

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет транспорту та механічної інженерії

(повне найменування факультету)

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗУ ДЛЯ
ПРОЄКТУВАННЯ НАКОПИЧУВАЛЬНИХ СИСТЕМ У СКЛАДІ
ГНУЧКИХ ВИРОБНИЧИХ КОМПЛЕКСІВ**

спеціальність 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Прикладна механіка

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ІМм-21

**Петриковець Станіслав
Русланович**

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Залета Ольга Михайлівна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

« » 2023 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Четвержук Тарас Іванович

(підпис)

Луцьк – 2023 року

Луцький національний технічний університет

Факультет Транспорту та механічної інженерії
Кафедра Прикладної механіки та мехатроніки
Другий (магістерський) рівень
освітньо-професійної програми «Прикладна механіка»
Спеціальність 131 Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
Р. РЕДЬКО
“ _____ ” _____ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Петриковця Станіслава Руслановича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Модернізація Застосування методів структурного синтезу для проектування накопичувальних систем у складі гнучких виробничих комплексів», керівник кваліфікаційної роботи магістра Залета Ольга Михайлівна к.т.н., доц. каф. ПМіМ затверджені наказом вищого навчального закладу від «14» січня 2023 р., № 42/01-02

2. Строк подання студентом роботи 01.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: звіт з переддипломної практики, літературні джерела в предметній області дослідження, інтернет-ресурси технічного спрямування.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз структурно-компонентного складу автоматизованих транспортно-накопичувальних систем у складі гнучких виробничих комплексів. 2. Моделювання автоматизованих накопичувальних систем. 3. Синтез структурно-компонувальних рішень автоматизованих накопичувальних систем. Висновки. Список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу:

1. Типи рухів елементів автоматизованих накопичувальних систем – 1 ф. А1; 2. Просторові відношення між елементами автоматизованих накопичувальних систем – 1 ф. А1; 3. Матричні моделі однорівневих автоматизованих накопичувальних систем – 1 ф. А1; 4. Матричні моделі автоматизованих накопичувальних систем – 1 ф. А1; 5. Структурно-компонувальні схеми автоматизованих накопичувальних систем – 2 ф. А1

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

01.03.2023 р.

Керівник

_____ (підпис)

Завдання прийняв до виконання

_____ (підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів виконання кваліфікаційної роботи магістра	Примітка
1.	<i>Аналіз структурно-компонентного складу автоматизованих транспортно-накопичувальних систем у складі гнучких виробничих комплексів</i>	<i>25.09.2023р.</i>	
2.	<i>Моделювання автоматизованих накопичувальних систем</i>	<i>15.10.2023р.</i>	
3.	<i>Синтез структурно-компонувальних рішень автоматизованих накопичувальних систем</i>	<i>25.11.2023р.</i>	
4.	<i>Представлення роботи</i>	<i>01.12.2023р.</i>	
5.	<i>Електронний варіант кваліфікаційної роботи магістра</i>		

Студент

_____ (підпис)

Петриковець С.Р.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Залета О.М.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Петриковець С.Р. Застосування методів структурного синтезу для проектування накопичувальних систем у складі гнучких виробничих комплексів – Рукопис.

Атестаційна магістерська робота на здобуття кваліфікації другого (магістерського) рівня вищої освіти із спеціальності 131 – Прикладна механіка. – Луцький національний технічний університет. – Луцьк, 2023.

У роботі виконано детальний аналіз структурно-компонентного складу автоматизованих транспортно-накопичувальних систем гнучких виробничих комплексів та видів їх структурно-компонувальних схем. Розглянуто засади матричного моделювання та побудовано відповідні моделі автоматизованих накопичувальних систем з різними типами накопичувачів. Запропоновано підхід до синтезу нових варіантів структурно-компонувальних рішень автоматизованих накопичувальних систем, в основу якого покладено принципи матричного моделювання та евристичні прийоми. Результати синтезу представлено у вигляді матричних моделей нових структурно-компонувальних рішень накопичувальних систем та відповідних їм компонентувальних схем.

Ключові слова: автоматизована накопичувальна система, накопичувач, модель, матриця, структурно-компонувальне рішення.

ANNOTATION

Petrykovets S.R. Application of structural synthesis methods for designing accumulative systems as part of flexible production complexes. – Manuscript.

Attestation master's work for obtaining the qualification of the second (master's) level of higher education in specialty 131 – Applied mechanics. – Lutsk National Technical University. – Lutsk, 2023.

The work includes a detailed analysis of the structural and component composition of automated transport and accumulative systems of flexible production complexes and types of their structural and compositional schemes. The principles of matrix modeling were considered and corresponding models of automated accumulative systems with different types of accumulative devices were built. An approach to the synthesis of new options of structural and compositional solutions of automated accumulative systems is proposed, which is based on the principles of matrix modeling and heuristic techniques. The results of the synthesis are presented in the form of matrix models of new structural and compositional solutions of accumulative systems and their layout schemes.

Keywords: automated accumulative system, storage device, model, matrix, structural and compositional solution.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 Аналіз структурно-компонентного складу автоматизованих транспортно-накопичувальних систем у складі гнучких виробничих комплексів.....	9
1.1. Огляд існуючих автоматизованих транспортно-накопичувальних систем	9
1.2. Функціональні компоненти автоматизованих транспортно-накопичувальних систем	12
1.3. Основні види структурно-компонувальних схем автоматизованих транспортно-накопичувальних систем	18
1.4. Оцінка ефективності структурно-компонувальних схем автоматизованих транспортно-накопичувальних систем	20
1.5. Висновки до 1-го розділу.....	23
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ НАКОПИЧУВАЛЬНИХ СИСТЕМ.....	24
2.1. Засади матричного моделювання автоматизованих накопичувальних систем.....	24
2.2. Матричне моделювання автоматизованих накопичувальних систем з динамічним накопичувачем.....	26
2.2.1. Побудова моделей автоматизованих накопичувальних систем з циклічним накопичувачем.....	26
2.2.2. Побудова моделей автоматизованих накопичувальних систем з лінійною структурою розташування комірок у накопичувачі.....	29
2.2.3. Побудова моделей автоматизованих накопичувальних систем з накопичувачами, які переміщуються у двовимірному просторі.	32
2.3. Матричне моделювання автоматизованих накопичувальних систем зі статичним накопичувачем.....	36

2.4. Матричне моделювання дворівневих автоматизованих накопичувальних систем.....	42
2.5. Висновки до 2-го розділу.....	46
РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ СТРУКТУРНО-КОМПОНУВАЛЬНИХ РІШЕНЬ	
АВТОМАТИЗОВАНИХ НАКОПІЧУВАЛЬНИХ СИСТЕМ	47
3.1. Засади синтезу структурно-компонувальних рішень накопичувальних систем.....	47
3.2. Формування спеціалізованого фонду евристичних прийомів.....	49
3.3. Принципи синтезу автоматизованих накопичувальних систем на основі матричних моделей.....	57
3.4. Генерування множини структурно-компонувальних рішень автоматизованих накопичувальних систем	59
3.5. Висновки до 3-го розділу.....	80
ВИСНОВКИ.....	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	82
ДОДАТКИ.....	85

ВСТУП

Актуальність теми. Створення гнучких виробничих комплексів (ГВК) є перспективним напрямом вдосконалення сучасного машинобудування. Важливим компонентом ГВК є транспортно-накопичувальні системи. Одним із підходів до підвищення їх ефективності є оптимізація проєктно-конструкторських робіт. Підвищення ефективності проєктування на ранніх стадіях розробки обладнання є можливим зокрема завдяки застосуванню методів структурного синтезу, адже під час моделювання об'єкта та генерування варіантів його елементної будови доцільно перевіряти всі отримані альтернативні результати на розроблених моделях, що, як наслідок, покращує якість кінцевого технічного рішення.

Мета і завдання роботи. Метою магістерської кваліфікаційної роботи є розробка на основі методів синтезу підходу до пошуку нових варіантів компоновальних схем автоматизованих накопичувальних систем.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі завдання:

- здійснити огляд існуючих автоматизованих транспортно-накопичувальних систем у складі гнучких виробничих комплексів;
- визначити, які функціональні компоненти входять до складу автоматизованих транспортно-накопичувальних систем;
- дослідити основні види існуючих структурно-компоновальних схем автоматизованих транспортно-накопичувальних систем;
- проаналізувати, які методи синтезу можуть бути застосовані для розробки нових структурно-компоновальних рішень накопичувальних систем;
- виконати моделювання та синтез нових варіантів компоновань накопичувальних систем на основі вибраного підходу.

Об'єкт дослідження – автоматизовані накопичувальні системи у складі гнучких виробничих комплексів.

Предмет дослідження – структурний синтез та матричне моделювання компоновань автоматизованих накопичувальних систем.

Методика дослідження. Загальні принципи технології машинобудування та автоматизації виробництв; методи матричного моделювання та структурного синтезу компоновальних схем технічних об'єктів.

Наукова новизна одержаних результатів. Запропоновано підхід до синтезу компоновальних схем автоматизованих накопичувальних систем у складі гнучких виробничих комплексів, в основу якого покладено матричне моделювання даних систем, що дозволило отримати нові варіанти їх структурно-компоновальних рішень.

Практичне значення роботи. Практичне значення одержаних результатів полягає в отриманні завдяки запропонованому підходу нових варіантів компоновальних схем накопичувальних систем, які дозволяють підвищити надійність гнучких виробничих комплексів. Використане у роботі матричне моделювання забезпечує математичну точність отриманих результатів та завдяки формалізації даних може бути застосоване для розробки програмного забезпечення з метою автоматизованого синтезу розглядуваних систем.

Апробація результатів дослідження. Результати роботи були представлені на III студентській науково-технічній конференції «Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії», м. Луцьк, 2023 р.

Достовірність теоретичних положень магістерської кваліфікаційної роботи підтверджується повною відповідністю поставленим задачам.

Публікації. Матеріали магістерської роботи опубліковані у:

1. Петриковець С.Р. Проектування накопичувальних систем у складі гнучких виробничих комплексів // Тези III студентської науково-технічної конференції факультету транспорту та механічної інженерії «Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії». Луцьк: ЛНТУ, 2023. С. 28-29.

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг роботи – 90 сторінок, в тому числі – 10 рисунків, 3 таблиці, список використаних джерел з 38 найменувань та 3 додатки на 5 сторінках. Обсяг основного тексту магістерської роботи – 71 сторінка.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТРУКТУРНО-КОМПОНЕНТНОГО СКЛАДУ АВТОМАТИЗОВАНИХ ТРАНСПОРТНО-НАКОПИЧУВАЛЬНИХ СИСТЕМ У СКЛАДІ ГНУЧКИХ ВИРОБНИЧИХ КОМПЛЕКСІВ

1.1. Огляд існуючих автоматизованих транспортно-накопичувальних систем

Гнучкий виробничий комплекс (ГВК) – це сукупність технологічного обладнання, оснащеного засобами і системами, що забезпечують його функціонування в автоматичному режимі та яке може бути переналагоджене в автоматизованому режимі на виробництво нових виробів у межах заданої номенклатури.

Автоматизована транспортно-накопичувальна система (АТНС) – це система взаємопов'язаних транспортних і складських пристроїв для укладання, зберігання, тимчасового накопичення, розвантаження та доставки предметів праці, технологічного оснащення до місця призначення [1-3].

Аналіз ролі АТНС у формуванні ГВК показує, що його слід розглядати у трьох аспектах: організаційному, структурному та функціональному.

Організаційний аспект характеризується потужністю вантажопотоку, що входить на підприємство, а також вирішенням задач щодо його оптимального розподілу. Якісне вирішення організаційного аспекту забезпечує скорочення обсягу вантажообігу підприємства, кількості транспортних засобів, тривалості виробничого циклу і, як наслідок, зниження капітальних вкладень і суми витрат на випуск продукції.

Структурний аспект проявляється під час реалізації міжцехового, внутрішньоцехового, дільничного, міжопераційного та внутрішньоопераційного переміщення предметів праці та штучних вантажів.

Функціональний аспект визначається важливістю АТНС у контексті реалізації основних принципів, що лежать в основі ГВК: автоматизації, гнучкості, інтеграції та модульності [1].

Основні функції, які виконує АТНС [2, 3]:

1) накопичення виробів: заготовок, напівфабрикатів, готових деталей, інструментів, пристроїв тощо;

2) транспортування виробів: до технологічного обладнання та на позиції завантаження і розвантаження деталей, а також відпрацьованого інструменту, змінного технологічного оснащення від верстатів.

Відмінність ГВК від дільниці верстатів з ЧПК з автономним режимом функціонування полягає лише у ступені автоматизації допоміжних операцій: завантаження, транспортування, складування. Основною метою створення ГВК є забезпечення високого завантаження верстатів з ЧПК у порівнянні з їх індивідуальним використанням [4-8].

Саме рівень і характер автоматизації ручних операцій є відмінністю різних варіантів транспортно-накопичувальних систем.

Накопичення в автоматизованому складі у складі АТНС великої кількості заготовок, інструментів, пристроїв та інших засобів, необхідних для виробництва виробів, створює сприятливі умови для безперервного функціонування ГВК протягом однієї і більше змін із залученням невеликої кількості людей, або без їх участі [9].

Наявність спеціальної системи управління АТНС, що включає керований обчислювальний комплекс, забезпечує вибір найбільш ефективного маршруту транспортування виробів між робочими позиціями всередині системи залежно від поточної виробничої ситуації. Постачання оброблюваних деталей до верстатів може виконуватися у будь-якій послідовності, тобто має місце гнучка «маршрутизація» матеріальних потоків усередині ГВК.

ГВК повинен швидко переналагоджуватися при переході до обробки інших виробів. Тому традиційні транспортно-накопичувальні системи, що зазвичай застосовуються в автоматичних лініях, не підходять для ГВК. Структурно-

компонувальні схеми транспортно-накопичувальної системи у ГВК повинні передбачати виконання налагоджувальних та підготовчих робіт при переході до виготовлення інших виробів. Цього можна досягти за рахунок пошуку та реалізації компонувань, що дозволяють здійснювати автоматичну зміну інструментів, заготовок та їх транспортування [10].

Мінімальний рівень автоматизації зводиться до автоматичного складування виробів, транспортування їх від складу до верстатів і назад, завантаження в робочі зони верстатів та відвантаження після обробки. Інші процеси, такі як проміжне перевантаження зі складу на транспортні засоби і назад, доставка інструменту та його повернення, обмін пристроями, видалення стружки та ін. виконуються механізовано з безпосередньою участю людини [8, 9].

У деяких ГВК максимально автоматизовані всі транспортно-накопичувальні операції, в тому числі заміна інструментів у магазинах верстатів [11]. Проте, автоматизація низки процесів або зіштовхується зі значними технічними труднощами, або виявляється економічно недоцільною. Тож при створенні ГВК завдання автоматизації транспортно-накопичувальних функцій вирішують із врахуванням доцільності організації окремих робочих місць із залученням ручної праці. До таких операцій відносяться, наприклад, перевантаження деталей з накопичувальної тари на позиції видачі зі складу або завантаження безпосередньо у верстат, заміна комплекту інструментів на верстатах [9].

Для автоматизації потоку виробів між двома і більше верстатами застосовують транспортні пристрої. Група верстатів, пов'язаних між собою транспортно-завантажувальними пристроями, являє собою виробничу систему. Основними особливостями виробничої системи повинні бути її модульна конструкція та гнучкість при виготовленні деталей різних геометричних форм, а також змінна технологічна послідовність [12-14].

Проектування транспортно-складських систем ГВК та оптимальне управління міжопераційним транспортуванням об'єктів виробництва є

складними завданнями, якість вирішення якого впливає на технологічні, організаційні та техніко-економічні показники ГВК [3].

Транспортна система, пов'язуючи між собою технологічне обладнання ГВК (верстати, накопичувачі та контрольні позиції), повинна забезпечувати своєчасну подачу заготовок до верстатів та відведення від верстатів готових деталей. Разом з тим, вона не повинна перевантажувати робочий простір і заважати обслуговуванню та налагодженню верстата, зміні інструменту тощо.

Таким чином, важливим є завдання пошуку оптимального варіанту транспортування інструменту від складу до верстата, а також автоматизації операцій з підготовки комплектів інструментів для відповідної деталі [2, 12].

Щодо надійності операцій переміщення, то вона пов'язана з підготовкою відповідних керуючих команд; однаковістю та стабільністю заготовок (деталей) та їх геометричної форми; стійкістю різальних інструментів; можливістю переналагодження оснастки та стабільними режимами різання [15-18].

Створення АТНС на базі уніфікованих агрегатних вузлів здатне забезпечити зниження собівартості, скорочення термінів їх проектування, виготовлення та впровадження у виробництво.

1.2. Функціональні компоненти автоматизованих транспортно-накопичувальних систем

До функціональних компонентів АТНС відносять: автоматизовані склади, стелажі, крани та штабелери, перевантажувальні пристрої, інші транспортувальні пристрої, установчі плити [1, 12, 19-22].

Автоматизовані склади виконують роль системоутворюючих чинників при розробці ГВК і істотно впливають на формування матеріальних потоків у системі, займану виробничу площу, протяжність транспортних шляхів, гнучкість та, як наслідок, на ефективність функціонування системи загалом [19-21].

Автоматизовані склади у складі ГВК призначені для реалізації двох основних функцій – оперативної та накопичувальної. Оперативна функція

полягає у прийманні, зберіганні та видачі на внутрішні транспортувальні пристрої вантажів (заготовок, напівфабрикатів, деталей), а також комплектів технологічного оснащення, підготовленого для виконання поточних операцій. Накопичувальна функція полягає у зберіганні додаткових запасів заготовок або готових деталей. На складі також зберігається порожня тара, інструменти, установчі плити, інвентар тощо [20].

Автоматизовані стелажні склади бувають з одним однорядним стелажем і двома однорядними стелажми. На рис. 1.1 наведено схему автоматичного складу з одним однорядним стелажем. Він містить стелаж 1, кран-штабелер 2 і перевантажувальний пристрій 3 [1].

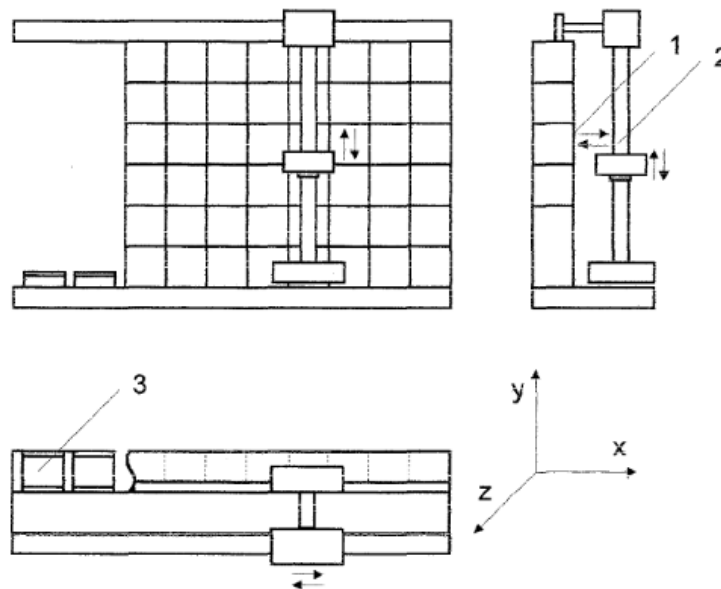


Рисунок 1.1 Автоматичний склад з однорядним стелажем: 1 – стелаж однорядний; 2 – штабелер; 3 – перевантажувальний пристрій

Стелажі обслуговуються краном-штабелером, який вкладає в комірки стелажу поданий на перевантажувальний пристрій вантаж (установча плита із заготовкою, інструмент та ін.) або, залежно від завдання, забирає його з комірки стелажу і передає на перевантажувальний пристрій, звідки вантаж за допомогою транспортуючого засобу подається на верстат. Однорядний стелажний накопичувач дозволяє встановлювати вантаж з будь-якої сторони стелажу. Такі склади розміщують вздовж лінії верстатів ГВК [21].

Отож, основними компонентами автоматизованого складу є стелаж, кран-штабелер, транспортно-складська тара (піддони, установчі плити) та пристрої для передачі вантажу зі штабелера на стелаж, зі стелажу на транспортно-накопичувальну систему ГВК або у зворотному напрямку.

Стелажні конструкції відносять до накопичувального обладнання ГВК. Вибір типу та параметрів стелажних конструкцій визначається відповідно до їх конкретного переліку вимог. Ці вимоги, як правило, обумовлені особливостями та специфікою створюваних ГВК. Комірки стелажа повинні забезпечувати можливість встановлення, орієнтування та вилучення однієї одиниці об'єкта за рахунок його захоплення штабелером. Приймальні позиції пристроїв для перевантаження повинні бути встановлені на висоті, зручній для транспортування. Комірки стелажів повинні вмещувати в себе об'єкти стандартних розмірів [1, 19].

До штабелювального обладнання, що використовуються для обслуговування складів зі стелажними накопичувачами відносять програмно-керовані крани-штабелери і мостові крани-штабелери [20].

Штабелери завантажують (подають) піддони із заготовками або установчі плити із закріпленими на них деталями в комірки накопичувача, а також видають їх залежно від команди, отриманої від системи керування. Штабелер забезпечений кареткою з двостороннім захопленням, за допомогою якої об'єкт можливо вкласти у комірку стелажа. В конструкції штабелера передбачено давачі, що передають інформацію системі керування.

Продуктивність і надійність роботи транспортно-накопичувальної системи ГВК багато в чому залежить від обраних перевантажувальних систем, які забезпечують взаємодію складської та транспортної систем

Перевантажувальні пристрої призначені для: вивантаження вантажів з транспортуючих засобів всередині ГВК і передачі їх у робочу зону крана-штабелера; передачі вантажів із робочої зони крана-штабелера на транспортуючі пристрої; накопичення вантажів після їх приймання з транспортуючих пристроїв

або перед їх завантаженням туди; вкладання заготовок, деталей, виробів в транспортно-складську систему і установчі плити.

Для виконання операцій приймання і передачі вантажів використовуються різні пристрої: поворотні дво- чи багатопозиційні столи точного позиціонування, встановлені у місцях прийому та видачі вантажу зі складу; вмонтовані у стелажі роликові та ланцюгові конвеєри для транспортування вантажу із робочої зони крана-штабелера у зону приймання та видачі складу; консольні столи для встановлення на них установчих плит (піддонів); автоматичні візки, роботи та маніпулятори, штовхачі та підйомники [1, 21].

Перевантажувальні пристрої для штучних вантажів належать до нестандартизованого обладнання. При виборі такого пристрою слід враховувати характеристики виготовлюваних деталей, тип транспортного на накопичувального обладнання, особливості організації потоків виробів і т.д.

Щодо автоматичних транспортуючих пристроїв, то у транспортно-накопичувальних системах ГВК застосовують безрейкові автоматичні транспортні візки. Вони транспортують заготовки зі складу до верстатів та виконують міжопераційні переміщення виробів. Інформацію про маршрут переміщення візок отримує за допомогою оптоелектронної системи обміну інформацією без електричного контакту. Керування маршрутом руху здійснюється з допомогою програми керування відповідно до послідовності обробки деталі на верстатах.

