

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Розроблення методу побудови маршруту переміщення робототехнічної
платформи у системі складування

(тема)

Виконав: студент 2 курсу, гр. КТРСм 21-1
Кулик Аліна Андріївна

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 151 автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
освітньої програми Комп'ютеризовані та
робототехнічні систем

(код і повна назва напрямку)

Тип програми освітньо-професійна

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Євсєєв В.В.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І.Ш.

(прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	<u>Автоматики і комп'ютеризованих технологій</u>
Кафедра	<u>Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки</u>
Рівень вищої освіти	<u>другий (магістерський)</u>
Спеціальність	<u>151 автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології</u>
Тип програми	<u>освітньо-професійна</u>
Освітня програма	<u>Комп'ютеризовані та робототехнічні системи</u> (код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Кулик Аліні Андріївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення методу побудови маршруту переміщення
робототехнічної платформи у системі складування

затверджена наказом по університету від _____ 07.11. 2022 р. № 1462 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ . _____ . 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи Ртс шатл, система переміщення на базі
модифікованого алгоритму Лі

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

4.1 Вступ

4.2 Аналіз сучасних систем складування в Індустрії 4.0

4.3 Розробка методу побудови маршруту переміщення шатла

4.4 Удосконалення робототехнічної платформи та створення 3D моделі

4.5 Експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів

4.6 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 10 с., формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Керівник (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз актуальності роботи	10.09.2022 – 15.09.2022	Виконано
2	Аналіз аналогічних рішень	16.09.2022 – 10.10.2022	Виконано
3	Розробка шатлу системи	10.10.2022 – 25.10.2022	Виконано
4	Моделювання роботи вдосконаленої системи	25.10.2022 – 25.11.2022	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	25.11.2022 – 12.12.2022	Виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk	13.12.2022	
7	Подання роботи на рецензію		
8	Подання роботи на підпис зав.кафедри		
9	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК		

Дата видачі завдання _____

Студент _____

(підпис)

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____

(підпис)

проф. Євсєєв В. В.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 89 с., 1 табл., 43 рис., 2 дод., 30 джерела.

ІНДУСТРІЯ 4.0, СКЛАДСЬКІ СИСТЕМИ, ШАТЛІ, WAREHOUSE 4.0, РОБОТИЗОВАНА ПЛАТФОРМА

Об'єкт дослідження – процес керування складськими системами в індустрії 4.0.

Предмет дослідження – моделі та методи керування робототехнічною платформою.

Мета дослідження – вдосконалення методу побудови маршруту для переміщення грузів в системі WAREHOUSE 4.0.

Методи дослідження – метод рондамізацій, ланцюга Маркова, теорія матриць переміщення, теорія алгоритмів та теорія прийняття рішення, хвильовий алгоритм побудови шляху.

У ході роботи було проведено аналіз існуючих конструкцій роботизованих платформ шатлів у системах складування Індустрії 4.0. Було проведено розробку методу переміщення модифікованої платформи та створено 3D моделі платформи та складської системи. Було проведено експеримент з використанням модифікованої платформи та складської системи.

ABSTRACT

Explanatory note: 89 pp., 1 table, 43 fig., 2 appendix, 30 sources.

INDUSTRY 4.0, WAREHOUSE SYSTEMS, SHUTTLE, WAREHOUSE 4.0, ROBOTIZED PLATFORM

The object of research is the process of managing warehouse systems in Industry 4.0.

The subject of research is models and methods of controlling a robotic platform.

The purpose of the research is to improve the route construction method for cargo movement in the WAREHOUSE 4.0 system.

Research methods – method of randomization, Markov chain, theory of displacement matrices, theory of algorithms and theory of decision-making, wave algorithm of path construction.

In the course of the work, an analysis of existing designs of robotic shuttle platforms in the storage systems of Industry 4.0 was carried out. A modified platform movement method was developed and a 3D model of the platform and warehouse system was created. An experiment was conducted using a modified platform and warehouse system.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	8
Вступ.....	9
1 Аналіз сучасних систем складування Індустрій 4.0	11
1.1 Аналіз видів складування Індустрій 4.0.....	12
1.2 Аналіз методів складування.....	18
1.3 Аналіз робототехнічних платформ.....	23
1.3.1 Changchun Rochiev Intelligent Equipment Manufacturing Co., Ltd.	23
1.3.2 Система транспортування для палет ISC series	24
1.3.3 Система транспортування для палет RS 150.....	25
1.3.4 Jiangsu EBIL Intelligent Storage Technology Co.,Ltd.	26
1.4 Аналіз методів переміщення у системі складування робототехнічних платформ	28
1.5 Постановка завдань дослідження	32
2 Розробка методу побудови маршруту переміщення шатлу.....	34
2.1 Аналіз сучасних констукцій всенаправлених колес	34
2.1.1 Всенаправлені конвеєрні ролики Celluveyor.....	34
2.1.2 Колесо Mecanum.....	34
2.1.3 Колесо Ілона або шведське колесо	35
2.2 Розробка методу переміщення робототехнічних платформ.....	36
2.3 Удосконалення методу побудови маршруту.....	37
2.4 Висновки до 2 розділу	40
3 Удосконалення робототехнічної платформи та створення 3D моделі	41
3.1 Розробка 3D моделей елементів робототехнічної платформи	41
3.2 Розробка 3D моделі зборки робототехнічної платформи	43
3.3 Розробка 3D моделі системи складування.....	45
3.4 Створення візуальної моделі системи складування	48
3.5 Висновки до 3 розділу	49

4 Експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів.....	50
4.1 Постановка завдань експерименту	50
4.2 Графіки порівняння.....	50
4.3 Розрахунок освітлення.....	70
4.4 Висновки до розділу 4	72
Висновки	73
Перелік джерел посилання	74
Додаток А Демонстраційний матеріал у вигляді презентації	77
Додаток Б Відомість кваліфікаційної роботи.....	87

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСПРВ – автоматизовану систему пошуку та розміщення вантажів;

АСУТП – автоматизованій системі управління технологічним процесом.

ПКРАК – програмно-керований працетехнічний чи автооперативний комплекс;

СШС – складські шатлові системи;

AS/RS – Autonomous Vehicle Storage and Retrieval System;

CRS – Collaborative Robot System;

WMS – Warehouse Management Systems;

ВСТУП

У постійно нестабільному бізнес-середовищі, яке характеризується попитом клієнтів, який важко передбачити, необхідно розробити інноваційні рішення, щоб відповісти на зростаючу потребу в гнучкості операцій ланцюга постачання. У цьому сценарії інновації Індустрії 4.0 дозволяють використовувати нові методи розробки, управління та вдосконалення процесів. Операції ланцюга постачання можуть значно виграти від впровадження однієї з цих інновацій, а саме автоматизації складів, яка складається з автоматизованих систем пошуку та зберігання (AS/RS) і мобільних роботів (MR) [1].

Індустрія 4.0 пропонує інтеграцію робототехніки, кіберфізичних систем, програмних служб і людей-учасників із такими функціями:

- Інтероперабельність : машини, пристрої Інтернету речей (IoT) і люди підключені та координують один одного.
- Інформаційна прозорість : фізичні системи, удосконалені даними датчиків для створення інформаційних систем із додатковою цінністю.
- Технічна допомога : це передбачає використання інтелектуальних пристроїв для сприяння прийняттю обґрунтованих рішень. Роботизована автоматизація може виконувати повторювані, небезпечні або точні завдання.
- Децентралізовані рішення : здатність таких систем приймати автономні рішення; лише в критичних випадках втручання людини.

Автоматизація складів є областю інтересів, оскільки впровадження вимог Industry 4.0 призведе до значних грошових переваг і переваг у продуктивності для великих роздрібних торговців. Поточні складські рішення Industry 3.0 значною мірою залежать від централізованого моніторингу, участі людей і статичного розгортання. Передбачається, що склади Industry 4.0 відійдуть від цього за допомогою розподілених/гібридних архітектур, важкої автоматизації та адаптивних розгортань [2].

Об'єкт дослідження – процес керування складськими системами в

індустрії 4.0.

Предмет дослідження – моделі та методи керування робототехнічною платформою.

Мета дослідження – вдосконалити методу побудови маршруту для переміщення грузів в системі WAREHOUSE 4.0.

Методи дослідження – метод рондамізацій, ланцюга Маркова, теорія матриць переміщення, теорія алгоритмів та теорія прийняття рішення, хвильовий алгоритм побудови шляху.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасних систем складування у індустрії 4.0;
- провести аналіз існуючих методів складування;
- провести аналіз робототехнічних платформ;
- провести аналіз методів переміщення у системах складування;
- провести розробку методу переміщення платформи;
- провести удосконалення методу побудови маршруту;
- провести удосконалення робототехнічної платформи;
- провести експеримент;
- оформити пояснювальну записку згідно з методичними вказівками [3], вимогами ДСТУ 3008:2015 [4].

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ СКЛАДУВАННЯ В ІНДУСТРІЙ

4.0.

Індустрія 4.0 (Industry 4.0) – провідний тренд «Четвертої промислової революції», яка відбувається на наших очах.

Зараз ми живемо в епоху завершення третьої, цифрової революції, що почалася в другій половині минулого століття. Її характерні риси – розвиток інформаційно-комунікаційних технологій, автоматизація та роботизація виробничих процесів.

Характерні риси Індустрії 4.0 – це повністю автоматизовані виробництва, на яких керівництво всіма процесами здійснюється в режимі реального часу і з урахуванням мінливих зовнішніх умов. Кіберфізичні системи створюють віртуальні копії об'єктів фізичного світу, контролюють фізичні процеси і приймають децентралізовані рішення. Вони здатні об'єднуватися в одну мережу, взаємодіяти в режимі реального часу, самоналагоджуватися і самонавчатися. Важливу роль відіграють інтернет-технології, що забезпечують комунікації між персоналом та машинами. Підприємства виробляють продукцію відповідно до вимог індивідуального замовника, оптимізуючи собівартість виробництва.

Складські шатлові системи – це рішення для автоматизації складу, яке зазвичай використовується разом із стелажми для піддонів для автоматизації транспортування піддонів від одного кінця стелажа до іншого. У цій публікації обговорюється складські транспортні системи, їх визначення, як вони працюють, їхні переваги та недоліки.

Warehousing (складування) є важливою складовою логістики та відіграє вирішальну роль у сприянні успіху компанії. З появою електронної комерції склади стають все більш важливими, ніж будь-коли, у логістиці. Як правило, склади отримують, зберігають, витягують і доставляють мільйони продуктів щодня або щотижня. Тому складські системи постійно переглядаються, щоб забезпечити безперервний потік продуктів у логістиці. В останні роки було

проведено велику кількість досліджень, пов'язаних із розвитком складських приміщень. Відповідно, мобільні, автономні, компактні або колаборативні системи все частіше застосовуються на складах (так звані Warehousing 4.0).

Одним із важливих компонентів, на яких базуються сучасні Warehouse Management Systems (WMS), в рамках Industry 4.0, є впровадження таких технологій:

Mobile Autonomous Rack System – системи стелажів, що встановлюються в систему рейкових напрямних, так що полиці можуть переміщатися вперед і назад вздовж рейок [5].

Autonomous Vehicle Storage and Retrieval System (AS/RS) – використання автоматизованих керованих підйомно-транспортних пристроїв, які доставляють вироби на склад і витягують їх звідти у разі потреби;

Compact Storage and Retrieval System – автоматизовані системи, які ефективно та безпечно зберігають вироби компактних розмірів;

Collaborative Robot System – система автоматичного групового управління мобільними роботизованими платформами, яка взаємодіє з оператором, з метою спільного використання робочого простору для вирішення завдань зберігання, навантаження, відвантаження виробів [6].

