабах ТВК, необхідно розглянути всі ці аспекти, а також їх вплив на всіх структурних та управлінських рівнях ТВК, виділивши спільні та відмінні риси (якщо такі є) в процесах руху матеріальних потоків на кожному з них, а також проаналізувати їх рух між цими рівнями.

Таким чином, слід провести аналіз функцій логістичних систем на різних ієрархічних рівнях їх організації.

1.2. Аналіз завдань, що вирішуються в рамках керування матеріальними потоками в логістичних системах

Розглянемо узагальнену структуру логістичної системи, а також її зв'язок із зовнішнім середовищем. На найвищому рівні абстракції її можна представити як показано на рис. 1.3.

На рисунку зображена структура логістичної системи так званого *третього ступеня повноти*, тобто логістична система, що охоплює управління, починаючи від етапу управління отриманням сировини, до виконання функції збуту, включаючи в себе також функцію управління виробництвом, на відміну від логістичних систем *першого* та *другого ступеня повноти*, які не включають в себе функцію управління отриманням сировини, та виробництва відповідно [84, 28].

В рамках даної дисертаційної роботи розглядається саме логістична система третього ступеня повноти як найбільш охоплююча та всеосяжна в термінах диспетчеризації матеріальних потоків.

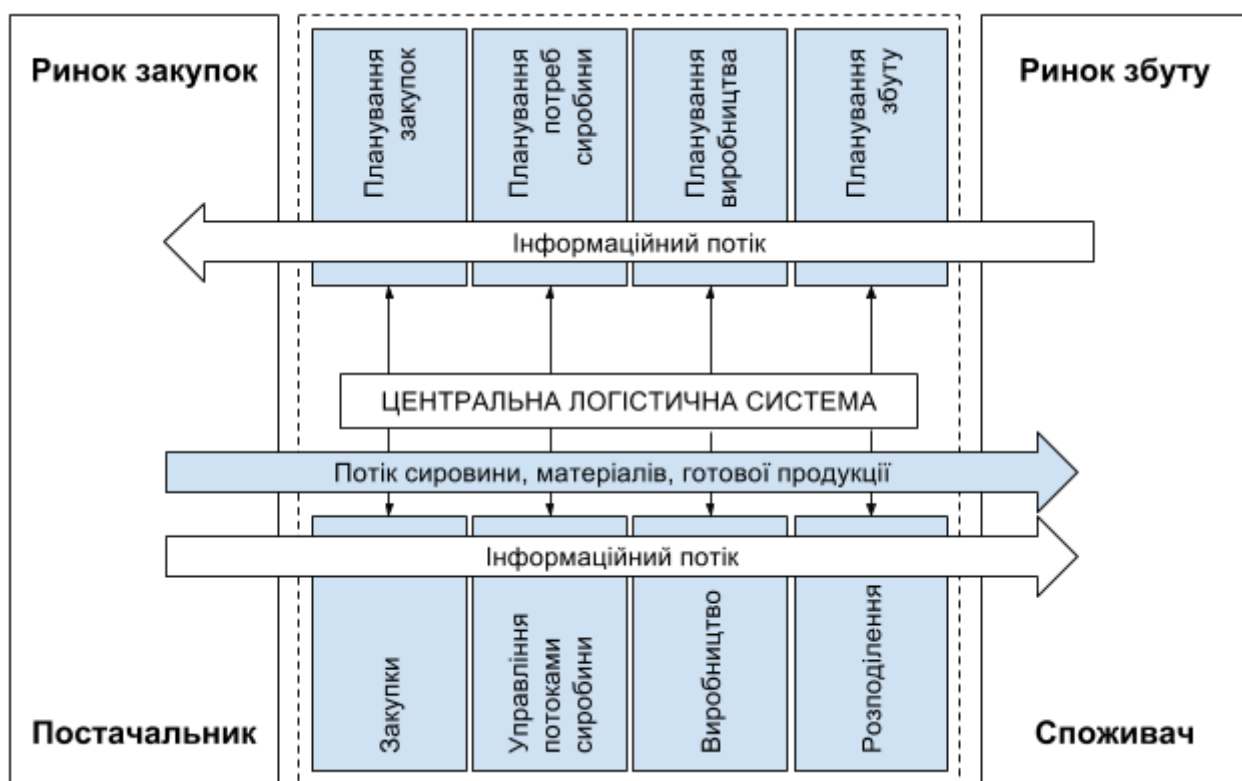


Рис. 1.3. Загальна структура та границі логістичної системи

З рисунку бачимо, що логістична система існує в середовищі, що визначається ринком, який умовно можна розділити на ринок закупівель та ринок збуту, а матеріальні та інформаційні потоки пронизують логістичну систему наскрізь, охоплюючи всі її компоненти [6, 11, 57].

Логістична система з точки зору виконання своїх завдань є системою управління, а, якщо точніше – адаптивною системою зі зворотнім зв'язком, що виконує ті чи інші логістичні операції та функції.

До основних логістичних функцій можна віднести [16, 17, 19, 56, 58]:

- здійснення наскрізного контролю за поточними процесами в логістичних системах;
- розробка та удосконалювання способів управління матеріальними потоками;
- багатоваріантне прогнозування обсягів виробництва, перевезень, запасів і т.д.;

- виявлення незбалансованості між потребами виробництва і можливостями матеріально-технічного забезпечення, а також потребами у логістичних послугах під час збуту і можливостями логістичної системи;
- стандартизація вимог до якості логістичних послуг і окремих операцій;
- раціональне формування господарських зв'язків;
- виявлення центрів виникнення втрат часу, матеріальних, трудових і грошових ресурсів;
- оптимізація технічної та технологічної структури транспортно-складських комплексів;
- визначення стратегії та технології фізичного переміщення матеріальних ресурсів, напівфабрикатів, готової продукції;
- формалізація актуалізованих (поточних оперативних) логістичних цілей і параметрів функціонування логістичної системи.

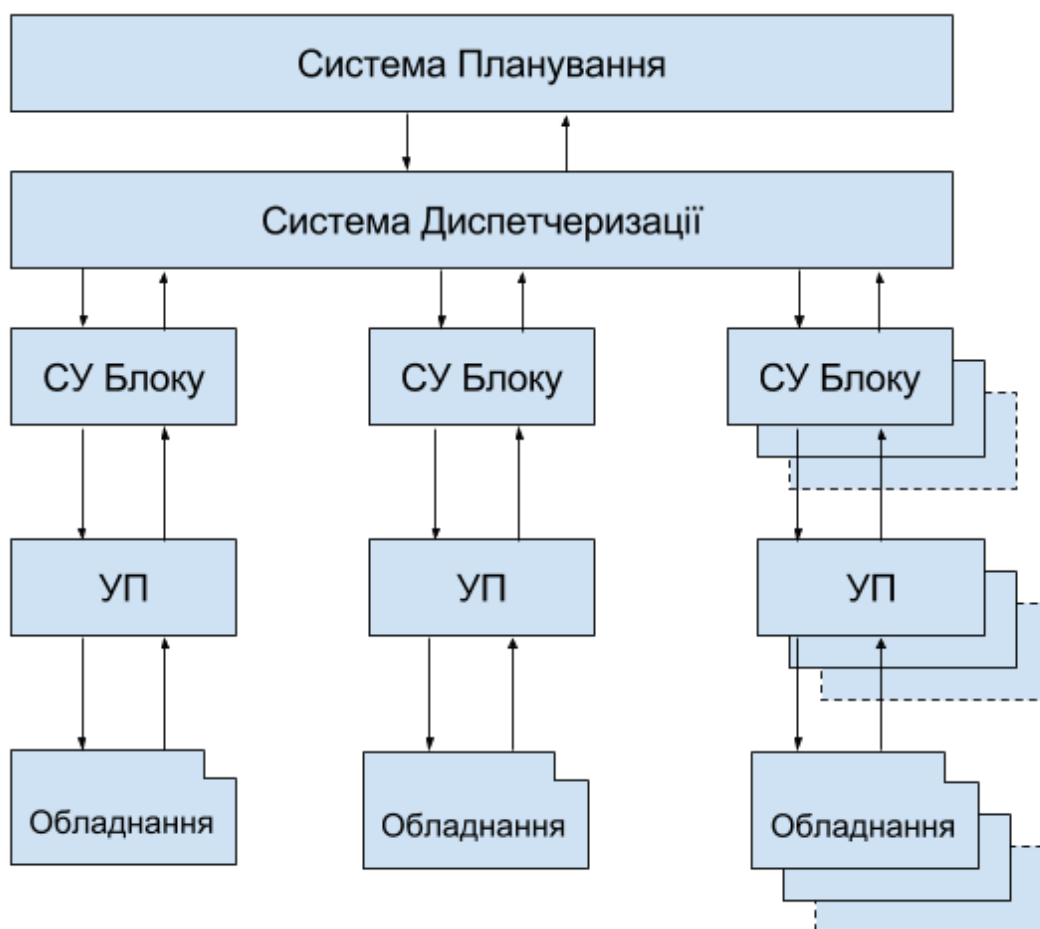


Рис. 1.4. Схема багаторівневої системи управління в логістичній системі

Розглянемо функціональну структуру і принципи роботи СДМП (рис. 1.5). СОУ реалізує принцип управління із зворотним зв'язком і складається з наступних основних блоків-модулів [45]:

- оперативне планування маршрутів (P1);
- оперативного обліку (P2);
- оперативного контролю (P3);
- оперативної диспетчеризації (P4);
- локального управління блоками (P5);
- оперативного корегування (P6);
- статистичного обліку (P7).

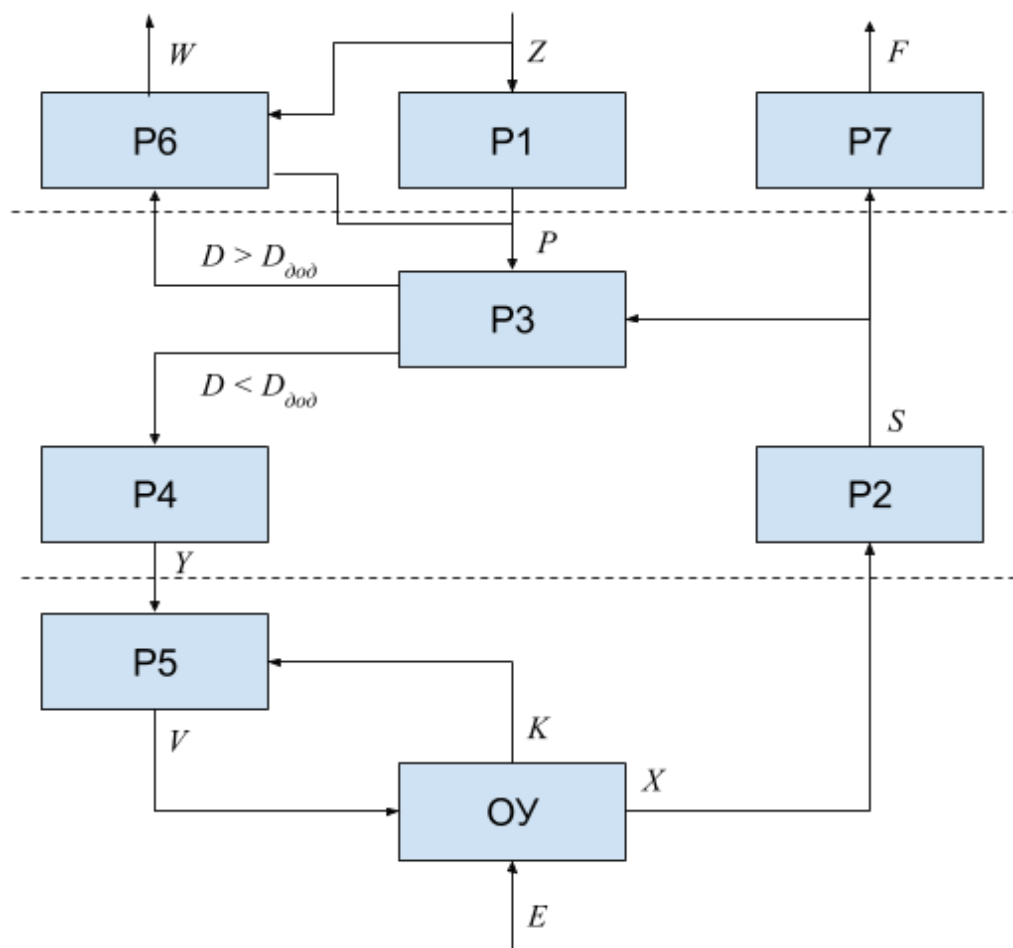


Рис. 1.5. Функціональна структура системи оперативного управління в ГВС

На вхід СДМП надходить цільова вказівка Z , що включає планове завдання у вигляді запланованих ланцюжків поставок, фонди матеріальних ресурсів, що

використовуються, і техніко-економічні показники для оцінки ефективності роботи.

Реалізація функцій управління із використанням ЕОМ здійснюється шляхом розробки і застосування програмно-математичного забезпечення (ПМЗ) комп'ютеризованих систем управління (КСУ) (рис. 1.6).

Формалізовано загальну структуру циклу виконання замовлення в логістичній системі можна представити як показано в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Структура циклу виконання замовлення в логістичній системі

Етапи циклу виконання	Групи операцій	Тип потоку
Отримання замовлення	Облік, обробка і оформлення замовлення	Інформаційний
Технічна підготовка	Розробка конструкції і технології виготовлення Організаційна підготовка Освоєння Організація переходу на випуск нової продукції	Інформаційний
Поставка матеріалів	Формування замовлення Вибір поставників Отримання і розміщення матеріалів на складі	Інформаційний Матеріальний
Підготовка до запуску	Отримання заготовок Підбір необхідного технологічного оснащення Проведення попередньої синхронізації Розробка плана-графіка випуску виробів	Інформаційний Матеріальний
Виготовлення замовлення	Технологічні операції Технологічний контроль виробництва Транспортування Диспетчеризації	Інформаційний Матеріальний
Поставка замовлення (збут)	Складування готової продукції Комплектація замовлення Відвантаження замовлення споживачеві	Інформаційний Матеріальний

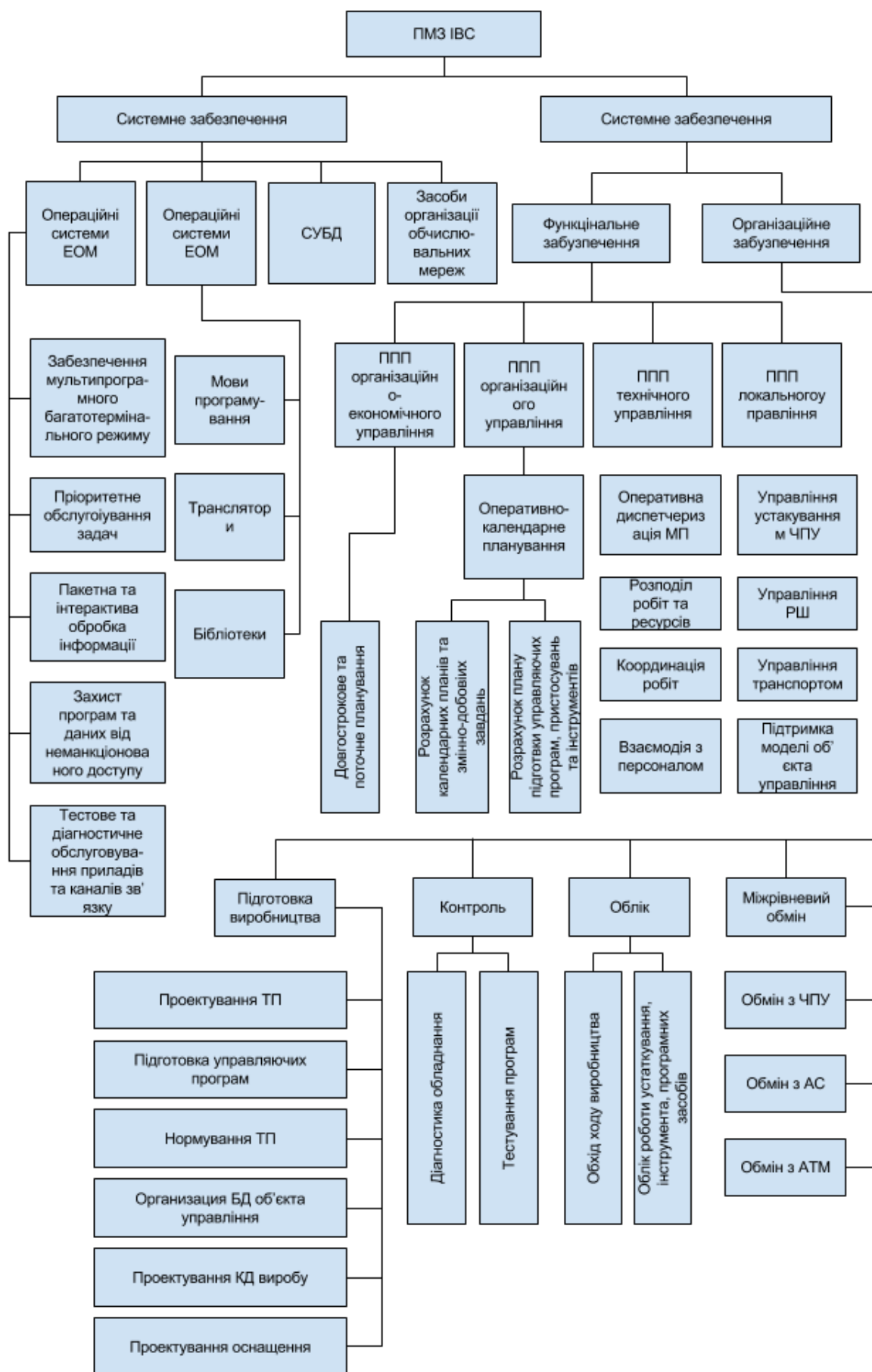


Рис. 1.6. Програмно-математичне забезпечення КСУ

Вхідні дані, що використовуються ЛС для виконання своїх функцій можна представити як зображено на рис. 1.7.

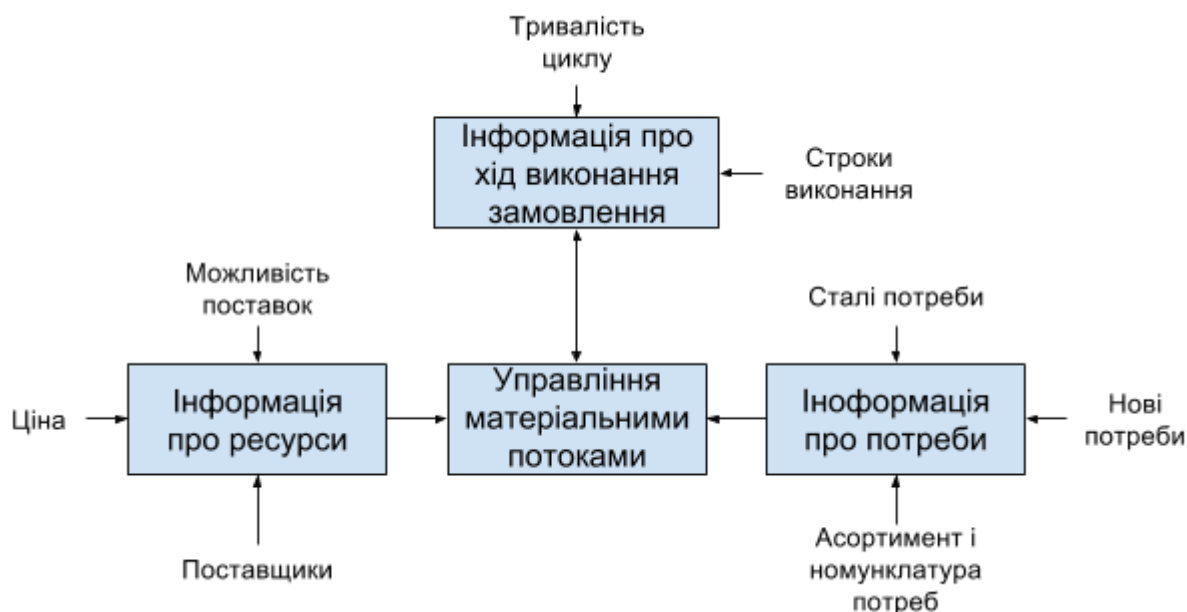


Рис. 1.7. Вхідні дані, що використовуються для виконання ЛС своїх функцій

Основною задачею оперативного диспетчеризування є не тільки побудова розкладу роботи устаткування та розстановки пріоритетності заявкам, а й управління матеріальними потоками таким чином, щоб встановлені графіки запуску-випуску деталей виконувалися чітко і в зазначеному порядку [98, 82, 86]. Отже, диспетчеризацію матеріальних потоків в ГВС можна розглядати як підзадачу оперативно-диспетчерського управління.

Кажуть, що в процесі роботи логістична система здійснює **логістичну функцію**, яку можна визначити як укрупнену групу логістичних операцій, що спрямовані на реалізацію цілей логістичної системи [26]. Логістична функція, при цьому, повинна працювати стабільно при наперед визначених відхиленнях параметрів і впливів зовнішнього середовища [17, 54, 72].

Кожен ієрархічний рівень ЛС виконує певну логістичну функцію як подано в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Деталізоване подання ієрархічних рівнів ЛС

Тип управляючої системи	Логістична функція	Фізичний компонент
Система оперативного контролю гнучкої виробничої системи	Транспортування елементів незавершеного виробництва (деталей, ремпкомплекту, ..)	Виробничий модуль Виробнича лінія Виробничий цех Підприємство
Система матеріального-технічного забезпечення	Складування Завантаження / розвантаження Комплектування / упаковка Внутрішні переміщення	Контейнер / палета Вантажний термінал / пункт доставки Склад Логістичний центр
Система інформаційно-аналітичного забезпечення	Збір інформації Обробка інформації Передача інформації	Корпорація Галузь економіки (міністерство) Глобальна економічна система

Як на рівні виробничому, так і на рівні матеріально-технічного забезпечення, система диспетчеризації матеріальних потоків повинна вирішувати дві основні задачі [86, 71, 51]:

- планування руху матеріальних потоків;
- диспетчеризація руху матеріальних потоків.

Більш детальне порівняння функцій системи ДМП на вказаних ієрархічних рівнях показано в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

Спільні та відмінні функції СОУ ГВС та СМТЗ

Функція	СОУ ГВС	СМТЗ
Формування зв'язків по доставці товарів чи послуг	+	+
Оперативне планування	+	+

Закінчення табл.1.5

Управління складськими операціями	+	+
Визначення об'ємів та напрямків матеріальних потоків	+	+
Прогнозні оцінки потреб в перевезеннях	+	+
Управління запасами	+	+
Автоматичне транспортування	+	-
Визначення послідовності проходження товарів/деталей через технологічні комірки/склади	+	+
Показники фінансової діяльності	-	+
Якісно-кількісні показники	+	-

В загальному вигляді процес реалізації логістичних функцій в рамках життєвого циклу логістичної системи можна розглядати таким чином як подано на рис. 1.8.

В процесі здійснення логістичної функції ЛС повинні працювати з урахуванням критеріїв ефективності [19, 26]:

- Номенклатура вантажу
- Якість вантажу
- Кількість вантажу
- Час доставки
- Фінансові витрати

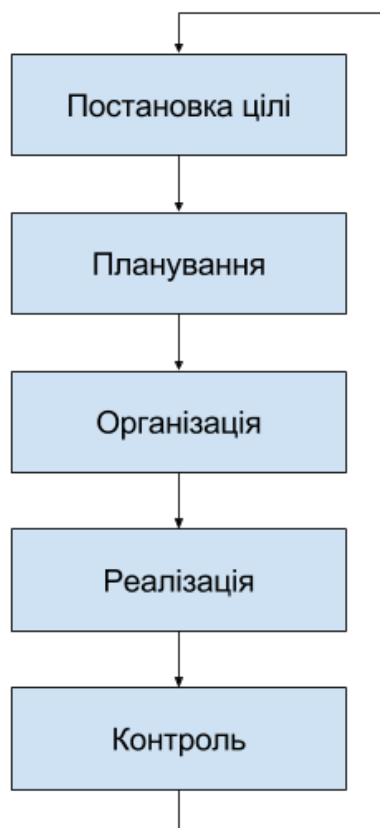


Рис. 1.8. Алгоритм здійснення логістичних функцій

Таким чином, можна формалізувати логістичну функцію як множину функцій (1.2) при заданих обмеженнях (1.3):

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = \sum_{j=1}^n c_j x_j \rightarrow \frac{\min}{\max}, \\ \dots \\ F_k = \sum_{j=1}^n d_j x_j \rightarrow \frac{\min}{\max}. \end{array} \right. \quad (1.2)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, x_j \geq 0. \quad (1.3)$$

Розв'язання такої багатокритеріальної задачі оптимізації не має стандартних підходів до пошуку рішень, а тому, в залежності від конкретної логістичної цілі, виконують або однокритеріальну оптимізацію, або знаходять квазіоптимальне рішення для двох критеріїв, де це можливо, користуючись тим

чи іншим методом (математичним апаратом) для моделювання матеріальних потоків складових логістичної системи [98, 94].

1.3. Мультиагентні моделі як сучасний підхід до моделювання роботи логістичних систем

Агентно-орієнтований підхід зазвичай використовується у відкритих, складних та інтерактивних системах, а ЛС можна віднести до кожної з цих категорій [83, 7]. Основою даного підходу є виділення деякої сутності (агента), що здатна автономно приймати рішення для вирішення поставленої задачі в умовах перебування в оточуючому середовищі. При цьому агент сприймає середовище з урахуванням умови невизначеності [37, 48].

Завдяки таким властивостям даного підходу, його можна використовувати в якості інструменту для розв'язання задачі побудови логістичної системи диспетчеризації матеріальних потоків в багаторівневих гнучких виробничих системах чи їх складових [92, 77, 78].

В цьому випадку об'єкт дослідження характеризується широким спектром довільних вхідних даних та широким спектром критеріїв якості кінцевої системи, а середовище, в якому існує об'єкт характеризується високим ступенем невизначеності.