Для автоматизації перевантаження візки забезпечуються різними завантажувально-розвантажувальними пристроями: промисловими роботами, секціями приводного роликового транспортера, підйомними платформами тощо. Переміщення візків по транспортних шляхах здійснюється за допомогою індукційного та фотоелектричного пристроїв наведення.

Дані візки характеризуються рядом переваг: мають підвищену гнучкість і мобільність транспортних ліній; маршрути руху візків можна змінювати; потужність потоку вантажів є регульованим за рахунок зміни кількості

залучених візків; вони володіють високою маневреністю; транспортні шляхи візків можна застосовувати для переміщення інших транспортуючих засобів.

Також має місце використання підлогових транспортуючих засобів. Вони мають порівняно незначні розміри та дозволяють зручно переадресувати матеріальні потоки, швидко створювати нові транспортні шляхи та стежити за маршрутом; їх можна оснащувати пристроями для вантажно-розвантажувальних операцій [1].

Широко розповсюджена практика створення та застосування промислових роботів свідчить, що вони є ефективним засобом автоматизації виробництва. Насамперед, вони дозволяють звільнити працівників від монотонної, травмонебезпечної та часто загалом фізично важкої і шкідливої для здоров'я праці [6, 20].

Розглянемо, наприклад, ГВК з централізованою системою накопичення, що включає в себе стелаж-накопичувач. У такому випадку можливо отримати чотири варіанти компоновань з різними транспортними системами (рис. 1. 2).

У першому варіанті ГВК (рис. 1.2, *a*) в якості транспортного пристрою використовується кран-штабелер 4, який не тільки виконує функції складування установчих плит з заготовками, а й розподіляє їх між верстатами. При цьому стелаж-накопичувач 3 слід розташовувати вздовж ряду верстатів. Для безаварійної роботи застосовують, як правило, один кран-штабелер, траса (ізолюваний електричний кабель, розміщений глибоко під підлогою) якого прокладена з боку верстатів. Така транспортна система економічна та надійна. Вона безпосередньо стикує стелаж-накопичувач із технологічним обладнанням.

Якщо продуктивність крана-штабелера недостатня для виконання всього обсягу перевантажувальних робіт, то його використовують тільки для складування установчих плит, а для їх транспортування до технологічного обладнання застосовують рейкові візки, безрейкові візки або роликовий конвеєр.

При цьому стелаж-накопичувач може бути розміщений як вздовж, та і впоперек виробничої лінії. Передача установчих плит від крана-штабелера до

іншого транспортного пристрою і назад здійснюється за допомогою позиції 5 приймання та передачі.

У другому варіанті ГВК (рис. 1.2, б) обладнання обслуговується рейковим візком. Він може переміщуватися з великою швидкістю вздовж обладнання, розташованого в лінію. Його надійна робота можлива тільки у випадку, якщо на ділянці є тільки один візок.

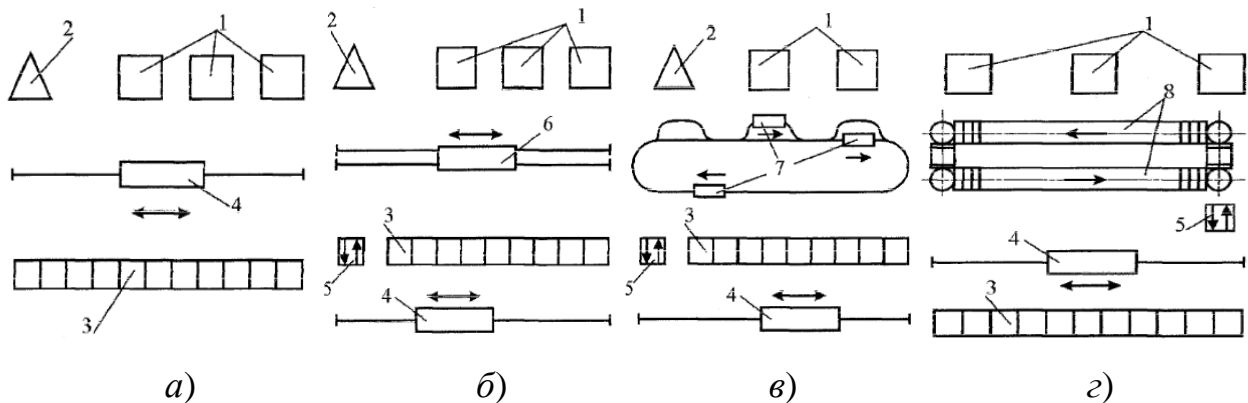


Рисунок 1.2 Застосування різних типів транспортних пристроїв у ГВК:
a – кран-штабелер; *б* – рейковий візок та кран-штабелер; *в* – безрейкові візки та кран-штабелер; *г* – роликівий конвеєр і кран-штабелер;
 1 – верстати; 2 – позиція контролю; 3 – стелаж-накопичувач; 4 – кран-штабелер;
 5 – позиція приймання і передачі установчих плит; 6 – рейковий візок;
 7 – безрейкові візки; 8 – роликівий конвеєр

У третьому варіанті ГВК (рис. 1.2, в) може бути кілька безрейкових візків. Найчастіше вони мають індукційне керування. Основною перевагою такого типу транспортуючих пристроїв є гнучкість. Його можна використовувати при створенні ГВК з різними транспортно-технологічними маршрутами (при цьому розташування верстатів у лінію не є обов'язково умовою).

У четвертому варіанті ГВК (рис. 1.2, г) застосовується роликівий конвеєр. Такі системи мають велику продуктивність, що досягається одночасним транспортуванням декількох установчих плит [6, 15].

Такі деталі як корпуси, важелі, каретки під час обробки на багатоцільових верстатах в ГВК зазвичай встановлюються і закріплюються або безпосередньо на установчій плиті, або в пристрої, встановленому на установчій плиті.

Установча плита разом з оброблюваною деталлю переміщається від верстата до верстата, не змінюючи початкового закріплення. На установчих плитах є спеціальні поверхні для базування, фіксації та затиску на робочому столі верстата та на обладнанні транспортно-завантажувальної системи. Установча плита є плитою з точно обробленою площиною. Для кріплення отворів оброблюваних деталей на плиті виконані Т-тодібні пази або сітка різьбових і фіксуємих отворів, що чергуються. Оброблювана деталь або пристосування з оброблюваною деталлю встановлюється на поверхню плити і фіксується. Встановлення і закріплення оброблюваних деталей на установчу плиту, а також звільнення та зняття деталі з неї виконується або вручну або за допомогою спеціального пристрою.

При обробці деталей на багатоцільових верстатах установчим плитам присвоюються номери. На їх бічних поверхнях встановлюються кодові гребінки з номерами. За допомогою кодового гребінця при передачі плити на робочий стіл верстата автоматично викликається відповідна програма обробки [14].

1.3. Основні види структурно-компонувальних схем автоматизованих транспортно-накопичувальних систем

Серед відомих структур, які реалізують потоки деталей можна виділити такі основні види як автономні, централізовані та комбіновані (дворівневі) (рис. 1.3) [18].

В умовах автономних (децентралізованих) потоків деталей кожен верстат з ЧПК має індивідуальний накопичувач (магазин) деталей (рис 1.3, а). Таке поєднання верстата з ЧПК із накопичувачем називають гнучким виробничим модулем (ГВМ) [20].

Передача заготовки з накопичувача на стіл верстата і прийом у вільну позицію готової деталі виконується автоматично на вимогу верстата. Простоювання верстата в очікуванні зміни деталі завдяки безперебійній завантаженості накопичувача відсутні. Це дозволяє ГВМ функціонувати в

автономному режимі (без участі людини, або з обмеженою її участю) протягом періоду, поки не будуть оброблені всі деталі, розміщені в накопичувачі. ГВМ функціонує в автономному режимі незалежно від стану інших ГВМ на дільниці верстатів з ЧПК.

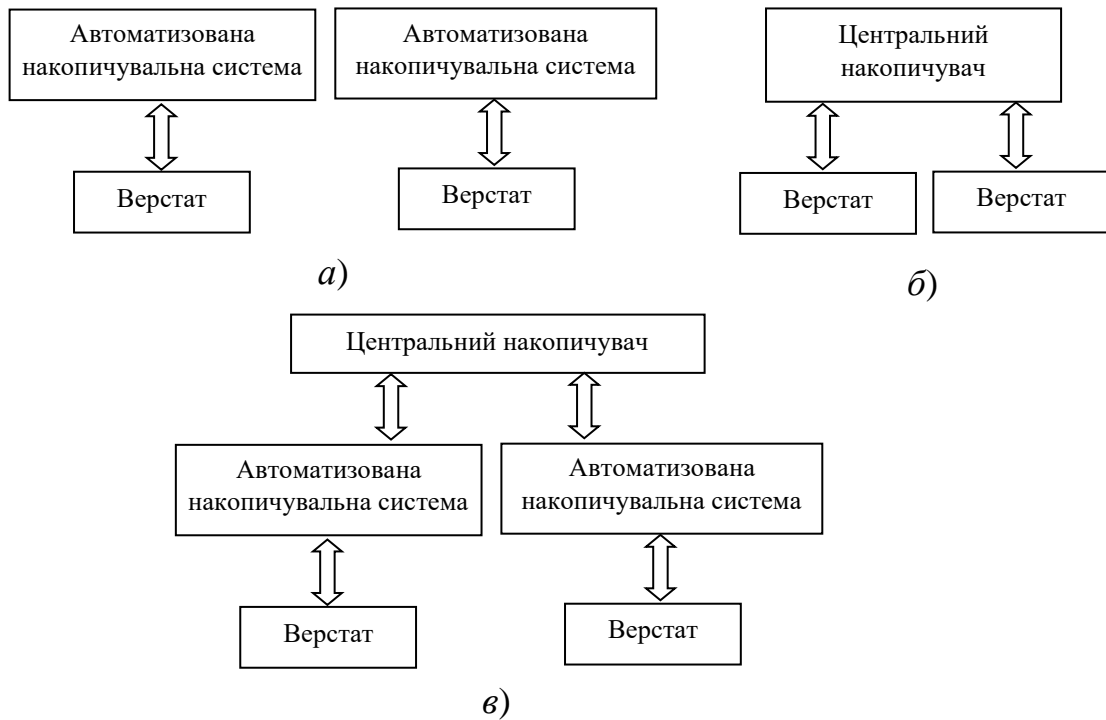


Рисунок 1.3 Структури потоків деталей: *а* – автономна; *б* – централізована; *в* – комбінована

Централізована підсистема, що реалізує потоки деталей (рис. 1.3, б), складається з центрального складу, що обслуговується за допомогою штабелера, та верстатів з ЧПУ у складі ГВК. Наявність центрального автоматичного складу дозволяє в автоматичному режимі передавати комплекти «установча плита – деталь» від одного верстата до іншого для продовження обробки деталі і використовувати плити, що звільнилися, для монтажу на них пристосувань для обробки деталей іншого найменування. В результаті зменшуються матеріальні витрати на технологічне оснащення, створюються сприятливі умови реалізації функціонування верстатів у складі ГВК у стані взаємодоповнення. Останнє тягне за собою скорочення циклу виготовлення деталей та підвищення ефективності використання оборотних коштів.

Підсистеми, що реалізують потоки деталей з централізованою структурою, мають наступні недоліки: при виході з ладу центрального автоматичного складу вся технологічна система припиняє функціонування; при нарощуванні пропускної спроможності (потужності) ГВК виникають труднощі, пов'язані з нарощуванням місткості складу і введенням додаткових верстатів в систему в цілому.

Основу дворівневої АТНС, що реалізує матеріальний потік деталей, складають індивідуальні (автономні) навколоверстатні накопичувачі та центральний автоматичний склад для приймання, зберігання та видачі деталей (рис. 1.3, в). У процесі функціонування ГВК верстати через центральний автоматичний склад можуть обмінюватися комплектами «установча плита – деталь». Це дозволяє здійснювати обробку деталей на верстатах в режимі взаємодоповнення до повного завершення їх обробки. При цьому скорочується цикл виготовлення деталей і кількість використовуваних комплектів технологічного оснащення, тобто зменшуються матеріальні витрати на їх створення, підвищується коефіцієнт використання верстатів. У разі виходу з ладу центрального складу верстати продовжуватимуть працювати доти, доки всі деталі в накопичувачі не будуть оброблені.

До недоліків дворівневих АТНС слід віднести їх складність, нижчу надійність, ніж попередніх двох видів АТНС, велику виробничу площу та збільшення витрат на їх виготовлення та експлуатацію [19-21].

1.4. Оцінка ефективності структурно-компонувальних схем автоматизованих транспортно-накопичувальних систем

Структура і компонування АТНС залежать від необхідної продуктивності технологічного процесу, конструкції і заданої якості виробів, а також від тривалості монтажу окремих деталей, які забезпечують автоматизацію системи [1, 22].

Обмеження, пов'язані зі скороченням тривалості повороту столу від однієї позиції до іншої та збільшенням кількості позицій, виникають внаслідок зростання інерційного навантаження, яке змінюється прямопропорційно квадрату радіуса поворотного столу і вазі його рухомих частин, виробів та їх пристосувань. Для транспортування виробів значної довжини доцільно використовувати барабани, що мають такі ж показники продуктивності і точності, як і транспортні пристрої типу поворотних столів. Збільшення кількості позицій призводить до зростання інерційних навантажень, що зменшують термін служби обладнання та його точність [4, 8].

Верстати, що функціонують у складі ГВК, мають, як правило, двопозиційні приймальні пристрої, які в процесі обробки однієї деталі (групи деталей) забезпечують завчасну доставку наступної деталі. У загальному випадку, на верстатах можуть оброблятися деталі і без установчих плит, тоді позиція складання-розбирання плит відсутня, а деталі до верстатів (на двопозиційні приймальні пристрої) постачаються в тарі або іншому вантажоносії (наприклад, на піддоні). Однак і при такій організації процесу не завжди вдається виключити простоювання, оскільки внаслідок виникнення черги на транспортний пристрій подача до верстата наступного вантажоносія може затриматися на час, що перевищує тривалість обробки деталей з попереднього вантажоносія;

$$t_{шт} m_i < t_{оч.i+1} + t_{об},$$

де $t_{шт}$ – тривалість обробки однієї деталі;

m – кількість деталей у тарі (вантажоносії);

$t_{оч}$ – тривалість очікування обслуговування верстата транспортним пристроєм;

$t_{об}$ – тривалість обслуговування (доставки вантажоносія);

i – номер вантажоносія [1].

При обробці деталей на установчих плитах до штучного часу обробки партії деталей додаються показники, що відображають очікування транспортування на стенд складання-розбирання установчих плит і назад, час зміни деталей на установчих плитах і т. п. Імовірність простоя верстатів збільшується в

результаті можливих несправностей транспортного пристрою та втрат часу, витраченого на їх усунення. Зменшити кількість простоювань верстатів внаслідок затримки в їх обслуговуванні транспортним пристроєм можна шляхом введення раціональних пріоритетів їх обслуговування, наприклад, мінімального інтервалу забезпеченості I_{3min} . Для цього для кожного верстата обчислюється поточний інтервал забезпеченості:

$$I_{3k} = \sum_{n=1}^N (m_n - P_n) t_{шт\ n},$$

де k – номер верстата;

n – номер позиції приймального пристрою;

m_n – кількість деталей (у тарі), доставлених на n -у позицію приймального пристрою;

P_n – кількість оброблених деталей, встановлених на n -й позиції приймального пристрою;

$t_{шт.n}$ – тривалість обробки n -ї деталі;

N – кількість позицій приймального пристрою, встановленого у k -му верстаті [19].

Раціональне розміщення обладнання на виробничій ділянці дозволяє знизити вартість та скоротити логістичні операції. Це завдання вирішується на етапі розробки проєктного рішення нового виробництва, або реконструкції існуючого цеху чи ділянки. Оптимізація дозволяє скоротити кількість робітників, залучених до транспортування виробів і засобів виробництва, кількість транспортних засобів, а також запаси напівфабрикатів, створюваних на робочих місцях. Цього можливо досягти за рахунок скорочення тривалості роботи, виконуваної працівниками, або за допомогою більш оперативного обслуговування робочих місць транспортними засобами, які вивільнюються. Крім того, підвищується стабільність роботи виробничої системи за рахунок зниження простоювань обладнання. Частина таких простоювань виникає внаслідок невчасної доставки операційних запасів напівфабрикатів до робочих місць, що є наслідком нерівномірності вантажопотоків під час роботи транспортної системи [6, 15].

Економічна ефективність автоматизованих пристроїв визначається довговічністю обладнання і зменшенням його простоювань, тож одним з важливих завдань механоскладального виробництва є підвищення автономності основних і допоміжних процесів, цілеспрямоване розширення зони багатOVERSTATного обслуговування [9].

Отже, зведення людської праці до мінімуму забезпечується трьома видами заходів: механічною обробкою із застосуванням верстатів з ЧПУ; завантаження-вивантаження деталей промисловим роботом; контроль за несправностями у роботі устаткування [13, 14, 22].

1.5. Висновки до 1-го розділу

1. Для сучасних виробничих систем, в тому числі гнучких виробничих комплексів, характерні такі тенденції розвитку як економія ресурсів та виробничої площі; підвищення продуктивності та надійності обладнання; скорочення виробничого циклу виготовлення продукції; дотримання раціонального балансу між витратами та ефективністю.

2. Для цілеспрямованого і ефективного пошуку оптимальних проєктних рішень автоматизованих накопичувальних систем необхідно розробити засади, які будуть як відповідати сучасним тенденціям розвитку гнучкого виробництва, так і відображатимуть системну організацію накопичувальних систем. Розроблений підхід має бути спрямований на пошук нових варіантів будови накопичувальних систем.

3. Для вирішення поставлених завдань планується використати матрично-модельний підхід до моделювання накопичувальних систем та розробити послідовність синтезу нових варіантів структурно-компонувальних рішень накопичувальних систем.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ НАКОПИЧУВАЛЬНИХ СИСТЕМ

2.1. Засади матричного моделювання автоматизованих накопичувальних систем

У складних технологічних системах типу ГВК матеріальні потоки (заготовки, напівфабрикати, деталі, інструмент і та ін.) забезпечуються автоматизованими накопичувальними системами (АНС). Останні виконують функції приймання, зберігання та видачі виробів, забезпечуючи безперервне функціонування ГВК, в тому числі із незначним залучення ручної праці. Затверджений на стадії проектування структурно-компонувальний склад АНС чинить суттєвий вплив на формування проєктних рішень ГВК в цілому і значною мірою визначають ефективність їх функціонування [1, 20].

Розвитку АНС можливо досягти з допомогою відповідних математичних моделей, що відображають структурну і функціональну організацію АНС і демонструють їх основні системні характеристики – елементний склад і розподіл функцій між ними, ієрархічні рівні системи, місткість накопичувача (кількість комірок для зберігання виробів), структуру розміщення комірок, орієнтацію несучої поверхні накопичувача у просторі, види координатних рухів органів пошуку заданої адреси комірки та переміщення її в зону прийому та видачі виробу.

Такі моделі повинні імітувати поведінку АНС як дискретної системи, бути зручними для опису системних характеристик, котрі вони відображають. Також вони мають бути орієнтовані на використання комп'ютерних засобів у процесі моделювання і служити в подальшому підґрунтям для автоматизованого синтезу накопичувальних систем.

Переліченим вище вимогам достатньою мірою відповідають математичні моделі, побудовані на основі принципів матричного моделювання [23, 24]. Такі

моделі – це сукупність матриць, пов’язаних між собою просторовими і часовими зв’язками, що відображають як структурну, так і функціональну організацію накопичувальної системи. Моделювання поведінки АНС у даному випадку зводиться до виконання операцій над матрицями моделі згідно правил матричного аналізу [25].

В якості компонентів математичних моделей АНС задамо матриці H , S , C , P та оператор T .

Матриця H виконує роль концептуальної моделі власне накопичувача виробів та характеризує його стан у будь-який момент часу. Число елементів матриці H визначає місткість (кількість комірок для зберігання виробів) накопичувача. Вона містить інформацію про конструктивно-компонувальні характеристики накопичувача, в тому числі про орієнтацію в просторі (горизонтальне або вертикальне) несучої поверхні накопичувача.

Матрицею S позначається поточний стан автооператора в процесі функціонування накопичувальної системи.

Циклічна матриця C і наддіагональна матриця P є концептуальними приводами, що забезпечують покрокове (дискретне) переміщення пристрою пошуку заданої адреси комірки накопичувача і переміщення його в зону накопичувальної системи. В якості пристрою пошуку адреси комірки виступає або накопичувач, або автооператор.

Оператор T призначений для транспортування матриць C і P , виконуючи функції концептуального пристрою реверсу, тобто змінює напрямок руху пристрою пошуку адреси комірки (накопичувача, автооператора) на протилежний.

Множення матриць H і S зліва або справа на матриці C і P за правилами, що узгоджуються з правилами матричного аналізу, імітує направлене (кероване) адресне (координатне) переміщення пристрою пошуку адреси комірки в процесі функціонування накопичувальної системи. Кожна конкретна матрична модель задає цілком визначену структурну та функціональну організацію АНС. Правила побудови матричних моделей розглянемо нижче.

2.2. Матричне моделювання автоматизованих накопичувальних систем з динамічним накопичувачем

2.2.1 Побудова моделей автоматизованих накопичувальних систем із циклічним накопичувачем.

На рис. 2.1, *a* представлена накопичувальна система, яка складається з накопичувача 1, виконаного у вигляді диска і автооператора 2.

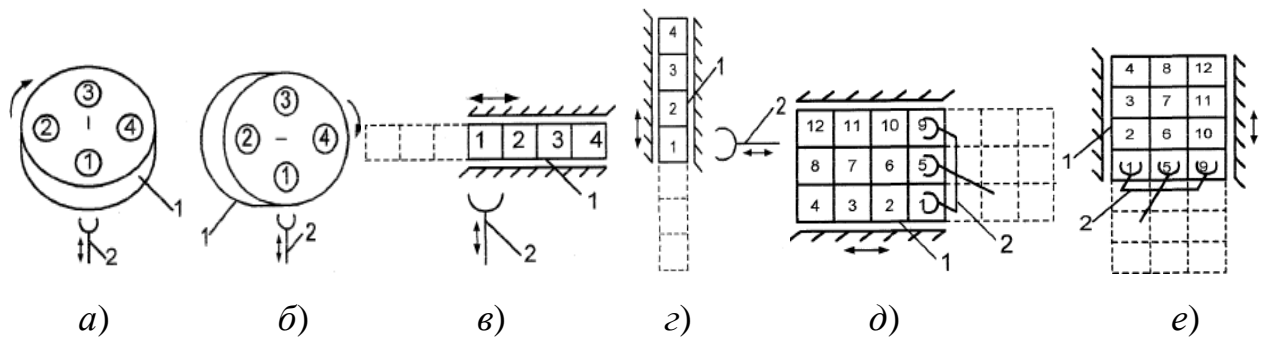


Рисунок 2.1 Схеми АНС з однокоординатним рухом при пошуку адреси комірки: *a, б* – дискові з вертикальною та горизонтальною віссю обертання відповідно; *в, г* – лінійні однорядні з вертикальною та горизонтальною віссю обертання відповідно; *д, е* – лінійні багаторядні з вертикальною та горизонтальною віссю обертання відповідно; 1 – нереверсивний накопичувач, 2 – автооператор приймання і видачі виробу

Накопичувач обертається навколо вертикальної осі. Комірки з виробами 1÷4 розташовані на периферії торцевої поверхні накопичувача, місткість (кількість комірок) якого $q = 4$. Під час функціонування накопичувальної системи переміщення необхідної комірки в зону приймання і видачі виробу (зону розташування автооператора 2 досягається за рахунок повороту накопичувача 1 за годинниковою стрілкою на потрібне число кроків. У даному випадку функції пошуку адреси комірки виконує нереверсивний накопичувач 1, а автооператор 2 виконує функцію приймання та видачі виробів (заготовки, інструменту, деталі).