1.1 Аналіз видів складування Індустрій 4.0

Великі обсяги переробки дають змогу використовувати механізацію і автоматизацію складських робіт на вищому рівні. Склади виробничої логістики входять до складу організаційної системи виробництва і призначені для забезпечення технологічних процесів. На цих складах зберігаються залишки незавершеного виробництва, прибори, інструменти, запасні частини та ін. Робота пов'язана з відносно постійною номенклатурою вантажу, який постачають з визначеною періодичністю і невеликим терміном збереження, що і дає змогу автоматизувати обробку вантажу або більше механізувати виконувані операції.

Склади розподільчої логістики призначені для підтримання безперервності

руху товарів зі сфери виробництва у сферу споживання. Основне їх призначення – безперервне забезпечення споживачів, у тому числі роздрібною мережі. Вони можуть належати як виробникам (склади торговельної продукції, розподільчі склади виробників), так і підприємствам торгівлі [7].

Склади готової продукції розподільчі склади виробників у різних регіонах збуту (центральні і регіональні склади) обробляють тарні та штучні вантажі відносно однорідної продукції у межах асортиментного переліку одного виробника із швидким обігом реалізації великими партіями. Це дає можливість здійснювати автоматизовану і високо механізовану переробку вантажу.

Склади оптової торгівлі товарами народного споживання в основному забезпечують дрібних споживачів і роздрібну мережу. Відповідно до свого призначення такі склади концентрують залишки вантажу широкою номенклатури і нерівномірним обігом (іноді сезонного попиту) товару, що реалізується різними партіями. Це робить недоцільною автоматизовану обробку вантажів на цих складах і надає перевагу високо механізованій і механізованій обробці [8].

Склади роздрібною торгівлі забезпечують роздрібні торговельні мережі, об'єднані зі складом в організаційно-господарську одиницю. Як і на оптових складах, там зберігається товар з дуже великим асортиментом партій, щоб постійно підтримувати в магазинах широкий асортимент товару. Реалізація зі складу здійснюється дрібними партіями з частим постачанням. Такі склади, як правило, невеликі, тому на них раціональніше використовувати як механізовану, так і ручну обробку вантажів [9], [10].

Склади транспортних організацій створюються для тимчасового складування. Це склади залізничних станцій, вантажні термінали автотранспорту, морських і річкових портів, термінали повітряного транспорту. За характером виконуваних операцій вантажопереробки їх відносять до транзитно-перевалювальних. Термін зберігання вантажів зведений до мінімуму, адже цей склад призначений для ефективного і своєчасного забезпечення клієнтів шляхом заміни одного виду доставки (або транспортного засобу) на інший. Вантажі постачаються і відправляються великими партіями, при цьому

вантажна одиниця, що постачається (піддон або контейнер), на складі не розформовується. На таких складах доцільний високий рівень механізації. Група цих складів може перебувати як у межах заготівельної, так і розподільчої логістики. У табл. 1.1 показано класифікація складів.

Таблиця 1.1 – Класифікація складів

Ознака класифікації	Види товарних складів
Характер виконуваних функцій	Сортувально-розподільчі, транзитно-перевалочні, накопичувальні
Товарна спеціалізація	Універсальні, спеціалізовані, вузькоспеціалізовані, комбіновані, неспеціалізовані, змішаного зберігання
Технічна будова, яка визначає режим зберігання товарів	Загальнотоварні, спеціальні
Розмір корисної складської площі (складського об'єму), місткості	Малі – до 5 тис. м ² (30 тис. м ³), до 1 тис. т; середні – від 5 до 10 тис. м ² (від 30 до 60 тис. м ³), від 1 до 6 тис. т; великі – понад 10 тис. м ² (понад 60 тис. м ³), понад 6 тис. т
Рівень механізації вантажопереробки	Немеханізовані, механізовані, комплексно-механізовані, автоматичні
Поверхова висота приміщень	Одноповерхові (низьковисотні, середньовисотні, висотні)
Транспортні умови	Прирейкові, портові, при пристанях, неприрейкові (внутрішньоміські)
Конструктивні особливості	Закриті, напівзакриті, відкриті
Температурний режим	Утеплені, неутеплені, опалювані, неопалювані, склади-холодильники
Форма користування	Індивідуального користування, спільного користування, загального користування
Форма властивості	Державні, колективні, приватні, спільні

Однією з основних ознак класифікації складів є характер виконуваних ними функцій. Залежно від цього склади поділяються на сортувально-розподільчі, транзитно-перевалочні, накопичувальні. Найпоширенішим видом складів є сортувально-розподільчі, які мають значну питому вагу у складському товарообороті. На таких складах здійснюється приймання товарів від місцевих та позамісцевих постачальників, а також їх сортування, комплектування партій товарів відповідно до замовлень роздрібних торговельних організацій. На сортувально-розподільчих складах, як правило, зосереджуються поточні товарні запаси, які зберігаються відносно недовгий час. Тому функція зберігання товарів для цих складів не є характерною [11].

Транзитно-перевалочні склади в основному призначені для переправлення товарів з районів виробництва до пунктів споживання різними видами транспорту. Ці склади виконують роль перевалочних пунктів, забезпечуючи вивантаження товарів, що прибули на одному з видів транспорту, приймання їх за масою та кількістю місць, сортування згідно з місцем призначення та навантаження на інший вид транспорту [12].

Накопичувальні склади існують для сезонного та тривалого зберігання товарів. Оскільки вони забезпечують накопичення та відносно тривале зберігання товарів, великого значення набуває також контроль за якістю зберігання товарів. Накопичувальні склади зосереджені здебільшого в оптовій ланці. Разом з основними функціями накопичення та зберігання товарів ці склади виконують допоміжні технологічні операції, пов'язані з прийманням та відпуском товарів оптовим покупцям. Ідеться про їх перепакування, сортування тощо. Залежно від товарної специфікації, обумовленої асортиментом товарів, які підлягають зберіганню, розрізняють універсальні, спеціалізовані, вузькоспеціалізовані, комбіновані, неспеціалізовані склади та склади змішаного зберігання [13].

Універсальні склади використовуються для зберігання й складської обробки однієї з груп товарів.

Вузькоспеціалізовані склади використовують для зберігання товарів

одного виду, як правило, простого асортименту, але таких, які вимагають особливого режиму зберігання на комбінованих складах.

Неспеціалізовані склади на відміну від попередніх видів призначені для зберігання й проведення різних технологічних операцій з кількома групами товарів, не пов'язаних між собою єдністю споживчого призначення (склади гастрономічних, м'ясних, рибних та інших товарів).

На складах змішаного зберігання складські операції виконують з основними видами продовольчих та непродовольчих товарів.

Важливою ознакою класифікації складів є їх технічна побудова, що визначає режим зберігання товарів. За цією ознакою склади поділяються на загальнотоварні та спеціальні.

Загальнотоварні склади призначені для зберігання й складської обробки товарів, які не потребують дотримання спеціальних умов зберігання.

Спеціальні склади призначені для зберігання товарів, фізико-хімічні особливості яких потребують створення спеціальних конструкцій будівель чи технологічних пристроїв. Як правило, спеціалізовані склади поділяються на такі основні типи: немеханізовані, механізовані, комплексно-механізовані, автоматизовані, автоматичні.

Немеханізованими є склади з ручною вантажопереробкою, механізовані ж є складами, що мають дільниці з локально механізованими технологічними операціями за умов ручного укладання та комплектування продукції. Комплексно-механізованими є склади з механізованою вантажопереробкою, що відбувається протягом усього технологічного циклу. Автоматизованими є комплексно-механізовані склади чи їх дільниці, що мають автоматизовану систему пошуку та розміщення вантажів (АСПРВ), програмно-керований працетехнічний чи автооперативний комплекс (ПКРАК), експлуатований у максимальному режимі, чи комплекс устаткування з локальними системами автоматизованого управління, оснащений електронною автоматикою. Автоматичні склади є програмно керованими автоматизованими складами, що експлуатуються в автоматизованій системі управління технологічним процесом

(АСУТП) за допомогою ЕОМ без безпосередньої участі людини, тобто склади-автомати з технологією, що не потребує участі людини.

Важливим елементом класифікації складів є їх поверхневість та висота приміщень. Відповідно до цього розрізняють одноповерхові низьковисотні склади (їх робоча висота сягає 7,2 м), середньовисотні (їх висота становить від 7,2 м до 12,6 м), висотні (їх висота – понад 12,6 м) та багатоповерхові склади. Залежно від транспортних умов, зокрема, враховуючи розміщення поблизу залізничних чи водних шляхів, склади відповідно називають приреєковими (розташовані біля магістральних залізничних шляхів або мають під'їзні шляхи), склади при пристанях (розташовані на річкових пристанях, які мають причали), портові (розташовані у морських портах), неприреєкові (внутрішньоміські) склади (безпосередньо не зв'язані з транспортними шляхами).

Залежно від конструктивних особливостей складські будівлі бувають закритими, напівзакритими, відкритими. Закриті склади є основним видом складських будівель. Вони, як правило, розподіляються у певній послідовності на окремі приміщення, призначені для виконання різних видів робіт (приймання, зберігання, фасування, комплектування партій товару тощо).

Закриті склади розрізняють за утепленістю, кількістю поверхів, матеріалів стін, за ступенем вогнестійкості (неспалимі, важкоспалимі, спалимі).

До напівзакритих належать різного типу навіси. За конструкцією вони можуть бути або зовсім без стін, або мати одну, дві, три стіни. Висота їх досягає від 4 м до 6 м. Довжина може бути різною, але не більше 180 м. Фундаменти навісів асфальтують чи бетонують.

Відкриті склади є рівними майданчиками з незначним схилом до країв для стоку дощової та талої води. На них зберігаються матеріальні цінності, яким не загрожує температурний чи атмосферний вплив.

Залежно від температурного режиму чи утепленості закриті склади поділяються на неутеплені (неопалювані), утеплені (опалювані) та склади-холодильники. Неутеплені (неопалювані) склади використовують в основному для зберігання товарів у скляній, м'якій чи іншій тарі. Ці склади будують без

горищного покриття, утепленої підлоги та дверних тамбурів. Утеплені (опалювані) склади мають горище чи з'єднані з утепленим дахом, а також мають дверні тамбури, утеплені підлоги. На таких складах створюються умови для захисту товарів від зовнішньотемпературних перепадів та вологості повітря. Склади-холодильники обладнані пристроями для підтримання від'ємного рівня температури у камерах зберігання швидкопсувних товарів.

Залежно від форми використання розрізняють склади індивідуального, спільного та загального користування. Склад індивідуального користування є власністю однієї торговельної організації чи підприємства, які використовують його площу для обладнання за власним розсудом, однак він може бути й орендованим приміщенням. Серед складів спільного користування виділяють два різновиди: кооперативні та об'єднані.

Кооперативні склади належать торговельним організаціям, які об'єднали капітал для будівництва великого складського комплексу й користуються ним спільно [14].

Об'єднані склади належать одній торговельній організації, але використовують їх декілька установ чи підприємств. До складів загального користування належать спеціально споруджені складські будівлі, приміщення яких здаються у тимчасову експлуатацію будь-якій торговельній організації, яка потребує складської площі. Такі склади перебувають у власності транспортно-експедиційних та контейнерних служб залізничного транспорту, а також автотранспортних підприємств [15].

1.2 Аналіз методів складування

Оптимальна система складування передбачає раціональність технологічного процесу на складі. Основною умовою тут є мінімальна кількість операцій з переробки вантажу. Саме тому значна увага приділяється визначенню оптимального виду і розмірів товароносія, на якому формується складська вантажна одиниця. Такими товароносіями можуть стати: стоякові, сітчасті,

ящичні, плоскі піддони та напівпіддони, а також касети, ящики для дрібних вантажів тощо.