Стохастична складова матеріальних потоків отримана за рахунок того, що потокоутворення та рух МП в рамках ЛС піддається зовнішнім впливам. Для того, щоб позбутись зовнішніх впливів, можна змодельовати середовище, де вони класифіковані і введені в модель інтелектуального агента, що реагує на них [10-12].

Таким чином, всі потокоутворюючі блоки ЛС чи її компонентів можуть бути представлені інтелектуальними агентами з відповідними цільовими функціями[48, 89].

Отже, основою агентно-орієнтованого підходу є виділення деякої сутності (агента), що здатна автономно приймати рішення для вирішення поставленої задачі в умовах перебування в оточуючому середовищі. При цьому агент сприймає середовище з урахуванням умови невизначеності[54, 48].

Означення 1.6. *Інтелектуальний агент* – деяка сутність, яка *сприймає* своє середовище за допомогою датчиків та впливає на це середовище за допомогою виконавчих механізмів (рис. 1.9). [63, 37, 52]

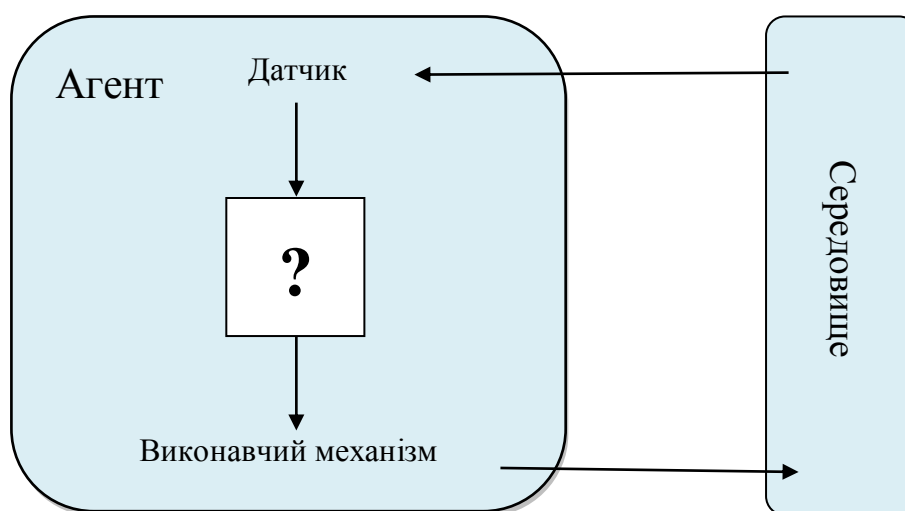


Рис. 1.9. Агент взаємодіє з середовищем за допомогою датчиків та виконавчих механізмів

В даному означенні термін *сприйняття* використовується для позначення отриманих агентом даних в будь-який конкретний момент часу. Таким чином *послідовністю актів сприйняття* агентом деяких даних можна назвати повну історію всього, що коли-небудь сприймав агент. Вибір агентом тієї чи іншої дії може базуватися як на щойно засвоєній інформації так і на повній послідовності актів сприйняття [52, 101].

В найбільш широкому розумінні раціональний агент - це агент, який дія наскільки успішно, наскільки це можливо [73, 37, 52].

Усі агенти можна поділити на наступні типи:

- прості рефлексивні агенти;
- рефлексивні агенти, що ґрунтуються на моделі;

- агенти, що базуються на цілі;
- агенти, що базуються на корисності;
- агенти, що навчаються.

Типові структури інтелектуальних агентів наведені в додатку Б.

Найбільш повна мультиагентна модель ланцюжків поставок була запропонована професором Марком Фоксом, що запропонував розбити середовище моделювання на наступні типи агентів [62, 51]:

- *Агент обробки замовлень.* Отримує вхідну інформацію від клієнтів про параметри їх запитів, виконує обробку цих запитів. Проводить комунікацію з логістичним агентом.

- *Логістичний агент.* Виконує координацію між крупними вузлами логістичної системи – поставниками, виробництвами, та мережею розповсюдження продукції. Управляє рухому сировини та готової продукції. Формує завдання для транспортних агентів.

- *Транспортний агент.* Виконує планування графіку руху транспорту між крупними вузлами логістичної системи, відповідаючи за мінімізацію вартості транспортування, при одночасному виконанні календарних планів графіків замовлень.

- *Агент-планувальник.* Виконує планування та перепланування завантаженості виробничих потужностей ЛС. Він виконує призначення операцій виробничим ресурсам та генерує завдання агентам-диспетчерам. Також даний агент враховує обмеження та нештатні ситуації пов'язані з відсутністю сировини, недоступністю виробничих ресурсів на певний період часу, та ін..

- *Ресурсний агент.* Ресурсний агент об'єднує в собі функції управління поставками сировини управління виробничим інвентарем, виконуючи відповідні необхідні оцінки виходячи з календарних планів випуску та доставки продукції.

- *Агент-диспетчер.* Виконує управління та контроль за функціями виробничих потужностей в реальному часі, виходячи з завдань поставлених агентом-планувальником. Надає відповідні вказівки, пов'язані з виникненням незапланованих змін в календарних та оперативних планах роботи ЛС, обладнанню та транспорту.

Агентно-орієнтований підхід, виходячи з його властивостей та сильних сторін, є найкращим вибором для моделювання логістичних систем, оскільки забезпечує:

- *представлення розподіленого характеру ЛС;*
- *асинхронну паралельну модель поведінки компонентів ЛС;*
- *інтерактивну поведінку модельованих компонентів ЛС;*
- *моделювання компонентів, що переналаштовують свою поведінку в залежності від контексту виконання задач;*
- *представлення системи у вигляді агентів, що володіють «експертними» властивостями як моделю роботи механізму прийняття рішень;*
- *моделювання складних систем.*

Проаналізувавши функції логістичних систем, та обравши загальний структурний підхід до побудови моделі ЛС, перейдемо до розгляду математичних методів моделювання руху матеріальних потоків.

1.4. Огляд методів моделювання руху матеріальних потоків в логістичних системах

Оскільки, в попередніх підрозділах, ми визначились із стохастичною природою матеріальних потоків, що існують в логістичних системах, розглянемо математичні методи подання руху матеріальних потоків зі стохастичною поведінкою.

Одним з найбільш поширених методів моделювання руху матеріальних потоків в ЛС є *теорія масового обслуговування*, що розглядає середовище, в

якому існують матеріальні потоки як систему масового обслуговування (СМО), тобто систему, в якій здійснюється обслуговування будь-якого роду, а на вході можуть утворюватися черги [99, 90, 56]. Такий підхід можна зустріти як в задачах складської, так і виробничої логістики при моделюванні роботи гнучких виробничих систем та їх рівнів [49, 20].

В логістичних СМО застосовуються для реалізації моделі «гибелі та зародження», наприклад, при моделюванні роботи контейнерного терміналу, чи роботи гнучкого виробничого модуля (ГВМ) з накопичувачем (рис. 1.10).

В такому випадку оброблюючий модуль розглядається як одно- чи багатоканальна СМО (може розглядатись як виробнича операція, чи складська операція зберігання, та ін.). Зміна стану системи, в даному випадку, може бути обумовлена лише двома подіями [93]:

1. попадання нових об'єктів в обробку;
2. вихід опрацьованих об'єктів після обробки на транспортування далі по логістичному ланцюжку.

Подача нових об'єктів на обробку володіє марківськими властивостями і має розподіл Пуассона:

$$P_o(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{(-\lambda t)},$$

де λ – інтенсивність вхідного потоку.

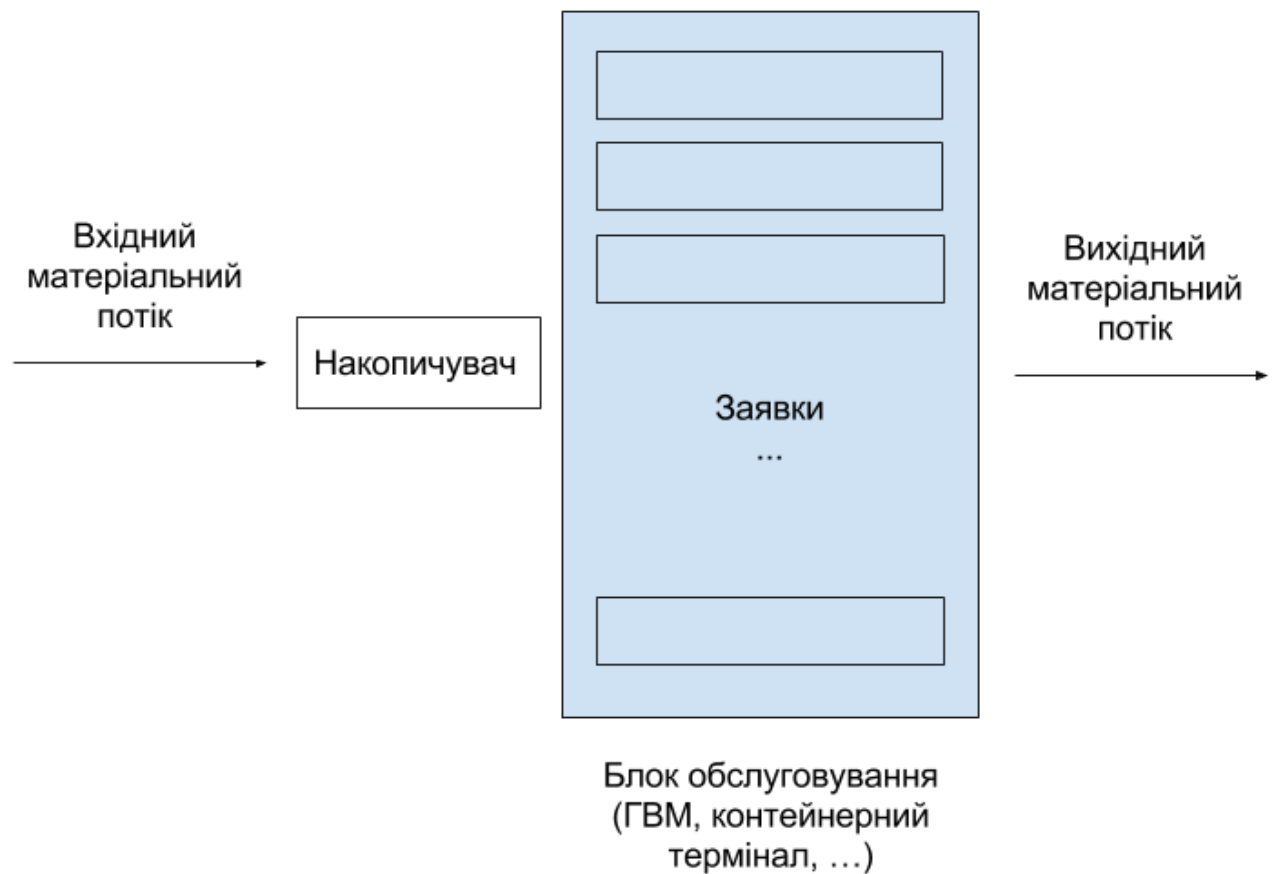


Рис. 1.10. Рух матеріального потоку через СМО

Подача нових об'єктів на обробку володіє марківськими властивостями і має розподіл Пуассона:

$$P_o(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{(-\lambda t)},$$

де λ – інтенсивність вхідного потоку.

Тривалість обслуговування при цьому розподілена згідно з експоненціальним законом з інтенсивністю обслуговування μ :

$$P(t_{\text{обсл}} > 1) = \int_t^{\infty} \mu e^{-\mu t} dt = e^{-\mu t}.$$

Ймовірність того, що за деякий час t жодне із зайнятих місць (k – кількість зайнятих місць в деякому i -му стані системи) не звільнилось, рівна:

$$P_0(t) = (e^{-\mu t})^k.$$

Отже, якщо $i \leq n$:

$$P_{i,i+1}(t) = \lambda t e^{-\mu t} (e^{-\mu t})^i,$$

$$P_{i,i+1}(t) = \lambda t (1 - \lambda t + o(t)) (1 - n\mu t + o(t)) = \lambda t + o(t),$$

$$P_{i,i-1}(t) = n\mu t + o(t),$$

$$\text{де } e^{-\lambda t} = 1 - \lambda t + io(t), \quad (e^{-\mu t})^i = e^{-i\mu t} = 1 - i\mu t + o(t).$$

В даній моделі маємо переходи $i \rightarrow i + 1$ (поступлення нового об'єкта на обслуговування (обробку), а також $i \rightarrow i - 1$ (вихід обробленого об'єкта з системи). Аналогічно при $i \leq n$:

$$P_{i,i-1}(t) = e^{-\lambda t} (e^{-\mu t})^{i-1} C_i^1 \mu t e^{-\mu t} = i\mu t + o(t).$$

У відповідності до теорії масового обслуговування отримаємо кінцеві ймовірності станів знаходження k об'єктів на обслуговуванні в кожний момент часу t :

$$\begin{cases} P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{j-1}}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_j}}, \\ P_j = P_0 \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{j-1}}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_j}, j \geq 1. \end{cases}$$

В такому випадку можна побудувати граф стану процесів обслуговування, що показує ймовірності знаходження на обробці j об'єктів:

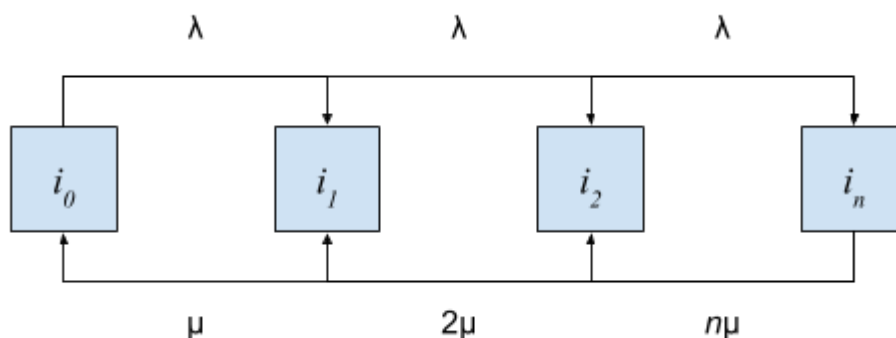


Рис. 1.11. Граф стану та ймовірностей знаходження k об'єктів на обробці

Переваги методу [49, 93, 20]:

- унікальність середовища аналітичних методів по здатності врахування фактору черги;
- висока універсальність.

ТМО це єдиний із аналітичних методів, який здатний «виловити» інформацію, пов'язану з чергами.

До основних недоліків методу можна віднести [49, 14, 15, 20]:

- статичність характеристик матеріальних потоків, що моделюються;
- відносну складність побудови імітаційних моделей систем, описаних за допомогою методів теорії масового обслуговування.

Ще одним ефективним засобом моделювання дискретних процесів є *сітки Петрі* та сіткові моделі взагалі.

Апарат СП був спеціально розроблений для опису і аналізу дискретних систем з паралельними, асинхронними, ієрархічними і взаємообумовленими процесами. Традиційним об'єктом моделювання СП є програмні і апаратні засоби обчислювальної техніки і автоматики [65, 45].

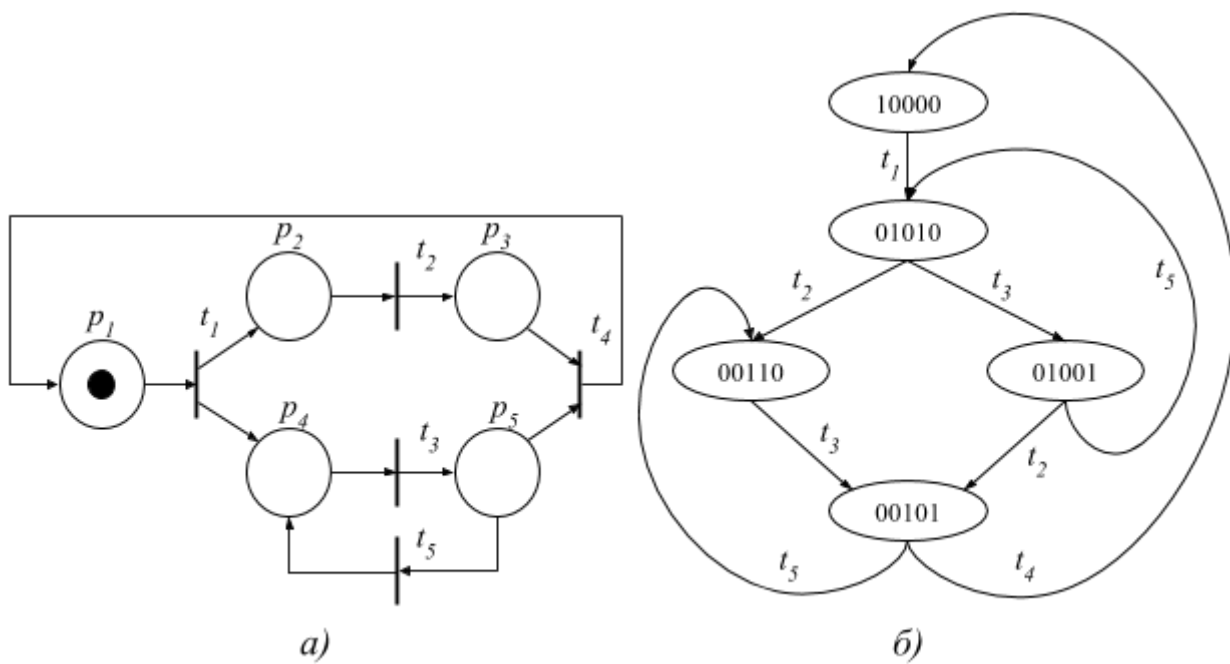
Сітка Петрі - причинно-наслідкова модель представлення подій, що виникають у процесі роботи дискретної системи та представляється сукупністю пов'язаних подій та умов, що виникають у системі, яка моделюється [45].

Формально *сітка Петрі* — це набір виду:

$$N = (P, T, F, H, \mu_0),$$

де P – скінчена непуста множина позицій (станів або місць); T – скінчена непуста множина переходів (подій); $F: P \times T \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ – вхідна функція (вхідний потік – відображення переходів в позиції); $H: T \times P \rightarrow \{0, 1, 2\}$ – функція на виході (потік на виході – відображення з позицій у перехід); $\mu_0: P \times K$ – початкове маркування (розмітка) сітки, яке задає початковий розподіл міток по позиціях сітки (K – множина невід’ємних цілих чисел).

Графічно структура СП представляється орієнтованим біграфом, множину вершин V якого розбивають на дві неперетинні множини (долі) T і P , такі, що $V = T \cup P$, $T \cap P = \emptyset$ (рис. 1.12).



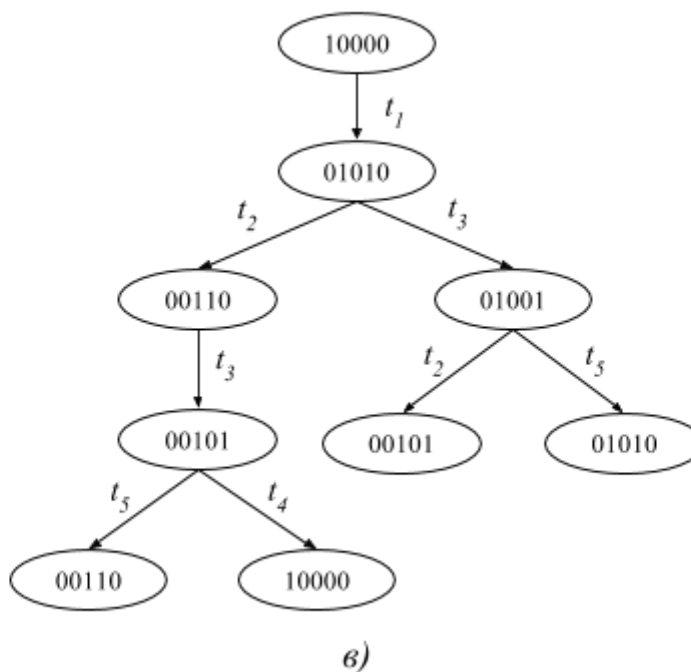


Рис. 1.12. Схематичне подання сіток Петрі: *a* – структура СП; *б* – граф досяжності; *в* – дерево досяжності

Вершини $p_i \in P$ (позиції зображуються колами) і $t_j \in T$ (переходи зображуються вертикальною рисою або вузьким вертикальним прямокутником) з'єднані між собою орієнтованими ребрами (дугами) так, що разом з вершинами T і P ребра на вході та на виході забезпечують усім простим циклом біграфа парну довжину. Отже, дуги (зв'язки) графа можуть бути спрямовані тільки від позицій до переходів або тільки від переходів до позицій. Інші комбінації у графі не допускаються. Таким чином, функції входу та виходу задають множину одинарних дуг (ребер) $(t_j p_i)$ і $(p_i t_j)$, що зв'язують вершини біграфа [85, 47, 46].

Наприклад, дуги, які передують позиції p_i , містяться у множині $H(p_i) = \{(t_j p_i) | H(t_j p_i) = 1\}$, а дуги, які передують переходові t_j – у множині $H(t_j) = \{(p_i t_j) | H(p_i t_j) = 1\}$ (тут значення $H(t_j p_i) = 1$ вказує на наявність ребра, яке з'єднує перехід t_j і позицію p_i , і аналогічно значення $H(p_i t_j) = 1$ вказує на дугу,

спрямовану від позиції p_i до переходу t_j). Дуги, які прямують з p_i і t_j , можуть бути представлені відповідно множинами:

$$F(p_i) = \{(p_i t_j) \mid F(p_i t_j) = 1\}; F(t_j) = \{(t_j p_i) \mid F(t_j p_i) = 1\}.$$

Вхідний потік $PRE(t_j)$ переходу t_j об'єднує множину йому передуючих позицій; аналогічно для вхідного потоку $PRE(p_i)$ позиції p_i об'єднується множина передуючих їй переходів:

$$PRE(t_j) = \{p_i \in P \mid F(p_i t_j) = 1\};$$

$$PRE(p_i) = \{t_j \in T \mid H(t_j p_i) = 1\}.$$

За аналогією можна записати витікаючі потоки j -го переходу $POST(t_j)$ та i -ої позиції $POST(p_i)$, відповідно:

$$POST(t_j) = \{p_i \in P \mid H(t_j p_i) = 1\};$$

$$POST(p_i) = \{t_j \in T \mid F(p_i t_j) = 1\}.$$

Усі перелічені множини можна знайти із відображень H і F .

При маркуванні сітки всім позиціям СП приписують деякі натуральні числа, і маркування сітки подають вектором:

$$\mu = \begin{pmatrix} \mu(p_1) \\ \mu(p_2) \\ \dots \\ \mu(p_n) \end{pmatrix},$$

де $\mu(p_i)$ – кількість позначок в позиції p_i , $i = \overline{1, n}$.

Перехід від одного маркування до іншого здійснюється через спрацьовування переходів (або збудження переходів). При цьому граф

досяжності (рис. 2.1, б) відображує можливість переходу маркера з будь якої позиції до іншої, а дерево досяжності (рис. 2.1., в) відбиває шляхи таких переходів.

Формальна умова спрацювання (збудження) переходу

$$\mu(p_i) - F(p_i t_j) \geq 0, \quad \forall p_i \in P$$

порівнює кількість позначок у p_i з числом дуг між p_i та t_j .

Переваги методу, як методу імітаційного моделювання:

- широкий спектр можливостей;
- висока інформативність;
- висока адекватність;
- висока готовність для використання.

Специфічні переваги методу:

- візуалізація причинно-наслідкових зв'язків;
- лаконічність засобів представлення;
- легкість, практично автоматизм, перехід від об'єкта (формування сітки)

до програмної реалізації методу.

Ще однією перевагою СП є простота формування для багатьох об'єктів. Це справедливе і для великих систем, але лише з однорідними елементами і відносно не важкою логікою їх взаємодії [45, 46].

Основні недоліки СП:

- важкість аналізу поведінки СП (необхідно одночасно відслідковувати положення декількох маркерів);
- неможливість опису функціонування умовного переходу (для опису умовних переходів можна застосувати інгібіторні СП, що значно ускладнюють структуру та моделювання поведінки сіткової моделі, та не усувають інші недоліки СП);

- СП не описують в явному вигляді поведінку, а саме - динаміку зміни станів системи [85, 45].

Ще одним класом методів моделювання є *стохастичні методи*, серед яких популярним є *марківські процеси*, суть яких полягає в переході системи з одного стану в інший, причому кожний перехід системи з одного стану в інший може відбутись з певною ймовірністю [67].

Марківські процеси враховують стохастичний аспект поведінки системи і дають їх кількісні характеристики відносно певних проміжків часу чи наборів завдань, але вони абстрагуються від внутрішньої будови системи [47].

Марківські процеси відносяться до стохастичних моделей. При моделюванні станів системи можна вважати, що кожен наступний стан системи може настати після попереднього з певною ймовірністю. Така послідовність станів називається Марківським ланцюжком. Ймовірності переходу не можуть бути довільними, оскільки на кожному кроці відбувається подія. Сума ймовірностей виникнення таких подій буде рівна одиниці (якщо прийняти, що система має кінцеву кількість станів) [59, 96].

У випадку, якщо відомо з якого стану розпочався процес роботи системи, або задані ймовірності станів в початковий момент часу, можна за допомогою початкових та умовних ймовірностей визначити ймовірність події на кожному наступному кроці.

Виходячи з поданого аналізу, можна зазначити, що від гнучкості вибору методів формального опису матеріальних потоків в логістичних системах багато в чому залежить ефективність їх функціонування в майбутньому [5, 13, 23, 31].

В таблиці 1.6. зазначені властивості матеріальних потоків і широко засновувані методи їх формального опису [23].