Початковий стан накопичувача (рис. 2.1, *a*) визначається $(1 \times q)$ -матрицею (матрицею-рядком):

$$H_1^1 = \parallel 1 \ 2 \ 3 \ 4 \parallel$$

Елементом $1 \div 4$ матриці відповідають номери комірок накопичувача. У початковому стані накопичувача кожній комірниці відповідає визначена адреса (координати) його розташування. Ці адреси представлені у вигляді рядка чисел $1 \div 4$, розташованого над матрицею H_1^1 .

Повороту накопичувача на один крок за годинниковою стрілкою відповідає множення справа матриці початкового стану H_1^1 на циклічну матрицю C :

$$H_1^1 C = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 1 & 2 & 3 \end{bmatrix} = H_1^2.$$

Для повороту на два кроки матрицю H_1^1 необхідно помножити двічі на циклічну матрицю C :

$$H_1^1 C^2 = (H_1^1 C) C = H_1^2 C = \begin{bmatrix} 4 & 1 & 2 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 4 & 1 & 2 \end{bmatrix} = H_1^3.$$

При множенні матриці H_1^1 справа k разів на C , отримаємо матричну модель накопичувальної системи з нереверсивним накопичувачем:

$$H_1^1 C^k = H^{k+1} \quad (2.1)$$

При $k=q$ накопичувач повертається в початкове положення.

$$H_1^1 C^q = H^{q+1} = H_1^1$$

В деяких випадках, з метою зменшення тривалості пошуку заданої адреси комірки накопичувач має можливість виконувати поворот як за, так і проти годинникової стрілки. Матрична модель системи з реверсивним накопичувачем має вигляд:

$$H_1^k (C^{k1} \oplus C^{k2}) = H_1^k C^{k1} \oplus H_1^k C^{k2} \quad (2.2)$$

де H_1^k – поточний стан накопичувача, $k \in \{1, 2, \dots, q - 1\}$;

C' – транспонована циклічна матриця, $C' = CT$;

k_1, k_2 – кількість покрових поворотів накопичувача за або проти годинникової стрілки відповідно;

\oplus – операція виключної диз'юнкції [26].

Символ \oplus тут вказує на те, що матриця поточного стану H_1^k множиться справа або k_1 разів на циклічну матрицю C , або k_2 разів на транспоновану матрицю C' .

Наявність реверсивного накопичувача в складі АНС дозволяє вибрати найкоротший шлях його переміщення при переході з i -го стану в j -й стан (i, j – номери комірок, що знаходяться в різні моменти часу в зоні приймання та видачі виробу). Правила вибору найкоротшого шляху переміщення та напрямки повороту накопичувача визначаються співвідношенням:

$$l_{ij} = \begin{cases} j - i, \text{ якщо } i < j \text{ та } j - i \leq \frac{q}{2}, & \text{поворот за годинниковою} \\ & \text{стрілкою;} \\ q - (j - i), \text{ якщо } i < j \text{ та } j - i > \frac{q}{2}, & \text{поворот проти годинникової} \\ & \text{стрілки;} \\ i - j, \text{ якщо } i > j \text{ та } i - j \leq \frac{q}{2}, & \text{поворот проти годинникової} \\ & \text{стрілки;} \\ q - (i - j), \text{ якщо } i > j \text{ та } i - j > \frac{q}{2}, & \text{поворот за годинниковою} \\ & \text{стрілкою.} \end{cases}$$

Під час повороту за годинниковою стрілкою на k_1 кроків накопичувач із поточного стану H^k переходить в стан $H^k C^{k_1} = H^{k+k_1}$, $k \in \{1, 2, \dots, q - 1\}$, $1 < k + k_1 \leq q$.

Під час повороту проти годинникової стрілки на k_2 кроків його новий стан визначається таким чином:

$$k > k_2 \Rightarrow H^k C^{k_2} = H^{k-k_2}; k_2 = q \Rightarrow H^k C^{k_2} = H^k.$$

Під час обертання накопичувача навколо горизонтальної осі та розташування комірок з виробами у вертикальній площині (рис. 2.1, б)

початковий стан накопичувача задається $(q \times 1)$ -матрицею (матрицею-стовпцем) H_2^1 :

$$H_2^1 = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} \left\| \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} \right\|.$$

Елементом матриці H_2^1 відповідають номери комірок, а числам ліворуч від матриці – номери адрес перебування комірок у початковий момент часу.

Матрична модель АНС з реверсивним накопичувачем, виконаним у вигляді диска з горизонтальною віссю обертання матиме вигляд:

$$(C^{k1} \oplus C^{k2})H^k = C^{k1}H^k \oplus C^{k2}H^k. \quad (2.3)$$

Правила вибору найкоротшого шляху переміщення накопичувача залишаються такими самими, як для моделі (2.2). Модель, що визначається співвідношенням (2.3), відрізняється від моделі (2.2) тим, що матриця поточного стану множиться зліва на циклічну матрицю зліва, а не справа, як у випадку моделі (2.2).

2.2.2 Побудова моделей автоматизованих накопичувальних систем з лінійною структурою розташування комірок у накопичувачі.

На рис. 2.1, в представлена накопичувальна система з однорядним розташуванням комірок в накопичувачі 1. Під час функціонування системи накопичувач здійснює лінійні зворотно-поступальні рухи в горизонтальній площині, переміщуючи комірку з заданою адресою в зону розташування автооператора 2 (зону приймання та видачі виробу). В даному випадку накопичувач 1 працює в режимі «човника» і може здійснювати рухи в межах свого «розмаху», величина якого становить $2q - 1$ (q – кількість комірок у накопичувачі).

Робота накопичувача в «човниковому» режимі призводить до збільшення розміру накопичувальної системи майже вдвічі. Це зумовлено специфікою функціональної організації лінійної накопичувальної системи.

Початковий стан накопичувача 1 (див. рис. 2.1, в) визначається матрицею H_3^1 . При $q = 4$ ця матриця матиме вигляд:

$$H_3^1 = \|\|0\ 0\ 0\ 1\ 2\ 3\ 4\|\|.$$

Ненульові елементи $1 \div 4$ матриці відповідають номерам комірок однорядного лінійного накопичувача. Інші $(q-1)$ елементів матриці – нульові. Вони виконують роль «фіктивних комірок».

У початковому стані H_3^1 накопичувач займає крайнє праве положення. При цьому комірка під номером 1 знаходиться у зоні автооператора. Переміщення накопичувача вліво на один крок досягається множенням справа матриці H_3^1 початкового стану на 1-піддіагональну матрицю P розміром $(2q-1) \times (2q-1)$. При $q = 4$ будемо мати:

$$H_3^1 = \|\|0\ 0\ 0\ 1\ 2\ 3\ 4\|\| \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = \|\|0\ 0\ 1\ 2\ 3\ 4\ 0\|\| = H_3^2.$$

При множенні матриці H_3^1 справа l_1 разів на матрицю P накопичувач переміщується вліво на l_1 кроків: $H_3^1 P^{l_1} = H_3^{l_1+1}$.

Якщо $l_1 = q - 1$, то $H_3^1 P^{l_1} = H_3^{l_1+(q-1)} = H_3^q$.

В останньому випадку накопичувач досягає свого крайнього лівого положення. В такому разі в зону автооператора переміститься комірка під номером 4.

Переміщення накопичувача з крайнього лівого положення вправо на l_2 кроків імітується множенням матриці H_3^q справа l_2 разів на транспоновану матрицю $P' = PT$: $H_3^q P^{l_2} = H_3^{q-1}$, $1 \leq q - l_2 \leq q$.

Матрична модель накопичувальної системи з рухомим горизонтальним однорядним накопичувачем (рис. 2.1, в) матиме вигляд:

$$\begin{cases} H_3^l(P^{l_1} \oplus P^{l_2}) = H_3^l P^{l_1} \oplus H_3^l P^{l_2}; \\ l_1 l_2 \in \{1, 2, \dots, q-1\}; 1 \leq l + l_1 \leq q; 1 \leq l + l_2 \leq q, \end{cases} \quad (2.4)$$

де H_3^l – поточний стан накопичувача, $l \in \{1, 2, \dots, q\}$.

Операція виключної диз'юнкції \oplus вказує на те, що матриця поточного стану множиться справа або l_1 разів матрицю P , або l_2 разів на матрицю $P' = PT$.

Накопичувальна система з лінійним однорядним накопичувачем, який виконує вертикальне переміщення, показана на рис. 2.1, з.

Початкове положення накопичувача задається $((2q-1) \times 1)$ -матрицею H_4^1 :

$$H_4^1 = \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Переміщення накопичувача вниз на один крок імітується множенням зліва матриці H_4^1 один раз на 1-піддіагональну матрицю P : $PH_4^1 = H_4^2$.

При цьому в зону автооператора переміститься комірка під номером 2. Для переміщення накопичувача вниз на l_1 кроків матриця H_4^1 множиться зліва l_1 разів на матрицю P : $P^{l_1} H_4^1 = H_4^{l_1+1}$, $1 \leq l_1 + 1 \leq q - 1$.

При $l_1 + 1 = q$ накопичувач досягає найнижчого положення, яке відображає матриця H_4^q . В цьому стані в зоні автооператора буде перебувати комірка під номером q (в розглядуваному нами випадку (див. рис. 2.1, з) – $q = 4$). При множенні матриці H_4^q зліва l_2 разів на транспоновану матрицю P' накопичувач підніметься вгору на l_2 кроків: $P^{l_2} H_4^q = H_4^{q-l_2}$.

Математичну модель накопичувальної системи з лінійним однорядним накопичувачем, який переміщується у вертикальній площині, опишемо так:

$$\begin{cases} (P^{l_1} \oplus P^{l_2}) H_4^l = P^{l_1} H_4^l \oplus P^{l_2} H_4^l; \\ l_1 l_2 \in \{1, 2, \dots, q-1\}; 1 \leq l + l_1 \leq q; 1 \leq l + l_2 \leq q. \end{cases} \quad (2.5)$$

Аналогічним чином можна побудувати матричні моделі накопичувальних систем з лінійним багаторядним розташуванням комірок, які зображені на рис. 2.1, *д, е*.

Розглянуті вище матричні моделі – це системи, накопичувачі яких у процесі пошуку заданої адреси комірки переміщуються в одновимірній системі координат.

Далі розглянемо накопичувальні системи, в яких накопичувач як орган пошуку адреси заданої комірки та переміщення виробу в зону приймання та видачі рухається у двовимірному просторі.

2.2.3 Побудова моделей автоматизованих накопичувальних систем з накопичувачами, які переміщуються у двовимірному просторі.

На рис. 2.2, *а* представлена накопичувальна система з накопичувачем 1 барабанного типу з вертикальною віссю обертання. Комірки 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 розташовані ярусами на зовнішній циліндричній поверхні барабанного накопичувача. Розміщення комірок на барабані може мати гвинтову структуру. У процесі функціонування барабан обертається навколо своєї вертикальної осі за годинниковою або проти годинникової стрілки і піднімається вгору або опускається вниз, переміщуючи необхідну комірку в зону розташування автооператора 2.

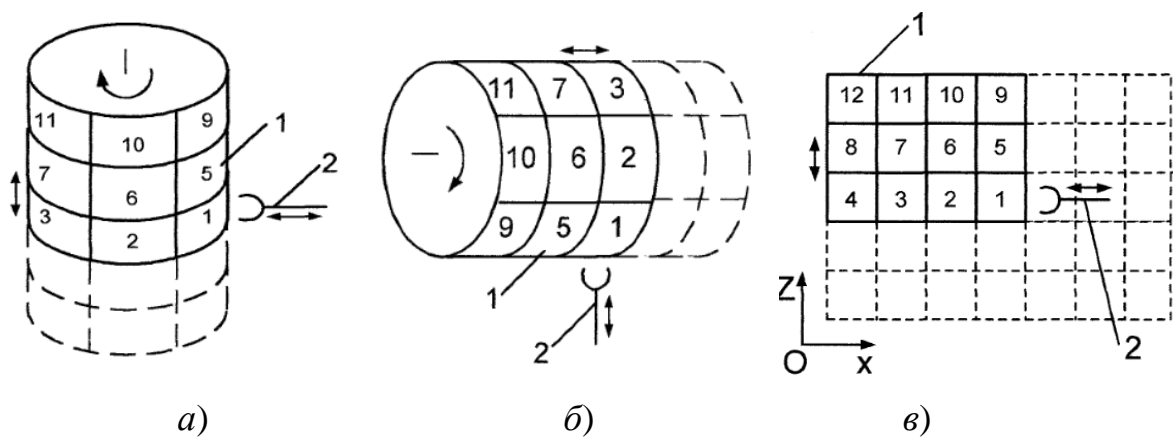


Рисунок 2.2 Схеми АНС з двокоординатним рухом при пошуку адреси комірки:
а, б – барабанна з вертикальною і горизонтальною віссю обертання відповідно;
в – лінійна (призматична) багаторядна

Початковий стан накопичувача барабанного типу заданий матрицею $H_5^{(1,1)}$:

$$H_5^{1,1} = \begin{vmatrix} 12 & 11 & 10 & 9 \\ 8 & 7 & 6 & 5 \\ 4 & 3 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Кількість рядків з ненульовими елементами матриці $H_5^{(1,1)}$ дорівнює кількості ярусів m на циліндричній поверхні барабана. Кількість нульових рядків цієї матриці дорівнює $m - 1$. На кожному ярусі міститься n комірок. Місткість накопичувача (кількість комірок на всій поверхні барабана) буде: $q = mn$.

У розглядуваному прикладі маємо $m = 3$, $n = 4$, тоді $q = 12$. Поворот барабана навколо вертикальної осі та поступальне переміщення вздовж цієї осі може здійснюватися паралельно (одночасно) або послідовно. У першому випадку витрачається менше часу на виконання операцій приймання та видачі виробів.

Матрична модель АНС барабанного типу з вертикальною віссю обертання барабана та можливістю його вертикального переміщення має вигляд:

$$\begin{cases} (P^{l_1} \oplus P^{l_2}) H_5^{l,k} (C^{k_1} \oplus C^{k_2}) \\ l_1 l_2 \in \{1, 2, \dots, m - 1\}; 1 < l + l_1 \leq m; \\ 1 < l + l_2 \leq m; l \in \{1, 2, \dots, m\}; 1 < k + k_1 \leq n; \\ 1 < k + k_2 \leq n; k \in \{1, 2, \dots, n\}; \\ k_1 k_2 \in \{1, 2, \dots, n - 1\}, \end{cases} \quad (2.6)$$

де $H_5^{(l,k)}$ – матриця поточного стану накопичувача;

l – координата поточного стану (розташування) барабана вздовж його вертикальної осі;

k – поточна кутова координата розташування барабана;

l_1, l_2 – число кроків поступального переміщення барабана вгору і вниз відповідно;

k_1, k_2 – величина повороту барабана в кроках за годинниковою і проти годинникової стрілки відповідно.

При послідовному виконанні барабаном координатних рухів математична модель системи матиме відмінності:

$$(P^{l1} \oplus P'^{l2})[H_5^{l,k}(C^{k1} \oplus C'^{k2})]. \quad (2.7)$$

Обмеження, що накладаються на змінні, залишаються такими ж, як і в попередній моделі (2.6). Але у цьому випадку спочатку виконується поворот барабана навколо осі за годинниковою або проти годинникової стрілки, а потім він піднімається вгору або опускається вниз на задану кількість кроків. Аналогічно будується модель при зміні послідовності виконання барабаном координатних рухів.

Матрична модель АНС з горизонтальною віссю повороту барабана (рис. 2.2, б) відрізняється від моделі (2.6) тим, що матриця поточного стану її накопичувача

$$H_5^{l,k} = \begin{vmatrix} 9 & 5 & 1 & 0 & 0 \\ 10 & 6 & 2 & 0 & 0 \\ 11 & 7 & 3 & 0 & 0 \\ 12 & 8 & 4 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

множиться зліва на циклічні матриці C, C' , а справа – на 1-піддіагональну, або 1-наддіагональну матриці P, P' задану кількість разів:

$$(C^{k1} \oplus C'^{k2}) H_5^{l,k} (P^{l1} \oplus P'^{l2}). \quad (2.8)$$

Система обмежень тут така ж, як у моделі (2.6).

На рис. 2.2, в показана накопичувальна система, накопичувач якої здійснює рухи в системі координат XOY . Накопичувач має прямокутну форму та матричну структуру розміщення комірок для зберігання виробів.

Комірконесуча поверхня накопичувача може розташовуватися горизонтально або вертикально. Його місткість дорівнює $q = mn$, де m – кількість рядів комірок, n – кількість комірок в одному ряду. Габарити системи значно

збільшуються через наявність двомірного розмаху рухів накопичувача величиною, рівною $(2m - 1) \times (2n - 1)$.

Початковий стан накопичувача системи задається матрицею $H_7^{l,h}$.

При $m = 3, n = 4$ ця матриця матиме вигляд:

$$H_7^{l,h} = \begin{vmatrix} 12 & 11 & 10 & 9 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 7 & 6 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Під час одночасного переміщення накопичувача вздовж осей координат OX та OY матрична модель АНС задається співвідношенням:

$$\begin{cases} (P_1^{l_1} \oplus P_1^{l_2}) H_7^{l,h} (P_2^{h_1} \oplus P_2^{h_2}) \\ l_1 l_2 \in \{1, 2, \dots, m - 1\}; l \in \{1, 2, \dots, m\}; \\ 1 < l + l_1 \leq m; \quad 1 < l + l_2 \leq m; \\ h_1 h_2 \in \{1, 2, \dots, n - 1\}; h \in \{1, 2, \dots, n\}; \\ 1 < h + h_1 \leq n; \quad 1 < h + h_2 \leq n, \end{cases} \quad (2.9)$$

де l, h – поточні координати накопичувача в даний момент часу;

l_1, l_2 та h_1, h_2 – число кроків переміщення накопичувача вздовж осей OY і OX відповідно;

P_1 – 1-піддіагональна матриця розміром $(2m - 1) \times (2m - 1)$;

P_2 – 1-піддіагональна матриця розміром $(2n - 1) \times (2n - 1)$.

Під час послідовного виконання рухів вздовж координатних осей OY і OX в математичній моделі у порівнянні з моделлю (2.9) зміниться порядок множення матриці поточного стану на наддіагональні матриці P_1 та P_2 і матриці $P'_1 = P_1 T$, $P'_2 = P_2 T$.

2.3. Матричне моделювання автоматизованих накопичувальних систем зі статичним накопичувачем

Зі збільшенням місткості накопичувача і маси виробів, що розміщуються у ньому, знижується швидкість його переміщення при виконанні операцій приймання та видачі виробів, збільшується час обслуговування та погіршуються динамічні характеристики. У такому разі доцільно зберігати вироби у статичних (нерухомих) накопичувачах. Функції пошуку заданої адреси комірки та транспортування виробу в зону завантаження та вивантаження виконується автооператором (роботом, штабелером). Такі накопичувальні системи можуть мати різну структурну та функціональну організацію. Наочними прикладами систем зі статичними накопичувачами у складі ГВК є автоматизовані стелажні склади для зберігання деталей, де функції приймання та видачі виконує штабелер, а також центральні стелажні магазини, які обслуговуються роботом [20].

На рис. 2.3, а показано схему накопичувальної системи, в якій накопичувач 1 виконаний у вигляді нерухомого диска, розташованого в горизонтальній площині. Комірки 1, 2, 3, 4 для зберігання виробів розміщені по колу на торцевій поверхні накопичувача. Функції завантаження та вивантаження виробів здійснює автооператор 2. Останній має можливість повороту навколо вертикальної осі за годинниковою та проти годинникової стрілки.

Початковий стан автооператора описується $(1 \times q)$ -матрицею (матрицею-рядком) S_1^1 (q – кількість комірок у накопичувачі). Матриця S_1^1 містить єдиний ненульовий елемент рівний 1.

При $q=4$ ця матриця має вигляд:

$$S_1^1 = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & 1 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

Розміщена над матрицею строка чисел 1, 2, 3, 4 вказує на адреси комірок накопичувача.

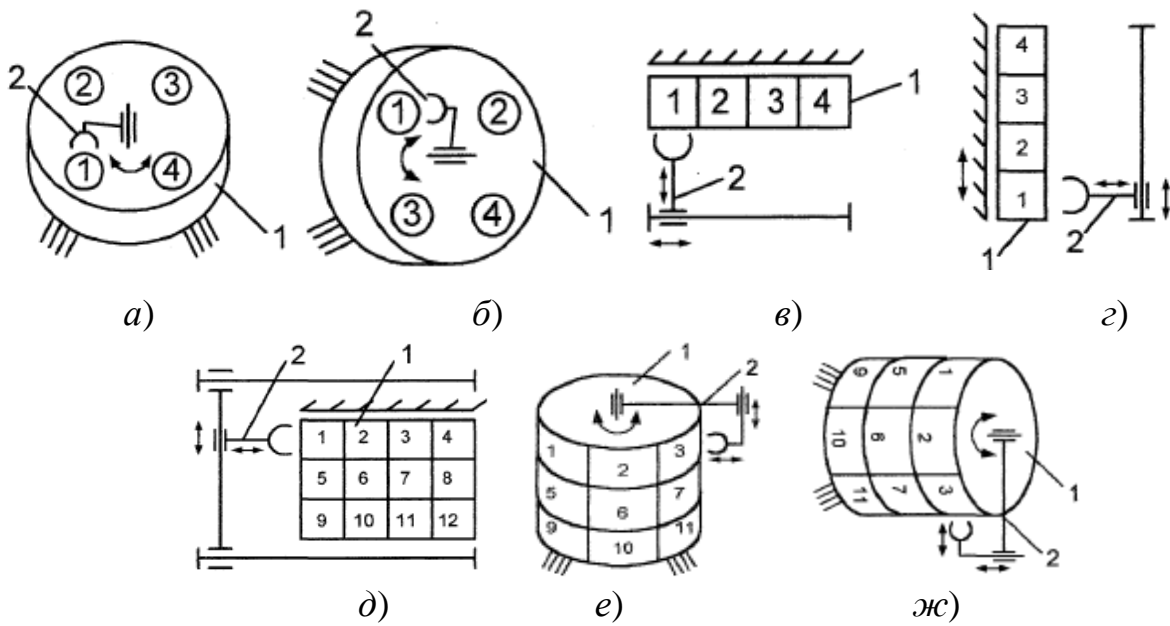


Рисунок 2.3 Схеми автоматизованих накопичувальних систем зі статичним накопичувачем: *a, б* – дискові з вертикальною та горизонтальною осями повороту автооператора; *в, г, д* – лінійні (горизонтальна, вертикальна та багаторядна відповідно); *е, ж* – барабанні з вертикальною та горизонтальною осями повороту автооператора

Для повороту автооператора 2 за годинниковою стрілкою на один крок необхідно матрицю S_1^1 помножити справа на циклічну $(q \times q)$ -матрицю C :

$$S_1^1 C = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \end{matrix} = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \end{vmatrix} \end{matrix} = S_1^2$$

Поворот автооператора в тому ж напрямку на два кроки імітується множенням матриці S_1^1 на матрицю $C^2 = CC$, тобто:

$$S_1^1 C^2 = (S_1^1 C)C = S_1^2 C = S_1^3.$$

Матрична модель накопичувальної системи, показаної на рис. 2.3, *a*, буде:

$$\begin{cases} S_1^k (C^{k_1} \oplus C'^{k_2}) = S_1^k C^{k_1} \oplus S_1^k C'^{k_2} \\ k_1 k_2 \in \{1, 2, \dots, q-1\}; \\ 1 < k + k_1 \leq q; 1 < k - k_2 \leq q, \end{cases} \quad (2.10)$$

де S_1^k – поточний стан автооператора.