Складський товароносій пов'язує між собою номенклатуру вантажу, що переробляється, зовнішні та внутрішні матеріальні потоки і всі елементи системи.

На вибір товароносія впливають:

- вид та розміри упаковки і транспортної тари;
- система комплектації замовлення;
- оборотність товару;
- технологічне обладнання, що застосовується для складування вантажу;
- особливості підйомно-транспортних машин і механізмів, які обслуговують склад.

Головним критерієм правильного вибору товароносія є те, що складська вантажна одиниця не повертається із зони комплектації до зони зберігання у процесі формування замовлення покупця.

В основному розрізняють три види складування.

Одиничне – найпростіша форма, що використовується під час зберігання обладнання, транспортних та інших засобів, які тимчасово витримують відкритість. Досить часто застосовується лінійне і блокове збереження. За лінійного збереження до кожного одиничного збереження забезпечується прямий доступ, зручний для різноманітних товарів з невеликими і середніми розмірами.

Виокремлюють такі види збереження:

- розміщення товарів на підлозі;
- створення полиць-стелажів;
- рухомі полиці;
- стороння висотних стелажних складів.

Блокове збереження характеризується тісним (без простору) розміщенням. Недолік розміщення зберігатися можуть лише комплектні одиниці і неможливим є прямий доступ до об'єктів, що зберігаються.

Вирізняють такі види основних варіантів збереження: складування у штабельованих блоках;

- складування у висотних стелажах;
- складування у стелажах до 6 м;
- складування у прохідних (в'їзних) стелажах;
- складування у пересувних стелажах; складування в елеваторних стелажах та ін.

На сучасних складах частіше використовуються комбінації різних варіантів складування, особливо на складах оптової торгівлі. Пояснюється це різноманітністю продукції, що зберігається, із власними специфічними особливостями.

Доступність елементів, що складуються, їх розміри і вага впливають на конструкцію складів. Альтернативами є:

- плоска;
- висотна;
- стелажне збереження або у підвісному стані; збереження на відкритому повітрі.

Плоска – одноповерхова, без підвалу складська будівля. Висота до 4 м і використання простих транспортних засобів є найбільш економним порівняно з висотними.

Висотна, або багатоповерхова, будівля характеризується обмеженими можливостями навантаження на підлогу, додаткову витрату площі і капітальних коштів на створення кліток, стелажів та ін. Склади, що обладнані полицями, стелажми, розташовані в одноповерхових будівлях та досягають 14 м і вище. Перевага будівництва підвісних складів полягає у швидкому перебудуванні та вільному доступі транспорту до місць збереження. Ці склади мають захисні пристрої від непогоди і перевагу порівняно зі зберіганням на відкритому повітрі.

Для обслуговування складів використовують різноманітні наземно-транспортні машини і механізми, їх вибір тісно пов'язаний з переліченими підсистемами і залежить від характеристик самих технологічних засобів і

загальної спрямованості технічної оснащення складу.

Складське обладнання складається з допоміжних пристроїв для навантаження-розвантаження, внутрішньоскладських транспортних засобів, полиць, стелажів, ящиків, штабелерів та ін.

Найбільш поширеними на механізованих складах є такі види підйомно-транспортних засобів, як електронавантажники та електроштабелери, а на автоматизованих складах міжстелажні крани-штабелери.

Для досягнення ефективності обороту важливим є вибір відповідних видів внутрішньоскладського транспорту. Вони охоплюють: вилочні підйомники, ручні підйоми, електроталі, операторів для висотного стелажу ванн я складу, рухові роботи, рольганги тощо. Внутрішньоскладське транспортування передбачає пересування вантажу між різними зонами складу: від зони розвантаження у зону прийому, звідти у зону збереження, комплектації та в навантажувальну зону. Транспортування вантажів усередині складу має здійснюватися за мінімальної протяжності у часі та просторі за прямими маршрутами [16], [17].

Стелажі і полиці є складським обладнанням для одиничних товарів і виготовляються з дерева, бетону і сталі.

Під час переробки вантажу процес комплектації проходить у три етапи:

- відбір товару за замовленнями покупця;
- комплектація повного замовлення покупця згідно з його заявкою;
- комплектація партій відправки покупцям для централізованої або децентралізованої доставки.

Є кілька схем відбору, які містять різноманітне сполучення таких позицій:

- вихідне положення вантажу щодо відбиральника (статичне або динамічне) у процесі підготовки матеріалу до споживання;
- переміщення вантажу в просторі під час відбору (одномірне, двомірне);
- відбирання вантажу (за допомогою технічних засобів або без них);
- ступінь комплектації замовлення (централізований – відбирання вантажу одночасно для кількох клієнтів, децентралізований – для одного клієнта).

Технологічний процес на сучасних складах, насамперед автоматизованих, передбачає наявність систем, що управляють інформаційними потоками, які здійснюють:

- управління прийомом та відправкою вантажів;
- управління запасами на складі;
- обробку документації, що одержується;
- підготовку супроводжувальних документів під час відправки вантажів тощо [18].

На рисунку 1.2 перераховані види складування.

Складана одиниця	Вид складування	Обладнання для обслуговування складу	Комісіювання	Управління переміщенням вантажу	Обробка інформації	"Будівля"
Плоский піддон	Складування по підлозі	Візок	З місць зберігання	Вручну	Вручну	Склад із відкритим небом
Ящиківий піддон	Складування у блоках	Транспортер безперервної дії	У зоні комплектції	У місцевому режимі	У пакетному режимі	Плоский звичайний склад
Стійковий піддон	Складування в поличкових стелажах	Вилковий електровізок	Централізована відбірка	У дистанційному режимі	В режимі реального часу	Висотний плоский склад
Касета	Складування у висотних поличкових стелажах	Фронтальний електронавантажувач	Децентралізована відбірка	Від ЕОМ "он-лайн"	Безпосередньо з комп'ютера	Склад із висотною зоною зберігання
	Складування у прохідних стелажах	Електроштабелер повідовий	Динамічне вихідне положення			Багатоповерховий склад
	Складування у гравітаційних стелажах	Електроштабелер для висотних стелажів	Статичне вихідне становище			Склад із стелажно-несучою конструкцією
	Складування на елеваторних стелажах	Кран-штабелер міжстелажний	Одновимірне переміщення			
	Складування на елеваторних стелажах "Патерностер"		Двовимірне переміщення			
	Складування на стелажах, що циркулюють		Вручну			
	Конвеєрне складування		Механічне			

Рисунок 1.2 – Види складування [8].

1.3 Аналіз робототехнічних платформ (шатлів)

1.3.1 Changchun Rochiev Intelligent Equipment Manufacturing Co., Ltd.
(Китай)

На рис. 1.1 чотириходовий шатл.



Рисунок 1.1 – Чотириходовий шатл [6]

Чотириходова система вагона шатла – це рішення для інтенсивного зберігання, що має горизонтальні та вертикальні напрямні, які йдуть прямо до робочого положення. До з ommunicating з WCS або WMS системи, чотириходовий трансфер автомобіль може рухатися на обох поздовжніх і поперечних рейках. З нашою системою чотиристороннього шатла можна досягти 90% використання простору та зіткнення порожнеч між навантажувачем та полицею, а також скоротити витрати на технічне обслуговування, спричинені аваріями.

Чотириходовий шатл використовується на складі для автоматичного оброблення та транспортування піддонів. Наш чотириходовий шатл Pallet являє собою інтелектуальне вантажно-розвантажувальне обладнання, яке може

переміщатися як у вертикальному, так і горизонтальному напрямку. З високою гнучкістю, продукт може прийти в будь-яку позицію стелажу та налаштувати вхідну/вихідну пропускну здатність системи, збільшивши або зменшивши кількість шатлів. Працюйте з піком системи, налаштовуючи та плануючи операційний парк, та максимізуйте ефективність, вартість та ресурси [6].

1.3.2 Система транспортування для палет ISC series (КИТАЙ)

На рис. 1.2 система транспортування для палет ISC series.



Рисунок 1.2 – Система транспортування для палет ISC series [6]

Шатл-візок використовується з вилковим навантажувачем для напівавтоматичного зберігання матеріалів.

Стандартні технічні параметри:

- універсальний розмір піддону – довжина від 1200 мм до 1400 мм, ширина від 800 мм до 1200 мм;
- максимальне навантаження: 1500 кг;
- швидкість пересування:
- повне навантаження 0,8 м/с, Порожнеча 1 м/с;
- акумулятор: фосфат заліза літію, 24 В, 64 А, протягом 8 год безперервної роботи;

– стандартні компоненти: 1x Візок, 1x Акумулятор, 1x Зарядний пристрій, 1x Віддалений контроль, 1x User manual [6].

1.3.3 Система транспортування для палет RS 150 (Швейцарія)

На рис. 1.3 система транспортування для палет RS 150.



Рисунок 1.3 – Система транспортування для палет RS 150 [6]

Автоматизоване кріплення вантажу для зберігання з високою густиною розміщення RS150 BT Radioshuttle – це дистанційно керований шатл, який перевозить палети в тунелях.

Напівавтоматична функціональність допомагає заощадити час і уможливити більш ефективне використання драйверів.

BT Radioshuttle RS150 доступний для обробки декількох різних розмірів палет до 1200 мм² x 1200 мм². Для керування встановленими пристроями, до 200 пристроїв, водій може використовувати передавач у будь-якому місці на складі, що робить BT Radioshuttle простим у використанні та економічно ефективним.

Деякі характеристики:

- вантажопідйомність до 1,5 т;
- бездротовий пульт дистанційного керування;

- висока швидкість пересування;
- додаткові функції безпеки;
- підходить для використання в холодному та вологому середовищі [6].

1.3.4 Jiangsu EBIL Intelligent Storage Technology Co.,Ltd. (Китай)

На рис. 1.4 Шатл RGV.

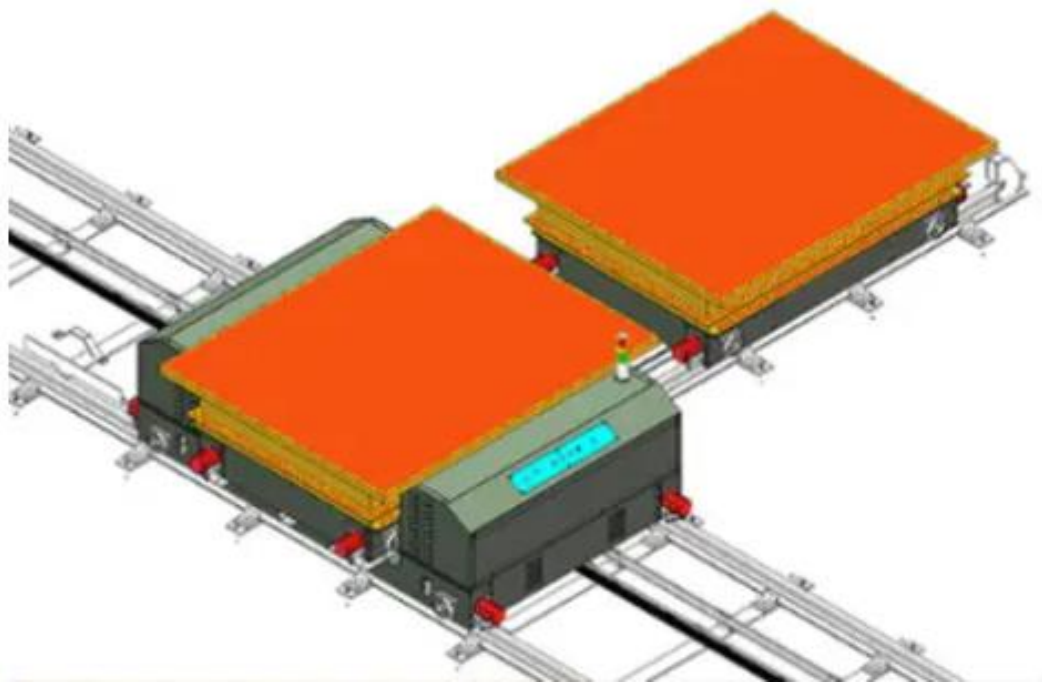


Рисунок 1.4 – Шатл RGV [6]

В автоматизованій логістичній транспортній системі шатл є важливим транспортним обладнанням. Його структура проста, маневрена та гнучка. Залежно від умов роботи на об'єкті ви можете вибрати прямолінійний, кільцевий або надпотужний траверсний режим. Автоматизований шатл може замінити велику кількість звичайного транспортувального обладнання, а ефективність його автоматичного керування висока.