Таблиця 1.6

Властивості матеріальних потоків і методи їх формального опису*

		1	2	3		k
	Властивості Методи	Опис динаміки процесу	Кількісні хар-ки	Якісні хар- ки	...	Синтаксичний опис
1	Теорія автоматів	+	+-	+		+
2	Теорія графів	-	-/+	+/-		+
3	Сітки Петрі	+	+/-	+		-/+
	Часові СП	+	*	-/+		-/+
	Розфарбовані СП	+	*	*		-
4	Системи масового обслуговування		+			
	Марківські процеси	-/+	+	-/+		+
5	Алгебри процесів	+	-	+		+
6	Діюдні (max, min+) алгебри	-/+	*	*		-/+
...						
n	Методи формальних специфікацій	+	-	+		*

* ступінь опису: «+»-повний; «-/+»-неповний; «-»-неможливо дати опис;
«*»-рівень опису залежить від застосування модифікацій методу.

Як бачимо з таблиці, найкраще кількісні характеристики матеріальних потоків подаються засобами теорії систем масового обслуговування, та марківських процесів. І саме кількісні характеристики є надважливими при моделювання руху матеріальних потоків.

Хоча теорія СМО не дозволяє описувати динамічні параметри, в комбінації з марківськими ланцюжками, можна створювати дискретні динамічні моделі, а в рамках задачі управління матеріальними потоками цього достатньо для забезпечення процесу управління.

1.5. Загальна постановка задачі досліджень

Фізичний зміст матеріальних потоків, що виникають в логістичних системах на різних управлінських рівнях, є ідентичним, а при їх моделюванні можуть застосовуватись одні і ті ж математичні апарати і сутності.

Це дає підстави вважати, що є можливим створення єдиної системи управління матеріальними потоками та диспетчеризацію матеріальних потоків у виробництві та ланцюжках постачань.

Задача побудови єдиної узагальненої системи диспетчеризації матеріальних потоків в ЛС характеризується широким спектром довільних вхідних даних, а також стохастичною природою поведінки матеріальних потоків всередині системи.

Сам процес вибору методів моделювання є складною задачею, що потребує всебічного дослідження вхідних даних, коли для розв'язання певної композиції задач дослідження процесів функціонування ГВС можуть застосовуватись різні методи з різною ефективністю їх використання (через гетерогенність об'єкта досліджень).

Проаналізувавши характеристики матеріальних потоків в ЛС, а також функції, що виконуються в рамках вирішення задачі управління МП, було обрано методи СМО та марківських ланцюжків як такі, що, дякуючи своїм властивостям найкраще відображають стохастичну природу, та дозволяють максимально повно моделювати кількісні характеристики МП.

Результатом вирішення поставленої задачі повинна стати логістична система диспетчеризації матеріальних потоків, що задовольняє критеріям оптимальності, заданих в якості вхідних даних:

- мінімізація часу простою оброблювальних ресурсів;
- максимізація часу роботи АТМ з корисним навантаженням;
- максимізація кількості оброблених замовлень доставки матеріальних ресурсів за одиницю часу;
- мінімізація фінансових затрат на виконання замовлень доставки матеріальних ресурсів.

Виходячи з поставлених вимог до результату даного дослідження, можна сформулювати наступні цілі дисертаційної роботи:

1. Розробка універсальної організаційної структури системи управління матеріальними потоками в логістичних системах.
2. Розробка мультиагентної моделі логістичної системи з визначенням цільових функцій інтелектуальних агентів.
3. Розробка моделі руху матеріальних потоків в логістичній системі.
4. Синтез функції диспетчеризації матеріальних потоків на базі розробленої моделі руху матеріальних потоків та мультиагентної моделі системи.
5. Розробка алгоритмічного втілення функції диспетчеризації матеріальних потоків.
6. Розробка імітаційної моделі для досліджень ефективності роботи розробленого алгоритму диспетчеризування.

В якості способу оцінювання пропонується побудова імітаційних моделей отриманих систем. Такі моделі дозволять виконати імітацію роботи виробничого циклу від надходження вихідних матеріалів в ГВС до виходу їх на автоматизовану складську систему [46].

Перевага імітаційного моделювання в можливості представлення будь-якої системи, імітуючи реальні параметри її роботи без побудови реальної системи чи її макету. Як вихідні дані, можна отримати робочі характеристики компонентів імітаційної системи (наприклад, час простоювання обладнання, або час роботи АТМ без корисного навантаження) [40].

1.6. Висновки до першого розділу

1. Розглянуто та розкрито поняття матеріального потоку, його місця та значення в логістичних системах. Проведений аналіз функцій систем керування матеріальними потоками в рамках логістичних систем виявив відсутність комплексного підходу до вирішення задачі диспетчеризації матеріальних потоків.

2. Проведений аналіз структури систем керування, а також властивостей матеріальних потоків, показав можливість побудови системи диспетчеризації матеріальних потоків в рамках всіх ієрархічних рівнів логістичних систем на базі єдиної моделі.

3. На основі проведеного дослідження властивостей логістичних систем з точки зору положень системного аналізу, був зроблений висновок про те, що найбільш зручним для створення моделі логістичних систем є агентно-орієнтований підхід.

4. На основі аналізу цілого спектру математичних методів моделювання, обґрунтовано застосування методів СМО та марківських ланцюжків для вирішення задачі моделювання руху матеріальних потоків. Вказані методи в найповнішій мірі реалізують подання кількісних характеристик процесу руху матеріальних потоків, абстрагуючись від особливостей реалізації та сфери роботи досліджуваних логістичних систем.

РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЬ РУХУ МАТЕРІАЛЬНИХ ПОТОКІВ В ЛОГІСТИЧНІЙ СИСТЕМІ НА БАЗІ АГЕНТНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ

2.1. Розробка організаційної структури узагальненої системи управління матеріальними потоками в логістичній системі

В контексті предмету досліджень даної дисертаційної роботи, нас цікавлять ті компоненти логістичної системи, які виконують вплив на, власне, процеси руху матеріальних потоків, тобто виконують диспетчеризацію. На базі виконаного структурного аналізу ЛС в першому розділі роботи, виділимо наступні три різні типи систем, що існують на різних ієрархічних рівнях ЛС:

1. система оперативного управління виробництвом (рис. 2.1);
2. система матеріально-технічного забезпечення (рис. 2.2);
3. система інформаційно-аналітичного забезпечення (рис. 2.3).

Зробимо детальні висновки зі структури кожної з цих систем.

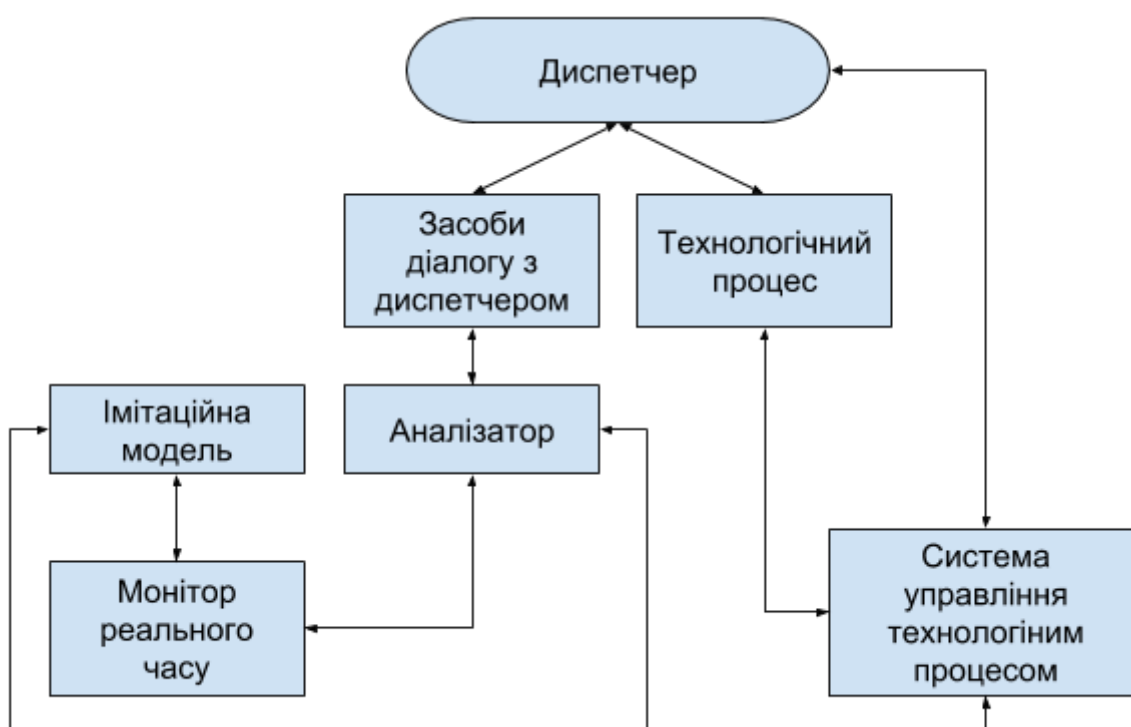


Рис. 2.1. Структура системи оперативного управління виробництвом

Як бачимо зі структурної схеми СОУ ГВС, ця система є системою управління зі зворотнім зв'язком, що здійснює управління ходом виробництва на базі інформації про стан процесів, що в ньому проходять. Саме управління технологічними процесами будується на базі інформації, що надається з попередніх етапів роботи компонентів логістичної системи (рис. 2.1).

На більш високому рівні виконується календарне планування виробництва, яке здійснюється на базі результатів роботи системи матеріально-технічного забезпечення [46].

Варто зазначити, що в даній роботі, інформаційні потоки також вважатимемо матеріальними, тобто такими, що володіють такими ж властивостями, як і було обґрунтовано в першому розділі роботи (табл. 1.2).

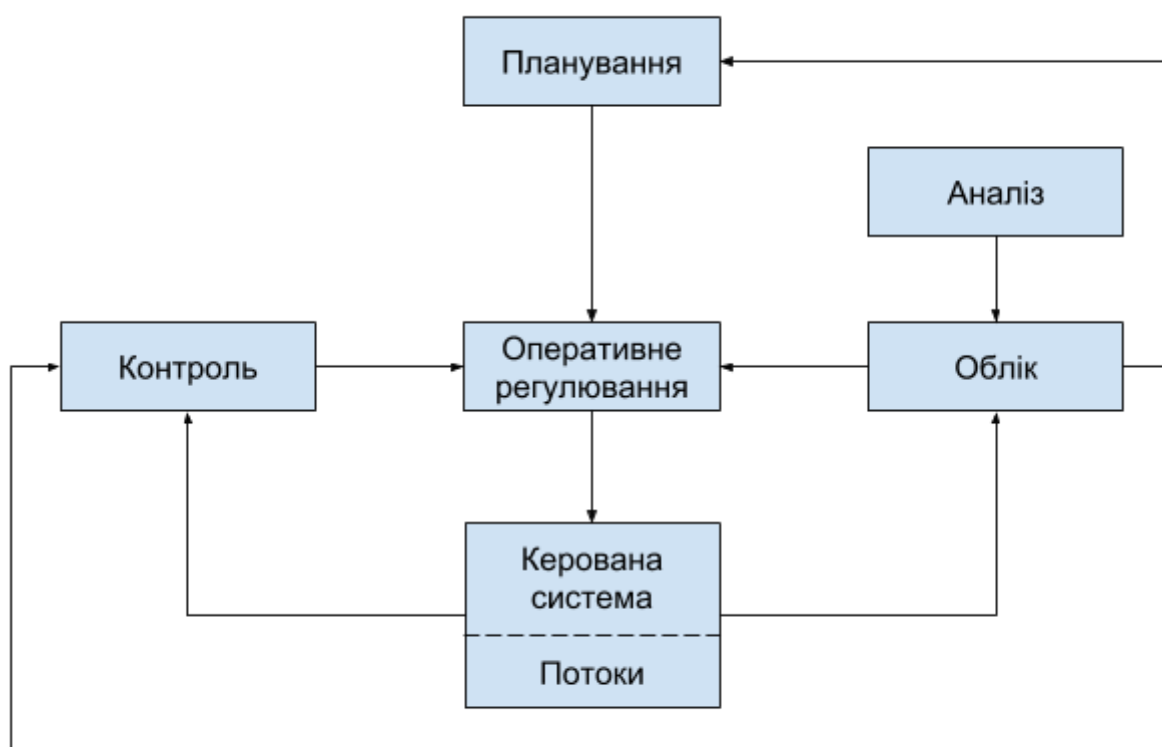


Рис. 2.2. Загальна схема системи матеріально-технічного забезпечення

Як бачимо із загальної структурної схеми системи матеріально-технічного забезпечення, дана система є, аналогічно до попередньої, системою управління

зі зворотнім зв'язком, що керує потоками і здійснює забезпечення наступного компоненту логістичної системи – виробництва.

Свою роботу система матеріально-технічного забезпечення здійснює на базі результатів роботи попередніх компонентів, що можуть бути як іншими системами МТЗ, так і системами інформаційно-аналітичного забезпечення (рис. 2.3), яка, в свою чергу також є системою управління зі зворотнім зв'язком [97].

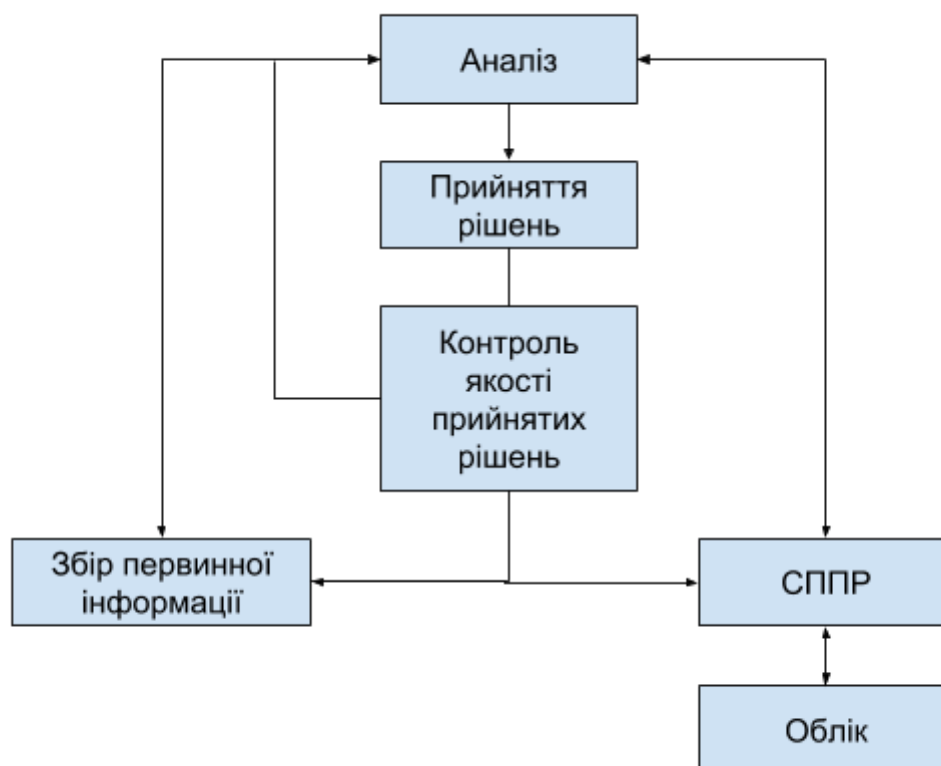


Рис. 2.3. Загальна схема системи інформаційно-аналітичного забезпечення

Виходячи з аналізу властивостей матеріальних потоків, а також структурного аналізу СОУ ГВС, СМТЗ, та СІАС, бачимо, що в них можна виділити спільний об'єкт управління, а саме матеріальний потік, модельовані параметри якого в обох випадках однакові.

В якості першого кроку до побудови узагальненої структури системи управління матеріальними потоками, побудуємо порівняльну таблицю відповідності їхніх структурних компонентів.

Таблиця 2.1

Порівняльна таблиця структурних компонентів СОУ, СМТЗ, та СІАЗ

СОУ	СМТЗ	СІАЗ
Диспетчер	Контроль	Контроль якості прийнятих рішень
Аналізатор	Аналіз Облік	Аналіз Облік
Технологічний процес	Керована система	Збір первинної інформації
Система управління технологічним процесом	Оперативне регулювання	СППР
Імітаційна модель		
Монітор реального часу		

На базі розгляду структури трьох вищеподаних систем, проведений аналіз дозволяє вивести і подати уніфіковану структуру системи управління матеріальними потоками як підсистеми ЛС на кожному конкретному ієрархічному рівні в загальному вигляді як показано на рис. 2.4.

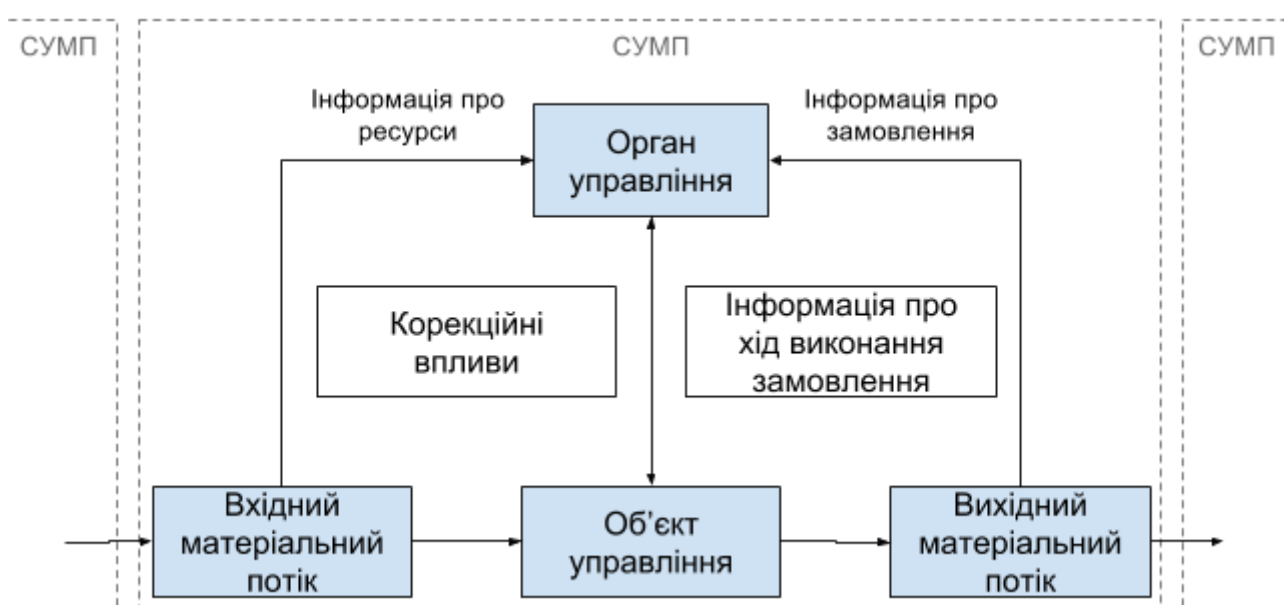


Рис. 2.4. Структура узагальненої системи управління матеріальними потоками

На базі загальних структурні схем компонентів існуючих систем, що виконують диспетчеризацію матеріальних потоків (рис. 2.1, 2.2, 2.3), ми зробили висновки, що вони мають багато спільних рис та схожу структуру зв'язків, а відмінності між ними характеризуються ступенем автоматизації процесів - найбільш автоматизовані процеси в СОУ ГВС, а найменш автоматизовані - в системах інформаційно-аналітичного забезпечення.

Таким чином, нами пропонується узагальнена структура системи управління матеріальними потоками (рис. 2.4) як така, що в повній мірі охоплює спектр функцій, що виконуються існуючими системами управління.

Логістична система, в якій рухаються матеріальні потоки є ієрархічною, тому, окрім розробки загальної структури, слід виконати деталізацію властивостей МП на різних ієрархічних рівнях.

Для виконання цієї задачі, скористаємось зручним представленням ЛС та її компонентів у вигляді графа, де зв'язками будуть напрями руху матеріальних потоків між її компонентами (потокоутворюючими блоками).


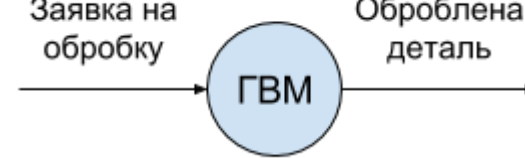
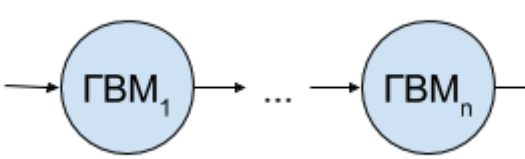
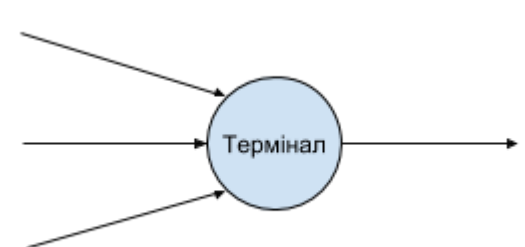
Як вже було показано в таблиці 1.1, всі матеріальні потоки володіють певними спільними властивостями. Проте, на різних ієрархічних рівнях ЛС виділяють свої унікальні властивості МП, призначені для вирішення певних практичних задач моделювання та оптимізації (табл. 1.3). На найвищому рівні абстракції як вже зазначалось можна виділити три рівні управляючих підсистем в ЛС, кожна з яких забезпечує виконання однієї чи більше логістичних функцій, що в свою чергу виконуються в різних організаційних компонентах ЛС як зображено в таблиці 2.2.

Таким чином, варто розглянути кожен фізичний компонент окремо, оскільки в кожному з них управління залежить від певних властивостей матеріальних потоків або ж потокоутворюючих елементів, що впливають на управління ними (табл. 2.2). В таблиці також зображений структурний граф

мережі масового обслуговування, якою можна представити той чи інший компонент ЛС згідно з моделлю, поданою в підрозділі 2.2.

Таблиця 2.2

Властивості МП та потокоутворюючих блоків в компонентах різних рівнів ЛС

Компонент	Граф	Особливі властивості МП
Контейнер / палета		Фізичні розміри матеріалів для складування
Виробничий модуль		ємність міжопераційного накопичувача
Виробнича лінія		Параметри надійності обладнання Час обробки деталей
Вантажний термінал		Час виконання перевантаження
Логістичний центр	...	Класи заявок

Виробничий цех		Ритмічність роботи виробничих ліній Змінно-добові завдання
----------------	--	---

Закінчення табл. 2.2

Склад		Строк зберігання товару на складі
Підприємство	...	Календарний план випуску продукції ...
Корпорація	...	Інформація про замовлення ...
Галузь економіки	...	Економічні індикатори ...

Глобальна економічна система	...	Макроекономічні індикатори ...
------------------------------	-----	-----------------------------------

Як бачимо з таблиці, на кожному ієрархічному рівні логістичної системи, в залежності від виконуваної логістичної функції маємо відмінні параметри, що характеризують потокоутворення в системі та впливають за виконання завдання управління матеріальними потоками. Деякі комірки залишені вільними (або поставлена трикрапка), оскільки таких характеристик може бути велика кількість (як у випадку двох останніх), або структури систем можуть носити індивідуальний характер, але при цьому залишаються тим же орієнтованим графом.

При цьому, самі матеріальні потоки не набувають нових властивостей, а наведені характеристики стосуються саме потокоутворюючих блоків. Таким чином, при моделюванні руху матеріальних потоків варто розділяти моделі потокоутворюючих блоків та взаємозв'язків між ними. Розробити таку розподілену модель можна скориставшись агенто-орієнтованим підходом.

2.2. Розробка мультиагентної моделі середовища руху матеріальних потоків

В першому розділі даної дисертаційної роботи була подана усталена структура мультиагентного подання логістичних систем. Проте, враховуючи поставлену задачу досліджень, а також той факт, що кожен з описаних агентів, по суті, виконує задачу управління матеріальними потоками на різних ієрархічних рівнях, було прийнято рішення про розробку універсального інтелектуального диспетчеризуючого агента (УІДА), що міг би замінити кожного вищеописаного на своєму рівні.

Приведемо структуру такого агента як показано на рис. 2.5.

Функції комунікації та координації комунікації, хоча і подані для завершеності запропонованої структури, проте їх детальний опис виходить за межі даного дослідження, окрім того, в літературі зустрічаються вирішення цих проблем [61, 83, 48, 52].

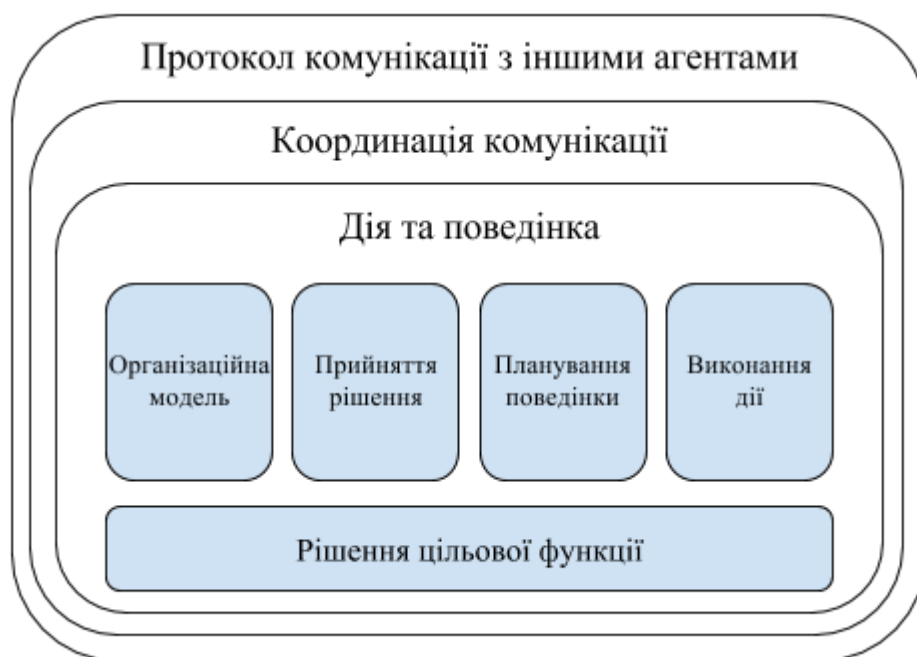


Рис 2.5. Структура УІДА

Як бачимо з поданої структури, агент є незалежним від інших компонентів ЛС, виконує самостійне планування поведінки та прийняття рішень на основі вхідних даних, отриманих шляхом комунікації, та критерії оптимізації поведінки на базі цільової функції.