При розміщенні накопичувача у вертикальній площині (рис. 2.3, б) матриця початкового стану автооператора задається $(q \times 1)$ -матрицею S_2^1 :

$$S_2^1 = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 0 \\ 3 & 0 \\ 4 & 0 \end{vmatrix}$$

Для побудови моделі даної системи матриця поточного стану S_2^1 множиться зліва на циклічні $(q \times q)$ -матриці C і C' .

Побудуємо матричну модель АНС з нерухомим накопичувачем 1 з однорядною лінійною структурою розміщення комірок для зберігання виробів (рис. 2.3, в). Накопичувач 1 тут розміщений горизонтально. Відповідно, автооператор 2 під час пошуку заданої адреси комірки і переміщення виробу в зону завантаження й вивантаження виконує рухи в горизонтальній площині.

Початковий стан автооператора задається $(1 \times q)$ -матрицею (матрицею-строкою) S_3^1 ($q = 4$):

$$S_3^1 = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \parallel & 1 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

Матриця S_3^1 повністю співпадає з матрицею початкового стану розглянутої вище накопичувальної системи, зображеної на рис. 2.3, а, тобто $S_3^1 = S_1^1$

Лінійні зворотно-поступальні рухи у горизонтальній площині, які виконує автооператор 2, імітуються множенням матриці поточного стану S_3^1 справа l_1 разів на 1-наддіагональну $(q \times q)$ -матрицю P або l_2 разів на 1-піддіагональну транспоновану матрицю P' . Матрична модель накопичувальної системи, показаної на рис. 2.3, в, матиме наступний вигляд:

$$\begin{cases} S_3^k(P^{l_1} \oplus P'^{l_2}) = S_3^k P^{l_1} \oplus S_3^k P'^{l_2} \\ k \in \{1, 2, \dots, q-1\}; l_1 l_2 \in \{1, 2, \dots, q-1\}; \\ 1 < k + l_1 \leq q; 1 < k - l_2 \leq q, \end{cases}$$

(2.11)

При вертикальному розташуванні лінійного накопичувача (рис. 2.3, *з*) початковий стан автооператора задається $(q \times 1)$ -матрицею S_4^1 :

$$S_4^1 = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} \left\| \begin{matrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \right\|.$$

На відміну від попередньої моделі при побудові математичної моделі даної системи матриця її поточного стану S_4^1 множиться на 1-наддіагональні та 1-піддіагональні матриці P і P' не справа, а зліва:

$$(P^{l1} \oplus P'^{l2})S_4^k = P^{l1}S_4^k \oplus P'^{l2}S_4^k. \quad (2.12)$$

Система обмежень і змінних така ж, як і для моделі (2.11).

Накопичувальна система, зображена на рис. 2.3, *д*, містить нерухомий накопичувач 1, що має $(m \times n)$ -матричну структуру розміщення комірок (m – кількість рядів комірок, n – кількість комірок у кожному ряду). Місткість накопичувача рівна $q = m \times n$. У процесі функціонування системи автооператор 2 здійснює рухи у прямокутній системі координат. Початковий стан автооператора 2 визначається прямокутною $(m \times n)$ -матрицею $S_5^{(1,1)}$. При $m = 3$ і $n = 4$ ця матриця матиме вигляд:

$$S_5^{(1,1)} = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \left\| \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \right\|.$$

Імітація поведінки даної накопичувальної системи здійснюється з допомогою матричної моделі виду:

$$\begin{cases} (P_1^{l_1} \oplus P_1^{l_2}) S_5^{l,h} (P_2^{h_1} \oplus P_2^{h_2}) \\ l_1 l_2 \in \{1, 2, \dots, m-1\}; l \in \{1, 2, \dots, m\}; \\ 1 < l + l_1 \leq m; \quad 1 < l - l_2 \leq m; \\ h_1 h_2 \in \{1, 2, \dots, n-1\}; h \in \{1, 2, \dots, n\}; \\ 1 < h + h_1 \leq n; \quad 1 < h - h_2 \leq n, \end{cases} \quad (2.13)$$

де $S_5^{(l,h)}$ – матриця поточного стану автооператора;

l_1, l_2 – величини переміщень автооператора паралельно осі OX ;

h_1, h_2 – величини переміщень автооператора паралельно осі OY ; величини переміщень автооператора задаються кількістю кроків.

Розглянемо нерухомий накопичувач 1, що має форму барабана, на зовнішній циліндричній поверхні якого поярусно розміщені комірки 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 (рис. 2.3, *e*). У процесі функціонування автооператор 2 може обертатися як за годинниковою, так проти годинникової стрілки навколо вертикальної осі барабана, а також підніматися вгору або опускатися вниз, здійснюючи поступальні рухи паралельно його осі. Автооператор здійснює рухи в дискретній циліндричній системі координат. Обертальні і поступальні рухи автооператора можуть виконуватися одночасно і послідовно.

Початковий стан автооператора визначається $(m \times n)$ -матрицею $S_6^{(1,1)}$. При $m = 3$ і $n = 4$ ця матриця матиме вигляд:

$$S_6^{(1,1)} = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \left\| \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \right\| \end{matrix} .$$

Верхні індекси матриці поточного стану $S_6^{(l,k)}$ вказують на координати перебування автооператора 2 в розглядуваний момент часу: l – координата лінійного переміщення автооператора паралельно вертикальній осі; k – координата кутового положення автооператора.

Поворот автооператора за годинниковою стрілкою на один крок імітується множенням справа матриці $S_6^{(1,1)}$ на циклічну матрицю C :

$$S_6^{(1,1)}C = \left\| \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{ccc|ccc} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right\| = S_6^{(1,2)}.$$

Переміщення автооператора вниз на 1 крок відобразимо множенням матриці $S_6^{(1,2)}$ зліва на 1-піддіагональну матрицю P :

$$PS_6^{(1,1)} = \left\| \begin{array}{ccc|ccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{ccc|ccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right\| S_6^{(2,2)}.$$

Матрична модель накопичувальної системи (рис. 2.3, *e*) набуде вигляду:

$$\begin{cases} (P_1^{l_1} \oplus P_1^{l_2})S_6^{l,h}(C^{k_1} \oplus C^{k_2}) \\ l_1 l_2 \in \{1, 2, \dots, m-1\}; l \in \{1, 2, \dots, m\}; \\ 1 < l + l_1 \leq m; \quad 1 < l - l_2 \leq m; \\ k_1 k_2 \in \{1, 2, \dots, n-1\}; k \in \{1, 2, \dots, n\}; \\ 1 < k + k_1 \leq n; \quad 1 < k - k_2 \leq n, \end{cases} \quad (2.14)$$

При горизонтальному розташуванні нерухомого накопичувача барабанного типу, як показано на рис. 2.3, *ж*, поведінка накопичувальної системи імітується множенням матриці поточного стану $S_6^{(l,k)}$ зліва на циклічні матриці C і C' , а справа – на піддіагональні і наддіагональні матриці P і P' .

Засади матричного моделювання, що пропонуються в даній кваліфікаційній роботі, можуть бути використані для розв'язування задач матричного аналізу і синтезу накопичувальних систем, що мають і більш складну багаторівневу ієрархічну структуру. Матрично-модельну інтерпретацію можна отримати не тільки для автоматизованих транспортно-накопичувальних систем і систем інструментального забезпечення у складі ГВК, але і для таких об'єктів як конвеєри на дільницях механоскладального виробництва, роторних автоматичних ліній та інших технологічних (виробничих) систем.

Матричні моделі є також зручними засобами імітаційного моделювання поведінки окремих робочих органів верстатів з ЧПУ і верстата в цілому як єдиної технологічної системи [27].

2.4. Матричне моделювання дворівневих автоматизованих накопичувальних систем

У реальних виробничих умовах часто виникає потреба в АНС більш складної структури, ніж описані вище, внаслідок чого постає задача синтезу багаторівневих накопичувальних систем. Розв'язання такої задачі дозволить розширити різноманіття матричних моделей накопичувальних систем та на їх основі побудувати сукупність ефективних структурно-компонувальних рішень.

Дворівнева АНС складається з накопичувачів першого рівня та другого рівня. Накопичувач першого рівня являє собою АНС, кожна комірка якої містить не штучний виріб, а пов'язаний з нею автоматизований накопичувач другого рівня, комірконесуча поверхня якого в свою чергу забезпечена комірками для зберігання виробів. Накопичувач першого рівня можна розглядати як платформу, що містить на собі накопичувачі другого рівня. Всі накопичувачі другого рівня, з'єднані з комірками платформи можуть бути як однаковими, так і різними.

Нижче розглянемо задачу синтезу дворівневих АНС з однаковими накопичувачами другого рівня. Суть запропонованої процедури структурного синтезу дворівневих АНС полягає у побудові переліку всіх логічно можливих пар виду $\langle p, n \rangle$, де « p » і « n » – предметні змінні, що позначають платформу і накопичувач другого рівня відповідно і можуть набувати значень багатьох структурно-компонувальних рішень однорівневих АНС (табл. 2.1).

Для того, щоб синтезувати всі можливі пари $\langle p, n \rangle$, доцільно скористатися методом морфологічного аналізу, що дозволяє генерувати логічно впорядкований перелік можливих варіантів альтернативних рішень.

Морфологічний аналіз, як метод генерування, полягає у виявленні та аналізі незалежних змінних, що відносяться до форми, або структурних і функціональних параметрів проєктованої системи. Різні поєднання обраних параметрів (ознак, властивостей, характеристик) проєктованої системи формують альтернативні проєктні ідеї або рекомендовані рішення поставленої задачі [28, 29].

Таблиця 2.1. – Однорівневі автоматизовані накопичувальні системи

Тип накопичувача	Матрична модель
Дисковий з вертикальною віссю обертання	$M_1 = H_1^1(C^{k1} \oplus C^{k2}),$ $H_1^1 = \parallel 1, 2, \dots, q \parallel$
Дисковий з горизонтальною віссю обертання	$M_2 = (C^{k1} \oplus C^{k2})H_2^1,$ $H_2^1 = \parallel 1, 2, \dots, q \parallel$
Барабанний з вертикальною віссю обертання	$M_3 = H_3^1(C^{k1} \oplus C^{k2}),$ $H_3^1 = \parallel 1, 2, \dots, q \parallel$
Барабанний з горизонтальною віссю обертання	$M_4 = (C^{k1} \oplus C^{k2})H_4^1,$ $H_4^1 = \parallel 1, 2, \dots, q \parallel$
Лінійний однорядний горизонтальний	$M_5 = H_5^1(P^{l1} \oplus P^{l2}),$ $H_5^1 = \parallel 1, 2, \dots, q \parallel$
Лінійний однорядний вертикальний	$M_6 = (P^{l1} \oplus P^{l2})H_6^1,$ $H_6^1 = \parallel 1, 2, \dots, q \parallel$
Лінійний багаторядний горизонтальний	$M_7 = H_7^1(P^{l1} \oplus P^{l2}),$ $H_7^1 = \parallel 1, 2, \dots, q \parallel$
Лінійний багаторядний вертикальний	$M_8 = (P^{l1} \oplus P^{l2})H_8^1,$ $H_8^1 = \parallel 1, 2, \dots, q \parallel$

Кожне рішення, одержуване методом морфологічного аналізу, є однією з можливих комбінацій фіксованих значень параметрів, що описують систему. Таким чином, будь-яке рішення тут є фіксованим упорядкованим набором значень вибраних істотних параметрів досліджуваної системи як предметних змінних.

Можливі значення предметних змінних «п» та «н» (типи накопичувачів) представлені в табл. 2.2. Комбінуючи варіанти накопичувальних систем за кожним із можливих значень змінних «п» і «н» отримаємо різноманіття можливих варіантів рішень проєктованої системи.

Таблиця 2.2. – Морфологічна таблиця варіантів дворівневої автоматизованої накопичувальні системи

		Накопичувачі другого рівня							
		Н ₁	Н ₂	Н ₃	Н ₄	Н ₅	Н ₆	Н ₇	Н ₈
П	П ₁	<П ₁ , Н ₁ >	<П ₁ , Н ₂ >	<П ₁ , Н ₃ >	<П ₁ , Н ₄ >	<П ₁ , Н ₅ >	<П ₁ , Н ₆ >	<П ₁ , Н ₇ >	<П ₁ , Н ₈ >

П2	<П2, Н1>	<П2, Н2>	<П2, Н3>	<П2, Н4>	<П2, Н5>	<П2, Н6>	<П2, Н7>	<П2, Н8>
П3	<П3, Н1>	<П3, Н2>	<П3, Н3>	<П3, Н4>	<П3, Н5>	<П3, Н6>	<П3, Н7>	<П3, Н8>
П4	<П4, Н1>	<П4, Н2>	<П4, Н3>	<П4, Н4>	<П4, Н5>	<П4, Н6>	<П4, Н7>	<П4, Н8>
П5	<П5, Н1>	<П5, Н2>	<П5, Н3>	<П5, Н4>	<П5, Н5>	<П5, Н6>	<П5, Н7>	<П5, Н8>
П6	<П6, Н1>	<П6, Н2>	<П6, Н3>	<П6, Н4>	<П6, Н5>	<П6, Н6>	<П6, Н7>	<П6, Н8>
П7	<П7, Н1>	<П7, Н2>	<П7, Н3>	<П7, Н4>	<П7, Н5>	<П7, Н6>	<П7, Н7>	<П7, Н8>
П8	<П8, Н1>	<П8, Н2>	<П8, Н3>	<П8, Н4>	<П8, Н5>	<П8, Н6>	<П8, Н7>	<П8, Н8>

Такий самий перелік можливих структурно-компонувальних рішень дворівневих АНС можна отримати з добутку двох множин $\Pi = \{\pi_i\}$ і $N = \{n_j\}$, $i = [1, 8], j = [1, 8]$:

$$R = \Pi \times N = \{\langle \pi, n \rangle \mid \pi \in \Pi, n \in N\} = \{\langle \pi_1, n_1 \rangle, \langle \pi_1, n_2 \rangle, \dots, \langle \pi_8, n_8 \rangle\}.$$

Загальна можлива кількість синтезованих дворівневих накопичувачів у даному випадку становитиме

$$|\Pi| \cdot |N| = 8 \cdot 8 = 64,$$

де $|\Pi|, |N|$ – потужності множин Π, N .

Розглянемо правила побудови конструкцій дворівневих матричних моделей на прикладі. На рис. 2.4 представлена накопичувальна система, що відповідає парі $\langle \pi_1, n_1 \rangle$.

Платформа 1 виконана у вигляді диска з вертикальною віссю обертання і торцевою несучою поверхнею. Накопичувачі 2 також виконані у вигляді диска, вісь обертання кожного з яких перпендикулярна поверхні несучої платформи. Платформа і кожен накопичувач мають приводи, що дозволяють кожному з них здійснювати поворот в автономному режимі. Це дозволяє переміщувати необхідну комірку накопичувача другого рівня за заданою адресою для виконання операцій приймання та видачі виробів.

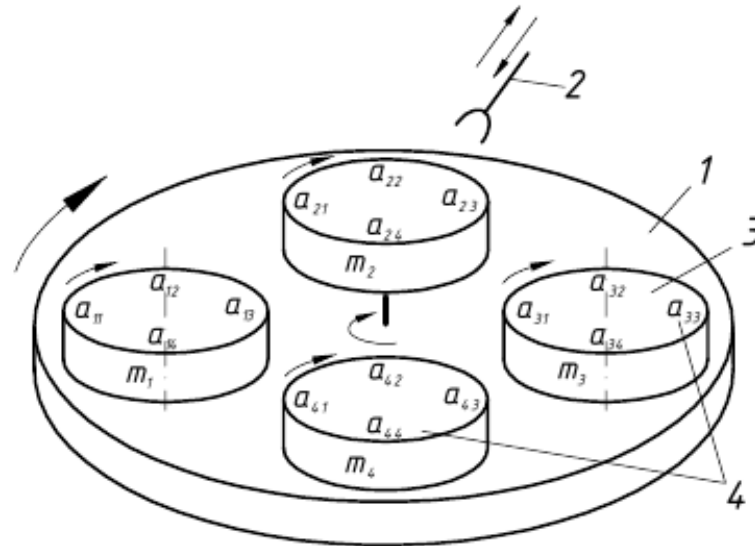


Рисунок 2.4 Схема дворівневої автоматизованої накопичувальної системи:
1 – платформа; 2 – автооператор; 3 – накопичувач другого рівня; 4 – комірка
для зберігання виробу

У даному прикладі функції пошуку необхідної комірки і переміщення її за заданою адресою виконуються за рахунок повороту як платформи 1 так і накопичувача 2, що містить необхідну комірку. Як видно з табл. 2.1, як платформа описується матричною моделлю M_1 , так і накопичувач описується моделлю M_1 . Для зручності синтезу прийемо позначення: M – модель накопичувача першого рівня, m – модель накопичувача другого рівня. Місткість платформи – 4 накопичувачі, що розміщуються на її поверхні, місткість накопичувачів – 4 комірки (рис. 2.4).

Отже, модель дворівневої АНС можна записати у вигляді:

$$M_{11} = \begin{cases} M_1 = H_1^k (C^{k1} \oplus C^{k2}) \\ H_1^k = \|m_1, m_2, m_3, m_4\|; \\ m_i = h_{1i}^k (C^{k1} \oplus C^{k2}), i = [1, 4] \\ h_{1i}^k = \|a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, a_{i4}\|; \end{cases}$$

Елементи m_1, m_2, m_3, m_4 матриці H_1^k відповідають адресам розташування накопичувачів другого рівня 3 в платформі 1, а елементи $a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, a_{i4}$ матриці h_{1i}^k – адресами комірок i -го накопичувача. Адреса комірки задається двома

цифрами i і j , де i – адреса i -го накопичувача в платформі, а j – адреса самої комірки в i -му накопичувачі.

Пошук конкретної комірки накопичувача другого рівня за її адресою здійснюється наступним чином. При послідовному пошуку адреси комірки спочатку знаходиться i -й накопичувач другого рівня, що містить цю комірку, а потім відбувається пошук адреси комірки в i -му накопичувачі.

В даному випадку тривалість пошуку адреси комірки t буде становити:

$$t = t_{\text{п}} + t_{\text{н}},$$

де $t_{\text{п}}$ – тривалість пошуку адреси i -го накопичувача на платформі;

$t_{\text{н}}$ – тривалість пошуку адреси j -ї комірки в i -му накопичувачі.

Тривалість пошуку адреси можна зменшити за рахунок одночасного (паралельного) переміщення платформи і накопичувача, тоді $t = \max\{t_{\text{п}}, t_{\text{н}}\}$.

2.5. Висновки до 2-го розділу

1. Запропоновано відображати морфологічну і функціональну структуру автоматизованих накопичувальних систем шляхом побудови їх матричних моделей.

2. Компонентами матричної моделі є концептуальні аналоги (матриці) функціональних елементів АНС – накопичувачів та їх секцій для розміщення та зберігання виробів; приводів рухів органів пошуку заданої адреси потрібної комірки, механізму реверсу руху.

3. Матричні моделі дозволяють імітувати поведінку АНС шляхом виконання математичних дій над матрицями згідно правил матричного аналізу.

4. Запропоновані матричні моделі за аналогічним, як представлено у роботі, принципом можуть бути використані при імітаційному моделюванні більш складних багаторівневих автоматизованих транспортно-накопичувальних систем і систем інструментального забезпечення у складі гнучких виробничих комплексів, конвеєрів складання виробів та інших технологічних систем.

5. Використання багаторівневих АНС дозволяє розширити функціональні та технологічні можливості транспортно-накопичувальних систем, підвищити їх швидкодію (оперативне обслуговування технологічного обладнання), продуктивність, гнучкість ГВК, зменшити їх габарити, а також забезпечити можливість одночасного обслуговування кількох одиниць технологічного обладнання.

6. Формалізація опису АНС з допомогою матричного моделювання є передумовою синтезу нових варіантів її структури.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ СТРУКТУРНО-КОМПОНУВАЛЬНИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗОВАНИХ НАКОПИЧУВАЛЬНИХ СИСТЕМ

3.1. Засади синтезу структурно-компонувальних рішень автоматизованих накопичувальних систем

Під синтезом прийнято мати на увазі побудову опису системи за заданим законом функціонування.

Розрізняють два види синтезу:

- структурний синтез – отримання структурних схем об'єкта, що містять відомості про склад елементів та способи з'єднання їх між собою;
- параметричний синтез – визначення числових значень параметрів елементів [30].

Оптимізація – це оцінка отриманих в результаті синтезу варіантів структури системи за допомогою відомих методів з подальшим вибором серед них кращого. Задача структурної оптимізації зводиться до пошуку екстремального значення критерію оптимальності із врахуванням прийнятих обмежень.

Розрізняють такі методи структурної оптимізації: методи відсікання, методи повного та направленої перебирання, комбінаторні та наближені методи.

Синтез технічних об'єктів націлений на створення нових варіантів їх будови, а аналіз використовують для оцінки цих варіантів, тобто синтез і аналіз виступають у процесі проектування в діалектичному зв'язку.

При синтезі заздалегідь задані допустимий набір елементів об'єкта, правила їх з'єднання між собою та способи визначення за синтезованою структурою об'єкта ті функції, які він реалізовує [30, 31].

Щоб визначити і формалізувати функції та варіанти структури досліджуваної технічної системи необхідно виконати ряд взаємопов'язаних етапів:

- 1) формалізувати завдання;
- 2) вибрати алгоритм розв'язання задачі структурного синтезу досліджуваної системи;
- 3) сформувавши загальну структуру системи та розподілити завдання функціонування за рівнями системи;
- 4) скомпонувати комплекс технічних засобів системи для реалізації заданих функцій [31].