Шатл RGV широко використовується в середніх і великих проектах автоматизованих складів, таких галузях, як товари повсякденної необхідності,

ліки, тютюн і медицина.

Переваги та характеристики надпотужного шатла RGV траверсного типу:

– використовується у різних складах високої щільності зберігання та покращує ємність всього складу;

– стабільна робота;

– висока швидкість роботи; підвищення загальної ефективності;

– автоматичне керування; багатопозиційне навішування;

– може бути підключений до кількох конвеєрних майданчиків;

– підвищує рівень автоматизації на заводі;

– робота прямим шляхом або вигнутим шляхом (опціонально) –

– індивідуальний дизайн;

– перенесення різних інструментів для перенесення;

– управління з перетворенням частоти або сервоуправління (опціонально)

[19].

PALLET RUNNER. Важливою особливістю даної системи є використання самохідного візка – радіокерованого шатла, який здійснює транспортування вантажів. На відміну від традиційних систем, які вимагають інтенсивної роботи штабелера, шатл може переміщати вантажі, перебуваючи усередині стелажів [20].

Шатл встановлюється на рейки, передбачені в стелажах, і переміщається ними, реагуючи на команди оператора. Розміри шатла підібрані так, щоб відповідати розмірам піддонів. Оскільки піддони можуть мати кілька варіантів розмірів, випускаються і шатли із різними габаритами [21].

Шатл є високотехнологічним пристроєм. Він має стійке шасі, а колеса покриті полімерними матеріалами, що забезпечують безшумність руху.

Вага найпоширенішого типу шатлів 370 кг при вантажопідйомності до 1,5 т.

Порожній візок пересувається зі швидкістю 0,9 м/сек, з повним навантаженням швидкість трохи падає до 0,75 м/сек.

Підйом та опускання палети вимагає 3 с, для цього використовується 4

гідроциліндри, розташовані рівномірно.

Одна зарядка дозволяє працювати шатлу до 20 год.

Повна зарядка акумуляторів потребує трьох годин.

Шаттл можна використовувати при температурах від $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Переваги технології Pallet Runner:

- проста конструкція, що складається із окремих модулів. Її елементи легко ремонтуються та замінюються;
- дистанційне управління. Шаттл виконує частину робіт з урахуванням власної програми, частина з допомогою команд оператора;
- відсутність простоїв. Шаттл практично завжди затребуваний на складі;
- значна швидкість обробки вантажів. Візок рухається з гарною швидкістю, разом зі штабелером він здатний швидко наповнити прохід піддонами з вантажем; [22].
- можливість функціонування за принципами FIFO та LIFO, що є недоступним для деяких систем зберігання;
- тривала робота від однієї зарядки. При цьому зміна батарей проводиться досить легко протягом декількох хвилин. Витягнуті батареї можна встановити на підзарядку;
- автономність шатлу. Йому не потрібні дроти чи інші способи подачі енергії;
- можливість використовувати самохідний візок у складах із різним температурним режимом, у тому числі й у холодильних складах;
- наявність підйомного пристрою у шатлі. Він спрацьовує швидко і має достатню вантажопідйомність. При цьому підйом проводиться рівномірно, що виключає перекидання та пошкодження вантажу; [23].
- максимальний коефіцієнт використання площі складу. Стелажі заповнюються вантажами з високою швидкістю, що робить оптимальним використанням шатлів на складах з інтенсивним вантажопотоком [24].

1.4 Аналіз методів переміщення у системі складування робототехнічних платформ

У ході проведення аналізу були виявлені наступні системи для переміщення у системах складування.

Конвеєрні системи для палет:

- автоматизація транспортування готової продукції і сировини;
- підходять для «холодних» складів і рефрижераторів;
- сумісні з палетами всіх типорозмірів;
- несуча здатність – до 2 000 кг.

Конвеєрні системи переважно застосовуються для транспортування палетованих вантажів між різними ділянками підприємства: зі складу сировини на виробництво, з виробництва на склад готової продукції, а також між окремими цехами виробництва. У разі, якщо вантажі переміщуються по постійному маршруту, а кількість операцій досить велика, конвеєри дозволяють істотно автоматизувати логістичний ланцюжок, мінімізуючи участь персоналу та складської техніки [25].

На рис. 1.5 конвеєрні системи для палет.



Рисунок 1.5 – Конвеєрні системи для палет [25]

Конвеєрні системи для коробок і ящиків:

- можуть використовуватися в холодильних і морозильних складах;
- сумісні з більшістю типів тари;
- максимальна вага ящика – 50 кг;
- висока швидкість обробки.

Спектр застосування подібних конвеєрів дуже широкий: логістичні та поштові служби, e-commerce, автозапчастини, фармацевтика і багато інших сфер. Фактично, використання таких конвеєрів буде доцільним у будь-якій галузі, що передбачає обробку коробок або ящиків – особливо при 1000 і більше відвантажень на добу. Вони дозволять не тільки налагодити транспортування товару між різними зонами складу, але і забезпечать зручні робочі пости комплектувальникам замовлень, при цьому мінімізуючи зайві переміщення персоналу [25].

На рис. 1.6 конвеєрні системи для коробок і ящиків.



Рисунок 1.6 – Конвеєрні системи для коробок і ящиків [10]

Безпілотна складська техніка (системи AGV):

- підходить для роботи з небезпечними матеріалами і при впливі екстремальних температур;
- підвищують ефективність вантажно-розвантажувальних робіт;
- відповідає стандарту безпеки EN ISO 3691-4 2000.

Автоматично керована техніка (Automated Guided Vehicle) призначена для широкого кола повторюваних операцій – транспортування, навантаження і розвантаження причепів, складування піддонів у вузьких проходах, сортування товару, інвентаризації, чищення і дезінфекції приміщень. Вбудовані системи безпеки і програмне забезпечення роблять таку техніку набагато безпечнішою, ніж керована людиною [25].

На рис. 1.7 безпілотна складська техніка (системи AGV).



Рисунок 1.7 – Безпілотна складська техніка (системи AGV) [25]

Транспортний монорельс (шатл):

- робота в повністю автоматичному режимі;
- вантажопідйомність: до 1 500 кг залежно від моделі;
- можливість безперервної роботи;
- системи безпеки вищої категорії.

Транспортні монорельси для складу призначені для автоматичного і напівавтоматичного переміщення вантажів по спеціальних напрямних. Такі системи забезпечують високу ефективність обробки вхідних товарів і сировини в логістичних комплексах із високим товарообігом за фіксованими маршрутами [25].

На рис. 1.8 транспортний монорельс (шатл).



Рисунок 1.8 – Транспортний монорельс (шатл) [25]

1.5 Постановка завдань дослідження

У ході проведення досліджень були виявлені недоліки існуючих систем, такі як обмеження руху шатла лише по 1 осі, що не дуже зручно. В наслідок чого пропонується розробити нову конструкцію шатлу та розробити новий метод побудови маршруту шатлу.

Мета дослідження – розробка нової конструкції шатлу для складських систем 4.0.

Об’єкт дослідження – складські системи 4.0.

Предмет дослідження – транспортні шатли у складських системах 4.0.

Методи дослідження – метод рондамізацій, ланцюга Маркова, теорія матриць переміщення, теорія алгоритмів та теорія прийняття рішення.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасних систем складування у індустрії 4.0;
- провести аналіз існуючих методів складування;
- провести розробку методу побудови маршруту переміщення. Звіт з професійної практики виконано згідно з [3], [4].

2 РОЗРОБКА МЕТОДУ ПОБУДОВИ МАРШРУТУ ПЕРЕМІЩЕННЯ РОБОТОТЕХНІЧНИХ ПЛАТФОРМ

2.1 Аналіз сучасних констукцій всенаправлених колес

2.1.1 Всенаправлені конвеєрні ролики Celluveyor

Ці всенаправлені конвеєрні ролики можуть підвищити ефективність роботи на складах. Вони можуть рухатися в будь-якому напрямку, і називають їх Celluveyor. Складаються з декількох невеликих керованих коліс [26].

2.1.2 Колесо Mecanum

Колесо Mecanum – це всенаправлені колеса для наземного транспортного засобу, за допомогою яких він зможе рухатися в будь-якому напрямку, наприклад, рухатися прямо, косо, горизонтально, S-подібно, і обертатися під будь-яким кутом з нульовим радіусом [27].

Інтегровані механові колеса RoboST – це абсолютно нові механові колеса, які складаються з двигуна втулки, коробки передач, кодера, датчика Холла та системи амортизатора. Конструкція «все в одному» сприяє його високій компактності та полегшенню встановлення. І цей інноваційний дизайн розширює сценарії його застосування:

- всеспрямоване колесо; рівномірний рух убік і обертання;
- мотор, вбудований у колесо з маточиною mecanum;
- компактна структура та легка збірка;
- міцний і стабільний;
- гнучкий і маневрений.

Точне керування механовим колесом дозволяє легко працювати навіть у вузькому та обмеженому просторі, особливо у важкій промисловості. Він

широко використовується в роботі колеса месанум, роботі приводу месанум, мобільних роботах, складах і логістичних роботах, AGV, AMR, інтелектуальному обладнанні для паркування, інтралогістичних роботах та інших галузях для задоволення потреб різних галузей, таких як промисловість, наукові дослідження, комерційна, медичний та ін. [28].

2.1.3 Колесо Ілона або шведське колесо

Колесо Ілона або шведське колесо – колесо з рівномірно розподіленими по ободу роликками, через які відбувається взаємодія колеса із поверхнею переміщення. Таке колесо дає змогу транспортному засобу шляхом незалежного приведення у рух своїх коліс забезпечити контрольоване переміщення у будь-якому напрямку.

Конструкція виконана у вигляді колеса, на якому змонтовано декілька роликів, розподілених рівномірно по зовнішньому колу периметра колеса. Кут осі обертання роликів становить 45° до осі колеса. Ролики, що прикріплені по колу, є пасивними а для передавання енергії у рушій служить основна вісь.

Таке колесо характеризується трьома ступенями вільності: обертання навколо (моторизованої) колісної осі; обертання роликів; обертання навколо точки контакту ролика з поверхнею.

Шляхом зміни швидкості та напрямку обертання кожного з коліс, урухомлення кожного з яких забезпечується окремим двигуном, можна заставити транспорт, оснащений такими колесами, рухатись у будь-якому напрямку – не лише вперед-назад, праворуч-ліворуч але і діагонально.

Головною перевагою є те, що, хоча обертання колеса від привода здійснюється навколо однієї осі, воно може рухатись з невеликим тертям у різних напрямках. Відпадає потреба у механізмі повороту коліс для зміни напрямку руху. Шведське колесо можна віднести до типу всенаправлених коліс.

Хоча гусеничний рушій використовує схожий метод для повертання, одна

при цьому він може суттєво пошкодити поверхню, якою він переміщається. До того ж для подолання сил тертя при повертанні вимагаються значні крутні моменти.

Недоліком коліс Ілона є швидке зношування, складність конструкції, відносно невеликі швидкості переміщення.