Задача обрання цільової функції агента може бути вирішена або за допомогою засобів штучного інтелекту, або ж вручну при проектуванні ЛС [40, 41, 43].

Джерелом формування вхідних даних цільової функції є таблиця 2.2, створена в рамках виконання задачі розробки організаційної структури універсальної СДМП. Ціллю є вибір такого шляху отримання цільової функції, яка б була квазіоптимальною згідно критеріїв заданих в множині вхідних

даних. Для цього потрібно проаналізувати оцінки отриманих систем згідно критеріїв оптимальності та порівняти їх для обрання найкращої [48, 66, 32, 33].

Основою для прийняття рішень агентом, виходячи з того, що було прийнято рішення про використання засобів СМО та марківських ланцюжків, оберемо апарат марківських ланцюжків прийняття рішень (МЛПР). Цей апарат є досить новою розробкою, що набув популярності 1994 році завдяки роботам Путермана.

В кожен момент часу охарактеризуємо ІА як такий, що знаходиться в певному стані s_i , а перехід між станами як певну дію a_i . В такому випадку діяльність агента подамо як ланцюг переходів:

$$s_0 \xrightarrow{a_0} s_1 \xrightarrow{a_1} s_2 \xrightarrow{a_2} s_3 \dots \xrightarrow{a_{n-1}} s_n \quad (2.1)$$

Нехай інтелектуальний агент (ІА) знаходиться в деякому стані s . Визначимо поведінку ІА як стохастичну, тобто задаймо ймовірність P здійснення деякої дії a , що переведе ІА в стан t .

$$P(s, a, t), a \in A. \quad (2.2)$$

Агент здійснить вказану дію, якщо отримає за неї деяку найвищу з можливих винагороду R , тобто кожна дія по переходу між станами дає якусь винагороду:

$$R(s, a, t), a \in A. \quad (2.3)$$

Саму винагороду визначатимемо виходячи з розв'язання заданої цільової функції агента, що різниться в залежності від його позиції в ієрархії (табл. 2.2).

В процесі постійного перепланування своєї діяльності інтелектуальний агент приймає рішення слідує певній політиці π , яка задається вхідними даними його задач. Так, наприклад, політика поведінки агента-диспетчера на виробництві диктується оперативним планом випуску продукції, і при відсутності відхилень в плані, слідування такій політиці поведінки дає

максимальне значення винагороди $V_{\pi}(s)$ при переході зі стану s . Обчислення можна здійснювати, враховуючи майбутнє застосування даної політики π в наступному стані, оцінюючи вигоду на один (2.4):

$$V_{\pi}(s) = R[s, \pi(s), t] + P[\pi(s)]V_{\pi}(t), a \in A, \quad (2.4)$$

чи декілька кроків вперед:

$$V^{i+1}(s) = \max \left\{ R[s, \pi(s), t] + \sum_{t \in S} P(a)V^i(t) \right\}, a \in A \quad (2.5)$$

Така процедура дозволяє виконувати формальне подання процесу прийняття рішень з урахуванням стохастичних властивостей модельованого середовища, а також згідно критерію, що задається цільовою функцією.

Процес врахування цільових функцій буде розглянутий в наступних розділах даної роботи на базі розробки формального подання руху матеріальних потоків.

2.3. Розробка моделі СДМП на базі економіко-математичної моделі логістичних ланцюжків поставок

Згідно з розглянутими в першому розділі властивостями МП, а також розробленої структури ІА, виконаної на базі аналізу функцій СДМП, можна сформулювати наступні вимоги до моделі руху матеріальних потоків:

- висока універсальність;
- розподілений характер моделі, що відображатиме розподілену структуру СДМП;
- врахування економічної складової в процесі виконання задачі диспетчеризації матеріальних потоків;
- «потокоцентричність» – в основі моделі повинна лежати інформація про властивості матеріальних потоків;

- наявність принципової можливості втілення математичної моделі у вигляді комп'ютерної моделі, в тому числі з можливістю реалізації функцій імітаційного моделювання.

Однією з перспективних моделей, що задовільняють більшість поставлених вимог, є економіко-математична модель логістичного ланцюга поставок, запропонована професором Пономаренко Л.А. [24], що базується на апараті СМО.

Для демонстрації можливостей СМО репрезентувати властивості модельованих СДМП див. таблицю 2.3.

Таблиця 2.3

Параметри моделі руху матеріального потоку в термінах СМО, а також їхнє фізичне відображення в СОУ, СМТЗ, та СІАС.

СМО	СОУ	СМТЗ	СІАЗ
Інтенсивність отримання заявок, λ	Інтенсивність транспортування деталей / заготовок	Інтенсивність транспортування товару	Інтенсивність збору пакетів даних
Інтенсивність обслуговування, μ	Інтенсивність обробки деталей / заготовок	Вартість складування одиниці товару	Інтенсивність аналітичної обробки пакетів даних
Завантаження, ρ	Завантаження технологічної комірки	Завантаження складу / точки продажу	Завантаження обчислювальних потужностей / операторів даних
Кількість паралельних каналів, n	Кількість АТМ	Кількість транспорту	Кількість процесорів / операторів, що обробляють документи
Місць в черзі, m	Місткість транспорту чи накопичувача	Місткість транспорту	Місткість бази даних / бази знань

Як бачимо з таблиці 2.3, моделювання матеріальних потоків за допомогою СМО репрезентує практично ідентичні сутності, тобто фізика процесів, що

стосується диспетчеризації матеріальних потоків у всіх системах на різних рівнях є однаковою.

В рамках вказаної моделі, представимо ланцюжок поставок у вигляді деякої мережі чи графу, в якому вершини є потокоутворюючими блоками, а ребра вказують на напрям руху матеріального потоку як зображено на рис. 2.6.

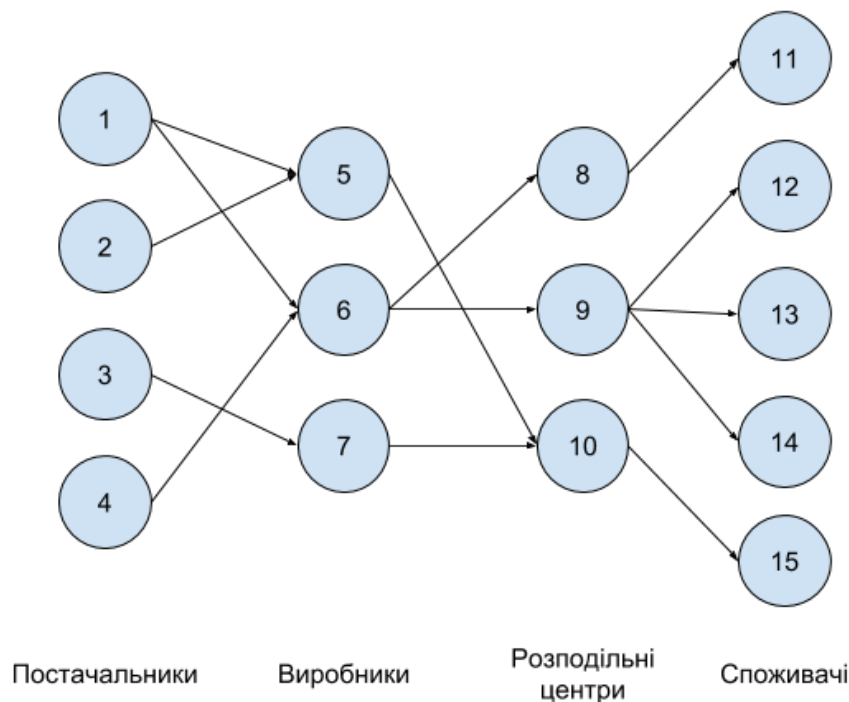


Рис. 2.6. Рух матеріальних потоків від постачальників сировини до кінцевих споживачів

Дана графічна модель повністю відповідає границям середовища та структурній схемі логістичної системи, представленої на рис. 1.3 попереднього розділу дисертаційної роботи. Виділимо тут наступні множини:

$S = \{S_i\}, i = 1, \dots, 4$ — множина постачальників;

$M = \{M_i\}, i = 5, \dots, 7$ — множина виробничих систем;

$D = \{D_i\}, i = 8, \dots, 10$ — множина розподільних центрів;

$C = \{C_i\}, i = 11, \dots, 15$ — множина кінцевих споживачів;

Тоді всю мережу, що представляє логістичну систему можна закодувати у вигляді послідовностей, що представляють собою лінійні ланцюги, наприклад:

$S1M5D10C15, S1M6D9C13, \dots$, і т.д.

При цьому, кожен з потокоутворюючих блоків, може бути розділений на підграфи, наприклад, певний виробник $M5$ може являти собою фабрику, що складається з потокоутворюючих блоків нижчого рівня (наприклад, ГВМ, АС, і т.д.), для яких потоки $S1 \rightarrow M5$, чи $S1 \rightarrow M5$ будуть зовнішніми.

В найбільш загальному випадку можна сказати, що дані потоки мають стохастичну природу, оскільки в процесі роботи ЛС на них впливає безліч зовнішніх непередбачуваних факторів, а тому побудувати таку модель можна з використанням теорії масового обслуговування, а саме побудувавши *мережу масового обслуговування* (МеМО). Для формалізації моделі ланцюжків введемо наступні позначення:

N — кількість вузлів в мережі поставок;

K — стала кількість вимог у МеМО, якщо розглядати її як замкнуту (наприклад, ГВС може розглядатись як замкнута в межах виконання змінно-добового завдання, коли немає вхідного матеріального потоку у випадку поставок сировини); тоді:

k_i — кількість вимог у i -му вузлі, при цьому для замкнутої мережі виконуватиметься рівність, що описуватиме стан мережі:

$$\sum_{i=1}^N k_i = K; (k_1, k_2, \dots, k_N), \quad (2.6)$$

де m_i — кількість паралельних каналів обслуговування в i -му вузлі;

μ_i — інтенсивність обслуговування вимог в i -му вузлі; тоді $\frac{1}{\mu_i}$ — середній час обслуговування вимог в i -му вузлі;

p_{ij} — ймовірність маршрутизації, тобто шанс, що вимога на i -му вузлі перейде на j -й вузол МеМО. При цьому варто зазначити граничні випадки, тобто якщо $i = 0$ — говоримо про попадання вимоги на j -й вузол у вигляді зовнішнього для мережі матеріального потоку, а при $j = 0$, — про вихід вимоги за межі мережі;

λ — сумарна інтенсивність вимог λ_i , що надходять до мережі ззовні на вузли мережі.

Використовуючи вказані умовні позначення можна сформулювати рівняння потоку МеМО:

$$\lambda_i = \lambda_{0i} + \sum_{j=1}^N \lambda_j \rho_{ij}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (2.7)$$

У випадку, коли ми моделюємо рух потоку всередині замкнутої мережі, рівняння спрощується до вигляду:

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^N \lambda_j \rho_{ij}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (2.8)$$

Наступним параметром МеМО, який слід ввести в модель є середня кількість звернень вимог e_i до вузла i , яку визначимо як:

$$e_i = \frac{\lambda_i}{\lambda}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (2.9)$$

а відповідні обчислення можна виконати за допомогою підстановки рівнянь для розімкнутої МеМО:

$$e_i = \rho_{0i} + \sum_{j=1}^N e_j \rho_{ji}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (2.10)$$

та для замкнутої:

$$e_i = \sum_{j=1}^N e_j \rho_{ji}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (2.11)$$

Також варто відзначити таку обставину як те, що вимоги в МеМО можуть розглядатись як однотипні, так і різнотипні, що призводить до ускладнення математичної моделі системи. У мережах, що формують ланцюги поставок, вимоги, зазвичай, різняться за різними показниками, як час обслуговування, маршрут в мережі, та ін.. В таких мережах тип вимог змінюється при проході певного вузла, що характерно для логістичних систем. Наприклад, дискретне

виробництво деякого продукту може включати ланцюг операцій обробки та складання. Для опису такої ситуації вводяться наступні поняття:

R — кількість типів вимог у мережі;

k_{ir} — кількість вимог типу r в i -му вузлі;

Тоді для замкнутого типу мереж матимемо наступне рівняння:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{r=1}^R k_{ir} = K. \quad (2.12)$$

K_r — кількість вимог типу r у МеМО; варто зазначити, що навіть у замкнутих системах це значення не є постійним, оскільки потокоутворюючі блоки можуть змінювати типи вимог, тобто в подальшому варто враховувати ймовірності $\rho_{ir,js}$ того, що на деякому i -му вузлі вимога може змінити свій тип, а ймовірності $\rho_{0,js}, \rho_{ir,0}$ відповідають відповідно ймовірностям входу та виходу вимог в мережу після обробки r -го типу вимоги на i -му вузлі.

$S_i = (k_{i1}, \dots, k_{ir})$ — вектор стану i -го вузла мережі такий, що:

$$\sum_{i=1}^N S_i = K. \quad (2.13)$$

З урахуванням типізації вимог отримаємо наступні рівняння (2.12, 2.13), (2.14, 2.15) для розімкнутої та замкнутої мереж відповідно:

$$\lambda_{ir} = \lambda_{0,ir} + \sum_{i=1}^N \sum_{r=1}^R \lambda_{js} \rho_{ir,js}; \quad (2.14)$$

$$\lambda_{ir} = \sum_{i=1}^N \sum_{r=1}^R \lambda_{js} \rho_{ir,js}; \quad (2.15)$$

$$e_{ir} = \rho_{0,js} + \sum_{i=1}^N \sum_{r=1}^R e_{js} \rho_{js,jr}, i = 1, \dots, N; r = 1, \dots, R; \quad (2.16)$$

$$e_{ir} = \sum_{i=1}^N \sum_{r=1}^R e_{js} \rho_{js,jr}, i = 1, \dots, N; r = 1, \dots, R. \quad (2.17)$$

Тоді розрахувати основні параметри МеМО можна наступним чином.

Ймовірність перебування МеМО в деякому стані, або *маргінальну ймовірність*, за наступною формулою:

$$\pi_i(k) = \sum_{\sum_{j=1}^N S_j = K_j S_i = k} \pi(S_1, \dots, S_n). \quad (2.18)$$

Завантаження i -го вузла вимогами r -го типу ρ_{ir} :

$$\rho_{ir} = \frac{1}{m_i} \sum_{k:k_i > 0} \pi_i(k) \frac{k_{ir}}{k_i} \min(m_i, k_i), k_i = \sum_{r=1}^R k_{ir}. \quad (2.19)$$

Середня кількість вимог типу r в деякому вузлі i :

$$\bar{K}_{ir} = \sum_{k:k_i > 0} k_r \pi_i(k). \quad (2.20)$$

Маючи модель логістичних ланцюжків поставок, можна перейти до формування узагальненої моделі логістичної системи.

Представимо логістичну систему LS як множину з N відкритих мереж масового обслуговування MN , кожна з яких існує на різних ієрархічних рівнях ЛС і, відповідно, володіє різними цільовими функціями F_i (1.1) при обмеженнях C_i :

$$LS = \{MN, F, C\}, \quad (2.21)$$

$$MN_i = \{S_i, D_i, M_i, C_i\}, i = 1, \dots, N. \quad (2.22)$$

Приведена модель з одного боку володіє властивостями сіткових моделей, і дозволяє моделювати такі характеристики матеріального потоку, як початковий та кінцевий пункти МП, а також його траєкторію (маршрут), а з іншого, завдяки властивостям МеМО, - інтенсивність та швидкість переміщення, задовільняє більшість вимог, поставлених до моделі в попередньому підрозділі даної роботи.

Проте, таку модель важко перетворити в комп'ютерну, що, відповідно, може в подальшому позначитись на можливості фізичної реалізації СДМП.

Для того, щоб позбутись вищевказаних недоліків, введемо в модель додатковий інваріант – час. Оскільки, при вирішенні задачі диспетчеризації нас не цікавить перебіг процесів перетворення матеріальних потоків, а лише сам факт зміни характеристик системи з виникненням в ній подій, визначимо час дискретним, отримавши таким чином дискретно-стохастичну модель [76] ланцюжків поставок.

Таким чином, нехай є деяка логістична система:

$$LS = \{LS^0, LS^p, \varphi\} \quad (2.23)$$

де LS^0 – деякий відомий стан системи в момент часу $t=0$ (початок роботи чи моделювання).

$$LS^0 = \{\lambda_{ir}^0, \pi_i^0(k), \rho_{ir}^0, \dots\} \quad (2.24)$$

φ – функція диспетчеризації, що виконує перехід системи з одного стану в інший шляхом корекції значень $\mu_i(k_i)$ та λ_i , що, в свою чергу, породжує залежність від ймовірностей маршрутизації p :

$$LS^{t+1} = \varphi(p_{ij}^t, \lambda_{ir}^t, \pi_i^t(k), \rho_{ir}^t), \quad (2.25)$$

а LS^p – плановий стан роботи системи як описано вище в оригінальному варіанті моделі (2.2 – 2.15):

$$LS^p = \{\lambda_{ir}, \pi_i(k), \rho_{ir}\}. \quad (2.26)$$

Оскільки, у процесі відхилення роботи системи від запланованого, змінюються ймовірності переходів станів вузлів $\pi_i(k)$, ціллю функції диспетчеризації φ є мінімізація відхилення значень цього вектора від його значення в нормальному стані:

$$\min \left(\sum_{i=1..N, j=1..N} |p_{ij}^t - p_{ij}^p| \right), \quad (2.27)$$

$$p_{ij}^{t+T_d} = p_{ij}^p, \quad (2.28)$$

де T_d – час диспетчеризації. У випадку запланованого режиму роботи системи функція φ є функцією ідентичності, тобто $T_d = 0$.

Власне перехід між станами легко виконати, якщо розглянути детальніше параметр моделі p_{ji} , що являє собою ймовірність переходів вимоги з деякого вузла j в деякий вузол i . Такі ймовірності для системи можна задати у вигляді матриці переходів:

i/j	0	1	...	n
0	0	0.2	...	0
1	0	0.25	...	0
...
$n-1$	1	0.5

Маючи всі ймовірності, можемо інтерпретувати дану матрицю як однорідну матрицю переходу ймовірностей марківського процесу.

Отримана дискретно-стохастична модель відображає динамічні характеристики системи та їхню зміну з часом, що дозволяє нам виконувати моделювання процесу диспетчеризації матеріальних потоків. Проте для вирішення задачі диспетчеризації матеріальних потоків необхідно відшукати функцію φ .

Оскільки, об'єктом досліджень даної роботи є матеріальні потоки в ієрархічних системах, слід деталізувати ієрархічні рівні на предмет особливостей руху матеріальних потоків в таких системах як по горизонталі (в межах одного рівня), так і вертикально (між рівнями).

2.4. Висновки до другого розділу

1. Вперше запропонована єдина для всіх ієрархічних рівнів логістичних систем організаційна структура системи диспетчеризації матеріальних потоків, яка абстрагується від завдань та конкретної фізичної реалізації досліджуваних систем. Такий підхід дозволяє впроваджувати автоматизацію процесів керування матеріальними потоками в будь-які системи, де виникає потреба у такому завданні.

2. Розроблена мультиагентна модель середовища руху матеріальних потоків та виконано формальний опис стратегії поведінки інтелектуального агента-диспетчера універсальної структури на базі апарату марківських ланцюжків прийняття рішень. Навідміну від результатів попередніх досліджень в напрямку подання логістичних систем як мультиагентних, даний підхід дозволяє моделювати ЛС будь-якого ієрархічного підпорядкування, шляхом простого масштабування кількості агентів-диспетчерів.

3. Розроблена формальна модель руху матеріальних потоків в ЛС на базі економіко-математичної моделі ланцюгів поставок Лісовського-Пономаренка. Навідміну від базової моделі, яка є статичною, удосконалена модель подає динаміку руху матеріальних потоків. Розроблена модель дозволяє нам виконати формалізацію процесу керування.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ФУНКЦІЇ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ МАТЕРІАЛЬНИХ ПОТОКІВ ТА АЛГОРИТМІВ УПРАВЛІННЯ

3.1. Синтез функції диспетчеризації матеріальних потоків

Функція диспетчеризації є ключовим механізмом, що розробляється в рамках даної дослідницької роботи. Виконаємо розробку механізмів прийняття оптимальних рішень про перехід системи між станами на базі механізму марківських ланцюжків прийняття рішень, задач диспетчеризації та наявних ресурсних і часових обмежень ЛС, згідно з основним принципом динамічного програмування: *«для будь-яких початкових значень змінної стану, та змінних, значення яких піддається управляючим впливам, на початку будь-якого періоду часу значення змінних, які управляються, вибираються оптимально для періоду роботи системи, що залишився, якщо ці значення були обрані оптимальними в попередні періоди управління»*.

Задамо загальний вигляд процесу диспетчеризації (вибору наступного стану) в термінах МЛПР як максимізацію функції отримання корисності на момент початку прийняття рішення:

$$\max_{\{g\}_{t_0}^T} E_0 \left[\sum_{t=t_0}^T f(s_t, G_t) \right]. \quad (3.1)$$

де E_0 – безумовне математичне очікування значення,

t_0 – час початку прийняття рішення,

T – період часу, на який обирається рішення в межах побудови стратегії поведінки,

G_t – значення загальної цільової функції системи, яке планується отримати в кожен момент часу t .

Тоді загальний вигляд марківського ланцюжка прийняття рішень буде наступним у вигляді рівняння Якобі-Белмана:

$$V(s) = \max_{g_t} \{f(G_t, s_t)\} + \beta \sum_{s=1}^k p(s_t^{t+1}) V(x_{t+1}(s)). \quad (3.2)$$

де $V(s_t)$ – корисність переходу (2.4, 2.5) зі стану s_t в рамках обраної стратегії поведінки,

p – ймовірність маршрутизації

β – коефіцієнт деградації корисності на кожному наступному кроці.

Оскільки, ІА веде постійне перепланування своєї діяльності, та існує в середовищі, де отримує повну інформацію про стан і задачі ЛС в момент, коли цей стан і задачі змінюються, приймемо значення коефіцієнта β за одиницю:

$$V(s_t) = \max_{g_t} \{f(G_t, s_t)\} + \sum_{s=1}^k p(s_t^{t+1}) V(x_{t+1}(s)). \quad (3.3)$$

Знайдемо розв'язок задачі побудови оптимальних планів поведінки агента, базуючись на наступних задачах диспетчеризації:

- побудова плану поведінки при відсутності факторів, що призводять до відхилень від оперативного плану роботи;
- побудова плану поведінки при відхиленні від оперативного плану роботи.

В першому випадку процес роботи ІА диспетчера представлятиме собою стаціонарний марківський процес, тобто:

$$\pi(t) = \{\pi, \pi, \dots, \pi\}, \quad (3.4)$$

а, отже, ніякого прийняття рішень не потребується.

В іншому випадку слід виконати ряд розрахунків для досягнення критеріїв загальносистемної оптимальності системи, розбивши поведінку ІА на два етапи:

1. мінімізація відхилення від оперативного плану диспетчеризації (2.27, 2.28);

2. пошук нового оптимального плану диспетчеризації до моменту повернення системи до запланованих умов роботи:

- максимізації завантаження i – го вузла ЛС вимогами r – го типу ρ_i^r (2.19);

- мінімізації кількості вимог r – го типу в системі на i – му вузлі \bar{K}_{ir} (2.20);

- мінімізації загального часу перебування заявки r – го типу в ЛС W_r ;

Таким чином, загальна цільову функція $G(t)$ розглянемо як композицію функцій загальносистемної оптимальності та цільової функції агента (C) згідно запланованого завдання з урахуванням мінімізації відхилення від оперативного плану диспетчеризації матеріальних потоків:

$$g(t) = \min \left(\sum_{i=1..N, j=1..N} |p_{ij}^t - p_{ij}^p| \right) + C. \quad (3.5)$$

Або ж згідно пошуку нового оперативного плану за завантаженням вузла:

$$g(t) = \max \left\{ \frac{1}{m_i} \sum_{k: k_i > 0} \pi_i(k) \frac{k_{ir}}{k_i} \min(m_i, k_i) \right\} + C, k_i = \sum_{r=1}^R k_{ir}. \quad (3.6)$$

За кількістю вимог:

$$g(t) = \min \left\{ \sum_{k: k_i > 0} k_r \pi_i(k) \right\} + C, k_i = \sum_{r=1}^R k_{ir}. \quad (3.7)$$

Та за часом загального перебування вимоги в системі:

$$g(t) = \min \left\{ \sum_{k: k_i > 0} \frac{m_i^r}{\mu_i} \right\} + C, k_i = \sum_{r=1}^R k_{ir} \quad (3.8)$$

Показник внутрішньої цільової функції C інтелектуального агента базується на конкретній задачі, отриманій ним в процесі планування роботи системи. Ця функція не є загальною для всіх логістичних систем, а залежить від конкретного її типу: склад, логістичний термінал, виробництво, і т.д.. Важливим є виконання нормування значення C по його максимально можливому значенню для приведення у відповідність масштабів значень та одиниць вимірювання (результати цільових функцій зазвичай вираховуються в абсолютних значеннях, бо не завжди мають стохастичну природу, як буде показано нижче):

$$C = C_{abs} / \text{MAX}(C), \quad (3.9)$$

Наведемо приклад декількох внутрішніх цільових функцій агента, що базуються на його задачах в цілях демонстрації концепції отримання :

- цільова функція транспортної задачі для ЛС представленої логістичним центром:

$$C = \min \{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \} / \text{MAX}(C), \quad (3.10)$$

де x_{ij} – кількість вимог в матеріальному потоці для транспортування між вузлами i та j , а c_{ij} – відповідна вартість здійснення транспортування,

$MAX(C)$ – найгірший випадок максимально дорогого перевезення.

- цільова функція рівномірного завантаження обладнання для виробничої логістичної системи:

$$C = \min \left\{ \frac{V_{ij}^r}{\mu_{ij}^r} \right\} / MAX(C), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, N_i} \quad (3.11)$$

де V_{ij}^r – об'єм незавершеного виробництва за вимогами r – го типу,

μ_{ij}^r – інтенсивність обробки вимоги r – го типу.