Для формування принципів та методологічних передумов для розробки процедур синтезу структурно-компонувальних рішень АНС потрібно виконати досліджень із застосуванням методів системного аналізу та дослідження операцій.

Під *структурно-компонувальним рішенням* будемо розуміти опис функціональної структури системи, що включає інформацію про функціональні елементи, їх взаємне розташування, взаємозв'язки і види взаємодії, особливості компонування, геометричної форми та інші істотні ознаки морфологічної та функціональної організації, а також важливі співвідношення значень параметрів.

Функціональні елементи системи утворюють основний масив структурно-компонувальних ознак. Кожен елемент виконує одну або кілька функцій щодо забезпечення роботи взаємопов'язаних з ним елементів та АНС загалом. Взаємне розташування елементів характеризує їх розташування один відносно одного в просторі та визначає структурно-компонувальну схему АНС.

В основу викладеного нижче методологічного підходу до побудови формалізованої моделі системного опису морфологічної та функціональної організації АНС покладено матричні моделі АНС, які докладно описані у розділі 2 цієї роботи та у даному розділі.

Описана далі методика орієнтована на використання евристичних прийомів синтезу структурно-компонувальних рішень АНС .

Евристичні методи сформувалися в процесі конструкторської та винахідницької діяльності та використовуються при виконанні проектних робіт у різних інженерних галузях в процесі пошуку раціональних технічних рішень

та вирішення творчих інженерних завдань, коли інші методи виявляються менш ефективними.

Евристичними прийомами називають способи і правила вирішення творчих інженерних завдань, в яких міститься короткі вказівки як перетворювати наявний прототип або в якому напрямку потрібно вести пошук, щоб отримати шукане рішення. Вони зазвичай не містять прямої однозначної вказівки, як перетворювати прототип, але з одного боку описують простір змінних і відповідають на запитання «Що змінювати?» у аналізованому технічному рішенні, з другого боку описують спосіб зміни і відповідають на запитання «Як застосовувати?». У порівнянні, наприклад, із методом проб і помилок евристичний прийом забезпечує значно більшу ймовірність знаходження раціональних, вдалих рішень [32].

У даній роботі, зокрема, вирішується завдання розробки методики, орієнтованої на пошук структурно-компонувальних рішень автоматизованих накопичувальних систем у складі ГВК. Розробка евристичного підходу, орієнтованого саме на пошук нових структурно-компонувальних рішень АНС, базується на виборі з міжгалузевого фонду [33] найбільш ефективних для даної задачі евристичних прийомів.

3.2 Формування спеціалізованого фонду евристичних прийомів

Формування спеціалізованого фонду евристичних прийомів виконується в наступній послідовності:

1-й етап: аналіз функцій автоматизованої накопичувальної системи та її елементів.

Будь-яку технічну систему можна розділити на кілька конструктивних елементів, що виконують визначені функції для забезпечення роботи системи в цілому. При цьому аналізована система є верхнім рівнем, а виділені елементи – нижнім. При детальнішому аналізі кожен із виділених елементів нижнього рівня

може розглядатися як самостійна система, яку можна розчленувати на деяку кількість функціональних елементів нижчого рівня і т.д. [29-31].

Виділимо наступні найбільш часто використовувані в АНС в ГВК функціональні елементи:

– *несучий елемент* – накопичувач з комірками, що виконує функцію зберігання виробів у заданому положенні;

– *автооператор*, що виконує функцію приймання та видачі необхідного виробу з накопичувача та передачі його на верстат або автоматичний транспортер;

– *привод*, що забезпечує переміщення комірки накопичувача із заданою адресою в зону приймання та видачі виробу або переміщення штабелера, захоплення автооператора;

– *приймально-передавальний пристрій*, що виконує функцію передачі виробу з накопичувача на верстат або транспортер і навпаки [1, 19].

Основні функціональні елементи АНС представлені на рис. 3.1 та в табл. 3.1.

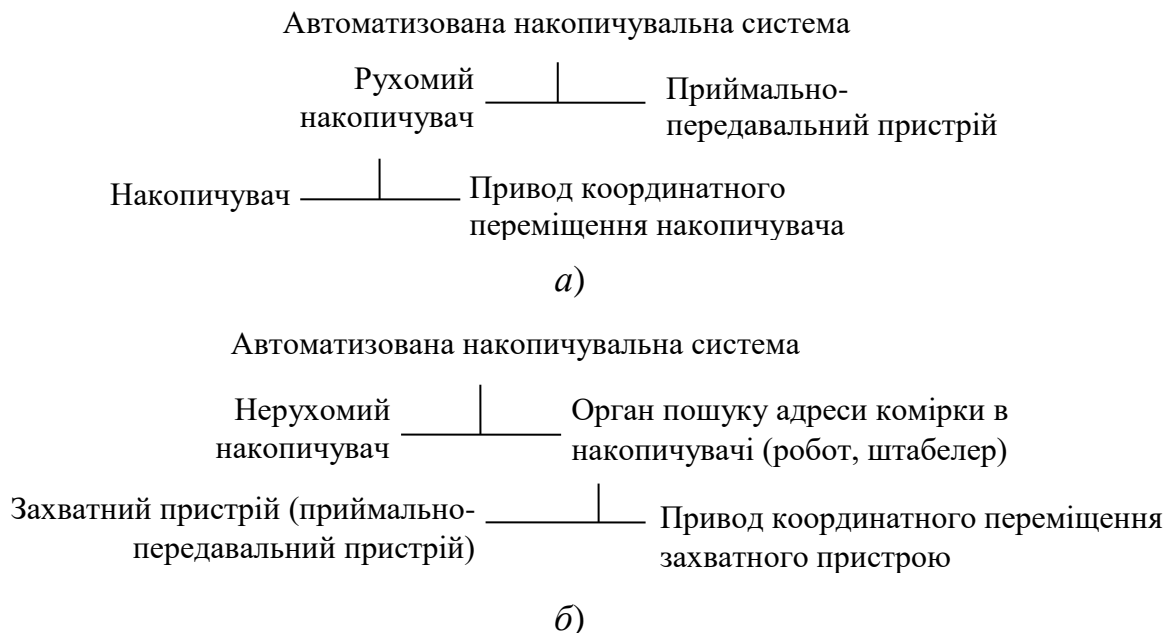


Рисунок 3.1 Дерево автоматизованої накопичувальної системи:

а – з рухомим накопичувачем; *б* – з нерухомим накопичувачем

Таблиця 3.1. – Функції, які виконує автоматизована накопичувальна система та її елементи

АНС та її функціональні елементи	Виконувані функції
АНС	Приймання, зберігання та видача необхідного виробу
Накопичувач рухомий (динамічний)	Зберігання виробів у комірках, переміщення комірки із заданою адресою до зони приймання та видачі виробу та навпаки
Накопичувач нерухомий	Зберігання виробів у комірках
Робот, штабелер	Переміщення виробу із зони приймання та видачі виробу в комірку із заданою адресою та навпаки
Приймально-передавальний пристрій	Приймання виробу зі столу верстата та передача його в комірку накопичувача, на платформу автоматичного транспортуючого засобу та навпаки
Привод	Забезпечення покрокового обертального та поступального переміщення комірки накопичувача із заданою адресою в зону приймання та видачі і навпаки; переміщення захватного пристрою робота, штабелера в задану координату розташування комірки, захоплення виробу і переміщення його в зону прийому і видачі і навпаки.

Накопичувачі у складі АНС можуть мати різну форму: плоску – у вигляді прямокутника, диска, барабана (циліндра) з вузькою плоскою поверхнею; а комірки для зберігання виробів можуть являти собою ніші у прямокутної або циліндричної форми.

Найпростішим способом опису технічного рішення системи за допомогою наведених вище груп ознак є дерево. На рис. 3.2 наведено приклад дерева, що описує АНС [46].

2-й етап: визначення ознак системної (морфологічної та функціональної) організації АНС. Морфологічна та функціональна організація АНС докладно описана в розділі 2 цієї роботи.

3-й етап: вибір відповідних евристичних прийомів з міжгалузевого фонду для включення їх у спеціалізований фонд.

Для включення в спеціалізований фонд евристичних прийомів з міжгалузевого фонду обрані наступні групи прийомів [33]:

- перетворення форми об'єкта та його елементів;
- перетворення в просторі;
- перетворення в часі;
- перетворення руху.

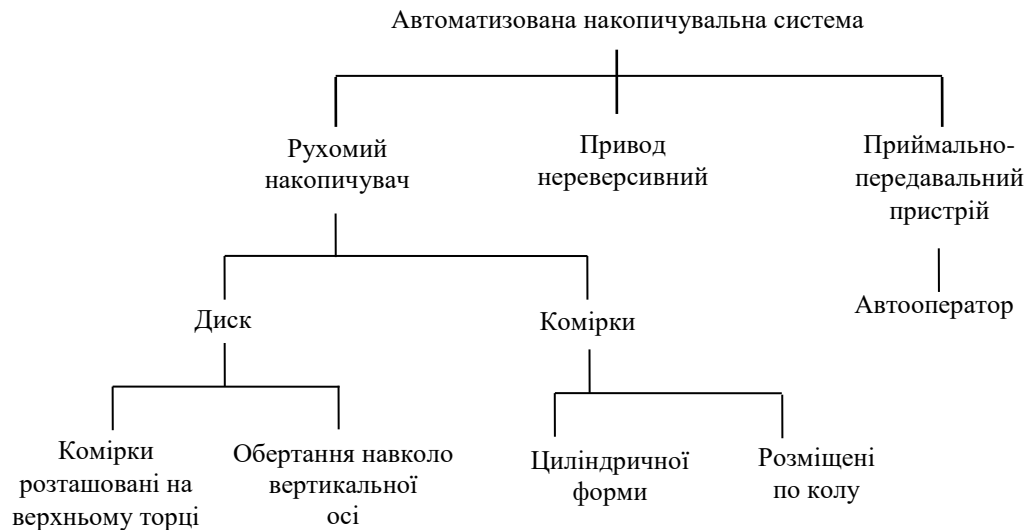


Рисунок 3.2 Модель структури накопичувальної системи у вигляді дерева

4-й етап: побудова просторових і часових відношень – спеціалізованих евристичних прийомів синтезу структурно-компонувальних рішень АНС. Нижче описані прийоми перетворення у часі та перетворення у просторі, які ґрунтуються на принципах псевдофізичної логіки [34], яка відображає сприйняття суб'єктом чи штучною системою закономірностей зовнішнього фізичного середовища.

Описані просторові і часові відношення разом із обраними вище (на 3-му етапі) з міжгалузевого фонду евристичними прийомами утворюють спеціалізований евристичний фонд.

Розглянемо окремі засади часової та просторової логіки [35], що створюють необхідні методологічні передумови для розробки евристичної методики синтезу структурно-компонувальних рішень АНС.

Для вирішення задачі синтезу структурно-компонувальних рішень АНС та представлення їх на рівні матричних моделей необхідні формальні засоби (мова), що дозволяють описувати морфологічну та функціональну організацію цих

систем. У якості таких засобів у цій роботі використовуються часова логіка, просторова логіка і логіка дій.

Часова логіка – логіка відношень, у якій відношення характеризують часові залежності («раніше», «одночасно», «пізніше» тощо).

Просторова логіка – формальна система, яка описує можливі розташування об'єктів у двовимірному (тривимірному) просторі, відстані між ними та т.з. «локи» (обмежена частина простору, у якій повністю міститься деякий об'єкт, зовнішні межі якого співпадають з межами локу).

Просторова логіка дозволяє наводити обґрунтування просторового розташування та взаємозв'язків об'єктів для випадку абсолютної та відносної системи координат і для випадку, коли такі змінні як відстань, розмір локу або характеристики взаємного розташування предметів задані у вигляді лінгвістичних змінних.

Логіка дій – система аргументів про закономірності дій у деякому досліджуваному середовищі. Логіка дій спирається на часову логіку та просторову логіку, а також на властивості конкретного середовища.

У часовій логіці важливу роль відіграє поняття події.

Під *подією* розуміють певний фіксований результат, факт, що є результатом діяльності якогось одиничного суб'єкта. Подіями стають лише значущі для вирішення задачі факти, без урахування яких неможливе успішне вирішення задачі.

Розрізняють події двох типів залежно від того, як вони проєктуються на шкали часу і простору: точкові та інтервальні. Кожній події на шкалі відповідає певний «темпор», тобто ділянка шкали. Якщо суть події така, що вона проєктується в точковий «темпор», то подія вважається точковою. Якщо «темпором» є набір із кількох поділок шкали, то подія у цій шкалі має розглядатися як інтервал.

Базовий набір часових відношень повинен дозволяти описувати послідовності здійснення подій у часі у рамках вирішуваної задачі. Для точкових та інтервальних подій базові часові відношення дещо відрізняються [34, 35].

Виділяють три групи часових відношень: метричні, неметричні та періодичні [35].

Неметричні відношення точкових подій:

$p \tau_0 q$ – подія p відбувається одночасно з подією q ;

$p \tau_1 q$ – подія p відбувається раніше, ніж події q ;

$p \tau_2 q$ – подія p відбувається пізніше за події q .

Метричні відношення точкових подій:

$p \tau_3 (n, \omega) q$ – подія p відбувається раніше події q на $n\omega$ одиниць за шкалою L , де ω – одиниця вимірювання шкали L , $n = 1, 2, 3, \dots$ (рис. 3.3).

$p \tau_4 t^*$ – подія p реалізується на момент t^* на шкалі L .

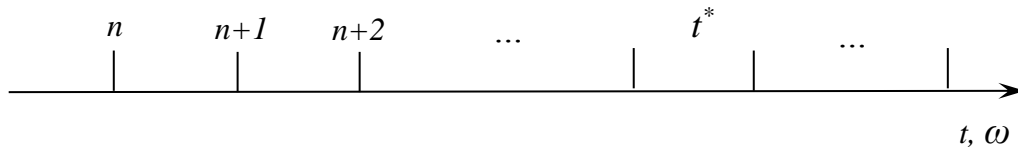


Рисунок 3.3 Метрична шкала L

Періодичні відношення точкових подій:

$p \tau_5 \tau$ – подія p реалізується з деяким періодом на шкалі L .

Одночасність подій відповідає тому, що їх проєкції співпадають, а відношення τ_4 співвідносить подію з поділкою шкали, позначену t^* .

Неметричні відношення інтервальних подій:

ρ_1 – подія p строго передує події q ;

ρ_2 – подія p строго слідує за q ;

ρ_3 – подія p перетинається з q ;

Часткові випадки ρ_3 :

ρ_3 – подія p співпадає з q ;

ρ_4 – подія p лежить всередині q ;

ρ_5 – подія p лежить всередині q так, що їх початки співпадають;

ρ_6 – подія p лежить всередині q так, що їх кінці співпадають;

ρ_7 – подія p безпосередньо передує q .

Метричні відношення інтервальних подій:

$p \rho_{m1} (n, \omega) q$ – подія p строго передує події q за шкалою L на $n\omega$ одиниць;

$p \rho_{m2} (n, \omega) q$ – подія p перетинається з q так, що відстань між їх початками дорівнює $n\omega$ за шкалою L ;

$p \rho_{m3} (n, \omega) q$ – подія p перетинається з q так, що відстань між їх кінцями дорівнює $n\omega$ за шкалою L ;

$p \rho_{m4} (t^*, \Delta t) q$ – початок події p реалізується на момент t^* , а тривалість p має величину Δt за шкалою L .

Періодичні відношення інтервальних подій:

$p \rho_{m1} \tau$ – подія p реалізується з періодом τ за шкалою L .

Якщо відомі моменти початку та закінчення інтервальної події, то цю подію можна спроектувати на метричну шкалу, задавши парою точкових подій – маркерів початку μ_p та закінчення μ_k .

У такому разі відношення між парами інтервальних подій можна задати через сукупність відношень між точковими подіями, що є їх маркерами. Наприклад, відношення $p \rho_6 q$ реалізується, якщо виконується таке відношення:

$$(\mu_k(p) \tau_0 \mu_k(q)) \wedge (\mu_p(p) \tau_1 \mu_p(q)).$$

Наведені часові відношення між точковими та інтервальними подіями становлять основу мови псевдофізичної часової логіки, яка описує алгебраїчні властивості часових відношень [36].

Під подією у межах вирішуваної у цій роботі задачі будемо розуміти переміщення накопичувача, платформи (каркаса) накопичувача, секцій накопичувача із поточного стану в необхідний стан, що визначається складеною для даного моменту виробничою ситуацією. При відомому початковому стані накопичувача необхідний стан досягається за рахунок його переміщення на задану кількість кроків.

Залежно від форми комірконесучої поверхні, структури розміщення комірок на ній і морфологічної організації компоненти АНС (накопичувач, платформа накопичувача, секції накопичувача) можуть здійснювати різні рухи в процесі переміщення комірки із заданою адресою в зону приймання та видачі виробу. Ці рухи виступають в якості подій p_1, p_2, \dots, p_{17} (див. табл. А.1)

Кожна матрична модель АНС відображає цілком визначену її морфологічну і функціональну організацію, яка у відповідність ставить конкретний набір базових функціональних елементів і види рухів, що здійснюються ними в процесі функціонування системи. Кожен рух, який здійснюється елементами системи, інтерпретується як проста подія p з множини подій $P = \{ p_1, p_2, \dots, p_{17} \}$.

У ряді випадків достатньо здійснення однієї простої події з множини P для переміщення комірки із заданою адресою в зону приймання та видачі виробів і навпаки. Така ситуація спостерігається, наприклад, при функціонуванні АНС, накопичувач якої має форму диска, що обертається навколо вертикальної осі. Комірки для зберігання виробів розташовані по периферії диска. Переміщення комірки із заданою адресою в зону прийому і видачі виробу досягається за рахунок кругового руху накопичувача на задану кількість кроків, тобто за рахунок здійснення події p_1 .

Якщо накопичувач АНС виконаний у вигляді барабана, що обертається навколо вертикальної осі, то для переміщення комірки із заданою адресою в зону прийому та видачі виробу звершення однієї події недостатньо. Тут необхідно виконання кругового руху (повороту) барабана навколо своєї осі (здійснення події p_1) та поступального переміщення барабана вздовж цієї осі (здійснення події p_{11}); вісь барабана у разі паралельна осі Z . Обидві події p_1 і p_{11} можуть відбуватися одночасно чи послідовно.

При одній і тій же морфологічній організації АНС можливі різні варіанти часової реалізації подій, які виконують її компоненти. Альтернативний перелік можливих варіантів послідовностей здійснення подій (виконання рухів компонентами АНС) у процесі функціонування можна побудувати за даними її матричної моделі, що відображає морфологічну організацію АНС.

У просторовій логіці виділяють три типи систем відліку (тривимірні шкали): абсолютну, відносну та розміту. Різні типи шкал визначають різні типи логік. З них у межах розв'язуваної задачі важливими є метричні просторові логіки з абсолютними та відносними системами відліку. Системи відліку можуть

стосуватися просторових характеристик різного типу: відстаней, напрямів, взаємного розташування об'єктів у просторі.

Просторові відношення типу «над», «під», «всередині» тощо називають просторовими відношеннями взаємного розташування (ПВВР) [38]. Далі будемо позначати ці відношення літерою R та використовувати їх для побудови (синтезу) множини можливих альтернативних варіантів структурно-компонувальних рішень АНС.

У логіці взаємного розташування базових компонентів АНС з огляду на їх об'ємність розглядається тривимірний простір.

За допомогою логічних операцій (\wedge – кон'юнкція (логічне «і»); \vee – диз'юнкція (логічне «або»); \rightarrow імплікація (логічне «якщо..., то...»); \neg (not) заперечення; \forall – квантор загальності (логічне «для кожного (для всіх)»)) [39] з базових просторових відношень (див. табл. Б.1) можна отримати потрібні похідні відношення. Дані просторові відношення орієнтовані на відображення структурно-компонувальних характеристик АНС.

3.3. Принципи синтезу автоматизованих накопичувальних систем на основі матричних моделей

У даному розділі запропоновано методикау направлено синтезу структурно-компонувальних рішень АНС. В основу запропонованого евристичного підходу до синтезу структурно-компонувальних рішень АНС покладено такі засади:

1. Вихідними даними для вирішення задачі структурно-компонувального синтезу АНС є результати перетворення базової (вихідної) $m \times n$ -матриці H на різні блокові матриці H'_i , $i = 1 \div p$, орієнтованих за своїм змістом на вирішення поставленого завдання. При тотожному перетворенні базова матриця перетворюється сама на себе, тобто $H = H'_i$. Перетворення (розбиття) матриці H на блокові матриці H'_1, H'_2, \dots, H'_i виконується за правилами матричного аналізу [25].

Елементи блокової матриці H' моделюють окремі (автономні) секції накопичувача. Кожна секція накопичувача забезпечена комірками для зберігання в них виробів. Комірки на несучій поверхні можуть розташовуватися в один і більше рядів. Загальна кількість рядів, що містяться в накопичувачі, дорівнює сумі комірок всіх його секцій і це число дорівнює розмірності $m \times n$ -матриці, тобто числу mn . При будь-якому перетворенні базової матриці H в блокову матрицю H' загальна кількість елементів всіх блоків матриці H' зберігається постійною і рівна mn .

2. Основними компонентами матричної моделі АНС є: накопичувач (базова матриця H); платформа накопичувача (блокова матриця H' , отримана після перетворення матриці H); секції накопичувача (підматриці, блоки матриці H); приводи, що забезпечують накопичувачу, платформі, секціям накопичувача круговий рух (циклічні матриці C , $C' = CT$, де T – оператор транспонованої матриці); приводи, які забезпечують зворотно-поступальний рух вперед і назад, або вгору-вниз (1-наддіагональні та 1-піддіагональні матриці P і P' відповідно).

Множення матриць-накопичувачів на матрицю C' має місце тоді, коли накопичувач може здійснювати реверсивні рухи. Множення матриць-накопичувачів на матрицю C імітує круговий рух накопичувача за годинниковою стрілкою, а множення на матрицю C' імітує переміщення проти годинникової стрілки.

Базова $m \times n$ -матриця імітує накопичувач, що містить n рядів комірок. Блокова матриця H' імітує платформу (каркас) накопичувача, на якій монтуються всі його автономні секції. У процесі функціонування платформа накопичувача здійснює кругові чи поступальні рухи. Автономність секцій проявляється у можливості їх переміщення незалежно від руху платформи. Секції накопичувача імітують окремі частини накопичувача і можуть бути забезпечені загальними чи індивідуальними приводами.

3. Комірконесучі поверхні розташовані на площині циліндричної поверхні накопичувача (барабану). Якщо накопичувач має форму диска, то комірки для виробів розміщуються або по колу на його торцевій поверхні, або на

циліндричній поверхні. Якщо накопичувач має прямокутну форму і здійснює лише поступальні рухи, то комірки для виробів розміщуються або на торцевій його поверхні, або по зовнішньому периметру.