У 1980-х роках ВМС США зацікавились проектом й викупили патент в Ілона. На військових кораблях апарати, оснащені такими колесами, застосовувались для переміщення вантажів в обмеженому просторі.

У 1997 році компанія «Airtrax Incorporated» та декілька інших компаній кожна заплатили ВМС США по 2500 доларів для того, щоб купити права на технологію, включно із старими креслениками та описами принципу роботи програмного забезпечення мікроконтролерів для керування двигунами. На основі придбаних матеріалів вони створили вилковий навантажувач, який міг би легко переміщатись в обмеженому просторі, як от, наприклад, палуба авіаносця. Такого роду транспорт уже виробляється.

Зазвичай використовується конфігурація, на базі 4-х коліс (наприклад, робот «URANUS», що здатний переміщатись в усіх напрямках):

- зушій;
- колеса Tri-star;
- Active Wheel [29].

2.2 Розробка методу переміщення робототехнічних платформ

Як метод переміщення робототехнічних платформ у складській системі було вирішено використовувати теорію гри у п'ятнадцять.

П'ятнашки (п'ятнадцять) – популярна головоломка, придумана у 1878 році Ноєм Чепменом. Складається з 15 однакових квадратних пластинок з нанесеними числами від 1 до 15. Пластинки поміщаються в квадратну коробку, довжина сторони якої в чотири рази більша довжини сторони пластинок, відповідно в коробці залишається незаповненим одне квадратне поле. Мета гри

– переміщаючи пластинки по коробці добитися впорядкування їх по номерах (рисю 2.1), бажано зробивши якомога менше переміщень.

Позначивши пусту клітину числом 16, властивості головоломки можна одержувати із властивостей перестановок чисел 1..16. Так кожне переміщення у головоломці відповідає деякій транспозиції числа 16 і деякого іншого числа. Кожна така транспозиція змінює парність перестановки чисел. Якщо в початковому розміщенні пуста клітина розташована у нижньому правому куті, то на своє місце вона може повернутися за парну кількість кроків, тобто парність у цьому випадку не зміниться. Тому якщо початкова перестановка є непарною (як наприклад на другому малюнку) то головоломка розв'язку не має. У загальному випадку розв'язку не існує, якщо непарним є число $n+i+j$, де n – рівно нулю для парних початкових перестановок чисел 1..16 і одиниці для непарних, i , j – позиція пустої клітини.

Натомість кожне початкове розміщення, для якого $n+i+j$ є парним, має розв'язок головоломки. Цей факт достатньо довести для випадку коли у початковому розміщенні пуста клітина розміщується у нежному правому куті. Потрібно розглянути множину перестановок, що можна одержати з правильного розміщення (що є розв'язком головоломки). Треба довести, що ця множина є множиною парних перестановок чисел 1..15.

Серед перестановок, які можна здійснити є цикл (11, 12, 15) (здійснюючи рух південь-схід-північ-захід). Тоді можна здійснити перестановки так щоб числа 11 і 12 були фіксовані, а на місці 15 опиниться довільне інше число. Тобто в групі перестановок також є цикли (11, 12, x) для довільного x з множини 1-10, 13, 14. Такі цикли породжують групу парних перестановок, що й доводить твердження.

2.3 Удосконалення методу побудови маршруту

Для початку можна роздивитись алгоритми пошуку оптимального шляху. Шлях із початкової вершини ХН до кінцевої вершини ХК – послідовність

дуг, що починається у вершині ХНХ, що закінчується у вершині ХКХ, і така, що кінець чергової дуги є початком наступної (і – номер шляху): $(x_H, x_{i1})(x_{i1}, x_{i2}) \dots (x_{i(i-1)}, x_i)$ (x_i, x_K) . Розрізняють наступні види шляхів:

- елементарний шлях – шлях, у якому вершини не повторюються;
- простий шлях – шлях, у якому дуги не повторюються;
- маршрут – послідовність ребер, що становлять, як і шлях, ланцюжок.

Довжина шляху виваженого графа визначається як сума ваги його дуг. Якщо граф не зважений, можна вважати ваги всіх дуг рівними 1, і тоді довжина шляху – це кількість дуг, що становлять шлях.

Найкоротшим шляхом між виділеною парою вершин x_H і x_K називається шлях, що має найменшу довжину серед усіх можливих шляхів між цими вершинами.

При побудові найдовшого шляху розглядаються елементарні або найпростіші шляхи, найдовші шляхи із заданим числом виконаних циклів. Найдовший шлях між x_H і x_K – шлях, що має найбільшу довжину серед усіх можливих шляхів між цими вершинами.

Розглянемо Хвильовий алгоритм побудови найкоротшого шляху для виваженого графа. На рис. 2.1 шлях між двома пунктами.

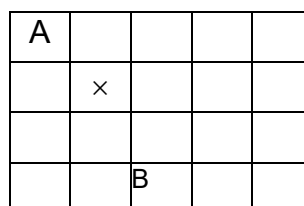


Рисунок 2.1 – Шлях між двома пунктами

Основою для хвильового алгоритму є процедура пошуку оптимального, тобто деякого критерію, шляху між двома пунктами, при виконанні ряду вимог:

- перша частина алгоритму моделює процес розповсюдження хвилі від елементарного майданчика А через вільні осередки. При розповсюдженні хвилі від А, алгоритм послідовно будує $\Phi_1(A)$, $\Phi_2(A)$, ..., $\Phi_k(A)$ її фронти. Множина

комірок що входять до i фронтів для всіх $i \leq k$ – це околиці осередку A $O_k(A)$. Якщо прокладання шляху можливе, тоді на $k + 1$ кроці виявиться, що $B \in O_{k+1}(A)$, якщо у наступний фронт не буде можливим врахувати жодного пустого осередку, тобто $O_k(A) = O_{k+1}(A)$, тоді при даних умовах шлях провести неможливо. Отже перша частина Хвильового алгоритму побудови шляху перевіряє можливість проведення шляху між A та B ;

– по другій частині Хвильового алгоритму побудови шляху, починаючи з B за встановленими правилами виконуємо перехід від осередку k -го фронту до осередку $k-1$ фронту, до тих пір поки не буде досягнуто A . Пройдені осередки це шлях, який шукали.

Вимоги, які повинні бути виконані при прокладанні шляху та можливість оцінки його оптимальності повинні бути закладені у правила, за котрими буде виконуватись рух фронту.

Для осередків закладається відносини сусідства (спільне ребро). Розповсюдження хвилі полягає у присвоєнні сусіднім осередкам значення вагової функції. Вага осередку k -го фронту P_k є функцією ваги осередку $k-1$ фронту. У загальному випадку до ваги осередків висувуються наступні вимоги: $P_k > P_{k-1}$, у більшості модифікацій цього алгоритму на вагу осередків накладається обмеження: $P_k > P_{k-1}$. У цьому випадку поведінка шляху складається у переході від A до B так, щоб P_k монотонно спадало. При цьому можливий варіант, коли декілька осередків сусідніх з даною мають однакову вагу. Для чіткого вибору при врахуванні критерію мінімальної кількості згибів провідника слід зберігати напрямок руху. Кщо треба робити поворот, тоді враховуємо заздалегідь заданий порядок вподобань.

Наприклад, нехай $P_k = P_{k-1} + 1$ – тобто дорівнює дистанції між k -м та початковим осередками в ортогональній метриці.

Робота алгоритму наведена нижче на рисунку 2.1:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	4	3	2	3	4	5	6	7	8	9	10	#
2	3	2	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	6	7	8	9	#
3	2	1	A	1	2	#	<u>6</u>	7	8	9	10	#
4	3	2	<u>1</u>	2	3	#	<u>7</u>	8	9	10	11	#
5	4	3	<u>2</u>	3	4	#	<u>8</u>	9	10	#	#	#
6	5	4	<u>3</u>	4	5	#	<u>9</u>	<u>10</u>	<u>11</u>	B		
7	6	5	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>7</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>10</u>	<u>11</u>		
8	7	6	5	6	7	8	9	10	11			

Рисунок 2.2 – Робота хвильового алгоритму пошуку шляху

Хвиля розповсюджується з $A, P_A = 0$ фронт хвилі доходить до B на 12 кроці. У ході побудови шляху з осередку з $P = 11$, можна перейти на 3 сусідні осередки з $P = 10$. Тут перехід здійснюється зберігаючи напрямлення вліво-вгору, так само з осередку з $P = 10$, у осередка $P = 9$, два сусідніх осередки $P = 8$, так як у цьому випадку треба змінювати напрямок руху, то перейдемо по вподобаному напрямку – вгору. Так як вага k -го осередку у цьому випадку дорівнює довжині шляху від A , то отриманий шлях є оптимальним, у сенсі його довжини у графі.

У загальному випадку функція може бути залежна від параметрів, що враховують довжину шляху, кількість переходів, ступінь наближення один до одного тощо. Наприклад у вигляді адитивної функції:

$$P_k = \sum_{i=1}^n a_i P_i(k), \quad (2.1)$$

де a_i – ваговий коефіцієнт, що враховує важливість i -го параметру, $P_i(k)$ – значення параметра, що враховується [30].

2.4 Висновки до 2 розділу

Отже провівши усі дослідження можна зробити висновок що дані зміни у конструкції шатлу та способі його переміщення на складі можна зробити висновок, що даний метод є найбільш ефективним для складських систем.

3 УДОСКОНАЛЕННЯ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ ТА РОЗРОБКА 3D МОДЕЛІ

3.1 Розробка 3D моделей елементів робототехнічної платформи

За допомогою програми для 3D моделювання 3D Мауа було розроблено графічні 3D моделі основних елементів робототехнічної платформи.

На рисунку 3.1 зображено 3D модель всенаправленого колеса.

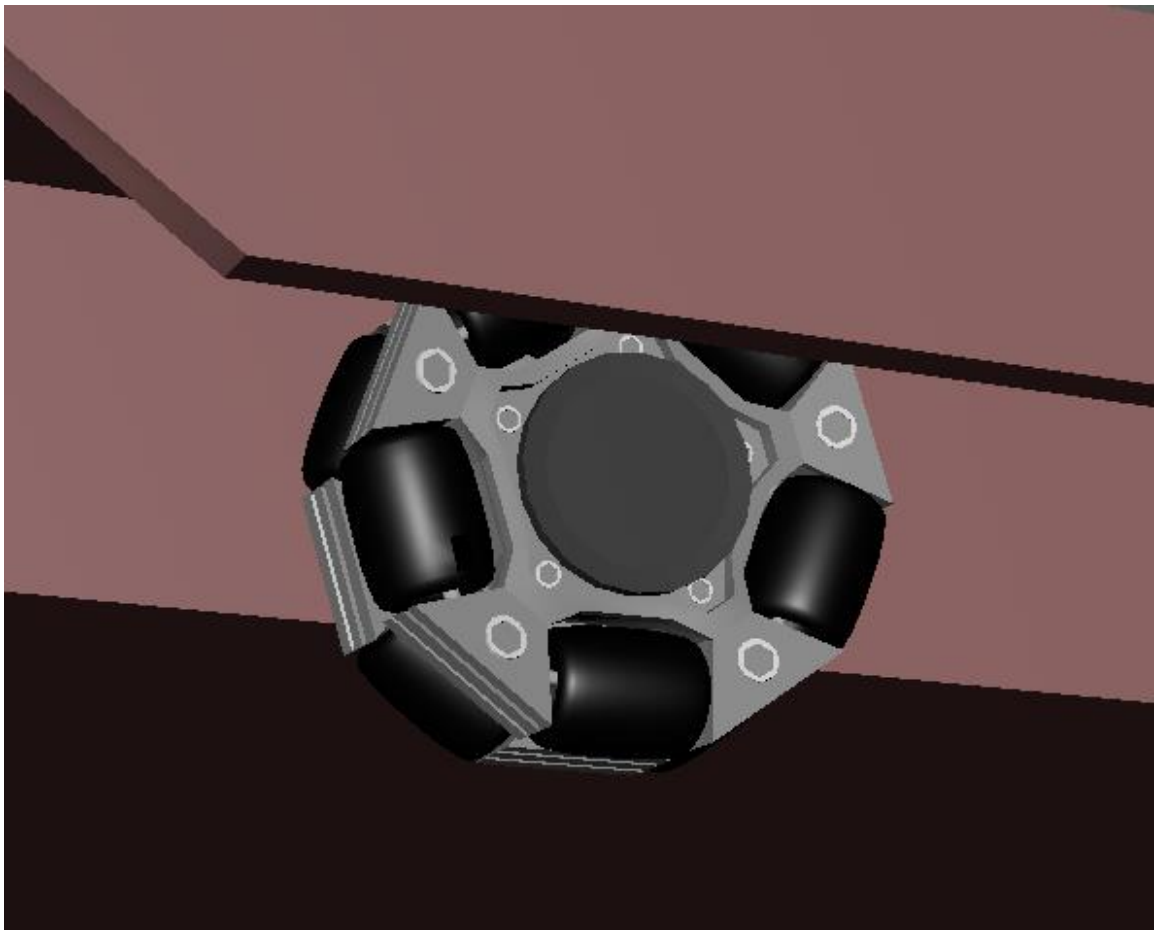


Рисунок 3.1 – Всенаправлене колесо

На рисунках 3.2 та 3.3 зображено 3D модель всенаправленого колеса та основи платформи.