Саме ці функції визначають конкретні задачі, і їх наявність чи відсутність в моделі інтелектуального агента зумовлена цілями, що досягаються в процесі диспетчеризації матеріальних потоків в конкретній логістичній системі.

Таким чином, сумарна цільова функція матиме вигляд:

$$G(t) = g(t) + C. \quad (3.12)$$

Підсумовуючи попередні викладки, наведемо фінальне рівняння визначення корисності прийняття рішень при знаходженні агента в стані x_t в залежності від часу:

$$V(x_t) = \max_{\{g\}_{t_0}^T} E_0 \left[\sum_{t=t_0}^T f(g_t + C, s_t,) \right] + \max_{g_t} \{f(g_t + C, s_t)\} + \sum_{s=1}^k p(s_t^{t+1}) V(x_{t+1}(s)). \quad (3.13)$$

Підставивши отриманий результат в початкову модель функції диспетчеризації Φ , отримаємо фінальний вигляд моделі диспетчеризації:

$$LS^{t+1} = \Phi(p_{ij}^t, \lambda_{ir}^t, \pi_i^t(k), \rho_{ir}^t) = \max\{V(x_t)\}, \quad (3.14)$$

$$V(s_t) = \max_{\{g\}_{t_0}^T} E_0 \left[\sum_{t=t_0}^T f(g_t + C, s_t,)) \right] + \max_{g_t} \{f(g_t + C, s_t)\} + \sum_{s=1}^k p(s_t^{t+1}) V(x_{t+1}(s)). \quad (3.15)$$

Наочно процес роботи ІА та здійснення ним процесу прийняття рішень по зміні стану системи можна подати у вигляді орієнтованого графа. Виходячи з вищеописаних випадків поведінки агента отримаємо граф як зображено на рис. 3.1.

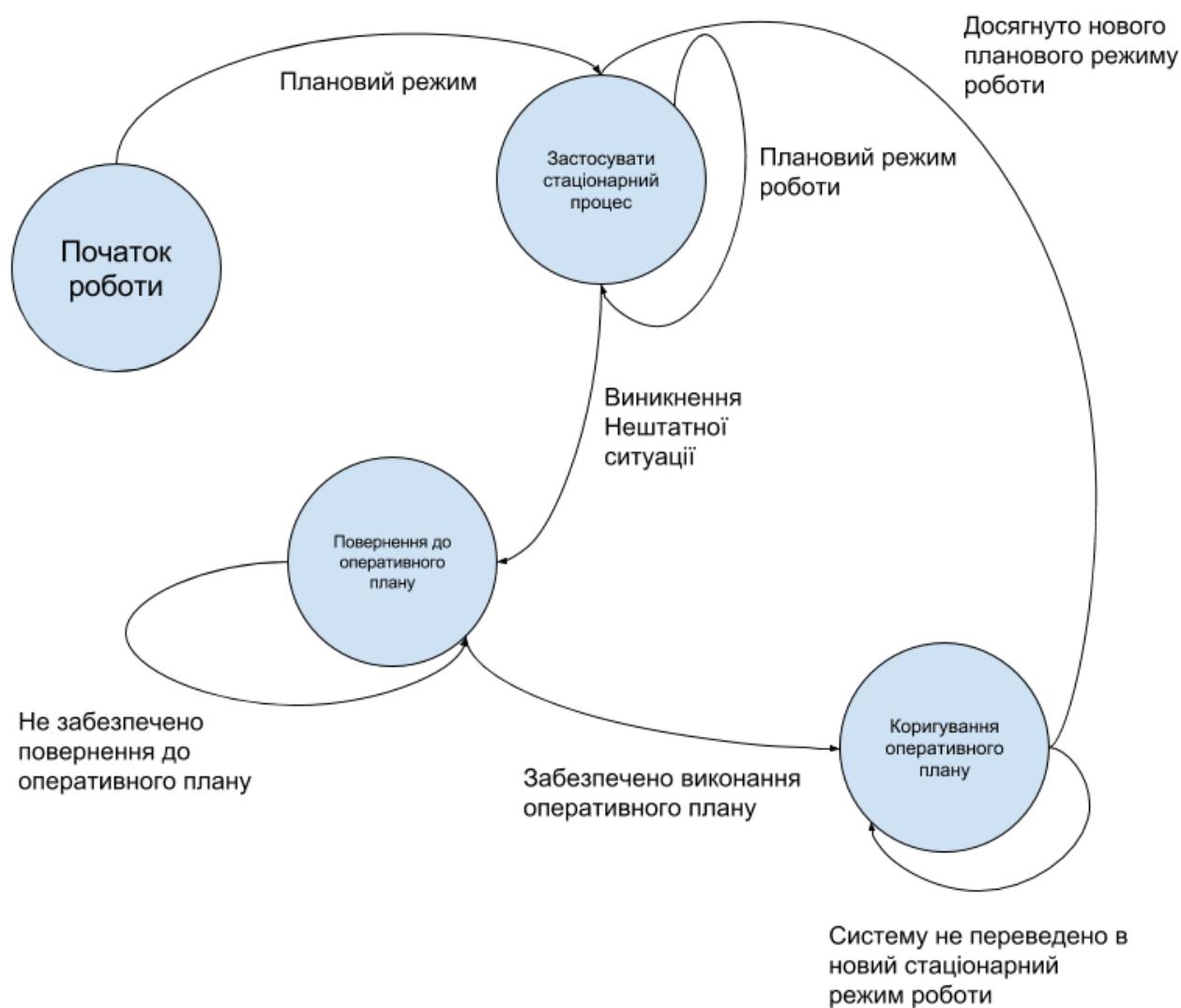


Рис. 3.1. Граф здійснення ІА процесу прийняття рішень в процесі виконання диспетчеризації МП

Таким чином, була розроблена модель диспетчеризації матеріальних потоків з використанням апаратів СМО, МЛПР, та дискретно-стохастичного динамічного програмування.

Розроблена формалізація ланцюжків прийняття рішень, завдяки засобам дискретно-стохастичного динамічного програмування, задає загальну політику збереження загальносистемної оптимальності поведінки інтелектуального агента.

Проте, оперуючи ймовірнісними показниками, важко втілити вжиття сам механізм управління за допомогою комп'ютерної системи управління логістичною системою. Саме тому потребується розробка комп'ютерної моделі, що реалізувала б напрацьовані рішення.

Оскільки, принципи динамічного програмування, та пошуку політики поведінки також застосовані і до детермінованих моделей, виконаємо розробку алгоритму управління, який є прийнятним для вирішення поставленої задачі, здатним формувати керуючі сигнали в реальному часі, що є критичним для вирішення задачі інтелектуального агента-диспетчера.

3.2. Розробка алгоритмічного втілення поведінки інтелектуального агента диспетчера згідно розробленої функції

Як було зазначено в попередньому підрозділі, пошук політики поведінки ІА базується на визначенні шляху отримання максимальної корисності. В інформатиці існує схожий алгоритм, що застосовується в задачах пошуку оптимального шляху.

Застосуємо для вирішення задачі диспетчеризації підхід, що пропонується в рамках динамічного програмування, запропонувавши алгоритм DISP*, що являє собою модифікацію алгоритму A^* , який широко використовується для оптимізацію сумарної оцінки вартості рішення за цільовою функцією [66, 68].

Нижче подано короткий опис принципів роботи розробленого алгоритму.

Алгоритм пошуку A^* в оригінальній версії застосовується для пошуку найкоротшого шляху між двома вершинами графу з додатними вагами ребер. Описаний 1968 р. Пітером Хартом, Нільсом Нільсоном та Бертрамом Рафаелем.

Алгоритм $DISP^*$ спершу відвідує ті вершини, які ймовірно ведуть до найкоротшого шляху до мети, базуючись на показнику корисності $V(s_t)$, що присвоюється ребру графа. Аби розпізнати такі вершини, кожному ребру, що веде до відомої вершини в момент часу t призначається значення $G(g, C, t)$, формуючи таким чином шлях набору корисності, який пролягає через обрану вершину. Вершини з найбільшим значенням $V(s_t)$ обираються в першу чергу.

Функція $G(g, C, t)$ для вершини визначається як було описано в попередньому розділі:

$$G(g, C, t) = g(t) + C,$$

де:

- $g(t)$ функція, значення якої містить показник загальносистемної оптимальності ЛС;
- C – цільова функція ІА, що виконує поточну поставлену задачу агентом-планувальником.

Згадані функції, а також їхній зміст описані в попередньому підрозділі даної роботи.

Використаний алгоритм не повинен давати завищену оцінку вартості шляху.

Алгоритм ділить вершини на три класи:

- *невідомі* вершини: ці вершини ще не були знайдені. Ще не відомий шлях до них. На початку роботи алгоритму всі вершини, окрім початкової, належать до класу *невідомих*;
- *відомі* вершини (OpenList): вже відомий (можливо не оптимальний) шлях до цих вершин. Всі відомі вершини разом зі значеннями $V(s_t)$ зберігаються в списку. З цього списку вибираються, в першу

чергу, найперспективніші вершини. Конкретна реалізація цього списку має істотний вплив на швидкодію алгоритму, і зазвичай має вигляд черги з пріоритетом (наприклад, бінарна купа). На початку роботи алгоритму до відомих вершин належить лише початкова вершина;

- *повністю досліджені* вершини (ClosedList): до цих вершин вже відомий найкоротший шлях. Повністю досліджені вершини додаються до так званого *замкненого списку*, аби запобігти багаторазовому дослідженню вже досліджених вершин. Список повністю досліджених вершин на початку роботи алгоритму порожній.

Кожна відома або повністю досліджена вершина має вказівник на попередні вершини. Завдяки цьому вказівникові, можна пройти шляхом від цієї до початкової вершини.

Коли вершину буде повністю досліджено (або *розкрито, релаксовано*), суміжні з нею вершини додаються до списку відомих вершин, а сама вершина додається в список повністю досліджених. Вказівники на попередню вершину встановлюються на x . Суміжні вершини, які вже знаходяться в списку повністю досліджених вершин, до списку відомих не додаються, а зворотні вказівники не змінюються. Суміжні вершини, які вже знаходяться в списку відомих, лише оновлюються (значення $V(s_i)$ та вказівник на попередню вершину), якщо знайдений до них шлях коротший за вже відомий.

Алгоритм зупиняється коли кінцева вершина потрапляє до списку повністю досліджених вершин. Знайдений шлях відтворюється із допомогою вказівників на попередню вершину. Якщо список відомих вершин порожній, то розв'язку задачі не існує і алгоритм припиняє пошук.

Відтворений за зворотними вказівниками знайдений шлях починається з кінцевої вершини та прямує до початкової. Аби одразу отримати шлях в правильному напрямі, з початкової вершини до кінцевої, в умовах задачі слід переставити місцями початок та кінець. Якщо шукати шлях починаючи з

кінцевої вершини, відтворений список починатиметься з початкової вершини й прямуватиме до кінцевої.

Алгоритм пошуку DISP* можна представити у вигляді псевдокоду:

program DISP

// Ініціалізація списку відомих вершин, список досліджених порожній

// (Vst-значення початкової вершини відсутнє)

openlist.enqueue(startknote, 0)

// цей шлях буде пройдений доки:

// - буде знайдено оптимальний розв'язок або

// - встановлено, що розв'язків не існує

repeat

// Вилучити вершину з найменшим Vst-значенням

currentNode := openlist.removeMin()

// Досягнута кінцева вершина?

if currentNode == endknote then

return PathFound

// Якщо кінцева вершина не досягнута: додати суміжні

// до поточної вершини в список відомих

expandNode(currentNode)

// поточна вершина вже повністю досліджена

closedlist.add(currentNode)

until openlist.isEmpty()

// список відомих порожній, розв'язків не існує

return NoPathFound

end

// перевіряє суміжні вершини та додає до списку відомих якщо:

// - суміжні вершини зустрічаються вперше або

// - знайдений кращий шлях до цієї вершини

function expandNode(currentNode)

foreach successor of currentNode

// пропустити, якщо вершина знаходиться в списку досліджених

if closedlist.contains(successor) then

continue

```

// обчислити значення g нового шляху:
// значення g попередньої вершини + вартість щойно пройденого ребра
tentative_g = g(currentNode) + C(currentNode, successor)
// якщо суміжна вершина вже в списку відомих,
// але знайдений шлях не кращий за вже відомий - пропустити
if openlist.contains(successor) and tentative_g >= G[successor] then
    continue
// встановити вказівник на попередню вершину та зберегти g
successor.predecessor := currentNode
g[successor] = tentative_g
// оновити значення Vst вершини у списку відомих
// або додати вершину до списку відомих
f := tentative_g + C(successor)
if openlist.contains(successor) then
    openlist.decreaseKey(successor, f)
else
    openlist.enqueue(successor, f)
end
end

```

Алгоритм пошуку $DISP^*$ знаходить оптимальний по корисності шлях між двома станами, представленими як вершини в графі. В залежності від функції вартості, яка задає кожному ребру його «вагу», оптимальність може означати *найкоротший, найшвидший* або навіть *найпростіший* шлях, що залежить від конкретної цільової функції інтелектуального агента-диспетчера. Теоретично, алгоритм може розв'язувати всі задачі, які існують в рамках здійснення диспетчеризації матеріальних потоків.

Алгоритм $DISP^$ використовується як для планування поведінки при мінімізації відхилення від оперативного плану, так і при пошуку нового стаціонарного стану ЛС.*

Основним недоліком алгоритму $DISP^$ є потреба в пам'яті для збереження всіх відомих та досліджених вершин. Через це алгоритм $DISP^*$ непридатний для багатьох задач. Таким чином, його неможливо буде*

застосовувати в реальному часі, де потрібно моделювати велику (більше 1000) кількість станів інтелектуального агента.

Розробивши загальну структуру алгоритму, перейдемо до подання конкретних механізмів перерахунку пріоритетів заявок.

3.3. Алгоритм диспетчеризації матеріальних потоків з динамічною корекцією шляхом зворотного поширення пріоритетів

В запропонованому методі пропонується застосування єдиного пріоритету на кожен вхідний матеріальний потік потокоутворюючого блоку ЛС.

Розглянемо кожен потокоутворюючий блок ЛС як окремий вузол графа. Тоді матеріальні потоки представимо як ребра графа. Інтелектуальний агент-диспетчер формує вимоги до отримання заявок на вузлах ЛС (вхідні матеріальні потоки кожного потокоутворюючого блока). Введемо наступні цілі такого інтелектуального агента, що планує і веде діяльність в реальному світі, які базуються на механізмі МЛПР, розробленому в підрозділі 3.1:

- агент прагне до якомога вищого завантаження вузлів:

$$\max (L = T_{роб} / T_{заг});$$

- агент прагне до мінімізації черги заявок на вузлах:

$$\min (Q = Q_{накоп} / Q_{заг});$$

- агент прагне до диспетчеризації заявок за операціями, що мають найвищий пріоритет.

Розраховуватимемо пріоритети з міркувань прямого підрахунку [14, 8]. Візьмемо максимальне значення пріоритету “загальної вимоги на заявки” агента $P = [0..1]$ на всі вхідні, доступні йому матеріальні потоки, за одиницю. Тоді $P = \sum_{i=1}^n p_i$, де p_i - пріоритет кожного окремого вхідного потоку з n матеріальних потоків.

Візьмемо також до уваги черги заявок. У випадку наявності вхідних накопичувачів заготовок виконаємо корекцію пріоритету, щоб врахувати

наповненість накопичувача (для мінімізації черги заявок). Тоді $P = \sum_{i=1}^n po_i \cdot q_i$, де $q_i = 1 - Q_{\text{накоп}}/Q_{\text{заг}}$, а po_i - пріоритет, що обчислюється виключно з урахуванням мінімізації відхилень від оперативного плану. З наведених формул бачимо наступну нерівність - $0 \leq (P, Q) \leq 1$, причому, у випадку максимального заповнення накопичувача, $Q = 0 \Rightarrow P = 0$. У частковому випадку відсутності накопичувача q_i може приймати значення виключно з множини $\{0, 1\}$.

Для обчислення po_i потрібно враховувати пріоритет операцій, що формується на базі відхилення від початкового плану випуску продукції. Скористаємось для цього методом критичного шляху [8]. За допомогою алгоритму DISP*, скориставшись зваженим графом матеріальних потоків, де значеннями ребер служитимуть пріоритети p_i , обчислимо критичний шлях для кожного типу вимог в системі (рис. 3.2).

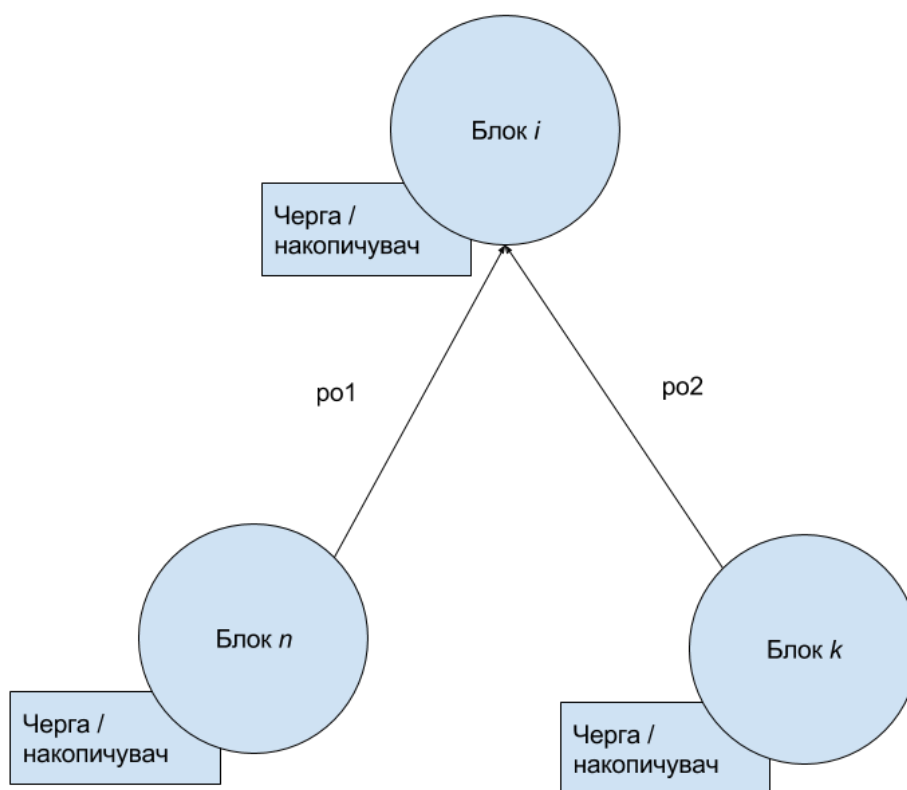


Рис. 3.2. Середовище потокоутворюючих блоків

Критичний шлях максимальної корисності $t_{kp\ i}$, що має максимальну сумарну тривалість, візьмемо за час обробки заявки кожного типу. Знайдемо кількість заявок, що опрацюється за певний період часу t_{ni} , за формулою $n_i = t_{ni} / t_{kp\ i}$. Тоді відхилення від плану становитиме $\delta_i = n_{ni} - n_i$, а сумарне відхилення – $\Delta = \sum_{i=1}^n \delta_i$. Таким чином, необхідні коефіцієнти po_i розрахуємо як коефіцієнти пропорції кожного відхилення в сумарному відхиленні Δ , попередньо нормалізувавши значення сумарного відхилення до одиниці.

Щоб отримати цілісну математичну модель на початку запуску виробничої системи, для кожного агента розставимо пріоритети вхідних потоків рівномірно, тобто $P = \sum_{i=1}^n 1/n = 1$.

3.4. Прогнозування динаміки зміни пріоритетів та інші шляхи удосконалення алгоритму диспетчеризації матеріальних потоків

Одним із перспективних напрямків удосконалення розробленого методу запропонуємо прогнозування відхилень в динаміці змін пріоритетів вимог. Таке прогнозування важливе з тієї точки зору, що у випадку, коли можна заздалегідь спрогнозувати зростання вимоги на певному потокоутворюючому блоці, наприклад, у момент виникнення непередбачуваної події на виробництві, можна отримати швидшу корекцію вимог, а, отже, досягнути швидшого динамічного перепланування розподілу матеріальних потоків і, таким чином, сприяти швидшій нормалізації ситуації всередині ЛС, що мінімізує відхилення від виконання оперативного та, відповідно, календарного, планів виробництва.

В нашій моделі інтелектуальні агенти ведуть неперервне планування своєї діяльності (формулюють вимоги до отримання деталей, що виражається в пріоритеті $P = [0..1]$, який, в свою чергу, складається з пріоритетів на кожному вхідному матеріальному потоці, тобто $P = \sum_{i=1}^n p_{oi} \cdot q_i$, де q - відносна наповненість накопичувача деталей).

Проблема планування діяльності агентів стає особливо гострою при виникненні нештатних ситуацій, в такому випадку, агенти повинні виконати перепланування пріоритетів вимог) [37]. При цьому виконується розрив зв'язків між потокоутворюючими блоками, а отже, змінюються вимоги кожного блоку, бо кожен зв'язок відображає певний вхідний матеріальний потік.

В термінах запропонованого алгоритму виконується розрив лише вхідних матеріальних потоків.

В поточній реалізації алгоритму агенти, що знаходяться на початку логістичного ланцюжка поставок (B, C) , отримають вплив з певним запізненням, оскільки зміна вимог за пріоритетами розповсюджується з агентів, що знаходяться в кінці технологічного ланцюжка [37]. Таким чином, для певного агента A (рис. 3.3) вимога P зростатиме дуже повільно за лінійним законом (рис. 3.4).

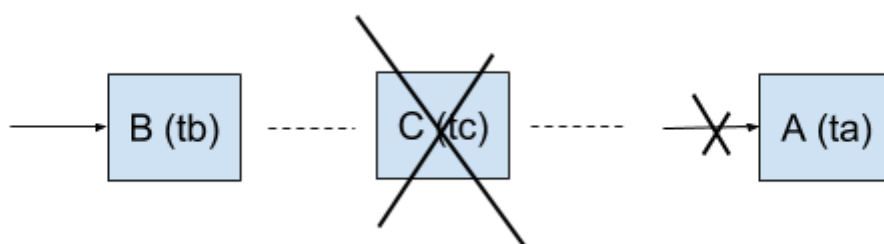


Рис. 3.3. – Ділянки ГВС, що репрезентовані потокоутворюючими блоками, де блок A отримує вхідний потік від блоку C

Розглянемо для прикладу автоматизовану ділянку ГВС.

Якщо час виконання обробки однієї деталі (включаючи час завантаження та розвантаження деталі) становить 20 секунд, а накопичувач представляє собою бункер на 100 деталей, вимога зменшиться вдвічі лише за $20 \times 50 = 1000 \text{ с} = 16.66(6) \text{ хв}$.

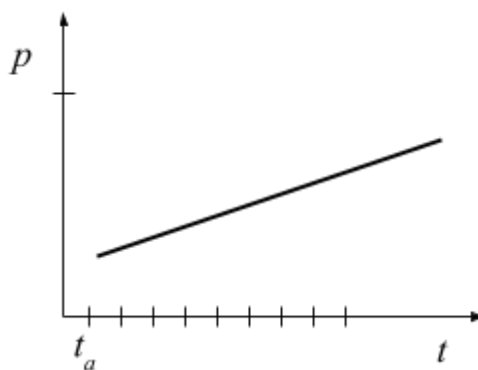


Рис. 3.4. – Закон зміни вимоги з часом при розриві вхідних потоків

Очевидно, що така динаміка є неприйнятною, оскільки при виході з ладу ТК, що була одним з джерел матеріального потоку для агента **A**, зменшиться потужність матеріального потоку до цієї комірки, а середня швидкість заповнення накопичувача залишатиметься такою ж. Таким чином, вимога повинна зростати швидше, адже це вже відомо заздалегідь.

Аналіз зміни зв'язків при виникненні нештатних ситуацій в ГВС

Розглянемо варіанти поведінки ІА диспетчера в мультиагентному середовищі як зображено на рис. 3.5.

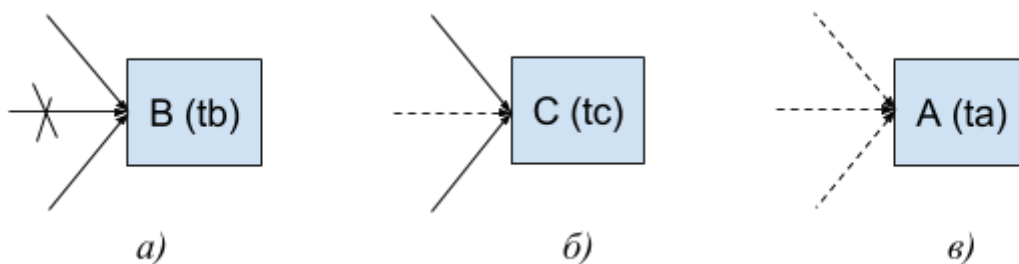


Рис. 3.5. – Позиціювання агентів в мультиагентному середовищі ГВС: а) розрив матеріального потоку; б) введення нового матеріального потоку; в) введення в експлуатацію резервного агента (ТК)

У випадку, зображеному на рис. 3.5, а, маємо факт знищення вхідного матеріального потоку j блоку **B**; таким чином, отримуємо зміну розрахунку вимоги агента $P = \sum_{i=1}^n p_{oi} \cdot q_i \Rightarrow P = \sum_{i=1}^{n-1} p_{oi} \cdot q_i + p_{oj} \cdot q_j / (n - 1)$, тобто

вимоги потоку розподіляються рівномірно між рештою вхідних потоків на один наступний дискретний крок зміни стану системи.

У випадку, коли розірваний матеріальний потік був єдиним - отримуємо критичну ситуацію, коли календарний план не може бути виконаним фізично, а, отже, система повинна зупинити розрахунки або ввести додаткового агента, що виконував роль того, що вийшов з ладу.