4. Структура блокової матриці H' , одержана після перетворення матриці H , описує закономірності взаємного розташування секцій накопичувача одна відносно одної, тобто просторову організацію (морфологію) накопичувача. При множенні матриць H , H' та підматриць на матриці (приводи) C , C' , P , P' моделюється морфологічна та функціональна організація АНС. В результаті зростає ступінь конкретизації взаємного розташування елементів накопичувача один відносно одного та в просторі (описується логіка положення) і більш повно розкриваються можливі взаємозумовлені рухи компонентів АНС у процесі її функціонування (описується логіка рухів).

3.4. Генерування множини структурно-компонувальних рішень автоматизованих накопичувальних систем

У даному підрозділі наведено генерування множини можливих варіантів структурно-компонувальних рішень АНС з різними рівнями ієрархії на прикладі АНС, які здійснюють кругові рухи. Це зумовлено тим, що АНС з динамічним накопичувачем, що здійснює поступальні рухи, має більший розмах і, як наслідок, займає більшу виробничу площу.

Варіант 1. Початкова $m \times n$ -матриця H перетворюється внаслідок тотожного перетворення сама на себе.

Нехай $m = 4$ і $n = 4$ тоді отримаємо:

$$H = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}$$

Множення матриці H справа на циклічну матрицю C n -го порядку імітує обертальний рух накопичувача:

$$C = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

При цьому накопичувач має форму барабана (циліндра), що обертається навколо вертикальної осі. Комірки (ніші) для зберігання виробів розташовані ярусами на циліндричній поверхні барабана. Для переміщення комірки із заданою адресою в зону приймання та видачі виробів необхідно задати барабану 1 рух вгору (вниз) вздовж вертикальної осі на задане число кроків (рис. В.1).

Для імітації вертикального переміщення барабана необхідно попередньо перетворити матрицю H на матрицю H_1 і помножити останню зліва відповідне число разів на 1-наддіагональну P або на 1-піддіагональну $P' = PT$ матрицю:

$$P = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}; H_1 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}.$$

Опис АНС з допомогою матричної моделі залежить від послідовності здійснення двох подій: p_1 – круговий рух накопичувача навколо вертикальної осі та p_3 – поступальне переміщення вздовж цієї осі.

Тут можуть мати місце три випадки:

1) $p_1 \tau_0 p_3$ – події p_1 та p_3 відбуваються одночасно. Тоді матрична модель матиме вигляд;

$$(P^{h_2} \oplus P^{h_3})H_1^{h_1, k_1} C^{k_2} = H_1^{(h_1+h_2, k_1+k_2)} \oplus H_1^{(h_1+h_3, k_1+k_2)}; \quad (3.1)$$

Обмеження: $0 \leq h_1 + h_2 \leq m - 1$; $0 \leq h_1 + h_3 \leq m - 1$; $1 \leq k_1 + k_2 \leq n - 1$,

де (h_1, k_1) – координати положення барабана (накопичувача) у початковому стані;

h_1 – координата положення барабана щодо початку відліку вздовж вертикальної осі;

k_1 – кругова (кутова координата);

h_2 – задане число кроків при поступальному переміщенні барабана вертикально вгору;

h_3 – задане число кроків при поступальному переміщенні барабана вертикально вниз;

k_2 – задане число кроків, що виконуються барабаном при круговому русі.

Тривалість $t_{\text{ком}}$ переміщення комірки із заданою адресою в зону приймання і видачі дорівнює $t_{\text{ком}} = \max\{t_n, t_{\text{п}}\}$, де t_n – тривалість повороту накопичувача на задане число кроків, $t_{\text{п}}$ – тривалість поступального переміщення накопичувача вздовж вертикальної осі на задане число кроків .

2) $p_1 \tau_1 p_3$ – подія p_1 відбувається раніше, ніж подія p_3 . Представимо це у вигляді відповідної матричної моделі:

$$(P^{h_2} \oplus P^{h_3})[H_1^{h_1, k_1} C^{k_2}] = H_1^{(h_1+h_2, k_1+k_2)} \oplus H_1^{(h_1+h_3, k_1+k_2)}. \quad (3.2)$$

3) $p_1 \tau_2 p_3$ – подія p_1 відбувається пізніше, ніж подія p_3 . Побудуємо матричну модель:

$$[(P^{h_2} \oplus P^{h_3})H_1^{h_1, k_1}]C^{k_2} = H_1^{(h_1+h_2, k_1+k_2)} \oplus H_1^{(h_1+h_3, k_1+k_2)}. \quad (3.3)$$

Як видно з моделей (3.2), (3.3), обмеження для $h_1 + h_2$, $h_1 + h_3$, $k_1 + k_2$ залишаються такими самими, як і в моделі (3.1). Моделі (3.2) і (3.3) відображають випадки послідовного виконання накопичувачем кругового і поступального рухів. У цих випадках тривалість переміщення комірки із заданою адресою буде визначатись як $t_{\text{ком}} = t_n + t_{\text{п}}$.

За даними моделі (3.1) накопичувач-барабан (див. рис. В.1) здійснює нереверсивний круговий рух (рух за годинниковою стрілкою). Для забезпечення

кругового руху накопичувача проти годинникової стрілки необхідно помножити матрицю H_1 справа на циклічну матрицю $C' = CT$. Тоді матрична модель АНС з реверсивним приводом руху матиме вигляд:

$$(P^{h_2} \oplus P^{h_3})H_1^{(h_1, k_1)}(C^{k_2} \oplus C^{k_2}) = H_1^{(h_1+h_2, k_1+k_2)} \oplus H_1^{(h_1+h_3, k_1+k_2)} \oplus H_1^{(h_1+h_2, k_1+k_3)} \oplus H_1^{(h_1+h_3, k_1+k_3)}. \quad (3.4)$$

$$0 \leq h_1 + h_2 \leq m - 1; 0 \leq h_1 + h_3 \leq m - 1; 1 \leq k_1 + k_2 \leq \frac{n}{2}; 1 \leq k_1 + k_3 \leq \frac{n}{2}.$$

Варіант 2. Початкова матриця H перетвориться на блокову матрицю H_2 :

$$H_2 = \begin{bmatrix} H_{2.1} \\ H_{2.2} \\ H_{2.3} \\ H_{2.4} \end{bmatrix};$$

$$H_{2.1} = \|a_{11} \ a_{12} \ a_{13} \ a_{14}\|;$$

$$H_{2.2} = \|a_{21} \ a_{22} \ a_{23} \ a_{24}\|;$$

$$H_{2.3} = \|a_{31} \ a_{32} \ a_{33} \ a_{34}\|;$$

$$H_{2.4} = \|a_{41} \ a_{42} \ a_{43} \ a_{44}\|.$$

Блокова матриця H_2 виконує роль платформи накопичувача, що несе на собі секції $H_{2.1}, H_{2.2}, H_{2.3}, H_{2.4}$, обладнані комірками для зберігання виробів.

На множині блоків $H_{2.1}, H_{2.2}, H_{2.3}, H_{2.4}$ задані такі відношення: унарне відношення R_1 – мати горизонтальне положення, R_{13} – бути паралельно, R_{19} – не стикатися.

Як і при побудові моделі (3.1), тут можуть бути три різні послідовності здійснення подій p_1 і p_3 :

1) $p_1 \tau_0 p_3$ – поворот однієї з секцій навколо вертикальної осі і поступальне переміщення накопичувача в цілому вздовж цієї осі на задане число кроків відбувається одночасно:

$$(P^{h_2} \oplus P^{h_3})H_2^{h_1} \wedge (H_{2.1}^{k_1} \oplus H_{2.2}^{k_2} \oplus H_{2.3}^{k_3} \oplus H_{2.4}^{k_4})C^{k_5} = H_2^{h_1+h_2} \oplus \oplus H_2^{h_1+h_3}) \wedge (H_{2.1}^{k_1+k_5} \oplus H_{2.2}^{k_2+k_5} \oplus H_{2.3}^{k_3+k_5} \oplus H_{2.4}^{k_4+k_5}). \quad (3.5)$$

Матрична модель описує АНС, накопичувач якої складається з розміщених один над одним секцій-накопичувачів, кожна з яких має форму диска (рис. В.2).

Секції накопичувача $H_{2.1}$, $H_{2.2}$, $H_{2.3}$, $H_{2.4}$ мають можливість незалежного повороту на задану кількість кроків (що задаються програмою) навколо загальної вертикальної осі від одного приводу. У будь-який момент може повертатися лише одна із секцій накопичувача. Комірки для зберігання виробів розташовані на циліндричній поверхні секцій. Для переміщення комірки із заданою адресою в зону прийому та видачі виробу відповідна секція здійснює поворот на k_5 кроків та поступальний рух вздовж вертикальної осі вгору на h_5 кроків або вниз на h_6 кроків.

У моделі (3.5) секції накопичувача мають можливість повороту лише в один бік (за годинниковою стрілкою). Для забезпечення реверсивного руху необхідно підматриці $H_{2.1}$, $H_{2.2}$, $H_{2.3}$, $H_{2.4}$ помножити справа на циклічні матриці C або $C' = CT$:

$$(P^{h_2} \oplus P^{h_3})H_2^{h_1} \wedge (H_{2.1}^{k_1} \oplus H_{2.2}^{k_2} \oplus H_{2.3}^{k_3} \oplus H_{2.4}^{k_4})(C^{k_5} \oplus C^{k_6} = = H_2^{h_1+h_2} \oplus H_2^{h_1+h_3}) \wedge (H_{2.1}^{(k_1+k_5) \oplus (k_1+k_6)} \oplus H_{2.2}^{(k_2+k_5) \oplus (k_2+k_6)} \oplus \oplus H_{2.3}^{(k_3+k_5) \oplus (k_3+k_6)} \oplus H_{2.4}^{(k_4+k_5) \oplus (k_4+k_6)}). \quad (3.6)$$

$$0 \leq h_1 + h_2 \leq m - 1; 0 \leq h_1 + h_3 \leq m - 1; 1 \leq k_1 + k_5 \leq \frac{n}{2};$$

$$1 \leq k_1 + k_6 \leq \frac{n}{2}; 1 \leq k_2 + k_5 \leq \frac{n}{2}; 1 \leq k_2 + k_6 \leq \frac{n}{2};$$

$$1 \leq k_3 + k_5 \leq \frac{n}{2}; 1 \leq k_3 + k_6 \leq \frac{n}{2}; 1 \leq k_4 + k_5 \leq \frac{n}{2}; 1 \leq k_4 + k_6 \leq \frac{n}{2}.$$

2) $p_1 \tau_1 p_3$ – подія p_1 відбувається раніше, ніж подія p_3 :

$$(P^{h_2} \oplus P^{h_3})H_2^{h_1} \wedge [(H_{2.1}^{k_1} \oplus H_{2.2}^{k_2} \oplus H_{2.3}^{k_3} \oplus H_{2.4}^{k_4})C^{k_5}] = (H_2^{h_1+h_2} \oplus H_2^{h_1+h_3}) \wedge \wedge (H_{2.1}^{k_1+k_5} \oplus H_{2.2}^{k_2+k_5} \oplus H_{2.3}^{k_3+k_5} \oplus H_{2.4}^{k_4+k_5}) \quad (3.7)$$

3) $p_1 \tau_2 p_3$ – подія p_1 відбувається пізніше, ніж подія p_3 :

$$[(P^{h_2} \oplus P^{h_3})H_2^{h_1}] \wedge (H_{2.1}^{k_1} \oplus H_{2.2}^{k_2} \oplus H_{2.3}^{k_3} \oplus H_{2.4}^{k_4})C^{k_5} = (H_2^{h_1+h_2} \oplus H_2^{h_1+h_3}) \wedge \\ \wedge (H_{2.1}^{k_1+k_5} \oplus H_{2.2}^{k_2+k_5} \oplus H_{2.3}^{k_3+k_5} \oplus H_{2.4}^{k_4+k_5}) \quad (3.8)$$

На моделі (3.5), (3.7), (3.8) накладається система обмежень:

$$0 \leq h_1 + h_2 \leq m - 1; 0 \leq h_1 + h_3 \leq m - 1; 1 \leq k_1 + k_5 \leq n - 1; \\ 1 \leq k_2 + k_5 \leq n - 1; 1 \leq k_3 + k_5 \leq n - 1; 1 \leq k_4 + k_5 \leq n - 1.$$

У моделях (3.5)–(3.8) поворот (круговий рух) кожної секції накопичувача здійснюється від одного і того ж приводу, що імітується матрицею C . Наявність у виразі $(H_{2.1}^{k_1} \oplus H_{2.2}^{k_2} \oplus H_{2.3}^{k_3} \oplus H_{2.4}^{k_4})C^{k_5}$ знака виключної диз'юнкції \oplus вказує на те, що в кожен момент часу привод може повертати на задане число кроків k_s лише одну з секцій $H_{2.1}, H_{2.2}, H_{2.3}, H_{2.4}$ накопичувача. Всі секції змонтовані на одній платформі (каркасі), яка має можливість поступального переміщення на задану кількість кроків вгору h_2 або вниз h_3 вздовж вертикальної осі повороту секцій.

У випадку наявності для кожної секції $H_{2.1}, H_{2.2}, H_{2.3}, H_{2.4}$ індивідуального приводу C_1, C_2, C_3, C_4 відповідно ці секції отримують можливість повороту на задану кількість кроків незалежно один від одного. У цьому випадку матрична модель АНС набуває вигляду:

$$(P^{h_2} \oplus P^{h_3})H_2^{h_1} \wedge (H_{2.1}^{k_1}C_1^{k_2} \vee H_{2.2}^{k_3}C_1^{k_4} \vee H_{2.3}^{k_5}C_1^{k_6} \vee H_{2.4}^{k_7}C_1^{k_8}) = (H_2^{h_1+h_2} \oplus \\ \oplus H_2^{h_1+h_3}) \wedge (H_{2.1}^{k_1+k_2} \oplus H_{2.2}^{k_3+k_4} \oplus H_{2.3}^{k_5+k_6} \oplus H_{2.4}^{k_7+k_8}). \quad (3.9)$$

Варіант 3. Початкова матриця H перетвориться на блокову матрицю H_3 :

$$H_3 = \parallel H_{3.1} \ H_{3.2} \parallel$$

$$H_{3.1} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \end{vmatrix}; \quad H_{3.2} = \begin{vmatrix} a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}.$$

Блоки (підматриці) $H_{3.1}$ і $H_{3.2}$ відображає секції накопичувача, а блокова матриця H_3 – платформу, де змонтовані ці секції.

На множині секцій $H_{3.1}$, $H_{3.2}$ задані бінарні відношення: R_1 – мати горизонтальне положення; R_{13} – бути паралельно; R_{15} – бути симетрично; R_{19} – не стикатися; R_{22} – перебувати на однаковому рівні.

Для забезпечення переміщення комірки із заданою адресою в зону приймання та видачі виробів необхідно надати платформі поступального і поворотного рухів шляхом множення матриці H_3 зліва на 1-наддіагональну матрицю P або 1-піддіагональну матрицю P' і множення цієї матриці справа на циклічну матрицю C_1 відповідну кількість разів, а для надання поворотних рухів навколо вертикальної осі секціям $H_{3.1}$ і $H_{3.2}$ необхідно помножити їх справа на циклічну матрицю C_2 . Отримане в результаті вказаних перетворень структурно-компонувальне рішення АНС представлено на рис. В.3.

У процесі функціонування АНС події p_4 , p_5 , p_7 можуть відбуватися в різній послідовності. Нижче представлений альтернативний перелік можливих варіантів послідовностей здійснення подій p_4 , p_5 , p_7 (прийняті позначення: $p \tau_0 q$ – подія p відбувається одночасно з подією q ; $p \tau_1 q$ – подія p відбувається раніше, ніж подія q ; $p \tau_2 q$ – подія p відбувається пізніше, ніж подія q).

- 1) $p_4 \tau_0 p_5 \wedge p_5 \tau_0 p_7 \Rightarrow p_4 \tau_0 p_7$;
- 2) $p_4 \tau_0 p_5 \wedge p_4 \tau_1 p_7 \Rightarrow p_5 \tau_1 p_7$;
- 3) $p_4 \tau_0 p_5 \wedge p_7 \tau_1 p_4 \Rightarrow p_7 \tau_1 p_5$;
- 4) $p_5 \tau_0 p_7 \wedge p_4 \tau_1 p_5 \Rightarrow p_4 \tau_1 p_7$;
- 5) $p_5 \tau_0 p_7 \wedge p_5 \tau_1 p_4 \Rightarrow p_7 \tau_1 p_4$;
- 6) $p_4 \tau_0 p_7 \wedge p_4 \tau_1 p_5 \Rightarrow p_7 \tau_1 p_5$;
- 7) $p_4 \tau_0 p_7 \wedge p_5 \tau_1 p_4 \Rightarrow p_5 \tau_1 p_7$;
- 8) $p_4 \tau_1 p_5 \wedge p_5 \tau_1 p_7 \Rightarrow p_4 \tau_1 p_7$.

Послідовності виконання подій $p_4 \tau_0 p_5 \wedge p_5 \tau_0 p_7$ відповідає матрична модель АНС:

$$\begin{aligned}
 (P^{h_2} \oplus P^{h_3})H_2^{h_1, k_1} C_1^{k_2} \wedge (H_{3.1}^{k_3} \oplus H_{3.2}^{k_4})C_2^{k_5} = & (H_3^{h_1+h_2, k_1+k_2} \oplus H_3^{h_1+h_3, k_1+k_2}) \wedge \\
 & \wedge (H_{3.1}^{k_3+k_5} \oplus H_{3.2}^{k_4+k_5}); \quad (3.10) \\
 0 \leq h_1 + h_2 \leq \frac{m}{2}; \quad 0 \leq h_1 + h_3 \leq \frac{m}{2} - 1; \quad 1 \leq k_1 + k_2 \leq n - 1; \\
 1 \leq k_3 + k_5 \leq n - 1; \quad 1 \leq k_4 + k_5 \leq n - 1.
 \end{aligned}$$

Модель (3.10) описує випадок, коли всі рухи платформи і секцій, необхідні для переміщення комірки із заданою адресою в зону приймання та видачі виробу, відбуваються одночасно. При цьому тривалість переміщення комірки в зону приймання та видачі становитиме $t_{\text{ком}} = \max\{t_{\text{к.пл.}}, t_{\text{п.пл.}}, t_{\text{к.с.}}\}$, де $t_{\text{к.пл.}}$ – тривалість переміщення платформи навколо вертикальної осі; $(t_{\text{п.пл.}})$ – тривалість поступального переміщення платформи; $t_{\text{к.с.}}$ – тривалість обертання секції накопичувача на крок.

При послідовному здійсненні подій p_4, p_5, p_7 , тобто при послідовності $p_4 \tau_1 p_5 \wedge p_5 \tau_1 p_7 \Rightarrow p_4 \tau_1 p_7$, матрична модель набуде вигляду:

$$\begin{aligned}
 [(P^{h_2} \oplus P^{h_3})[H_3^{h_1, k_1} C_1^{k_2}]^{(1)}]^{(2)} \wedge [(H_{3.1}^{k_3} \oplus H_{3.2}^{k_4})C_2^{k_5}]^{(3)} = & (H_3^{h_1+h_2, k_1+k_2} \oplus \\
 & \oplus H_3^{h_1+h_3, k_1+k_2}) \wedge (H_{3.1}^{k_3+k_5} \oplus H_{3.2}^{k_4+k_5}). \quad (3.11)
 \end{aligned}$$

Індекси над квадратними дужками вказують на послідовність завершення подій p_4, p_5, p_7 .

З моделі (3.11) видно, що спочатку відбувається поворот платформи навколо вертикальної осі на кроків k_2 , потім поступальний рух платформи вгору на h_1 кроків або вниз на h_2 кроків, після цього секція $H_{3.1}$ або секція $H_{3.2}$ здійснює круговий рух на k_5 кроків. Тривалість переміщення комірки із заданою адресою в зону приймання та видачі при такій послідовності здійснення подій становитиме: $t_{\text{ком}} = t_{\text{к.пл.}} + t_{\text{п.пл.}} + t_{\text{к.с.}}$.

При послідовності $p_4 \tau_0 p_5 \wedge p_4 \tau_1 p_7 \Rightarrow p_5 \tau_1 p_7$ здійснення подій p_4, p_5, p_7 матрична модель набуде виду:

$$[(P^{h2} \oplus P^{h3})H_3^{h1,k1} C_1^{k2}] \wedge (H_{3.1}^{k3} \oplus H_{3.2}^{k4})C_2^{k5} = H_3^{h1+h2,k1+k2} \oplus H_3^{h1+h3,k1+k2} \wedge (H_{3.1}^{k3+k5} \oplus H_{3.2}^{k4+k5}). \quad (3.12)$$

Модель (3.12) описує випадок, коли спочатку платформа накопичувача одночасно здійснює круговий рух навколо вертикальної осі та поступальний рух вздовж цієї осі, а потім секції накопичувача повертаються навколо вертикальної осі. Тривалість переміщення комірки із заданою адресою в зону приймання і видачі виробу при цьому становитиме $t_{\text{ком}} = \max\{t_{\text{к.пл.}}, t_{\text{п.пл.}}\} t_{\text{к.с.}}$.

Система обмежень у моделях (3.11), (3.12) така ж сама, як і у моделі (3.10).

Моделі (3.10), (3.11), (3.12) описують АНС, у яких круговий рух секцій $H_{3.1}$ і $H_{3.2}$ забезпечується одним загальним приводом. За наявності індивідуальних приводів секцій, що забезпечують можливість їхнього повороту незалежно один від одного, матрична модель АНС має деякі відмінності від розглянутих вище моделей:

$$(P^{h2} \oplus P^{h3})H_3^{h1,k1} C_1^{k2} \wedge (H_{3.1}^{k3} C_2^{k4} \oplus H_{3.2}^{k4} C_2^{k5}) = (H_3^{h1+h2,k1+k2} \oplus \oplus H_3^{h1+h3,k1+k2}) \wedge (H_{3.1}^{k3+k4} \oplus H_{3.2}^{k5+k6}). \quad (3.13)$$

Моделі (3.10)–(3.13) відображають випадки, коли поступальний рух вздовж вертикальної осі, необхідний для переміщення комірки із заданою адресою в зону приймання та видачі виробу в АНС, здійснює платформа накопичувача. При великій масі конструкції накопичувача в цілому і маси виробів, що зберігаються в комірках секцій, погіршуються динамічні характеристики всієї АНС. Цього можна значною мірою уникнути, якщо поступальний рух вгору і вниз (піднімання і опускання) у процесі функціонування здійснюватиме не платформа, а секції накопичувача $H_{3.1}, H_{3.2}$. У цьому випадку платформа H_3 здійснюватиме лише

кругові рухи. При такій системній організації АНС її матрична модель матиме вигляд:

$$H_3^{k1} C_1^{k2} \wedge (P^{h3} \oplus P^{h4})(H_{3.1}^{h1,k3} \oplus H_{3.2}^{h2,k4}) C_2^{k5} = H_3^{k1+k2} \wedge (H_{3.1}^{h1+h3,k3+k5} \oplus \oplus H_{3.1}^{h1+h4,k3+k5} \oplus H_{3.1}^{h2+h3,k4+k5} \oplus H_{3.2}^{h2+h4,k4+k5}). \quad (3.14)$$

Модель (3.14) описує випадок, коли обидві секції $H_{3.1}$ та $H_{3.2}$ мають один загальний привод піднімання і опускання та загальний привод, що забезпечує секціям можливість виконання кругового руху.