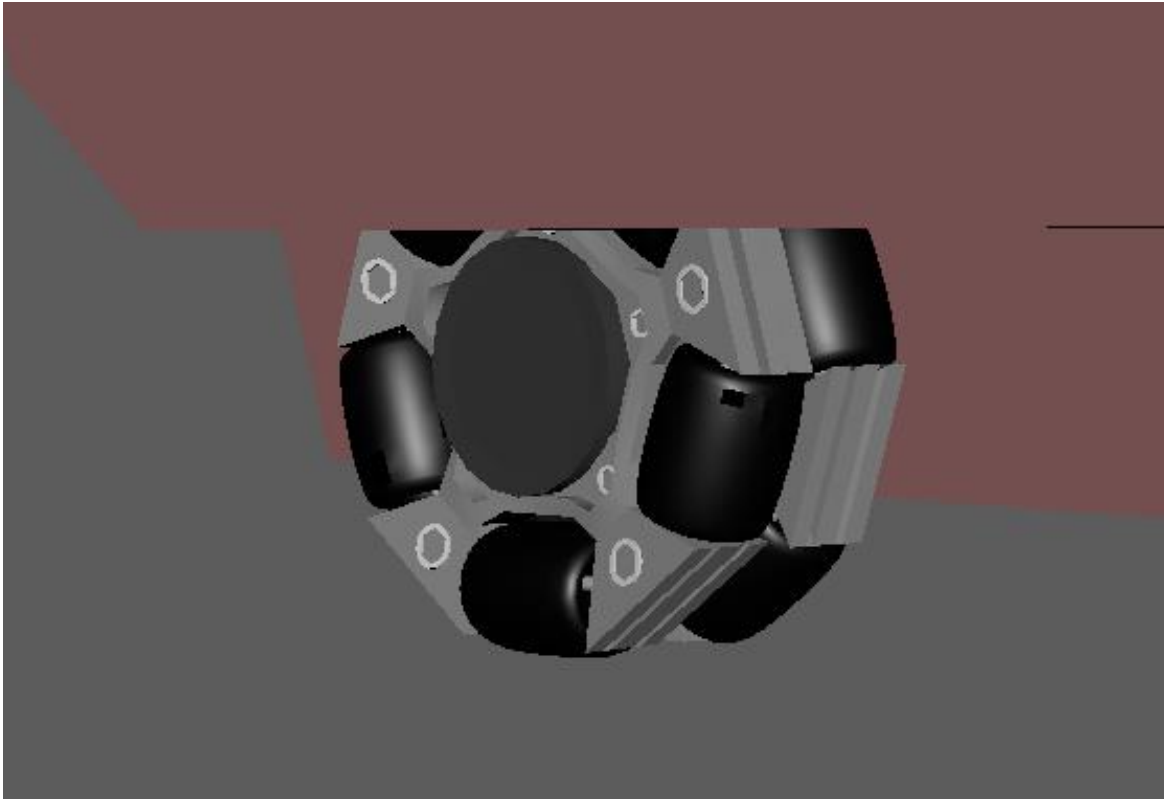


Рисунок 3.2 – Всенаправлене колесо

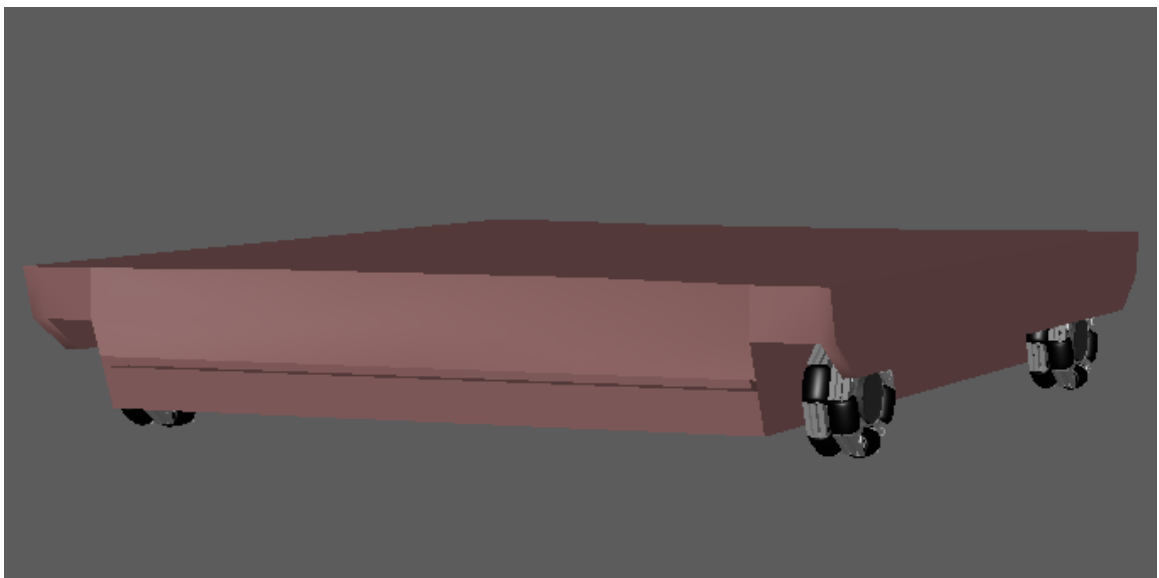


Рисунок 3.3 – Основа робототехнічної платформи

3.2 Розробка 3D моделі зборки робототехнічної платформи

Розробка сбірної моделі платформи так саме робилась у середі 3D Maya.

На рисунках 3.4 – 3.5 зображено розроблену зібрану модель робототехнічної платформи.

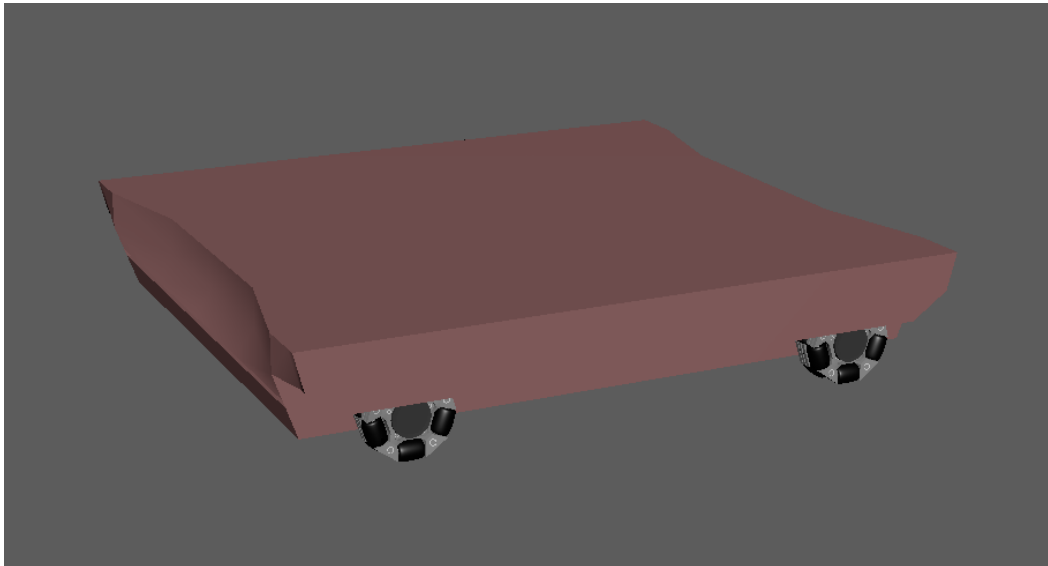


Рисунок 3.4 – Зібрана робототехнічна платформа

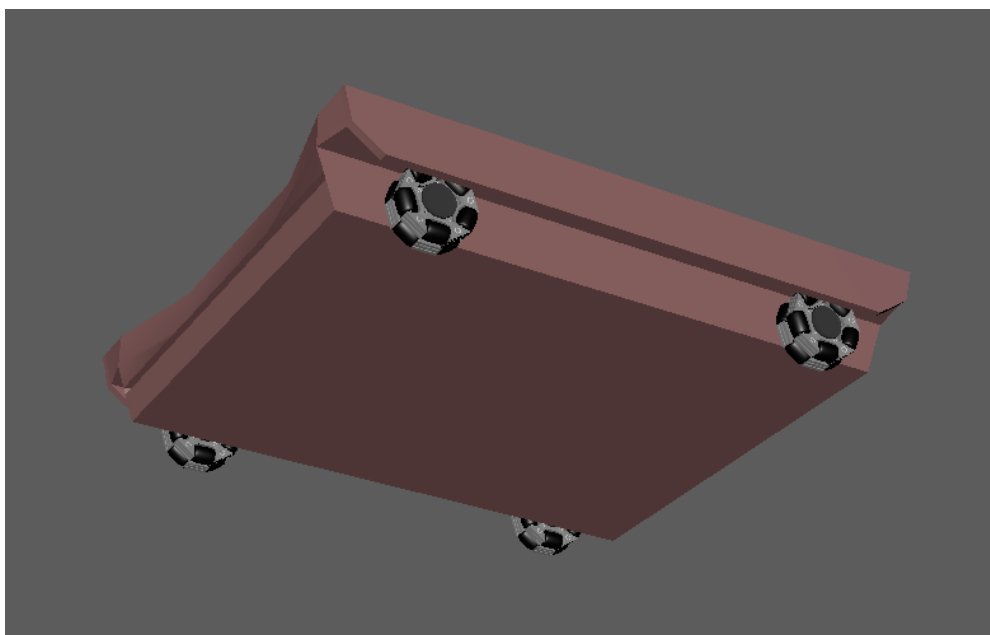


Рисунок 3.5 – Зібрана робототехнічна платформа

На рисунку 3.6 зображено розроблену зібрану модель робототехнічної платформи.



Рисунок 3.6 – Зібрана робототехнічна платформа

3.3 Розробка 3D моделі системи складування

На рисунку 3.7 зображено розроблену системи складування. Складська система представлена з видом збоку.