Розглянувши ситуацію з рис. 3.5, б, бачимо зворотній випадок, коли агент отримує додатковий матеріальний потік. В такому випадку, вимога новоствореного потоку повинна формуватися за рахунок пропорційного зменшення вимог до існуючих потоків.

Виключним є останній випадок (рис. 3.5, в), що визначає введення резервного агента в експлуатацію. В такому випадку, агент повинен отримати рівень вимоги як і у випадку, коли система тільки розпочинає роботу, тобто $P = \sum_{i=1}^n 1/n = 1$.

Оптимізація часу адаптації системи шляхом введення коефіцієнта зміни динаміки вимог

У будь-якому випадку, незалежно від позиціонування, посилення динаміки зміни вимоги по пріоритетах залежить від певних факторів:

1. Прямопропорційно – від швидкості матеріального потоку (середня швидкість Vt_c руху n деталей за одиницю часу в потоці).
2. Оберненопропорційно – від швидкості спорожнення накопичувача агента (Vq).

Тобто, введемо деякий необхідний коефіцієнт зміни динаміки вимог $Dp = Vt_c / Vq$. Очевидно, що діяти цей коефіцієнт в процесі роботи системи повинен не весь час, а до нормалізації рівня наповненості накопичувача, чи стабілізації швидкості подачі деталей у випадку відсутності останнього.

В такому випадку логічним здається задання порогу різниці швидкостей Vn таким чином, щоб виконувалась нерівність:

$$Vt_c - Vq < Vn. \quad (3.16)$$

Тобто даний коефіцієнт є адаптивним і застосовуватиметься виключно у випадку, коли нерівність (3.16) не виконується. В такому випадку, тимчасовий розрахунок вимоги становитиме $P = \sum_{i=1}^n p o_i \cdot q_i \cdot Dp$.

3.5 Висновки до третього розділу

1. На базі засобів теорії систем масового обслуговування та дискретно-стохастичного динамічного програмування синтезована та формально подана функція диспетчеризації матеріальних потоків. Навідміну від існуючих рішень, що базуються на здійсненні диспетчеризації за певним критерієм цільової функції, розроблений механізм дозволяє керувати матеріальними потоками, досягаючи квазі-оптимального вирішення задачі диспетчеризації за двома критеріями: цільової функції та загальносистемної оптимальності.

2. На базі формалізованого подання розробленої функції диспетчеризації матеріальних потоків, вперше реалізовано алгоритмічне втілення відповідного механізму керування. Це дозволяє використовувати розроблені методи на практиці в комп'ютерних засобах забезпечення керування логістичними системами.

3. Для розробленого алгоритму подані деякі шляхи оптимізації його роботи, що дозволяють підвищити ефективність керування при виникненні ряду конкретних нештатних ситуацій, які вимагають зміни стану керованої системи шляхом втручання механізму диспетчеризації.

РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ РОЗРОБЛЕНИХ АЛГОРИТМІВ НА ІМІТАЦІЙНІЙ МОДЕЛІ

4.1. Подання методики проведення імітаційних експериментів та опрацювання їх результатів

При підготовці інструментальних засобів для імітаційних досліджень були розглянуті численні програмні пакети для виконання імітаційного дискретно-подійного моделювання роботи систем: пакет моделювання Simulink [36], система моделювання складних вбудованих систем управління VisSim [23], TESS [35], пакет моделювання Model Vision for Windows [70, 74], програмний комплекс автоматичного проектування складних інтегрованих систем IBM Statemate [68], технологічний комплекс моделювання та аналізу інтегрованих систем на базі об'єктно-орієнтованого підходу IBM Rational Rhapsody [69], систему автоматичної верифікації та моделювання NuTech [55], універсальний продукт для імітаційного моделювання, візуалізації і оптимізації промислових систем та процесів eM-Plant [92] та багато інших.

Для виконання імітаційного моделювання роботи системи та розроблених в рамках даної дисертаційної роботи алгоритмів, видається розумним застосувати мову програмування загального призначення, оскільки в процесі роботи такої моделі майже все алгоритмічне забезпечення потрібно створювати власноруч.

У світових наукових колах для таких задач користується популярністю мова програмування Python [88] та бібліотека для розробки програм імітаційних симуляцій SimPy [79].

На жаль, хоча і дані засоби дозволяють побудувати дискретно-подійну симуляцію роботи системи, вони не мають вбудованих засобів візуалізації, а тому графіки отриманих результатів будуть виконані з застосуванням

програмного пакету роботи з електронними таблицями Microsoft Excel 2013 [80].

Експериментальні дослідження, проведені в рамках даної дисертаційної роботи базуються на перевірці працездатності розроблених алгоритмів комп'ютерного управління рухом матеріальних потоків.

В якості тестової логістичної системи була обрана автоматизована ділянка гнучкої виробничої системи.

Для цього поставлена серія експериментів, кожен з яких складається з наступних кроків:

1. Обрання тестової структури модельованої логістичної системи.

Тестова структура подається у вигляді структурної моделі потокоутворюючих блоків ЛС зі шляхом проходження матеріальних потоків у вигляді графа (рис 4.1).

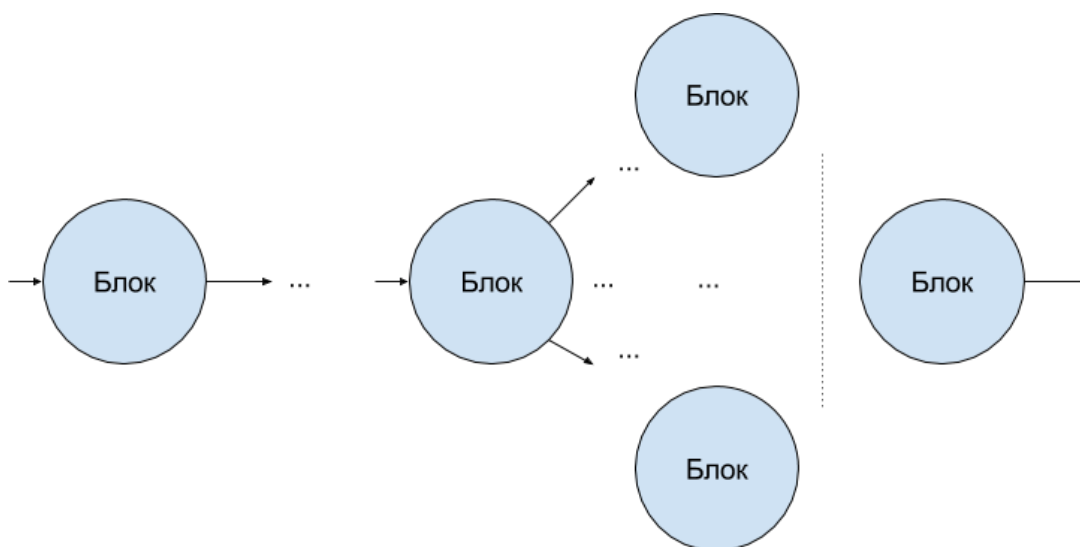


Рис. 4.1. Приклад тестової структури ЛС

Кожному блоку присвоюються наступні характеристики: час обробки заявки, можливість заміни іншими блоками в структурі, вхідні та вихідні напрямки руху МП.

2. Виконання імітації процесу руху матеріальних потоків в логістичній системі згідно запланованого режиму роботи з фіксацією в кожен момент часу кількості заявок, що пройшли через систему від входу до виходу.

3. Виділення певної гіпотетичної нештатної ситуації, що могла б відбутись в процесі виконання диспетчеризації МП в ЛС.

4. Застосування до імітаційної моделі існуючого алгоритму диспетчеризації МП, що вже довів свою працездатність та ефективність в реальних системах з фіксацією в кожен момент часу кількості заявок, що пройшли через систему від входу до виходу. Оскільки, в якості тестових систем обрані ділянки ГВС, в якості алгоритму диспетчеризації обраний широко застосовуваний алгоритм прямої диспетчеризації.

5. Застосування до імітаційної моделі алгоритму диспетчеризації матеріальних потоків шляхом зворотної корекції пріоритетів з фіксацією в кожен момент часу кількості заявок, що пройшли через систему від входу до виходу.

Таблиця 4.1

Структура таблиці результатів імітаційних експериментів

Час	Плановий прохід	Пряма диспетчеризація	Розроблений алгоритм ДМП
0	K_{p0}	K_{d0}	K_{DISP0}
1	K_{p1}	K_{d1}	K_{DISP1}
2	K_{p2}	K_{d2}	K_{DISP2}
...
n	K_{pn}	K_{dn}	K_{DISPn}
...

T	K_{pT}	K_{dT}	K_{DISPT}
-----	----------	----------	-------------

6. Виконання порівняння здатності алгоритмів до виконання корекції оперативних планів виробництва у зв'язку з виникненням нештатних ситуацій. Даний етап здійснюється у вигляді накладання графіків випуску продукції в результаті імітаційних проходів моделювання в пунктах 2, 4, 5.

7. Проведення аналізу та формування висновків з отриманих результатів про працездатність та ефективність отриманих в процесі виконання дисертаційного дослідження рішень.

4.2. Розробка імітаційної моделі ланцюжка поставок

Для розробки імітаційної моделі необхідно змодельовати роботу потокоутворюючих блоків (агентів), матеріальних потоків (заявок), а також роботу таймера, що фіксуватиме час під час симуляції.

Нижче схематично (в цілях економії місця) подано програмний код для симуляції всіх компонентів системи.

Для моделювання роботи годинника використовується наступний програмний код на мові програмування Python:

```
def clock(env, name, tick):
    while True:
        print(name, env.now)
        yield env.timeout(tick)
```

Наступний кроком є моделювання заявки на операцію потокоутворюючим блоком, що реалізується наступним програмним кодом на мові Python:

```
def operation(env, name, block):
    with block.operation.request() as request:
```

```

yield request
yield env.process(block.process(name))

```

Наступним будівельним блоком імітаційної моделі є симуляція виконання операції потокоутворюючим блоком:

```

def process(self, block):
    yield block.timeout(block.operation_time)

```

Операції та заявки формуються шляхом ітераційного виконання алгоритмів, розроблених в рамках даної дисертаційної роботи. Для проведення експериментальних досліджень наведемо програмний код наступних алгоритмів:

- прямої диспетчеризації з розв'язанням конфліктів:

```

def direct_prioritization(self, env, block):
    with block.request() as my_turn:
        # Wait until its our turn to simulate operation
        result = yield my_turn or self.get_conflict()

        # Check if not conflicts now
        if my_turn not in result:
            block.dispatch_operation()
            env.exit()

        # Check if type 1 conflict happened.
        if result == CONFLICT_TYPE_1:
            block.resolve_conflict_type1()
            env.exit()

```

```

    # Check if type 2 conflict happened.
    if result == CONFLICT_TYPE_2:
        block.resolve_conflict_type2()
        env.exit()

    yield env.timeout(0.001)

```

- зворотнього поширення пріоритетів:

```

def backpropagate(self, repairman):
    while True:
        # get list of all blocks
        blocks = self.env.get_blocks()
        while not_all_blocks_processed:
            # process block
            block.priority = block.calculate_priority()

```

- прямого проходу з використанням алгоритму A*:

```

def disp_search(graph, start, goal):
    frontier = PriorityQueue()
    frontier.put(start, 0)
    came_from = {}
    cost_so_far = {}
    came_from[start] = None
    cost_so_far[start] = 0

    while not frontier.empty():
        current = frontier.get()

```

```

    if current == goal:
        break

    for next in graph.neighbors(current):
        new_cost = cost_so_far[current] +
graph.cost(current, next)
        if next not in cost_so_far:
            cost_so_far[next] = new_cost
            priority = new_cost + heur(goal, next)
            frontier.put(next, priority)
            came_from[next] = current
    return came_from, cost_so_far

```

Сформована імітаційна модель дозволяє виконувати дискретно-подійні симуляції руху матеріальних потоків в логістичних системах на певному модельованому відрізку часу, а також виконувати розроблені алгоритми.

4.3. Проведення експериментальних досліджень на імітаційній моделі та аналіз отриманих результатів

Оскільки, в даній роботі виконується задача диспетчеризації, то критерієм успішності роботи алгоритму задаймо час повернення системи у відповідність до заданого змінно-добового завдання, процес проходження якого і будемо моделювати.

Для тестування роботи розроблених алгоритмів змоделюємо вихід з ладу одного з блоків системи, виконавши порівняння роботи алгоритму ДМП у порівнянні з класичним алгоритмом прямої диспетчеризації

Очевидно, що виконувати симуляцію системи, що не має резервних блоків для виконання того типу операцій, який виконується виведеним з ладу

обладнанням, немає сенсу, тому виконаємо 3 експерименти на наступних моделях:

- *модель 1* - гнучка виробнича лінія з одним резервним блоком і одним технологічним ланцюжком (1 номенклатурна одиниця виробу) (рис. 4.1.);
- *модель 2* - гнучка виробнича лінія з двома резервними блоками і одним технологічним ланцюжком (1 номенклатурна одиниця виробу) (рис. 4.2.);
- *модель 3* - гнучка виробнича лінія з трьома резервними блоками, що мають різний час опрацювання заявки (2 номенклатурні одиниці виробів) (рис. 4.3.).

Експерименти з моделлю 1.

1. Подамо загальну структуру моделі у наступному вигляді (рис 4.2).

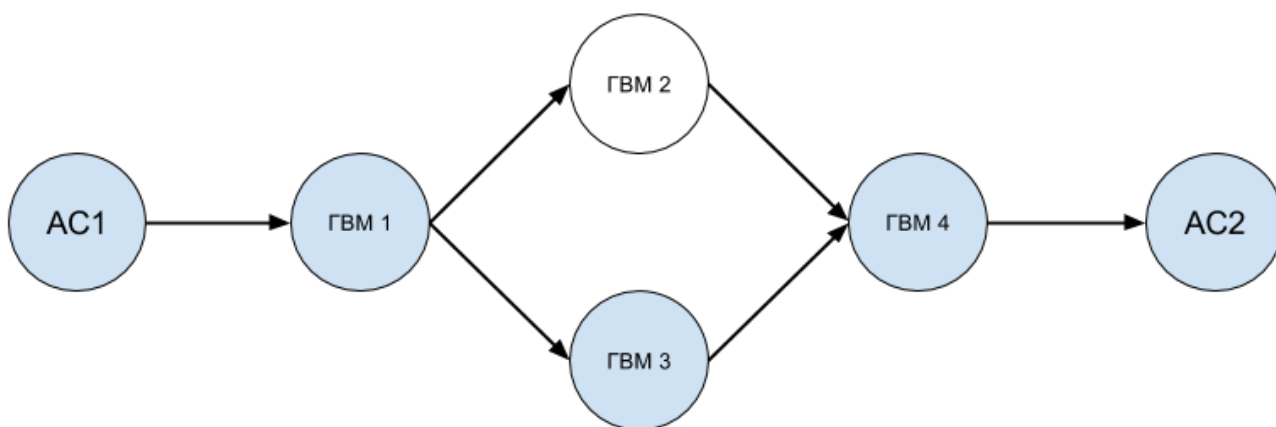


Рис. 4.2. Структура моделі ЛС імітаційної моделі 1

2. Сценарій імітацій відбувається з наступними параметрами:

- AC1 та AC2 – склади заготовок та готової продукції відповідно;
- кожен ГВМ виконує обробку заявки за 7 одиниць часу;
- ГВМ 2 та ГВМ 3 є взаємно замінювані;
- ГВМ 3 є резервним та не бере участі в процесі виробництва на старті імітаційного експерименту;
- моделювання відбувається протягом 1200 одиниць часу;

• Сценарієм нештатної ситуації є вихід з ладу потокоутворюючого блоку GBM 2 в момент часу 140.

3. В результаті проведеної імітації отримуємо наступну таблицю (в таблиці подані результати лише для відрізка часу, що представляє інтерес для аналізу.

Таблиця 4.2

Результати імітаційних експериментів на моделі 1

Час	Плановий прохід	Пряма диспетчеризація	Розроблений алгоритм ДМП
...
148	9	9	9
149	10	9	10
150	10	9	10
151	10	9	10
152	10	9	10
153	10	9	10
154	10	9	10
155	10	9	10
156	10	9	10
157	10	9	10
158	10	9	10
159	10	9	10
160	10	9	10
161	10	9	10
162	10	9	10
163	10	9	10
164	11	9	10
165	11	9	10
166	11	9	10
167	11	9	10
168	11	9	10
169	11	9	10
170	11	9	10
171	11	9	10
172	11	9	10
173	11	9	10
174	11	9	10
175	11	9	10
176	11	9	10
177	11	9	10
178	11	9	10
179	12	10	11
180	12	10	11
181	12	10	11
182	12	10	11
183	12	10	11
184	12	10	11
185	12	10	11
186	12	10	11
187	12	10	11
188	12	10	11

189	12	10	11
190	12	10	11
191	12	10	11
192	12	10	11
193	12	10	11
194	13	10	11
195	13	10	11
196	13	10	11
197	13	10	11
198	13	10	11
199	13	10	11
200	13	10	11
201	13	10	11
202	13	10	11
203	13	10	11
...



Рис. 4.3. Виконання оперативного плану при першому експерименті

Як бачимо з графіку, жодному з алгоритмів не вдалось виконати поставлений оперативний план з виготовлення 80 одиниць продукції за 1200

одиниць часу, що логічно, адже був витрачений час на переналаштування матеріальних потоків.

Також варто зазначити, що алгоритм СДМП в цьому випадку спрацював дещо гірше, ніж пряма диспетчеризація, забезпечивши виготовлення на 1 одиницю продукції менше.

Експерименти з моделлю 2.

1. Подаймо загальну структуру моделі у наступному вигляді (рис 4.4).

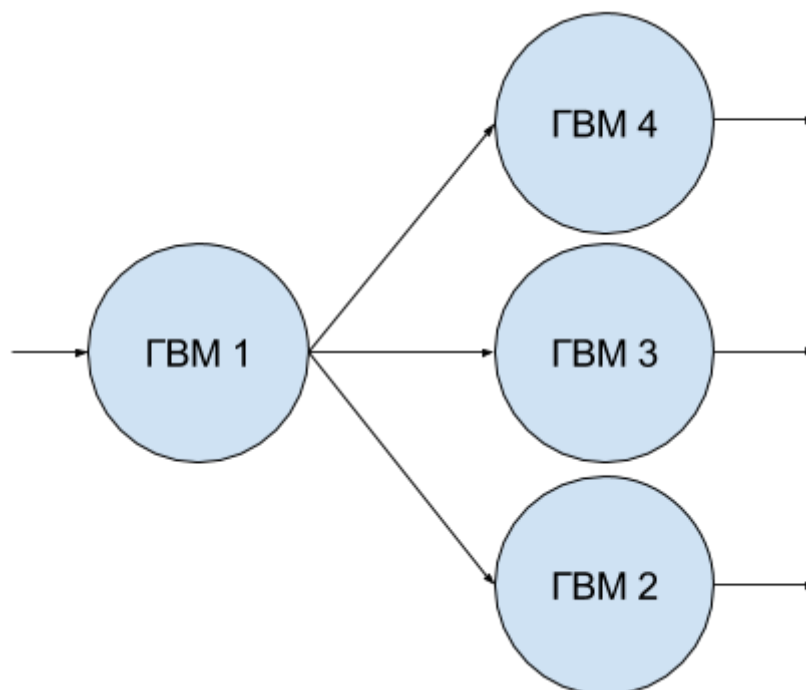


Рис. 4.4. Структура моделі ЛС імітаційної моделі 2

2. Сценарій імітацій відбувається з наступними параметрами:

- кожен ГВМ виконує обробку заявки за 7 одиниць часу;
- ГВМ 2, ГВМ 3, та ГВМ 4 є взаємно замінювані;
- ГВМ 3 та ГВМ 4 є резервними, та не беруть участі в процесі виробництва на старті імітаційного експерименту;
- моделювання відбувається на протязі 1200 одиниць часу;
- Сценарієм нештатної ситуації є вихід з ладу потокоутворюючого блоку ГВМ 2 в момент часу 140.

3. В результаті проведеної імітації отримуємо наступну таблицю (в таблиці подані результати лише для відрізка часу, що представляє інтерес для аналізу.

Таблиця 4.3

Результати імітаційних експериментів на моделі 2

Час	Плановий прохід	Пряма диспетчеризація	Розроблений алгоритм ДМП
...
148	9	9	9
149	10	9	10
150	10	9	10
151	10	9	10
152	10	9	10
153	10	9	10
154	10	9	10
155	10	9	10
156	10	9	10
157	10	9	10
158	10	9	10
159	10	9	10
160	10	9	10
161	10	9	10
162	10	9	10
163	10	9	10
164	11	9	10
165	11	9	10
166	11	9	10
167	11	9	10
168	11	9	10
169	11	9	10
170	11	9	10
171	11	9	10
172	11	9	10
173	11	9	10
174	11	9	10
175	11	9	10
176	11	9	10
177	11	9	10
178	11	9	10
179	12	10	11
180	12	10	11
181	12	10	11
182	12	10	11
183	12	10	11
184	12	10	11
185	12	10	11
186	12	10	11
187	12	10	11
188	12	10	11
189	12	10	11
190	12	10	11
191	12	10	11
192	12	10	11
193	12	10	11
194	13	10	11
195	13	10	11
196	13	10	11
197	13	10	11
198	13	10	11
199	13	10	11
200	13	10	11
201	13	10	11
202	13	10	11

203	13	10	11
...

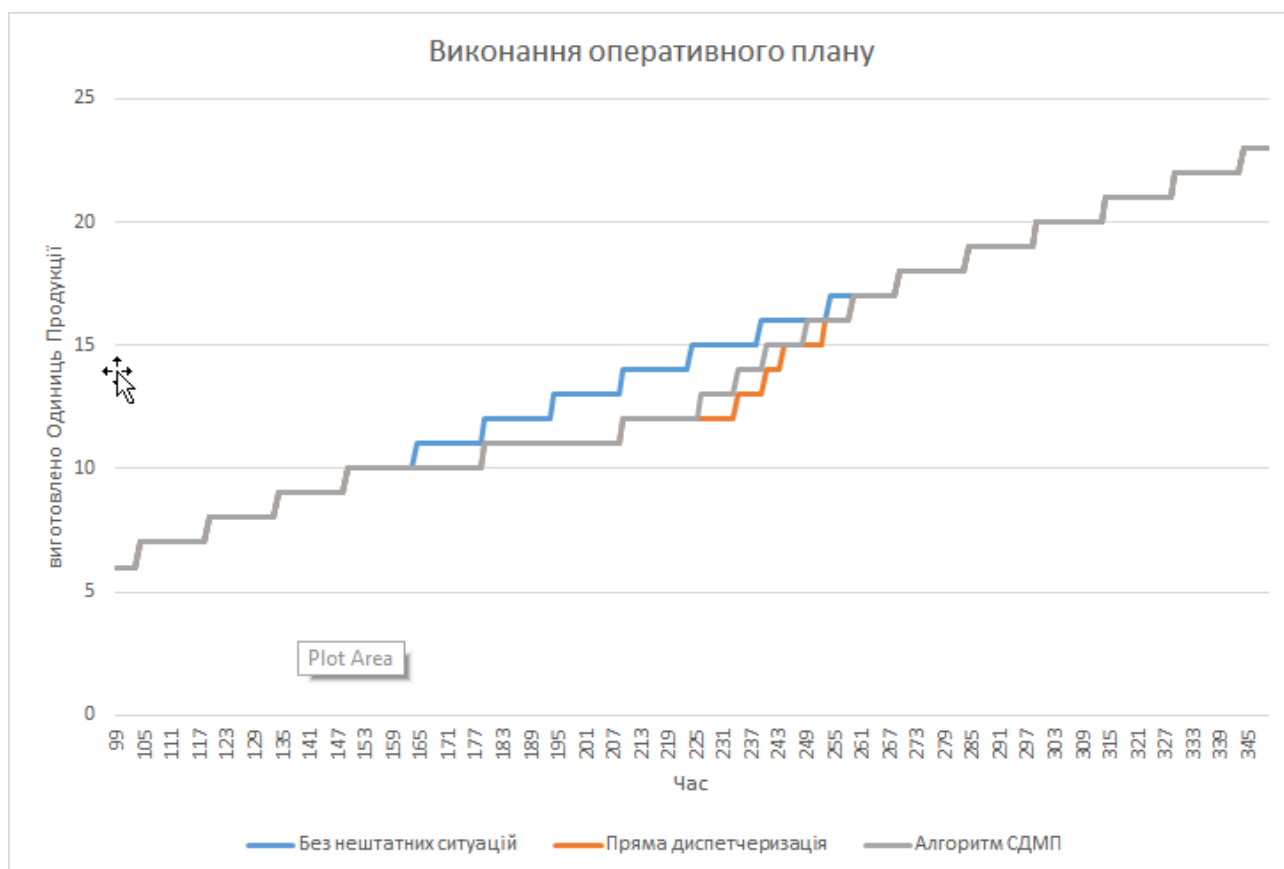


Рис. 4.5. Виконання оперативного плану при другому експерименті

Як бачимо з графіку, обидва алгоритми вирішили задачу, забезпечивши виконання оперативного плану. Разом з тим, розроблений алгоритм ДМП показав дещо вищу швидкість реакції на нештатну ситуацію, що потребувала корекції оперативного плану виробництва.

Ще декілька експериментів, проведених на схожій компоновці ГВС та при такому ж технологічному завданню (з різними параметрами самого оброблюючого ресурсу) показали схожу поведінку.

Експерименти з моделлю 3.

1. Подаймо загальну структуру моделі у наступному вигляді (рис. 4.6).