Нижче представлена матрична модель АНС, у якій секції накопичувача мають індивідуальні приводи піднімання і опускання та приводи кругового руху:

$$H_3^{k1} C_1^{k2} \wedge (P_1^{h3} \oplus P_1^{h4}) H_{3.1}^{h1,k3} C_2^{k4} \wedge (P_2^{h5} \oplus P_1^{h6}) H_{3.2}^{h4,k5} C_3^{k6} = H_3^{k1+k2} \wedge \wedge (H_{3.1}^{h1+h2,k3+k4} \oplus H_{3.1}^{h1+h3,k3+k4} \oplus H_{3.2}^{h4+h4,k5+k6} \oplus H_{3.2}^{h4+h6,k5+k6}). \quad (3.15)$$

В даному випадку в процесі функціонування АНС секції накопичувача $H_{3.1}$ та $H_{3.2}$ можуть незалежно один від одного здійснювати кругові та поступальні рухи. За наявності такої автономії секція АНС стає мобільнішою, а реалізований системою матеріальний потік гнучкішим.

Варіант 4. Початкова $m \times n$ -матриця H перетвориться на блокову матрицю H_4 :

$$\begin{aligned} H_4 &= \parallel H_{4.1} \ H_{4.2} \ H_{4.3} \ H_{4.4} \parallel \\ H_{4.1} &= \parallel a_{11} \ a_{12} \ a_{13} \ a_{14} \parallel; \\ H_{4.2} &= \parallel a_{21} \ a_{22} \ a_{23} \ a_{24} \parallel; \\ H_{4.3} &= \parallel a_{31} \ a_{32} \ a_{33} \ a_{34} \parallel; \\ H_{4.4} &= \parallel a_{41} \ a_{42} \ a_{43} \ a_{44} \parallel. \end{aligned}$$

Блокова матриця H_4 виконує функцію платформи накопичувача, а підматриці (блоки) $H_{4.1}$, $H_{4.2}$, $H_{4.3}$, $H_{4.4}$ цієї матриці – функцію секцій накопичувача.

На множині секцій накопичувача $H_{4.1}, H_{4.2}, H_{4.3}, H_{4.4}$ задані відношення R_1 – мати горизонтальне положення, R_{11} – перебувати на одній площині, R_{12} – перебувати на краю, R_{15} – бути симетричним, R_{22} – перебувати на однаковому рівні, R_{23} – бути рівно віддаленими.

При множенні матриці H_4 справа на циклічну матрицю C_1 та множенні підматриць (блоків) $H_{4.1}, H_{4.2}, H_{4.3}, H_{4.4}$ справа на циклічну матрицю C_2 платформа накопичувача та його секції здійснюють круговий рух навколо вертикальної осі в горизонтальній площині (рис. В.4).

У процесі функціонування АНС події p_4 і p_7 можуть відбуватися у різній послідовності. Кожній такій послідовності у відповідність ставиться цілком визначений опис матричної моделі АНС:

– $p_4 \tau_0 p_7$ – платформа H_4 та секції $H_{4.1}, H_{4.2}, H_{4.3}, H_{4.4}$ здійснюють кругові рухи одночасно:

$$H_4^{k_1} C_1^{k_2} \wedge (H_{4.1}^{k_3} \oplus H_{4.2}^{k_4} \oplus H_{4.3}^{k_5} \oplus H_{4.4}^{k_6}) C_2^{k_7} = H_4^{k_1+k_2} \wedge (H_{4.1}^{k_3+k_7} \oplus H_{4.2}^{k_4+k_7} \oplus H_{4.3}^{k_5+k_7} \oplus H_{4.4}^{k_6+k_7}); \quad (3.16)$$

$$1 \leq k_1 + k_2 \leq m - 1; 1 \leq k_3 + k_7 \leq m - 1; 1 \leq k_4 + k_7 \leq m - 1;$$

$$1 \leq k_5 + k_7 \leq m - 1; 1 \leq k_6 + k_7 \leq m - 1.$$

Тривалість переміщення комірки в зону приймання і видачі виробів в даному випадку становитиме: $t_{\text{ком}} = \max\{t_{\text{к.пл.}}, t_{\text{к.с}}\}$;

– $p_4 \tau_1 p_7$ – платформа H_4 виконує кругові рухи раніше, ніж секції $H_{4.1}, H_{4.2}, H_{4.3}, H_{4.4}$:

$$[H_4^{k_1} C_1^{k_2}] \wedge (H_{4.1}^{k_3} \oplus H_{4.2}^{k_4} \oplus H_{4.3}^{k_5} \oplus H_{4.4}^{k_6}) C_2^{k_7} = H_4^{k_1+k_2} \wedge (H_{4.1}^{k_3+k_7} \oplus H_{4.2}^{k_4+k_7} \oplus H_{4.3}^{k_5+k_7} \oplus H_{4.4}^{k_6+k_7}); \quad (3.17)$$

– $p_4 \tau_2 p_7$ – платформа H_4 обертається після того, як кругові рухи виконають секції $H_{4.1}, H_{4.2}, H_{4.3}, H_{4.4}$:

$$H_4^{k1} C_1^{k2} \wedge [(H_{4.1}^{k3} \oplus H_{4.2}^{k4} \oplus H_{4.3}^{k5} \oplus H_{4.4}^{k6}) C_2^{k7}] = H_4^{k1+k2} \wedge (H_{4.1}^{k3+k7} \oplus H_{4.2}^{k4+k7} \oplus \oplus H_{4.3}^{k5+k7} \oplus H_{4.4}^{k6+k7}); \quad (3.18)$$

При послідовному здійсненні подій p_4 і p_7 тривалість переміщення комірки із заданою адресою в зону приймання та видачі виробів буде становити:

$$t_{\text{КОМ}} = t_{\text{к.пл.}} + t_{\text{к.с.}}$$

Для забезпечення можливості одночасного обслуговування кількох одиниць технологічного обладнання, розташованих навколо АНС, необхідно кожену секцію накопичувача $H_{4.1}$, $H_{4.2}$, $H_{4.3}$, $H_{4.4}$ забезпечити індивідуальним приводом, що забезпечує можливість їх повороту незалежно один від одного в будь-який час задану кількість кроків. У такому випадку матрична модель АНС матиме вигляд:

$$H_4^{k1} C_1^{k2} \wedge (H_{4.1}^{k3} C_1^{k4} \vee H_{4.2}^{k5} C_2^{k6} \vee H_{4.3}^{k7} C_3^{k8} \vee H_{4.4}^{k9} C_4^{k10}) = H_4^{k1+k2} \wedge (H_{4.1}^{k3+k4} \vee \vee H_{4.2}^{k5+k6} \vee H_{4.3}^{k7+k8} \vee H_{4.4}^{k9+k10}); \quad (3.19)$$

Варіант 5. Початкова $m \times n$ -матриця H перетвориться в блокову матрицю H_5 :

$$H_5 = \parallel H_{5.1} \ H_{5.2} \parallel;$$

$$H_{5.1} = \parallel a_{11} \ a_{12} \ a_{13} \ a_{14} \ a_{21} \ a_{22} \ a_{23} \ a_{24} \parallel;$$

$$H_{5.2} = \parallel a_{31} \ a_{32} \ a_{33} \ a_{34} \ a_{41} \ a_{42} \ a_{43} \ a_{44} \parallel.$$

При такому перетворенні матриці H сталося збільшення місткості (кількості комірок) у кожній секції шляхом попарної конкатенації (операція об'єднання об'єктів лінійної структури). рядків цієї матриці за збереження сумарної місткості накопичувача, що дорівнює $m \times n$. Внаслідок цього кількість секцій у накопичувачі порівняно з моделями (3.16)–(3.19) зменшилась вдвічі.

На множині підматриць $H_{5.1}$ та $H_{5.2}$ мають місце відношення $R_1, R_{11}, R_{12}, R_{15}, R_{22}, R_{23}$ (такі ж, які були при побудові моделі (3.16)).

При множенні справа матриці H_5 та її підматриці $H_{5.1}$ та $H_{5.2}$ на відповідні циклічні матриці C_1 та C_2 отримаємо матричні моделі АНС, представленої на рис.

В.5:

– при одночасному виконанні кругових рухів платформою та секціями, тобто $p_4 \tau_0 p_7$:

$$H_5^{k_1} C_1^{k_2} \wedge (H_{5.1}^{k_3} \oplus H_{5.2}^{k_4}) C_2^{k_5} = H_5^{k_1+k_2} \wedge (H_{5.1}^{k_3+k_5} \oplus H_{5.2}^{k_4+k_5}); \quad (3.20)$$

$$1 \leq k_1 + k_2 \leq n - 1; 1 \leq k_3 + k_5 \leq 2n - 1; 1 \leq k_4 + k_5 \leq 2n - 1.$$

– при послідовності реалізації подій $p_4 \tau_1 p_7$:

$$[H_5^{k_1} C_1^{k_2}] \wedge (H_{5.1}^{k_3} \oplus H_{5.2}^{k_4}) C_2^{k_5} = H_5^{k_1+k_2} \wedge (H_{5.1}^{k_3+k_5} \oplus H_{5.2}^{k_4+k_5}); \quad (3.21)$$

– при послідовності реалізації подій $p_4 \tau_2 p_7$:

$$H_5^{k_1} C_1^{k_2} \wedge [(H_{5.1}^{k_3} \oplus H_{5.2}^{k_4}) C_2^{k_5}] = H_5^{k_1+k_2} \wedge (H_{5.1}^{k_3+k_5} \oplus H_{5.2}^{k_4+k_5}); \quad (3.22)$$

У моделях (3.20), (3.21), (3.22) секції $H_{5.1}$ та $H_{5.2}$ мають загальний привод, що забезпечує їм круговий рух. У цих умовах у кожний момент часу круговий рух може здійснювати тільки одна з секцій $H_{5.1}$ або $H_{5.2}$. Для надання більшої мобільності, гнучкості, що дозволяє АНС одночасно обслуговувати кілька одиниць технологічного обладнання і одночасно здійснювати обмін виробів із зовнішнім середовищем, необхідно кожен секцію забезпечити індивідуальним приводом. Тоді матрична модель набуде вигляду:

$$H_5^{k_1} C_1^{k_2} \wedge (H_{5.1}^{k_3} C_1^{k_4} \vee H_{5.2}^{k_4}) C_3^{k_6} = H_5^{k_1+k_2} \wedge (H_{5.1}^{k_3+k_4} \vee H_{5.2}^{k_5+k_6}). \quad (3.23)$$

Варіант 6. Початкова $m \times n$ -матриця H перетворюється в блокову матрицю H_6 :

$$H_6 = \|a_{11} \ a_{12} \ a_{13} \ a_{14} \ a_{21} \ a_{22} \ a_{23} \ a_{24} \ a_{31} \ a_{32} \ a_{33} \ a_{34} \ a_{41} \ a_{42} \ a_{43} \ a_{44}\|;$$

Як можна бачити, перетворення матриці у даному разі зведено до конкатенації рядків початкової матриці H . На множині елементів матриці $\{a_{ij}, i=1 \div m, j=1 \div n\}$ задані відношення R_1 – мати горизонтальне положення, R_{12} – перебувати на краю, R_{15} – бути симетрично, R_{24} – знаходитися концентрично, R_{25} – зміщуватися від центру.

При множенні матриці H_6 справа на циклічну матрицю C , отримаємо матричну модель АНС (рис. В.6):

$$H_6^{k1} C^{k2} = H_6^{k1+k2}. \quad (3.24)$$

При такій моноблоковій морфологічній організації габаритні розміри накопичувальної системи збільшуються, що призводить до погіршення динамічних характеристик АНС і до збільшення займаної нею виробничої площі.

Варіант 7. Початкова $m \times n$ -матриця перетвориться на блокову матрицю H_7 :

$$\begin{aligned} H_7 &= \|H_{7.1} \ H_{7.2} \|; \\ H_{7.1} &= \|H_{7.1.1} \ H_{7.1.2} \|; \quad H_{7.2} = \|H_{7.2.1} \ H_{7.2.2} \|; \\ H_{7.1.1} &= \|a_{11} \ a_{12} \ a_{13} \ a_{14} \|; \\ H_{7.1.2} &= \|a_{21} \ a_{22} \ a_{23} \ a_{24} \|; \\ H_{7.1.3} &= \|a_{31} \ a_{32} \ a_{33} \ a_{34} \|; \\ H_{7.1.4} &= \|a_{41} \ a_{42} \ a_{43} \ a_{44} \|. \end{aligned}$$

Тут підматриці $H_{7.1}$, $H_{7.2}$ є блоками матриці H_7 . В свою чергу підматриці $H_{7.1.1}$, $H_{7.1.2}$ є блоками матриці $H_{7.1}$, а підматриці $H_{7.2.1}$, $H_{7.2.2}$ відповідно є блоками матриці $H_{7.2}$. Підматриці $H_{7.1.1}$, $H_{7.1.2}$, $H_{7.2.1}$, $H_{7.2.2}$ виконують функції секцій накопичувача, а матриці $H_{7.1}$, $H_{7.2}$ по відношенню до цих секцій виконують функцію платформ другого рівня відповідно. Матриця H_7 щодо платформ другого рівня виконує роль платформи першого рівня. Таким чином, у цьому випадку отримуємо трирівневу АНС.

При множенні справа матриць $H_7, H_{7.1}, H_{7.2}, H_{7.1.1}, H_{7.1.2}, H_{7.2.1}, H_{7.2.2}$ на відповідні циклічні матриці (за умови наявності у кожній платформі та секції індивідуального приводу, які забезпечують незалежний круговий рух кожній з компонентів АНС) матрична модель матиме вигляд:

$$\begin{aligned} H_7^{k_1} C_1^{k_2} \wedge (H_{7.1}^{k_3} C_2^{k_4} \vee H_{7.2}^{k_5} C_3^{k_6}) \wedge (H_{7.1.1}^{k_7} C_4^{k_8} \vee H_{7.1.2}^{k_9} C_5^{k_{10}} \vee H_{7.2.1}^{k_{11}} C_6^{k_{12}} \vee \\ \vee H_{7.2.2}^{k_{13}} C_7^{k_{14}}) = H_7^{k_1+k_2} \wedge (H_{7.1}^{k_3+k_4} \vee H_{7.2}^{k_5+k_6}) \wedge (H_{7.1.1}^{k_7+k_8} \vee H_{7.1.2}^{k_9+k_{10}} \vee \\ \vee H_{7.1.2}^{k_{11}+k_{12}} \vee H_{7.1.2}^{k_{13}+k_{14}}), \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$0 \leq k_1 + k_2 \leq \frac{m}{2}; 0 \leq k_3 + k_4 \leq \frac{m}{2}; 0 \leq k_5 + k_6 \leq \frac{m}{2}, 1 \leq k_7 + k_8 \leq n - 1;$$

$$1 \leq k_9 + k_{10} \leq n - 1; 1 \leq k_{11} + k_{12} \leq n - 1, 1 \leq k_{13} + k_{14} \leq n - 1.$$

Тут циклічна матриця C_1 – привод платформи першого рівня H_7 , матриці C_2 та C_3 – приводи платформ $H_{7.1}$ та $H_{7.2}$ відповідно; матриці C_4, C_5, C_6, C_7 – приводи секцій $H_{7.1.1}, H_{7.1.2}, H_{7.2.1}, H_{7.2.2}$ відповідно.

Структурно-компонувальне рішення АНС, що описується моделлю (3.25), представлено на рис. В.7.

Варіант 8. Початкова $m \times n$ -матриця H перетвориться на блокову матрицю H_8 :

$$H_8 = \parallel H_{8.1} \ H_{8.2} \parallel;$$

$$H_{8.1} = \parallel a_{11} \ a_{12} \ \dots \ a_{n1} \parallel;$$

$$H_{8.2} = \parallel a_{11} \ a_{12} \ \dots \ a_{n2} \parallel.$$

Підматриці $H_{8.1}$ та $H_{8.2}$ виконують роль секцій, загальна місткість яких дорівнює $n_1 + n_2 = m \times n$. На множині підматриць $H_{8.1}$ та $H_{8.2}$ задані відношення: R_1 – мати горизонтальне положення; R_3 – перебувати всередині ($H_{8.1} \ R_3 \ H_{8.2}$); R_6 – перебувати в центрі; R_{22} – перебувати на однаковому рівні; R_{24} – знаходитися концентрично.

При множенні матриць $H_{8.1}$ та $H_{8.2}$ на циклічну матрицю C отримаємо матричну модель АНС виду:

$$(H_{8.1}^{k_1} \oplus H_{5.2}^{k_2})C_1^{k_3} = H_{8.1}^{k_1+k_3} \oplus H_{8.2}^{k_2+k_3}; \quad (3.26)$$

$$1 \leq k_1 + k_3 \leq n_1 - 1; 1 \leq k_2 + k_3 \leq n_2 - 1$$

Модель (3.26) описує АНС, структурно-компонувальне рішення якої представлено на рис. В.8.

Тут обидві секції $H_{8.1}$ та $H_{8.2}$ знаходяться на одному рівні, розташовуються концентрично одна відносно одної і мають одну вісь, навколо якої ці секції можуть здійснювати кругові рухи на задану кількість кроків. Обидві секції мають загальний привод, тому в кожний момент часу здійснювати кругові рухи може лише одна із секцій. За наявності індивідуальних приводів для забезпечення обертального руху у кожній з секцій $H_{8.1}$ та $H_{8.2}$ модель набуває вигляду:

$$(H_{8.1}^{k_1} C_1^{k_2} \vee H_{8.2}^{k_3} C_2^{k_4}) = H_{8.1}^{k_1+k_2} \vee H_{8.2}^{k_3+k_4}; \quad (3.27)$$

В даних умовах секції накопичувача можуть здійснювати круговий рух незалежно одна від одної.

Структурно-компонувальне рішення АНС, представлене на рис. В.7, дозволяє більш щільно розміщувати у фіксованому просторі комірки для зберігання виробів. Однак, виконання операцій приймання та видачі виробів при такому рішенні на практиці не завжди може бути прийнятним, наприклад, через відсутність вільного доступу захвата робота, маніпулятора до комірок під час виконання операцій приймання та видачі виробів. У такому випадку до перелічених вище відношень, визначених на множині секцій $H_{8.1}$ та $H_{8.2}$, необхідно додати відношення: R_4 – перебувати зовні; R_7 – перебувати всередині. Реалізація цих відношень призводить до створення АНС, побудованої за принципом телескопічності (рис. В.9). Тоді матрична модель набуває виду:

$$(P^{h_3} \oplus P^{h_4})(H_{8.1}^{h_1, k_1} \oplus H_{8.2}^{h_2, k_2})C_2^{k_3} =$$

$$= H_{8.1}^{h_1+h_3, k_1+k_3} \oplus H_{8.1}^{h_1+h_4, k_1+k_3} \oplus H_{8.2}^{h_2+h_3, k_2+k_3} \oplus H_{8.2}^{h_2+h_4, k_2+k_3}. \quad (3.28)$$

$$0 \leq h_1 + h_3 \leq 1, 1 \leq k_1 + k_3 \leq n_1 - 1, 0 \leq h_1 + h_4 \leq 1, 0 \leq h_2 + h_3 \leq 1;$$

$$1 \leq k_2 + k_3 \leq n_2 - 1, 0 \leq h_2 + h_4 \leq 1.$$

Модель (3.28) представляє АНС, в якій секції накопичувача $H_{8.1}$ та $H_{8.2}$ мають спільний привод, що забезпечує їх круговий рух. У цих умовах у кожний момент часу круговий рух може здійснювати або секція $H_{8.1}$, або секція $H_{8.2}$. Для забезпечення незалежного один від одного переміщення необхідно кожен секцію забезпечити індивідуальним приводом. Це дозволить кожній секції в автономному режимі здійснювати переміщення комірки із заданою адресою в зону приймання та видачі виробів. У такому випадку матрична модель АНС матиме вигляд:

$$(P^{h_3} \oplus P^{h_4})(H_{8.1}^{h_1, k_1} C_1^{k_2} \vee H_{8.2}^{h_2, k_3} C_2^{k_4}) =$$

$$= H_{8.1}^{h_1+h_3, k_1+k_2} \oplus H_{8.1}^{h_1+h_4, k_1+k_2} \oplus H_{8.2}^{h_2+h_3, k_3+k_4} \oplus H_{8.2}^{h_2+h_4, k_3+k_4}. \quad (3.29)$$

$$0 \leq h_1 + h_3 \leq 1, 1 \leq k_1 + k_2 \leq n_1 - 1, 0 \leq h_1 + h_4 \leq 1, 0 \leq h_2 + h_3 \leq 1;$$

$$0 \leq h_2 + h_4 \leq 1, 1 \leq k_3 + k_4 \leq n_2 - 1.$$

Для забезпечення незалежного один від одного переміщення необхідно кожен секцію забезпечити індивідуальним приводом. Це дозволить кожній секції в автономному режимі здійснювати переміщення комірки із заданою адресою в зону приймання та видачі виробів. У такому випадку матрична модель АНС набуде виду:

$$(P^{h_3} \oplus P^{h_4})(H_{8.1}^{h_1, k_1} C_1^{k_2} \vee H_{8.2}^{h_2, k_3} C_2^{k_4}) =$$

$$= (H_{8.1}^{h_1+h_3, k_1+k_2} \oplus H_{8.1}^{h_1+h_4, k_1+k_2}) \vee (H_{8.2}^{h_2+h_3, k_3+k_4} \oplus H_{8.2}^{h_2+h_4, k_3+k_4}). \quad (3.30)$$

$$0 \leq h_1 + h_3 \leq 1, 1 \leq k_1 + k_2 \leq n_1 - 1, 0 \leq h_1 + h_4 \leq 1, 0 \leq h_2 + h_3 \leq 1;$$

$$0 \leq h_2 + h_4 \leq 1, 1 \leq k_3 + k_4 \leq n_2 - 1.$$

Наявність у накопичувачі двох і більше концентрично розташованих одна відносно одної кільцеподібних секцій з можливістю їх висування вздовж осі

обертання дозволяє збільшити щільність розміщення комірок в обмеженому просторі та забезпечує вільний доступ до комірок захвата автооператора.

Варіант 9. Початкова $m \times n$ -матриця H перетворюється на блокову матрицю H_9 :

$$H_9 = \begin{pmatrix} 0 & H_{9,12} & 0 \\ H_{9,21} & 0 & H_{9,23} \\ 0 & H_{9,32} & 0 \end{pmatrix};$$

$$H_{9,12} = \|a_{11} \ a_{12} \ a_{13} \ a_{14} \|;$$

$$H_{9,21} = \|a_{21} \ a_{22} \ a_{23} \ a_{24} \|;$$

$$H_{9,23} = \|a_{31} \ a_{32} \ a_{33} \ a_{34} \|;$$

$$H_{9,32} = \|a_{41} \ a_{42} \ a_{43} \ a_{44} \|.$$

Для зручності позначимо $H_{9,12} = H_{9,1}$, $H_{9,21} = H_{9,2}$, $H_{9,23} = H_{9,3}$, $H_{9,24} = H_{9,4}$. Матриця H_9 відображає платформи накопичувача, а її блоки $H_{9,1}$, $H_{9,2}$, $H_{9,3}$, $H_{9,4}$ – секції. Кожна секція забезпечена комірками для зберігання виробів, які розташовані в один ряд.