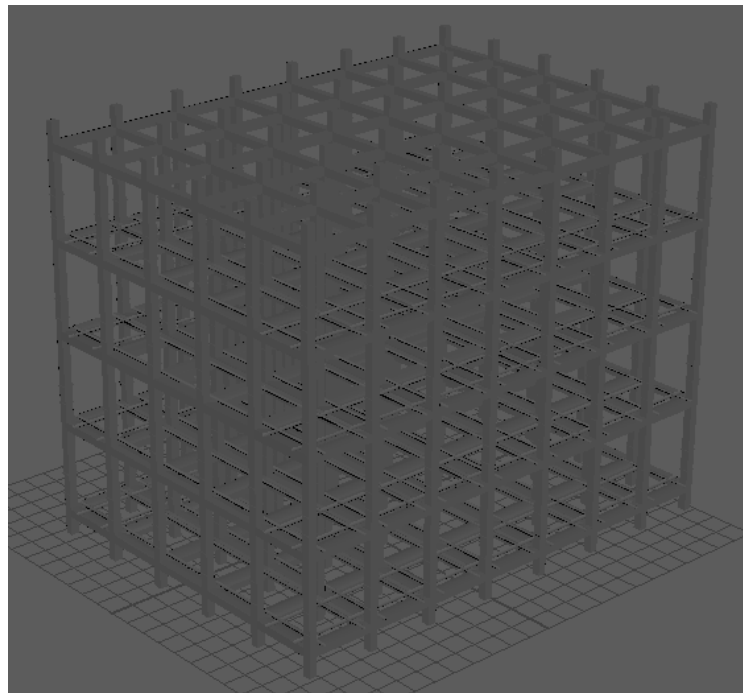


Рисунок 3.7 – Розроблена система складування

На рисунку 3.8 зображено розроблену системи складування. Складська система представлена з видом зверху.

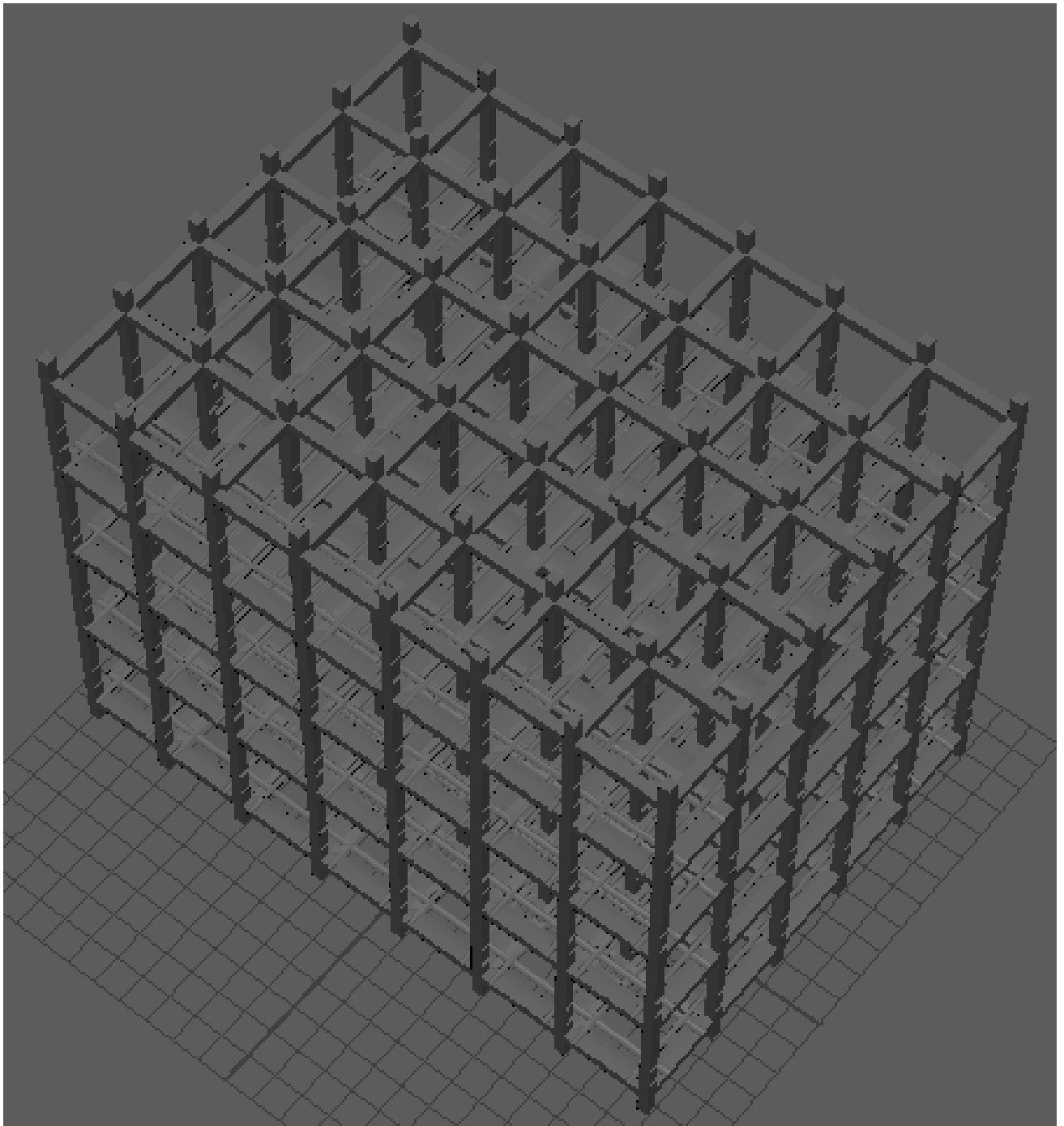


Рисунок 3.8 – Розроблена система складування

На рисунках 3.9 – 3.10 зображено розроблену системи складування.

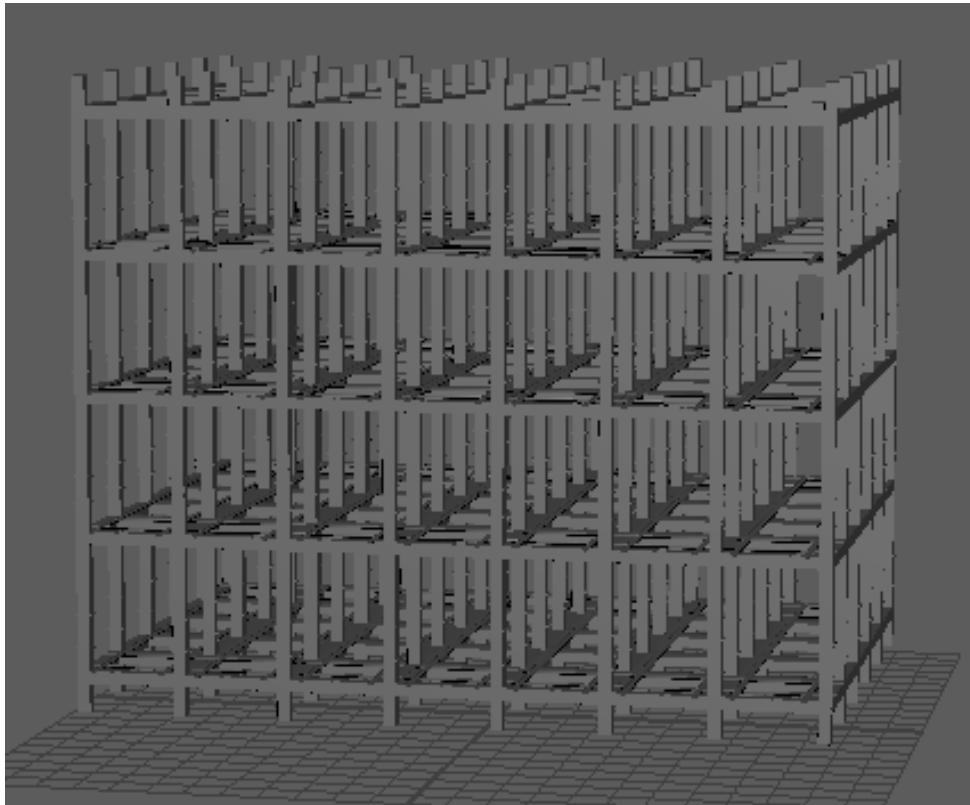


Рисунок 3.9 – Розроблена система складування

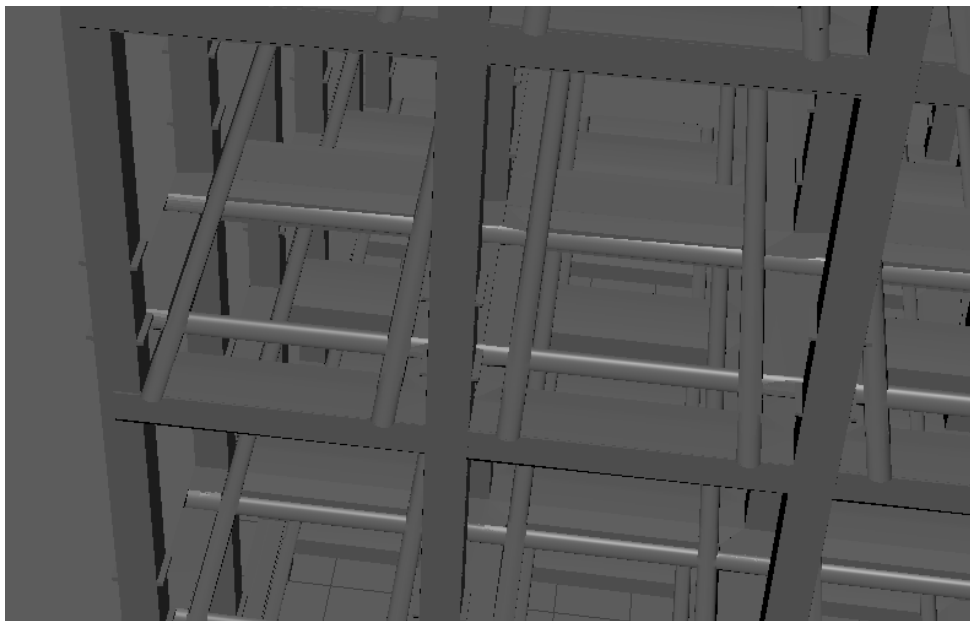


Рисунок 3.10 – Розроблена система складування

3.4 Створення візуальної моделі системи складування

На рисунках 3.9 – 3.10 зображено готову модель складської системи разом із робототехнічною платформою.