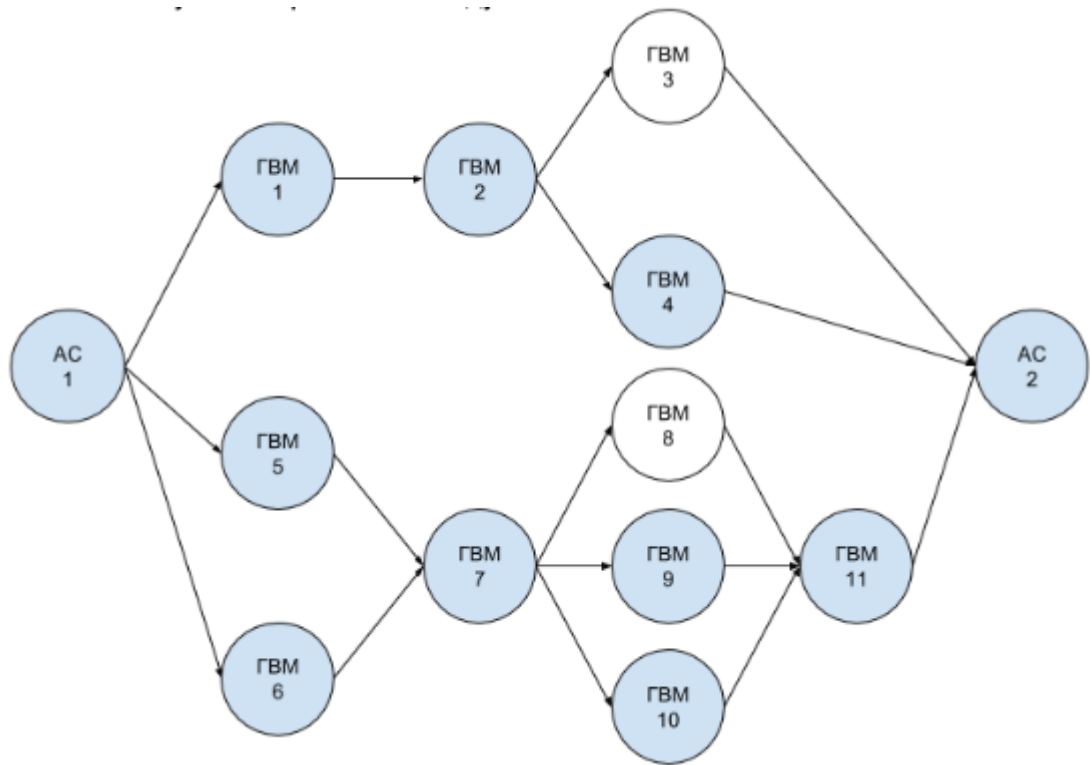


Рис. 4.6. Структура моделі ЛС імітаційної моделі 3

2. Сценарій імітацій відбувається з наступними параметрами:

- ГВМ 1 - ГВМ 10 виконують обробку заявки за 7 одиниць часу, а ГВМ 4 за 5 одиниць часу;
- ГВМ 2, ГВМ 7 є взаємно замінювані;
- ГВМ 4 та ГВМ 10 є резервними, та не беруть участі в процесі виробництва на старті імітаційного експерименту;
- моделювання відбувається на протязі 1200 одиниць часу;
- Сценарієм нештатної ситуації є вихід з ладу потокоутворюючих блоків ГВМ 3, ГВМ 8 в момент часу 140.

3. В результаті проведеної імітації отримуємо наступну таблицю (в таблиці подані результати лише для відрізка часу, що представляє інтерес для аналізу).

Таблиця 4.4

Результати імітаційних експериментів на моделі 3

Час	Плановий прохід	Пряма диспетчеризація	Розроблений алгоритм ДМП
-----	-----------------	-----------------------	--------------------------

...
148	9	9	9
149	10	9	10
150	10	9	10
151	10	9	10
152	10	9	10
153	10	9	10
154	10	9	10
155	10	9	10
156	10	9	10
157	10	9	10
158	10	9	10
159	10	9	10
160	10	9	10
161	10	9	10
162	10	9	10
163	10	9	10
164	11	9	10
165	11	9	10
166	11	9	10
167	11	9	10
168	11	9	10
169	11	9	10
170	11	9	10
171	11	9	10
172	11	9	10
173	11	9	10
174	11	9	10
175	11	9	10
176	11	9	10
177	11	9	10
178	11	9	10
179	12	10	11
180	12	10	11
181	12	10	11
182	12	10	11
183	12	10	11
184	12	10	11
185	12	10	11
186	12	10	11
187	12	10	11
188	12	10	11
189	12	10	11
190	12	10	11
191	12	10	11
192	12	10	11
193	12	10	11
194	13	10	11
195	13	10	11
196	13	10	11
197	13	10	11
198	13	10	11
199	13	10	11
200	13	10	11
201	13	10	11
202	13	10	11
203	13	10	11
...

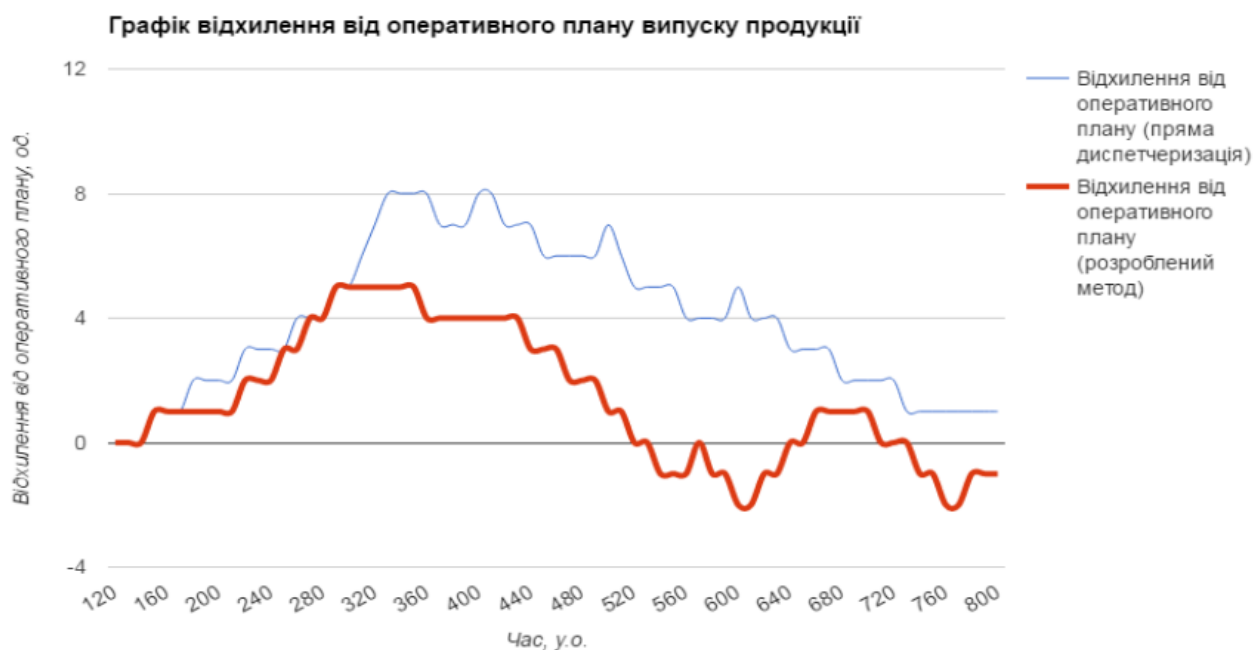


Рис. 4.7. Відхилення від оперативного плану при третьому експерименті

Як бачимо з графіку результатів проведення останнього експерименту, розроблений алгоритм ДМП швидше адаптується до виникнення нештатних ситуацій при складніших компоновках ГВС та при наявності більше однієї номенклатурної одиниці продукції.

Було також проведено ще декілька експериментів на даній компоновці ГВС та при таких же технологічних ланцюжках виробництва, які показали вищу швидкість адаптації, а, відповідно, приведення системи у відповідність до виконання оперативного плану на 3-4%, порівняно з методом прямої диспетчеризації.

Експерименти показали, що наведені в 3-му розділі оптимізації алгоритму значно впливають на приріст якості його виконання (статистично 65-90% приросту).

Таким чином, експериментально доведено ефективність роботи алгоритму порівняно з класичним підходом прямої диспетчеризації, особливо на більш складних компоновках ГВС з більшою кількістю випуску номенклатурних одиниць продукції.

4.4. Висновки до четвертого розділу

1. На базі проведених аналітичних розробок в рамках роботи над першими трьома розділами дисертаційних досліджень, з ціллю виконання імітаційних експериментів з перевірки працездатності отриманих результатів, розроблена дискретно-подійна модель ЛС з використанням мови Python та бібліотеки SimPy. Втілені в програмному коді розроблені алгоритми, а також довідковий алгоритм прямої диспетчеризації.

2. На базі розробленої імітаційної моделі виконані імітаційні експерименти на декількох простих модельованих тестових структурах ЛС. Імітаційні експерименти показали працездатність розроблених алгоритмів при їх застосуванні до диспетчеризації МП в ГВС. Результати експериментів показали, що в загальному розроблений алгоритм має ту ж поведінку, що і пряма диспетчеризація, проте демонструє дещо кращі результати при ускладненні налаштувань компоновки виробничої лінії, завдяки своїм адаптивним характеристикам.

ВИСНОВОК

Загальним результатом роботи є розроблена система диспетчеризації матеріальних потоків в логістичних системах, а саме - ключові її елементи:

- організаційна структура;
- мультиагентна модель;
- математична модель;
- функція прийняття рішень;
- алгоритм, що втілює функцію диспетчеризації.

Результати роботи полягають в наступному:

1. На базі структурного аналізу проведена класифікація ієрархічних рівнів існуючих логістичних систем, виділені властивості матеріальних потоків на всіх рівнях, а також розроблена організаційна структура універсальної системи диспетчеризації матеріальних потоків.

2. Розроблена дискретно-стохастична модель руху матеріальних потоків на базі економіко-математичної моделі поставок Лісовського-Пономаренка. Розроблена модель представлена у вигляді мультиагентного середовища для руху матеріальних потоків з детальним пропрацюванням агента, що представляє собою компонент СДМП, що виконує диспетчеризацію МП між потокоутворюючими блоками.

3. Синтезована функція диспетчеризації на базі марківських ланцюжків прийняття рішень.

4. Розроблений адаптивний алгоритм диспетчеризації матеріальних потоків на базі сіткового представлення процесу диспетчерського управління з уникненням етапу розв'язання конфліктів, а також механізми його удосконалення в залежності від компонування логістичної системи та шляхів проходження матеріальних потоків. Алгоритм також є компонентним, що

дозволяє йому, при збереженні загальної канви поведінки, застосовувати різні оптимізаційні рішення в залежності від специфіки модельованої системи.

6. Розроблена імітаційна модель логістичної системи, що призначена для дослідження ефективності роботи створених алгоритмів. Проведені експериментальні дослідження на моделях виробничих систем різних компонувань, що підтвердили працездатність розроблених рішень при виникненні потреби коригування оперативних планів виробництва. Експерименти також показали дещо вищу ефективність роботи розроблених рішень у випадку порівняння з класичним алгоритмом прямої диспетчеризації при моделюванні ділянки гнучкої виробничої системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алесинская Т. В. Основы логистики. Общие вопросы логистического управления: учебное пособие // Издательство ТРТУ. – 2005. – 121 с.
2. Бауэрокс Д. Логистика: интегрированная цепь поставок. / Бауэрокс Д., Клосс Д. – М.: ЗАО “Олимп-Бизнес”, 2001. – 636 с.
3. Блажко О. В. Моделювання процесів взаємодії компонентів комп’ютерно-інтегрованих систем із застосуванням апарату процесних алгебр / О. В. Блажко, О. І. Лісовиченко, Є. С. Поховський, Л. С. Ямпольський // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2003 №6 (26). с. 9-28.
4. Веников В. А. Теория подобия и моделирования / В.А. Веников, Г.В. Веников. – М.: Высшая школа, 1984. – 439 с.
5. Гнатієнко Г. Експертні технології прийняття рішень / Г. Гнатієнко, В. Снитюк // Маклаут. – Київ, 2008 – 444 с.
6. Голіков А. Регіональна економіка та природокористування.: Навчальний посібник. / за ред. Голікова А. П., А. Голіков, О. Дейнека // – К: Центр учбової літератури, 2009. – 352 с.
7. Дзінько А. М. Агентно-орієнтований підхід до розв’язання логістичних задач диспетчеризації матеріальних потоків / А. М. Дзінько, Л. С. Ямпольський // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2012. -№ 21(41). – с. 18-22.
8. Дзінько А. М. Диспетчеризація матеріальних потоків з динамічною корекцією шляхом зворотнього розповсюдження пріоритетів / А. М. Дзінько // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління». – 2014. -№ 1(24). – с. 5-8.
9. Дзінько Р.І Використання шаблонів проектування програмного забезпечення у моделюванні РТК / Р. І. Дзінько, А. М. Гордійчук,

О. І. Лісовиченко // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2011. -№ 19(39). – с. 73-78.

10. Дзінько Р.І. Використання мікропотоків для збору та обробки даних про стан ГВС / Р. І. Дзінько, А. М. Гордійчук, О. І. Лісовиченко // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2011. -№ 18(38). – с. 29-36.

11. Дзінько А. М. Логістичний підхід до диспетчеризації матеріальних потоків в ГВС / А. М. Дзінько, Л. С. Ямпольський // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління». – 2013. -№ 1(22). – с. 17-24.

12. Дзінько А.М. Прогнозування динаміки змін пріоритетів вимог в методі зворотнього розповсюдження пріоритетів / А. М. Дзінько, Л. С. Ямпольський // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління» - 2015. - №1(26). – с. 37-41.

13. Дэвид Г. Метод парных сравнений. – М.: Статистика, 1978. – 144с.

14. Жерновий Ю. В. Імітаційне моделювання систем масового обслуговування: практикум / Ю. В. Жерновий. – Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2007. – 307 с.

15. Ивченко Г. Теория массового обслуживания / Г. Ивченко, В. Каштанов, И. Коваленко. – М.: Высшая школа, 1982. – 636 с.

16. Кальченко А. Г. Логістика: Навч. посіб. — К.: КНЕУ, 2003. – 284 с.

17. Кальченко А. Г. Основи Логістики / А. Г. Кальченко. — К. : КНЕУ, 2004. – 284 с.

18. Кальченко А. Г. Основи логістики: навчальний посібник / А. Г. Кальченко – Київ, 1999. – с. 256.

19. Кислий В.М. Логістика: теорія та практика / В. М. Кислий, О. А. Біловодська, О.М. Олефіренко, О.М. Смоляник, 2010. – с. 412.

20. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. – М.: Наука, 1970. – с. 510.

21. Кудрявцев Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем / Е. М. Кудрявцев. – М., 2004. – 298 с.
22. Кудрявцев Л. Д. Краткий курс математического анализа: учебник // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 424 с.
23. Лісовиченко О. Розробка об'єктно-орієнтованого середовища моделювання матеріальних потоків гнучкої виробничої системи // Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук. – НТУУ “КПІ”, Київ. – 2007. – 236 с.
24. Лісовський В. “Економіко-математична модель логістичного ланцюга поставок” / В. І. Лісовський, Л. А. Пономаренко // Економіко-математичне моделювання соціально-економічних систем. Збірник наукових праць МННЦ ІТіС, випуск 17 // Київ. – 2012, – с. 5-23.
25. Ломтев А. Логистическая система. Управление поставками // Вестник УКЦ. — 2011. – с. 517.
26. Лубенцова В. С. Математические модели и методы в логистике. Под редакцией В.П. Радченко. – Самара. СГТУ, 2008, – 157 с.
27. Мешкова Л. Логистика в сфере материальных услуг / Л. Л. Мешкова, И. И. Белоус, Н.М. Фролов, 2002. – 200 с.
28. Моисеева Н. К. Экономические основы логистики: Учебник. – М74М.: ИНФРА-М, 2008. – 528 с.
29. Морозов О. Основы логистической теории в практике успешного ведения современного бизнеса. Специальный курс. Лекция №2. – 2005. – 367 с.
30. Мусаев А., Шерстюк Ю. Автоматизация диспетчеризации производственных процессов промышленных предприятий // В журнале.: Автоматизация в промышленности, 2003, №10. – с. 40-45.
31. Недашківська Н. Метод узгоджених парних порівнянь при оцінюванні альтернатив рішень за якісним критерієм // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2013. – № 4. – с. 67-79.

32. Орлов А. Теория принятия решений. Учебное пособие. – М.: Издательство «Март», 2004. – 656 с.
33. Пигнастый О. М. Основы статистической теории построения континуальных моделей производственных линий // Восточно-Европейский журнал передовых технологий: Процессы управления (ISSN 1729-3774). - 4/3 (70). - 2014, с. 38-48
34. Плоткин Б.К. Экономико-математические методы и модели в логистике: Учебное пособие / Б.К. Плоткин, Л.А. Делюкин, изд-во СПбГУЭФ, 2010. – 466 с.
35. Прицкер А. Введение в имитационное моделирование и язык СЛАМ II. М: "Мир", 1987, – 646 с.
36. Программное обеспечение моделирования непрерывно-дискретных систем.(под ред. В.Глушкова), М: "Наука", 1975. – 745 с.
37. Рассел, С. Искусственный интеллект. Современный подход. / С. Рассел, П. Норвиг - Издательский дом Вильямс, 2006. – 1408 с.
38. Рубан Т. Н. Материальные и финансовые потоки, обеспечивающие производство и реализацию потребительских товаров [Текст] / Т. Н. Рубан // Молодой ученый. – 2012. – №10. – с. 163-166.
39. Собчишин В. Закупівельна логістика й логістичне управління закупівлями: сутність, функції та відмінності // Електронне наукове фахове видання «Ефективна економіка», №9. – 2013. с. 15-23.
40. Советов Б. Я. Моделирование систем: Учеб. для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – 4 изд. стер. – М.: Высш. школа, 2005. – 343 с.
41. Томашевский В. Н. Имитационное моделирование средствами GPSS / В. Н. Томашевский, Е. Г. Жданова. – М.:Бестселлер, 2003. – 416 с.
42. Уотерс Д. Логистика. Управление цепью поставок: Пер. с англ. / Д. Уотерс. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 503 с.
43. Шаповалова С. І Моделювання дій інтелектуальних агентів в середовищі зі змінними характеристиками / С. І. Шаповалова, Д. І Третьяков //

Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. - № 45. – с. 64-69.

44. Щербаков В. Основы логистики // Издательский дом “Питер”. Business & Economics. – 2008. – 432 с.

45. Ямпольський Л. С. Гнучкі комп’ютеризовані системи: проектування, моделювання і управління / Л. С. Ямпольський, П. П. Мельничук, Б. Б. Самотокін, М. М. Поліщук, М. М. Ткач, К. Б. Остапченко, О. І. Лісовиченко, Житомир, 2005. -512 с.

46. Ямпольський Л. С. Гнучкі комп’ютерно-інтегровані системи: планування, моделювання, верифікація, управління : підручник / Л. С. Ямпольський, П. П. Мельничук, К. Б. Остапченко, О. І. Лісовиченко. – Житомир : ЖДТУ, 2010. – 768 с.

47. Ямпольський Л.С. Системи штучного інтелекту в плануванні, моделюванні та управлінні: підруч. для студ. вищ. навч. закл. / Л. С. Ямпольський, Б. П. Ткач, О. І. Лісовиченко. – К. : ДП «Вид. дім «Персонал», 2011. – 544 с.

48. Abercrombie, A Methodology to Evaluate Agent Oriented Software Engineering Techniques, Abercrombie, Robert K; Sheldon, Frederick T; Lin, Chia-En; Kavi, Krishna M.; Daley, Kristopher M, Oak Ridge, Tenn.: Oak Ridge National Laboratory. – 2007. – p. 132.

49. Adan I., Resig J. Queuing Systems // University Course. – Department of Mathematics and Computing Science. Eindhoven University of Technology. – 2015. – p.132.

50. Arvis J.-F., Mustra M. A., Panzer J., Ojala L. Connecting to Compete: Trade Logistics in the Global Economy. – The Logistics Performance Index and Its Indicators // World Bank. – 2007. – p. 354,

51. Bernd Wagner, Material flow management: improving cost efficiency and environmental performance, Bernd Wagner, Stefan Enzler, Heidelberg: Physica-Verlag, 2006. – p. 847.

52. Brian Henderson-Sellers, Agent-oriented methodologies, Brian Henderson-Sellers; Paolo Giorgini, Hershey, PA: Idea Group Pub., 2005. – p. 614
53. Brunner P., Rechberger H. Practical Handbook of Material Flow Analysis // Advanced Methods in Resource & Waste Management. Lewis Publishers. – 2003. – p. 465.
54. Bryan Jons, Logistics: An Integrated Approach (2rd edition), Bryan Jones, Michael Quale, Liverpool Business Publishing, 2002. – p. 894.
55. Chuah M., Wong K. A review of business intelligence and its maturity models // African Journal of Business Management. – 2011. – p. 364.
56. David Lowe, The transport's and Operator's Handbok (46th edition), Dawid Lowe, Clive Pidgeon, Kogan page, 2016. – p. 451.
57. DM Lambert, Fundamentals of Logistics Management, DM Lambert, JR Stock, L Elram, International edn., McGraw Hill, Singapore, 1998. – p. 462.
58. Donald Waters, Global Logistics and Distribution Planning (3rd edition), Donald Waters, CRC Press, 1999. – p. 745.
59. Doob J. Stochastic Processes // John Wiley and Sons. – New York. – 1953. – p. 461.
60. Fawcett S.E, Closs D.J. Coordinated global manufacturing, the logistics/manufacturing interaction, and firm performance // Journal of Business Logistics. – 1993. – p. 584.
61. Finin T., Fritzson R. KQML as an Agent Communication Language // Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation, – IEEE CS Press. – p. 744.
62. Fox M.S., Barbucenau M., Teigen R. Agent-Oriented Supply-Chain Management / Fox M.S. // The International Journal of Flexible Manufacturing Systems. – 2000. – p. 587.
63. Haag S. Management Information Systems for the Information Age. – 2006. p. 224-228.
64. Handfield R.B., Nichols E.L. Introduction to Supply Chain Management

/ Handfield R.B. // New York: Prentice-Hall. – 1999. – p. 431.

65. Herrmann J., Lin E. Petri Nets: Tutorial and Applications // The 32th Annual Symposium of Washington Operations Research-Management Science Council. – Washington, D.C. – 1997. – p. 622.

66. Hristev V. Artificial Neural Networks // R. M., California, 2005. – p. 440.

67. Huisinga W., Meerbach E. Markov Processes for Everybody // DFG Research Center MATHEON. – Berlin. – 2005. – p. 163.

68. IBM. IBM Statmate documentation: <http://www-03.ibm.com/software/products/en/ratistat>.

69. IBM. Rational Rhapsody Architect for Systems Engineers // Systems Engineering Tools Database. – 1996. – p. 516.

70. Inichova M.A., Inichov D.B., Kolesov Y.B., Senichenkov Y.B.: Model Vision for Windows. Graphical environment for hybrid system simulating. User's Guide. Moscow-St.Petersburg, 1995. – p. 436.

71. José Martínez Calatayud, Flow injection analysis of pharmaceuticals: automation in the laboratory, José Martínez Calatayud, London; Bristol, PA: Taylor & Francis, 1996. – p. 389.

72. JR Stock, Strategic logistics management, JR Stock, DM Lambert, McGraw-Hill/Irwin, 2001. – p. 459.

73. Kasabov N. Introduction: Hybrid intelligent adaptive systems. Agent Theories, Architectures, and Languages. – Springer-Verlag, 1996. – p. 300.

74. Kolesov Y.B., Senichenkov Y.B. Visual specification language intended for event-driven hierarchical dynamic system with variable structure. ICI&C'97 PROCEEDINGS, v.2, , St.Petersburg, 1997. p.712-719.

75. Larson, P.D. Halldorsson, A. Logistics versus supply chain management: an international survey. / Larson, P.D // International Journal of Logistics: Research & Application, – Vol. 7, Issue 1, – 2004. – p.17-31.

76. Laumanns M., Lefebvre E. Robust optimal control of material flows in demand-driven supply networks // Physica A: Statistical Mechanics and its

Applications. – 333 (1). – 2005, – p. 24-31.

77. Martha C. Cooper, Strategic Planning for Logistics, Martha C. Cooper, Daniel E. Innis and Peter R. Dickson, Oak Brook, Il: the Council of Logistics Management, 1992. – p. 351.

78. Martha C. Cooper, Supply Chain Management: More Than a New Name for Logistics, Martha C. Cooper, Douglas M. Lambert, Janus D. Pagh, The International Journal of Logistics Management, 1997, – p. 1 – 14.

79. Matloff N. Introduction to Discrete-Event Simulation and the SimPy Language. – 2008. – p. 878.

80. Microsoft. Official Website of Microsoft Excel Software: <https://products.office.com/en/excel>.

81. Min H., Zhou G. Supply Chain Modeling: Past, Present and Future // Computers & Industrial Engineering. – 43 (1-2) . – 2002, – p. 231-249.

82. National Research Council (U.S.), Materials count: the case for material flows analysis, National Research Council (U.S.). Committee on Material Flows Accounting of Natural Resources, Products, and Residuals; National Academy of Sciences, Washington, D.C.: National Academies Press, 2004. – p. 412.

83. Ngoc Thanh Nguyen, Agent and multi-agent systems technologies and applications, Ngoc Thanh Nguyen, Berlin; New York: Springer, 2007. – p. 451.

84. Owens R., Warner T. Concepts of Logistics System Design. Arlington, Va.: John Snow, Inc./DELIVER, for the U.S. Agency for International Development (USAID). – p. 235.

85. Parosh A., Mayr R. Petri Nets with Time and Cost. Tutorial // Department of Information Technology, Upsalla University. – 2012. – p. 345.

86. Paul Fawcett, Managing Passenger Logistics, Paul Fawcett, Kogan Page, 2000. – p. 556.

87. Peter Bartelmus, Green accounting and material flow analysis: alternatives or complements, Peter Bartelmus; Andre Vesper, Milano, Italy: Fondazione Eni Enrico Mattei, 2000. – p. 415.