На множині секцій $H_{9,1}$, $H_{9,2}$, $H_{9,3}$, $H_{9,4}$ задані відношення: R_1 – мати горизонтальне положення; R_{15} – бути симетрично; R_{22} – знаходитися на одному рівні; R_{25} – рухатися від центру; R_{26} – рухатися до центру; R_{27} – розташовуватися променеподібно.

Перемножуючи підматриці $H_{9,1}$, $H_{9,2}$, $H_{9,3}$, $H_{9,4}$ справа на циклічну матрицю C і на 1-наддіагональну або 1-піддіагональну матрицю P або $P' = PT$, отримаємо матричну модель АНС, структурно-компонувальне рішення якої представлене на рис. В.9.

Розглянемо можливі варіанти взаємодії платформи та секцій накопичувача:
– подія p_{12} (круговий рух платформи накопичувача в горизонтальній площині) і p_8 (поступальний рух секції накопичувача вздовж (паралельно) осі X) відбуваються одночасно $p_{12} \tau_0 p_8$:

$$H_9^{k_1} C^{k_2} \wedge (H_{9,1}^{l_1} \oplus H_{9,2}^{l_2} \oplus H_{9,3}^{l_3} \oplus H_{9,4}^{l_4})(P^{l_5} \oplus P^{l_6}) = H_9^{k_1+k_2} \wedge (H_{9,1}^{l_1+l_5} \oplus$$

$$\begin{aligned} & \oplus H_{9.1}^{l_1+l_6}) \vee (H_{9.2}^{l_2+l_5} \oplus H_{9.2}^{l_2+l_6}) \oplus (H_{9.3}^{l_3+l_5} \oplus H_{9.3}^{l_3+l_6}) \oplus (H_{9.4}^{l_4+l_5} \oplus H_{9.4}^{l_4+l_6}) \quad (3.31), \\ & 0 \leq k_1 + k_2 \leq n - 1; 0 \leq l_1 + l_5 \leq m - 1, 0 \leq l_1 + l_6 \leq m - 1, \\ & 0 \leq l_2 + l_5 \leq m - 1, 0 \leq l_2 + l_6 \leq m - 1, 0 \leq l_3 + l_5 \leq m - 1, 0 \\ & \leq l_3 + l_6 \leq m - 1, 0 \leq l_4 + l_5 \leq m - 1, 0 \leq l_4 + l_6 \leq m - 1. \end{aligned}$$

– подія p_{12} відбувається раніше, ніж подія p_8 , тобто $p_{12} \tau_1 p_8$:

$$\begin{aligned} [H_9^{k_1} C^{k_2}] \wedge (H_{9.1}^{l_1} \oplus H_{9.2}^{l_2} \oplus H_{9.3}^{l_3} \oplus H_{9.4}^{l_4})(P^{l_5} \oplus P^{l_6}) = H_9^{k_1+k_2} \wedge (H_{9.1}^{l_1+l_5} \oplus \\ \oplus H_{9.1}^{l_1+l_6}) \oplus (H_{9.2}^{l_2+l_5} \oplus H_{9.2}^{l_2+l_6}) \oplus (H_{9.3}^{l_3+l_5} \oplus H_{9.3}^{l_3+l_6}) \oplus (H_{9.4}^{l_4+l_5} \oplus H_{9.4}^{l_4+l_6}) \quad (3.32), \end{aligned}$$

– подія p_{12} відбувається раніше, ніж подія p_8 , тобто $p_{12} \tau_2 p_8$:

$$\begin{aligned} H_9^{k_1} C^{k_2} \wedge [(H_{9.1}^{l_1} \oplus H_{9.2}^{l_2} \oplus H_{9.3}^{l_3} \oplus H_{9.4}^{l_4})(P^{l_5} \oplus P^{l_6})] = H_9^{k_1+k_2} \wedge (H_{9.1}^{l_1+l_5} \oplus \\ \oplus H_{9.1}^{l_1+l_6}) \oplus (H_{9.2}^{l_2+l_5} \oplus H_{9.2}^{l_2+l_6}) \oplus (H_{9.3}^{l_3+l_5} \oplus H_{9.3}^{l_3+l_6}) \oplus (H_{9.4}^{l_4+l_5} \oplus H_{9.4}^{l_4+l_6}) \quad (3.33), \end{aligned}$$

Системи обмежень у моделях (3.32) та (3.33) такі ж самі, що і у моделі (3.31). Моделі (3.32), (3.33) описують АНС, в якій секції $H_{9.1}, H_{9.2}, H_{9.3}, H_{9.4}$ променеподібно розташовані на платформі H_9 симетрично щодо її центру. Секції забезпечені єдиним приводом, що забезпечує поступальний рух кожної з секцій вздовж осі X або Y . Кожна секція може висуватись, виходячи назовні і переміщати комірку із заданою адресою безпосередньо в зону приймання та видачі виробу. Після приймання або видачі виробу секція знову повертається у вихідне положення. Це дозволяє звести до мінімуму тривалість виконання операцій приймання та видачі виробу під час функціонування АНС. У кожен момент часу в моделях (3.31), (3.32), (3.33) привод ($P \vee P'$) може передавати поступальний рух тільки однієї з секцій $H_{9.1}, H_{9.2}, H_{9.3}, H_{9.4}$. Якщо кожную секцію накопичувача забезпечити індивідуальним приводом, то матрична модель АНС набуде вигляду:

$$H_9^{k_1} C^{k_2} \wedge (H_{9.1}^{l_1} (P^{l_2} \vee P^{l_3}) \vee (H_{9.2}^{l_4} (P^{l_5} \vee P^{l_6}) \vee (H_{9.3}^{l_7} (P^{l_8} \vee P^{l_9}) \vee$$

$$\begin{aligned} \vee (H_{9.4}^{l_{10}} (P^{l_{11}} \vee P^{l_{12}})) = H_9^{k_1+k_2} \wedge ((H_{9.1}^{l_1+l_2} \vee H_{9.1}^{l_1+l_3}) \vee (H_{9.2}^{l_4+l_5} \vee H_{9.2}^{l_4+l_6}) \vee \\ \vee (H_{9.3}^{l_7+l_8} \vee H_{9.3}^{l_8+l_9}) \vee (H_{9.4}^{l_{10}+l_{11}} \vee H_{9.4}^{l_{10}+l_{12}}) \end{aligned} \quad (3.34)$$

Варіант 10. Початкова $m \times n$ -матриця H перетвориться на блокову матрицю H_{10} :

$$H_8 = \| \|H_{10.1} \quad H_{10.2} \quad H_{10.3} \quad H_{10.4} \| \|;$$

$$H_{10.1} = \left\| \begin{array}{c} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{14} \end{array} \right\|; H_{10.2} = \left\| \begin{array}{c} a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \\ a_{24} \end{array} \right\|; H_{10.3} = \left\| \begin{array}{c} a_{31} \\ a_{32} \\ a_{33} \\ a_{34} \end{array} \right\|; H_{10.4} = \left\| \begin{array}{c} a_{41} \\ a_{42} \\ a_{43} \\ a_{44} \end{array} \right\|.$$

На множині секцій накопичувача $H_{10.1}, H_{10.2}, H_{10.3}, H_{10.4}$ задамо відношення: R_{10} – перебувати навколо; R_{13} – бути паралельно; R_{15} – бути симетрично; R_{20} – перебувати вище; R_{21} – перебувати нижче; R_{22} – перебувати на однаковому рівні; R_{23} – бути рівновіддаленим.

При множенні матриці H_{10} справа на циклічну матрицю C і множенні зліва підматриць $H_{10.1}, H_{10.2}, H_{10.3}, H_{10.4}$ на матриці P або $P' = PT$, отримаємо матричну модель АНС, структурно-компонувальне рішення якої представлено на рис. В.10. При виконанні співвідношення $p_4 \tau_0 p_{15}$ отримаємо наступну модель:

$$\begin{aligned} H_{10}^{k_1} C^{k_2} \wedge (P^{l_5} \oplus P^{l_6})(H_{10.1}^{l_1} \oplus H_{10.2}^{l_2} \oplus H_{10.3}^{l_3} \oplus H_{10.4}^{l_4}) = H_{10}^{k_1+k_2} \wedge (H_{10.1}^{l_1+l_5} \oplus \\ \oplus H_{10.1}^{l_1+l_6}) \oplus (H_{10.2}^{l_2+l_5} \oplus H_{10.2}^{l_2+l_6}) \oplus (H_{10.3}^{l_3+l_5} \oplus H_{10.3}^{l_3+l_6}) \oplus (H_{10.4}^{l_4+l_5} \oplus H_{10.4}^{l_4+l_6}) \end{aligned} \quad (3.35),$$

$$\begin{aligned} 0 \leq k_1 + k_2 \leq m - 1; 0 \leq l_1 + l_5 \leq n - 1, 0 \leq l_1 + l_6 \leq n - 1, \\ 0 \leq l_2 + l_5 \leq n - 1, 0 \leq l_2 + l_6 \leq n - 1, 0 \leq l_3 + l_5 \leq n - 1, 0 \\ \leq l_3 + l_6 \leq n - 1, 0 \leq l_4 + l_5 \leq n - 1, 0 \leq l_4 + l_6 \leq n - 1. \end{aligned}$$

Платформа накопичувача H_{10} має можливість повороту навколо вертикальної осі. Секції $H_{10.1}, H_{10.2}, H_{10.3}, H_{10.4}$, забезпечені комірками для зберігання виробів, можуть опускатися вниз і підніматися вгору. У кожен момент часу може підніматися або опускатися тільки одна з секцій, оскільки всі секції мають один загальний привод.

За наявності в кожній секції індивідуального приводу переміщення секції на задане число кроків вгору чи вниз може здійснюватися незалежно одна від одної. Тоді модель АНС має вигляд:

$$\begin{aligned}
& H_{10}^{k1} C^{k2} \wedge ((P^{l2} \oplus P^{l3})H_{10.1}^{l1} \vee (P^{l5} \oplus P^{l6})H_{10.2}^{l4} \vee (P^{l8} \oplus P^{l9})H_{10.3}^{l7} \vee \\
& \vee (P^{l11} \oplus P^{l12})H_{10.4}^{l10}) = H_{10}^{k1+k2} \wedge (H_{10.1}^{l1+l2} \oplus H_{10.1}^{l1+l3}) \vee (H_{10.2}^{l4+l5} \oplus H_{10.2}^{l4+l6}) \vee \\
& \vee (H_{10.3}^{l7+l8} \oplus H_{10.3}^{l7+l9}) \vee (H_{10.4}^{l10+l11} \oplus H_{10.4}^{l10+l12}). \quad (3.36)
\end{aligned}$$

Варіант 11. Початкова $m \times n$ -матриця H перетвориться на блокову матрицю H_{11} :

$$H_{11} = \left\| \begin{array}{c} H_{11.1} \\ H_{11.2} \\ H_{11.3} \\ H_{11.4} \end{array} \right\|;$$

$$H_{11.1} = \|a_{11} \ a_{12} \ a_{13} \ a_{14} \|;$$

$$H_{11.2} = \|a_{21} \ a_{22} \ a_{23} \ a_{24} \|;$$

$$H_{11.3} = \|a_{31} \ a_{32} \ a_{33} \ a_{34} \|;$$

$$H_{11.4} = \|a_{41} \ a_{42} \ a_{43} \ a_{44} \|.$$

Матриця H_{11} відображає платформу накопичувача, а її підматриці $H_{11.1}$, $H_{11.2}$, $H_{11.3}$, $H_{11.4}$ – його секції. На множині секцій задаємо відношення: R_{10} – перебувати навколо; R_{13} – бути паралельно; R_{15} – бути симетрично; R_{28} – перебувати зліва; R_{29} – перебувати справа.

При множенні матриці H_{11} зліва на циклічну матрицю C , і множенні підматриць $H_{11.1}$, $H_{11.2}$, $H_{11.3}$, $H_{11.4}$ справа на матриці P і $P' = PT$ при виконанні співвідношення $p_{12} \tau_0 p_8$ отримаємо наступну матричну модель АНС (рис. В.12).

$$\begin{aligned}
& C^{k2} H_{11}^{k1} \wedge (H_{11.1}^{l1} \oplus H_{11.2}^{l2} \oplus H_{11.3}^{l3} \oplus H_{11.4}^{l4})(P^{l5} \oplus P^{l6}) = H_{11}^{k1+k2} \wedge (H_{11.1}^{l1+l5} \oplus \\
& \oplus H_{11.1}^{l1+l6}) \oplus (H_{11.2}^{l2+l5} \oplus H_{11.2}^{l2+l6}) \oplus (H_{11.3}^{l3+l5} \oplus H_{11.3}^{l3+l6}) \oplus (H_{11.4}^{l4+l5} \oplus H_{11.4}^{l4+l6}) \quad (3.37)
\end{aligned}$$

Модель (3.37) описує АНС, платформа якої обертається навколо горизонтальної осі, а секції мають єдиний загальний привод і мають можливість переміщатися вправо і вліво по відношенню до платформи паралельно її осі. За умови забезпечення кожної секції накопичувача індивідуальним приводом вони можуть здійснювати поступальні рухи в автономному режимі незалежно один від одного:

$$\begin{aligned}
& C^{k2} H_{11}^{k1} \wedge (H_{11.1}^{l1} (P^{l2} \oplus P^{l3}) \vee H_{11.2}^{l4} (P^{l5} \oplus P^{l6}) \vee H_{11.3}^{l4} (P^{l8} \oplus P^{l9}) \vee \\
& \vee H_{11.4}^{l10} (P^{l11} \oplus P^{l12})) = H_{11}^{k1+k2} \wedge ((H_{11.1}^{l1+l2} \oplus H_{11.1}^{l1+l3}) \vee (H_{11.2}^{l4+l5} \oplus \\
& \oplus H_{11.2}^{l4+l6}) \vee (H_{11.3}^{l7+l8} \oplus H_{11.3}^{l7+l9}) \vee (H_{11.4}^{l10+l11} \oplus H_{11.4}^{l10+l12})) \quad (3.38)
\end{aligned}$$

3.5. Висновки до 3-го розділу

1. Розроблено на базі міжгалузевого фонду евристичних прийомів спеціалізований фонд, орієнтований на синтез структурно-компонувальних рішень АНС, який дозволяє враховувати і відображати закономірності функціонування елементів АНС під час їх моделювання.

2. Сформовано перелік часових і просторових відношень псевдофізичної логіки, з допомогою яких можна відображати системну організацію АНС.

3. Розроблено спосіб генерування можливих варіантів структурно-компонувальних рішень АНС, в основу якого покладено правила та процедури перетворення вихідної (базової) $m \times n$ -матриці, яка імітує несучий каркас (платформу) АНС, на блокові матриці, що відображають функції секцій-накопичувачів, а також часові та просторові відношення між елементами АНС для різних варіантів їх поєднання.

4. На основі запропонованого підходу до синтезу структури АНС згенеровано та представлено у вигляді матричних моделей та структурно-компонувальних схем різні варіанти нових структурно-компонувальних рішень АНС.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено підхід до представлення системної (структурної та функціональної) організації АНС у складі ГВК для виготовлення виробів у машинобудуванні на основі їх матричних моделей. Компонентами матричної моделі є концептуальні аналоги (матриці) функціональних елементів АНС – накопичувачів та їх секцій для розміщення та зберігання виробів; приводів рухів органів пошуку заданої адреси комірки, механізму реверсу руху.

2. Розроблено послідовність синтезу структурно-компонувальних рішень АНС, що представлена у вигляді логічно впорядкованих етапів, в основу якого покладено засади, що враховують тенденції розвитку ГВК, а також матричне моделювання АНС.

3. Розроблено на базі міжгалузевого фонду евристичних прийомів спеціалізований фонд та перелік часових і просторових відношень з псевдофізичної логіки, що описують системну організацію АНС та придатні для синтезу структурно-компонувальних рішень АНС.

4. Розроблено підхід до генерування можливих варіантів структурно-компонувальних рішень АНС, який полягає в перетворенні початкової (базової) $m \times n$ -матриці, яка імітує несучий каркас (платформу) АНС, на блокові матриці, що відображають функції секцій-накопичувачів.

5. Отримані результати у вигляді нових структурно-компонувальних рішень АНС здатні підвищити надійність ГВК за рахунок зменшення простоювань обладнання у складі ГВК.

6. Запропонований у роботі формалізований опис структури АНС різних видів може виступати основою для автоматизації процедур синтезу з допомогою комп'ютерних засобів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пуховський Є. С. Проектування гнучких виробничих систем машинобудування : навч. посіб. Ч. 1. Київ : НТУУ «КПІ», 2017. 286 с.
2. Крутовий Ж. А. Оптимізація технологічних процесів : навч. посіб. Ч.І. Харків : ХДУХТ, 2014. 300с.
3. Фролов Є. А., Кравченко С. І., Попов С. В., Гнітько С. М. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування : монографія. Полтава : ПНТУ, 2019. 204 с.
4. Бурек Я., Гурей І. В., Стоцько З. А. Верстатне обладнання : навч. посіб. Львів : Вид-во ун-ту «Львівська політехніка», 2014. 168 с.
5. Кузнєцов Ю. М., Саленко О. Ф., Харченко О. О., Щетинін В. Т. Технологічне обладнання з ЧПК: механізми і оснащення. Київ–Кременчук–Севастополь : Вид-во «Точка», 2014. 500 с.
6. Приходько В. П., Литвин О. В. Проектування оснащення верстатів, роботів і машин : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. 212 с.
7. Ковальов В. А., Гаврушкевич А. Ю., Гаврушкевич Н. В. Конструктивні особливості та основи програмування верстатів з числовим програмним керуванням : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 158 с.
8. Бочков В. М., Сілін Р. І., Гаврильченко О. В. Розрахунок та конструювання металорізальних верстатів : підручник / за ред. Р. І. Сіліна. Львів : Видавництво «Бескид Бід», 2008. 448с.
9. Дерібо О. В. Основи технології машинобудування : навч. посіб. Ч.І. Вінниця : ВНТУ, 2013. 125 с.
10. Паливода Ю. Є., Дячун А. Є., Лещук Р. Я. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки : навч.-метод. посібник. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. 240 с.

11. Залога В. О., Гончаров В. Д., Залога О. О. Сучасні інструментальні матеріали у машинобудуванні : навч. посіб. Суми: СумДУ, 2013. 371 с.
12. Ельперін І. В. Автоматизація виробничих процесів. Київ, 2017. 378 с.
13. Гончаренко Б. М., Осадчий С. І., Віхрова Л. Г., Каліч В. М., Дідик О. К. Автоматизація виробничих процесів. Кіровоград : Лисенко В.Ф., 2016. 352 с.
14. Синєглазов В. М., Сергєєв І. Ю. Автоматизація технологічних процесів: навч. посіб. Київ : НАУ, 2015. 444 с.
15. Мельничук П. П., Боровик А.І., Лінчевський П. А., Петраков Ю. В. Технологія машинобудування. Житомир : ЖДТУ, 2005. 882 с.
16. Божидарнік В. В., Григор'єва Н. С., Шабайкович В. А. Технологія виготовлення деталей виробів : навч. посібн. Луцьк : Настир'я, 2006. 592 с.
17. Кирилович В. А., Мельник О. Л., Мельничук П. П., Яновський В. А. Заготовки деталей машин : формоутворення, параметри, характеристики: підручник. Житомир : ЖДТУ, 2020. 314 с.
18. Ступницький В. В., Грицай І. Є., Сліпчук А. М. Обладнання та прогресивні методи формоутворення деталей : навч. посіб. Львів : Національний університет «Львівська політехніка». 2012. 338 с.
19. Іванов В. О., Дегтярьов І. М. Технологічні основи гнучких автоматизованих виробництв : навч. посіб. Суми: Сумський державний університет, 2022. 203 с.
20. Дудюк Д. Л., Мазепа С. С., Мисик М. М. Гнучке автоматизоване виробництво і роботизовані комплекси : навч. посіб. Львів: «Магнолія 2006», 2008. 278 с.
21. Гуліда Е.М., Ядченко О.О., Ступницький В.В. Гнучкі виробничі системи для механічної обробки. Львів : Світ. 152 с.
22. Муляр Ю. І., Репінський С. В. Автоматизація виробництва в машинобудуванні : навч. посіб. Ч. II. Вінниця : ВНТУ, 2020. 123 с.
23. Стеценко І.В. Моделювання систем : навч. посіб. Черкаси : ЧДТУ, 2010. 399 с.

24. Бахрушин В.Є. Математичні основи моделювання систем: навч. посіб. Запоріжжя : КПУ, 2009. 224 с.
25. Літнарівч Р. М. Алгебра матриць. Рівне, МЕНУ. 2007. 112 с.
26. Матвієнко М. П. Дискретна математика : підручник. Вид. 2-ге перероб. і доп. Київ : Видавництво Ліра-К, 2017. 324 с.
27. Павленко П. М., Філоненко С. Ф., Чередніков О. М., Трейтяк В. В. Математичне моделювання систем і процесів : навч. посіб. – Київ : НАУ, 2017. 392 с.
28. Севостьянов І. В. Теорія технічних систем : підручник. Вінниця : ВНТУ, 2014. 181 с.
29. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. Теорія технічних систем. Київ: ЦП «КОМПРИНТ», 2017. 291 с.
30. Крупа В.В. Теорія технічних систем : особливості побудови створення та розвитку : навч. посіб. Тернопіль : Осадца Ю.В., 2023. 308 с.
31. Кузнецов Ю. М., Придальний Б.І. Теорія технічних систем в аспектах досліджень та технічної творчості : підручник. Луцьк : Вежа-Друк, 2023. 284 с.
32. Грабченко А.І., Федорович В.О., Гаращенко Я.М. Методи наукових досліджень : навч. посібник. Харків: НТУ «ХП», 2009. 142 с.
33. Данильян О. Г. Дзьобань О. П. Методологія наукових досліджень : підручник. Харків : Право, 2019. 368 с.
34. Субботін С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2008. 341 с.
35. Сторожук С. В., Гоян І. М., Матвієнко І. С. Логіка : навч. посіб. Київ : Вадекс, 2020. 370 с.
36. Конверський А. Є. Сучасна логіка (класична та некласична). 2-ге вид. перероб. та доп. Київ: Центр учбової літератури, 2017. 294 с.
37. Шепетяк О. М. Логіка : підручник для студентів вищих навчальних закладів . Київ : Фенікс, 2015. 256 с.
38. Бондаренко М.Ф., Білоус Н.В., Руткас А.Г. Комп'ютерна дискретна математика : підручник. Харків : «Компанія СМІТ», 2004. 480с.