88. Python Software Foundation. Official Website of Python Programming Language: <http://python.org/>.
89. Rafael H Bordini, Programming multi-agent systems in AgentSpeak using Jason, Rafael H Bordini; Jomi Fred Hübner; Michael J Wooldridge, Chichester, England; Hoboken, NJ: J. Wiley, 2007. – p. 333.
90. Rex Faulks, International Transport (5th edition), Rex Faulks, published in association with the Chartered Institute of Transport, CRC Press, 1999. – p. 230.
91. Rex W. Faulks, International Transport: An Introduction to Current Practices and Future Trends, Rex W. Faulks, CRC Press, 1999. – p. 411.
92. Robert Phaal T-plan: The Fast Start to Technology Roadmapping. / Robert P., Clare F., David P. – Prime, 2015. – p. 350
93. Saaty T. L. Elements of queueing theory: with applications // M.: McGraw-Hill, – University of Michigan, – 1961. – p. 556.
94. Sangwon Suh, Materials and energy flows in industry and ecosystem networks: life cycle assessment, input-output analysis, material flow analysis, ecological network flow analysis, and their combinations for industrial ecology, Sangwon Suh, Leiden: Institute of Environmental Sciences (CML), 2004. – p. 455.
95. Satish C. Ailawadi, Logistics Management, Satish C. Ailawadi, Rakesh Singh, Prentice-Hall of India Pvt. Limited, 2005. – p. 300.
96. Serfozo R. Basics of Applied Stochastic Processes // Probability and Its Applications. – Springer-Verlag, Berlin. – 2009. – p. 302.
97. Srinivasan D., Gebretsadik G. Principles of Material Supply and Assembly Systems in an Automotive Production System // Master's Thesis in the Master Degree Programme. – Gothenburg. – 2001. – p. 544.
98. Stefan Helber, Performance analysis of flow lines with non-linear flow of material, Stefan Helber, Berlin; New York: Spinge, 1999. – p. 225.
99. Stuart Cole, Applied Transport Economics (3rd edition), Stuart Cole, Kogan Page, 2005. – p. 410.
100. Tseng Yung-yu, Yue W.L., Taylor M. A.-P. The role of transportation in

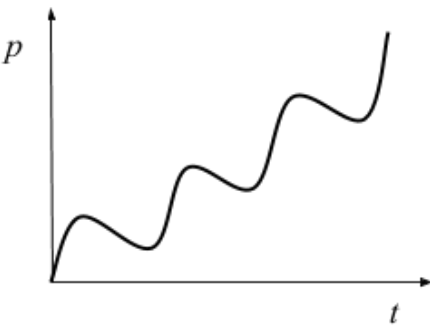
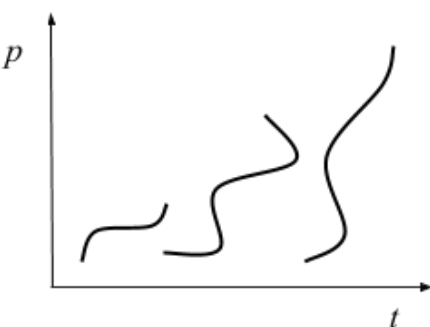
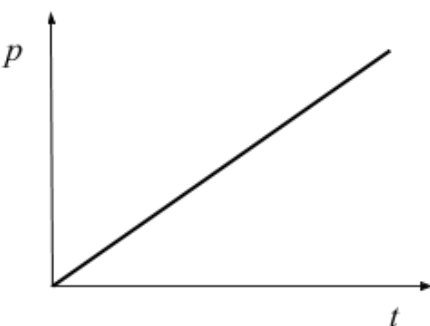
logistics chain / Tseng Yung-yu // Proceeding of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, – Vol.5, – 2005. – p.1657-1672.

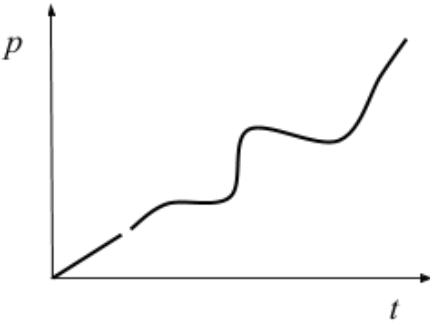
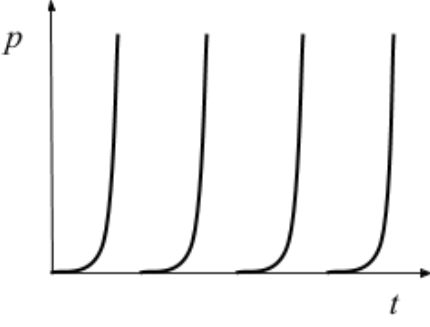
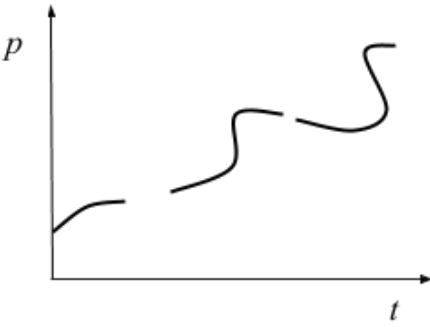
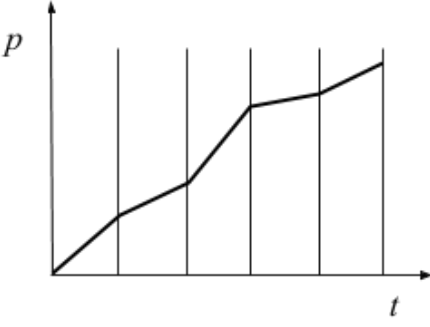
101. Weiss G. Multiagent systems (2nd ed) // The MIT Press. – Cambridge, MA, 2013. – p. 310

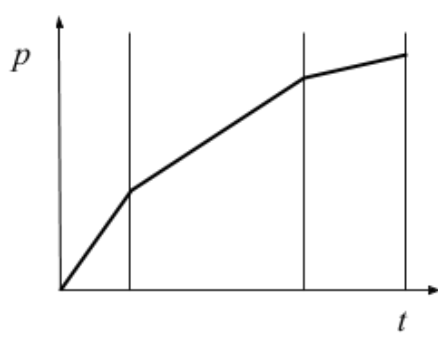
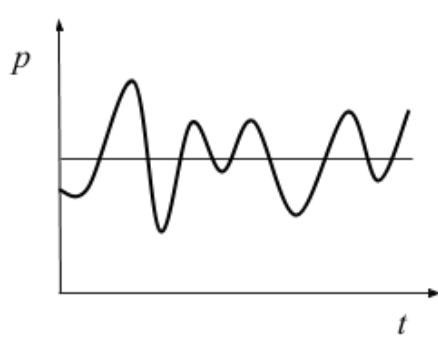
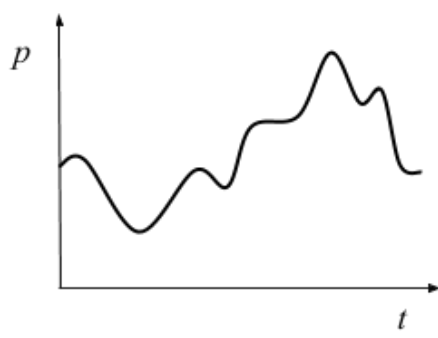
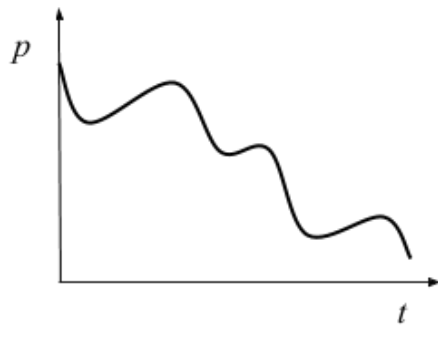
102. Weizhu Bao, Multiscale modeling and analysis for materials simulation, Weizhu Bao; Qiang Du, Singapore; Hackensack, NJ: World Scientific, 2012. – p. 512

ДОДАТОК А

Класифікація матеріальних потоків за їх основними характеристиками

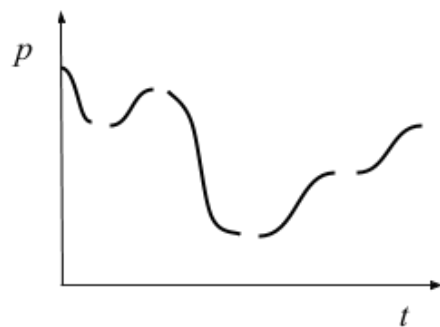
Вид потоку	Модель	Схема моделі
Детерміновані потоки		
Стабільний	$P = f(t) = \text{const},$ $t = [0, \infty)$	
Нестабільний	$P = f(t) \neq \text{const}$	
Рівномірний	$V = \text{const};$ $S = V \cdot t$	

Нерівномірний	$V = \text{const};$ $S \neq V \cdot t$	
Періодичний	$P = f(T)$	
Неперіодичний	$P = f(t_i) = T$	
Ритмічний	$P = V_1 t_1 + \dots + V_n t_n$	

Неритмічний	$P = f(V, t)$	
Стохастичні потоки		
Стационарний	$\lambda = const$	
Нестационарний	$\lambda \neq const$	
Неперервний	$P = \int_{t_1} f(t) dt$	

Дискретный

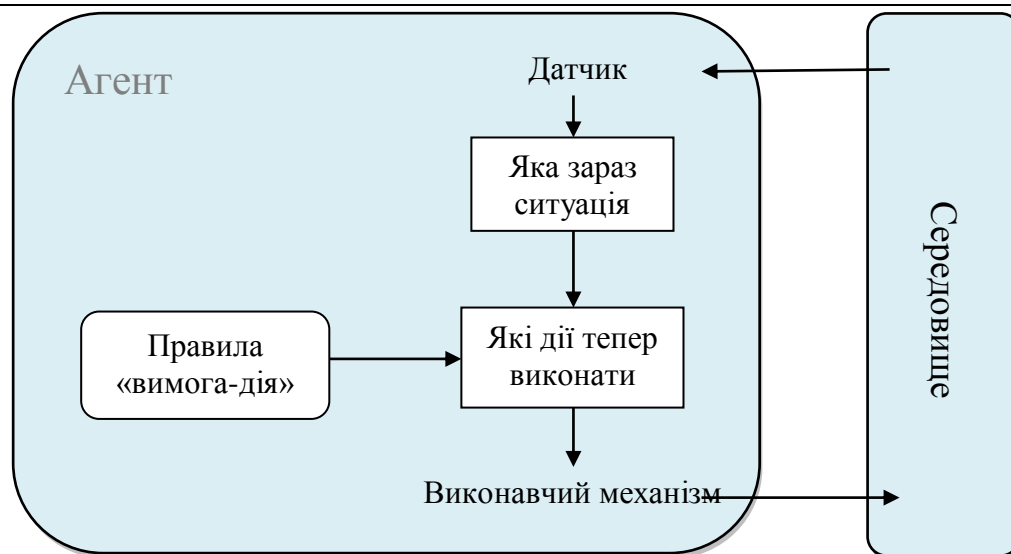
$$P = \sum_{i=1} p_i$$



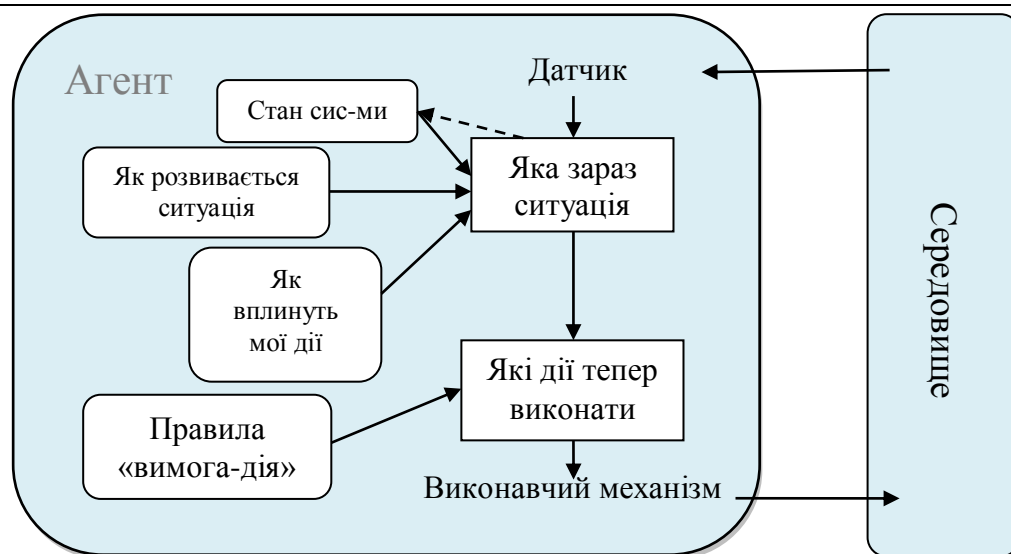
ДОДАТОК Б

Типові структури інтелектуальних агентів

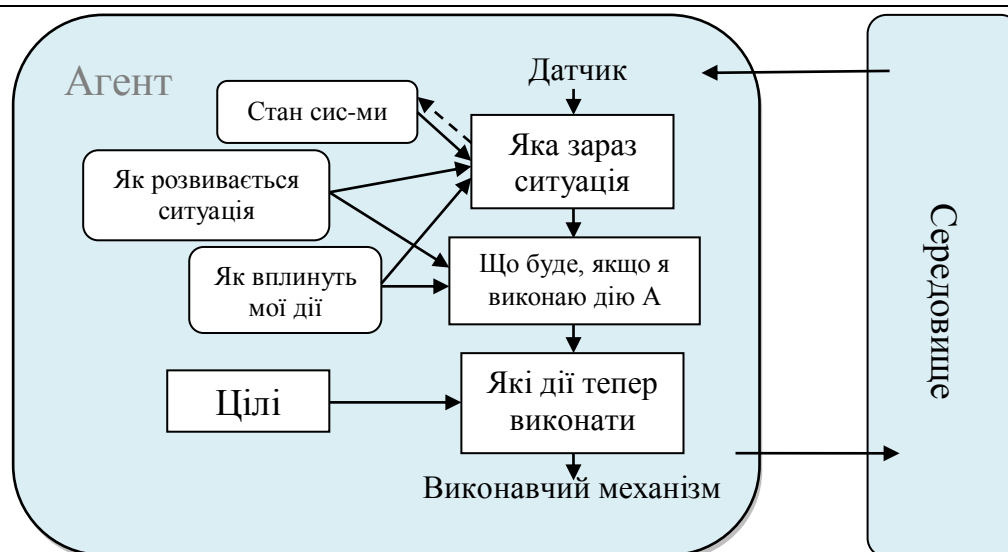
Простий рефлексний агент



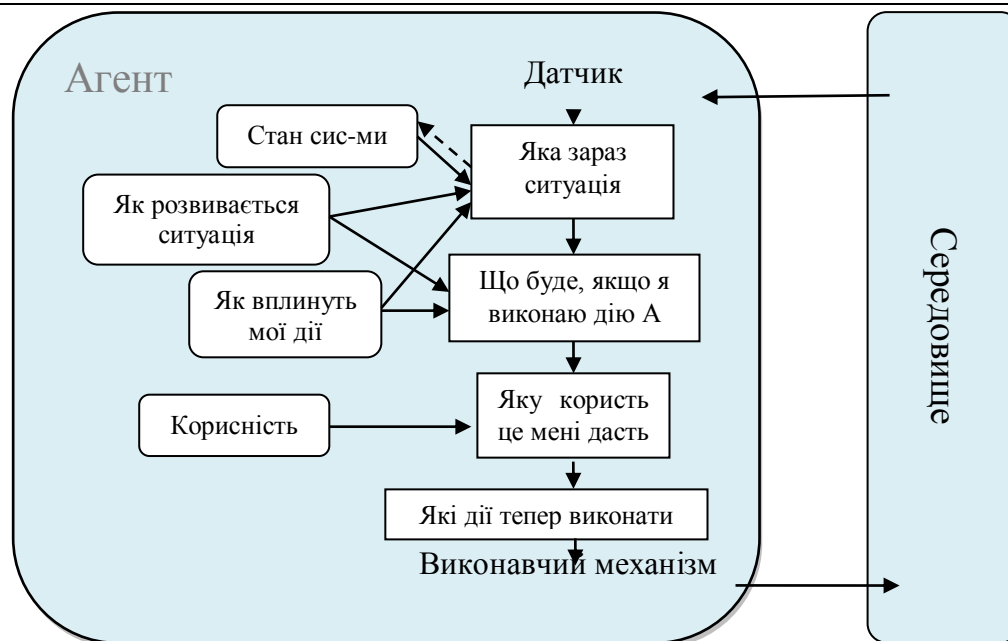
Рефлексний агент, що базується на моделі

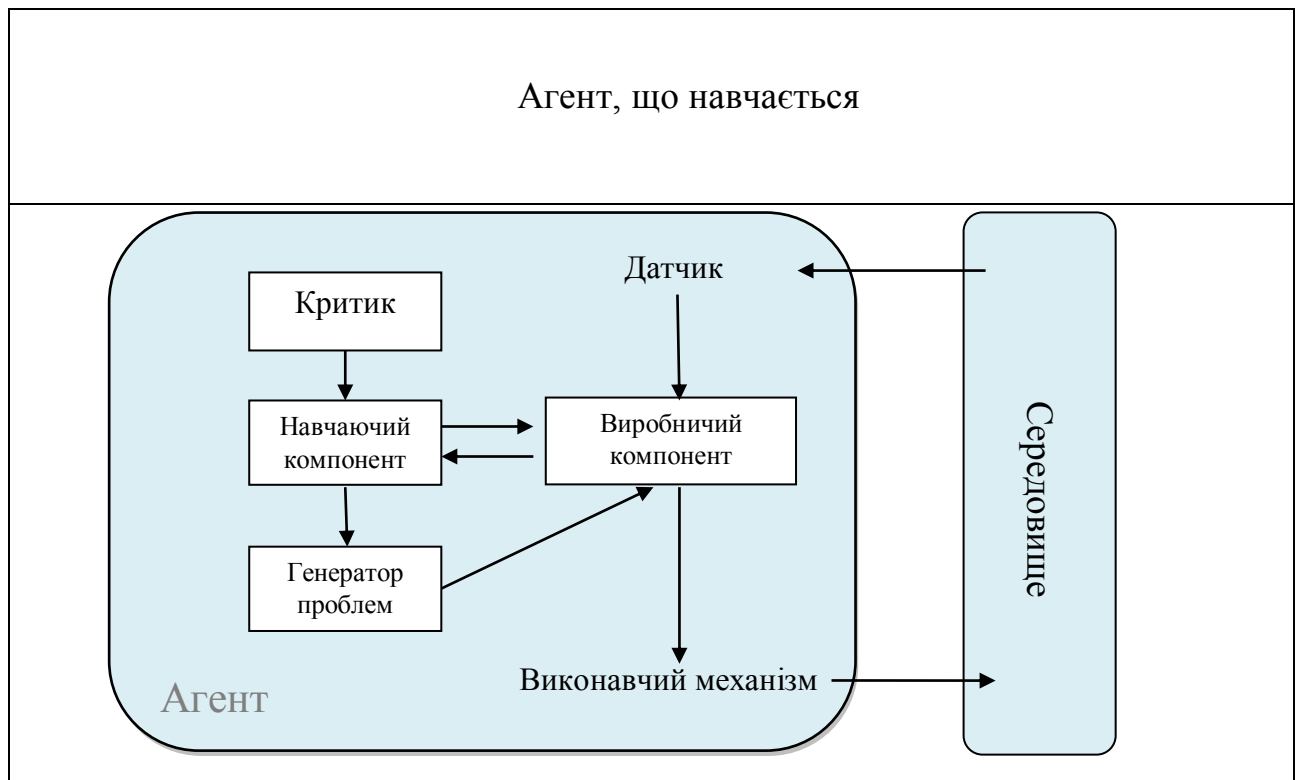


Агент, що базується на цілі



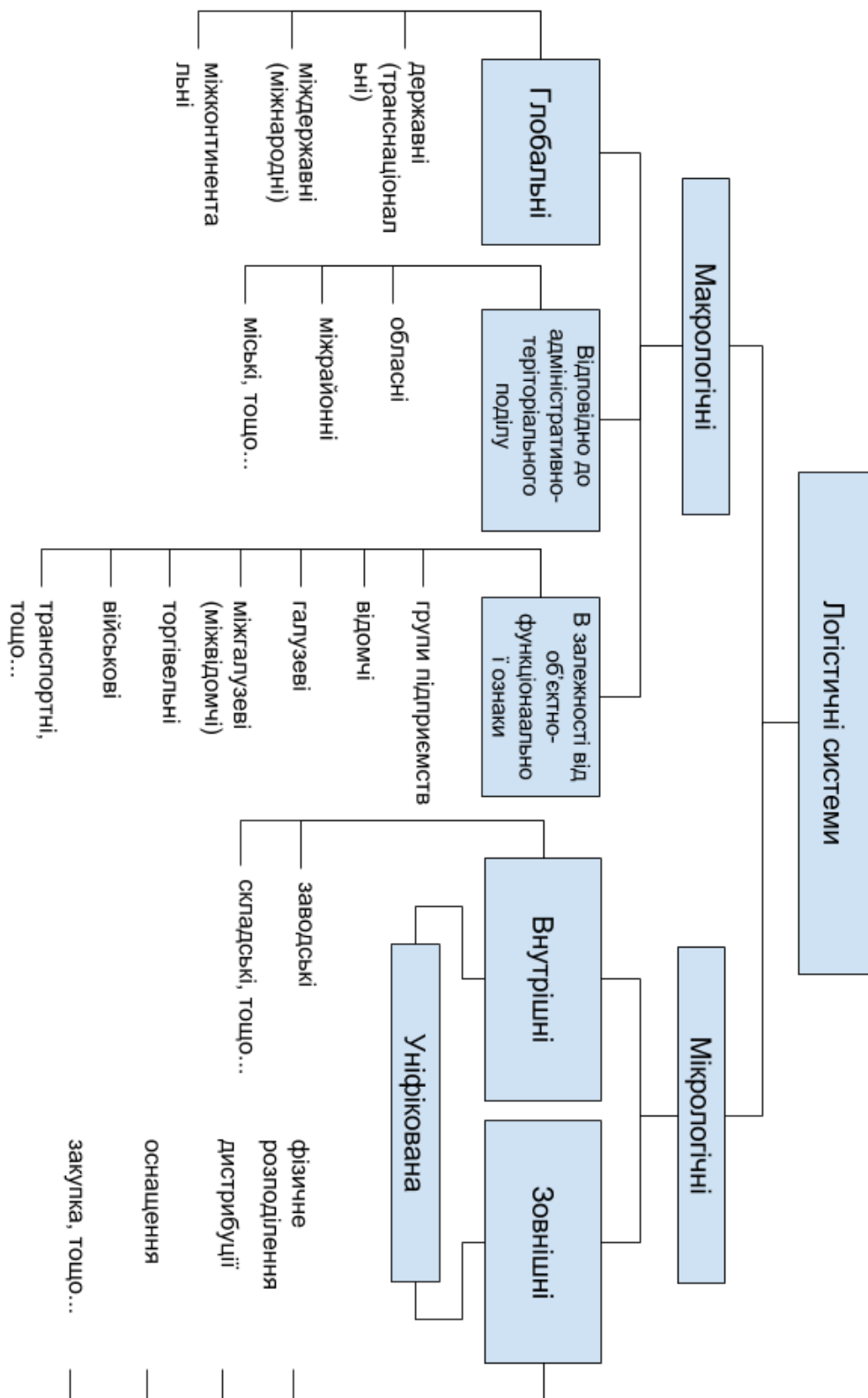
Агент, що базується на корисності



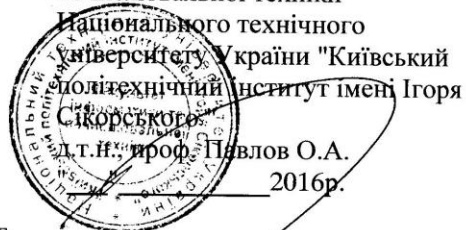


ДОДАТОК В

Повна класифікація логістичних систем



ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан Факультету інформатики та
обчислювальної техніки

АКТ

впровадження результатів кандидатської дисертації Дзінько Анастасії Михайлівни на тему «Мультиагентний підхід до автоматизації процесів керування матеріальними потоками в логістичних системах».

Ми, що нижче підписалися, в.о. завідуючого кафедрою технічної кібернетики (ТК), кандидат технічних наук, доцент Ткач Михайло Мартинович, кандидат технічних наук, доцент Лісовиченко Олег Іванович та кандидат технічних наук, доцент Остапченко Костянтин Борисович, склали цей акт, який засвідчує, що результати дисертації Дзінько А.М. були використані при розробці "Мультимедійного комплексу комп'ютерно-інтегрованих засобів дистанційно-віртуального навчання з використанням інтернет-технологій" авторів проф. Ямпольський Л.С., доц. Лісовиченко О.І., проф. Мельничук П.П., ст. викл. Олійник В.В., доц. Остапченко К.Б., доц. Поліщук М.М., проф. Ткач Б.П., доц. Ткач М.М., що був висунутий на здобуття Державної премії України в галузі освіти в номінації "вища освіта".

Мультимедійні підручники із комплексу передані для впровадження у навчальний процес у Технічний університет Софії (Болгарія), Саратовський державний технічний університет та Новосибірський державний технічний університет (Росія), які є учасниками спільного з КПІ ім. Ігоря Сікорського проекту TEMPUS (Подвійний магістерський диплом з автоматизації/мехатроніки країн ЄС - країн партнерів: номер проекту 517138-TEMPUS-1-2011-1-CZ-TEMPUS-JPCR).

Також, результати дослідження Дзінько А.М., що використані у книгах 5-7 зазначеного мультимедійного комплексу та при розробці лабораторно-дослідних стендів до нього, застосовуються при проведенні лекційних та практичних занять з дисципліни "Алгоритмізація та верифікація управління в ГКС" на кафедрі технічної кібернетики КПІ ім. Ігоря Сікорського (напрямок 6.050201 "Системна інженерія").

В.о. зав. кафедрою ТК

Доцент кафедри ТК

Доцент кафедри ТК

Ткач М.М.

Лісовиченко О.І.

Остапченко К.Б.