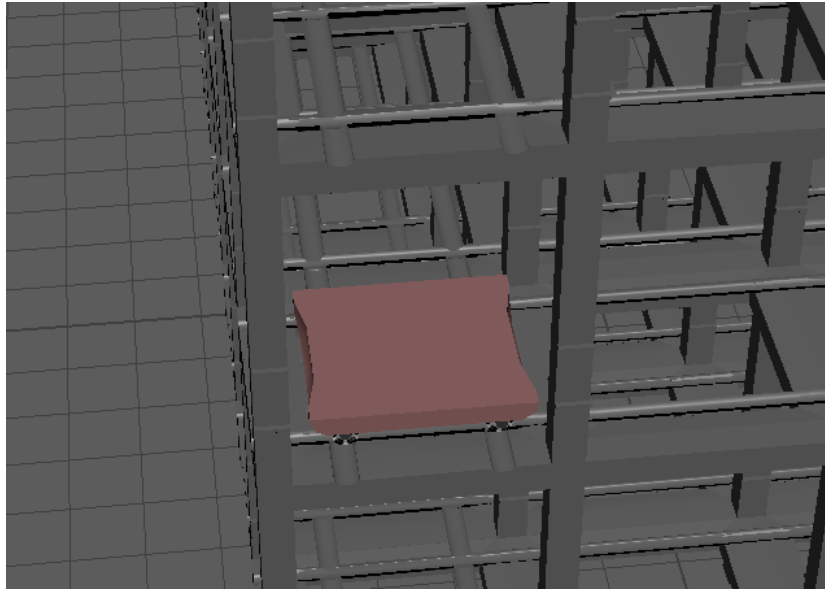


Рисунок 3.9 – Складська система з шатлом

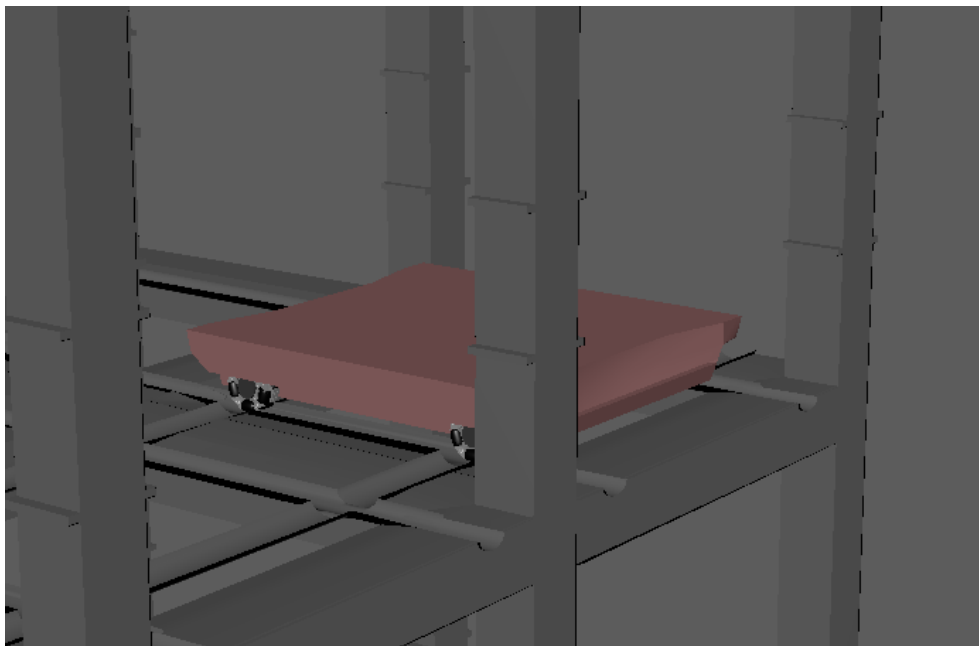


Рисунок 3.10 – Складська система з шатлом

На рисунку 3.11 зображено готову модель складської системи разом із робототехнічною платформою.

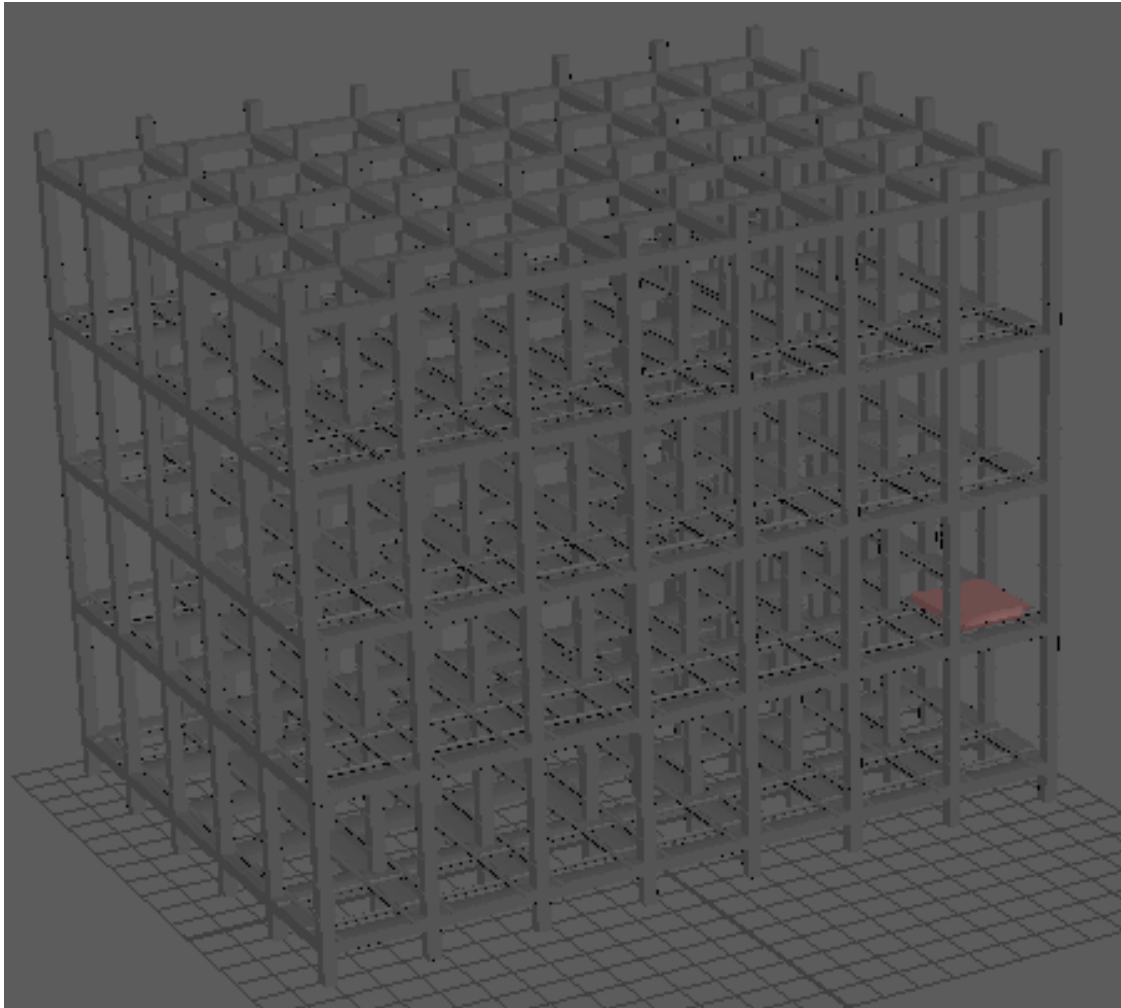


Рисунок 3.11 – Складська система з шатлом

3.5 Висновки до 3 розділу

На основі проведеної роботи можна зробити висновок, що нова концепція та модель складської системи у межах Індустрії 4.0. була розроблена.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1 Постановка завдань експерименту

Проведемо моделювання переміщення модифікованого шатла у складській системі розміром 7 на 5 відділень. Шатл зміненої конфігурації зі всенаправленими колесами.

Будемо моделювати побудову маршруту від початкової точки до потрібного грузу за допомогою використання хвильового алгоритму пошуку шляху.

Результати експерименту наведено у пункті 4.2.

4.2 Графіки порівняння

Проведемо декілька експериментів, для виявлення ефективності модифікованого хвильового алгоритму пошуку шляху.

Для цього розробимо умови, у яких платформа буде рухатись різними шляхами до потрібного грузу, та доставляти його у початкову точку, оминаючи різну кількість перешкод.

Проведемо перший експеримент: встановимо груз за координатами 4 по висоті 3 по ширині, та побудуємо маршрут за нашим алгоритмом.

Результати цього експерименту зображені на рисунках 4.1 – 4.3.

У ході експерименту платформа починає рух вгору (рис. 4.1), доходить до грузу (рис. 4.2) та повертається у початкову точку (рис.4.3).

На рисунку 4.1 представлена початкова позиція шатлу та грузу у складській системі і його подальший маршрут.

Платформа починає свій шлях, та рухається до грузу, траєкторія руху показана на рисунку 4.1.

На рисунку 4.1 представлена початкова позиція шатлу та грузу у складській системі і його подальший маршрут.

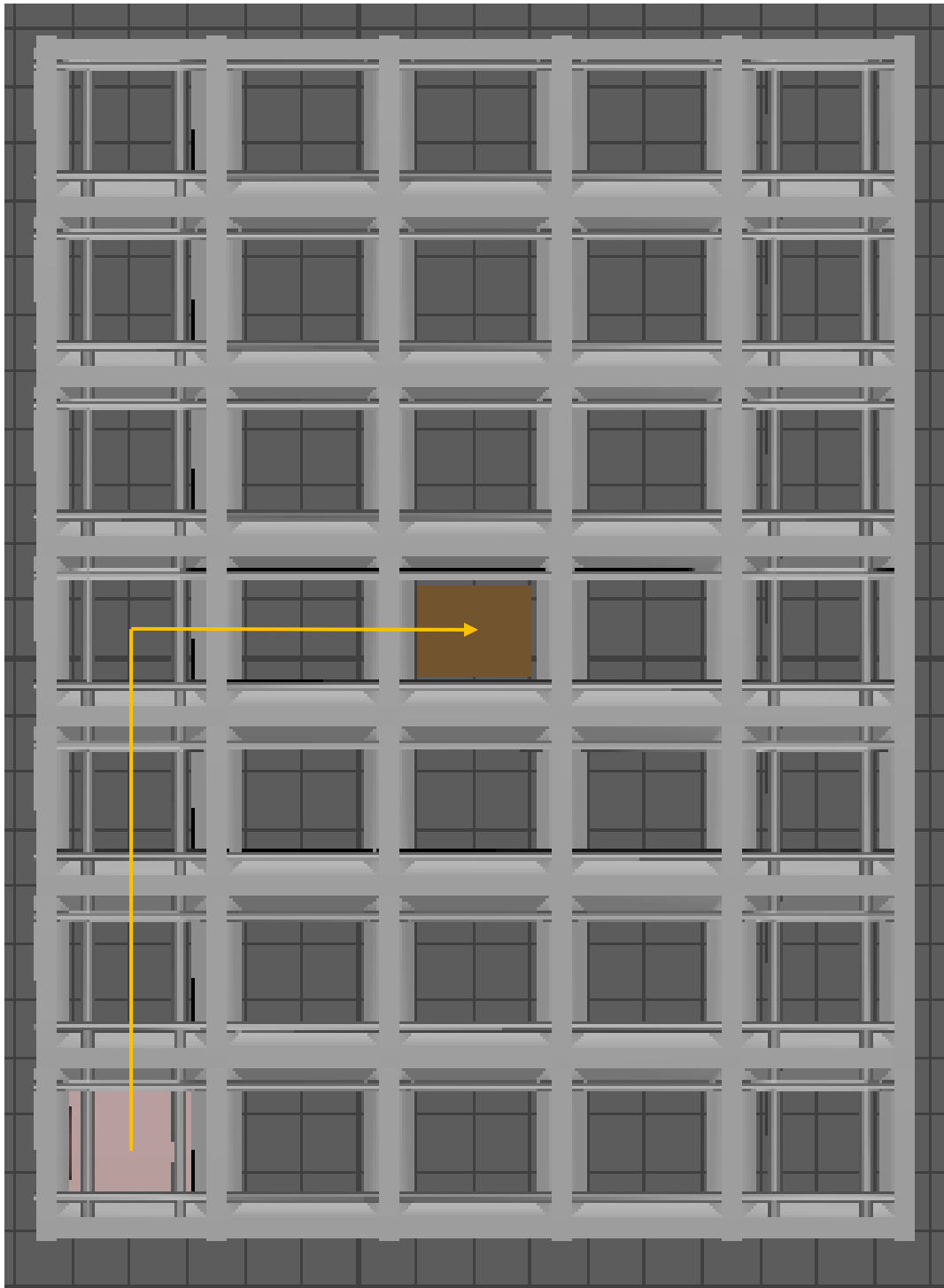


Рисунок 4.1 – Початкова позиція шатлу та грузу у складській системі і його

Платформа починає свій шлях, та рухається до грузу, траєкторія руху

показана на рисунку 4.1.

На рисунку 4.2 представлено як шатл дійшов до грузу і його подальший маршрут.

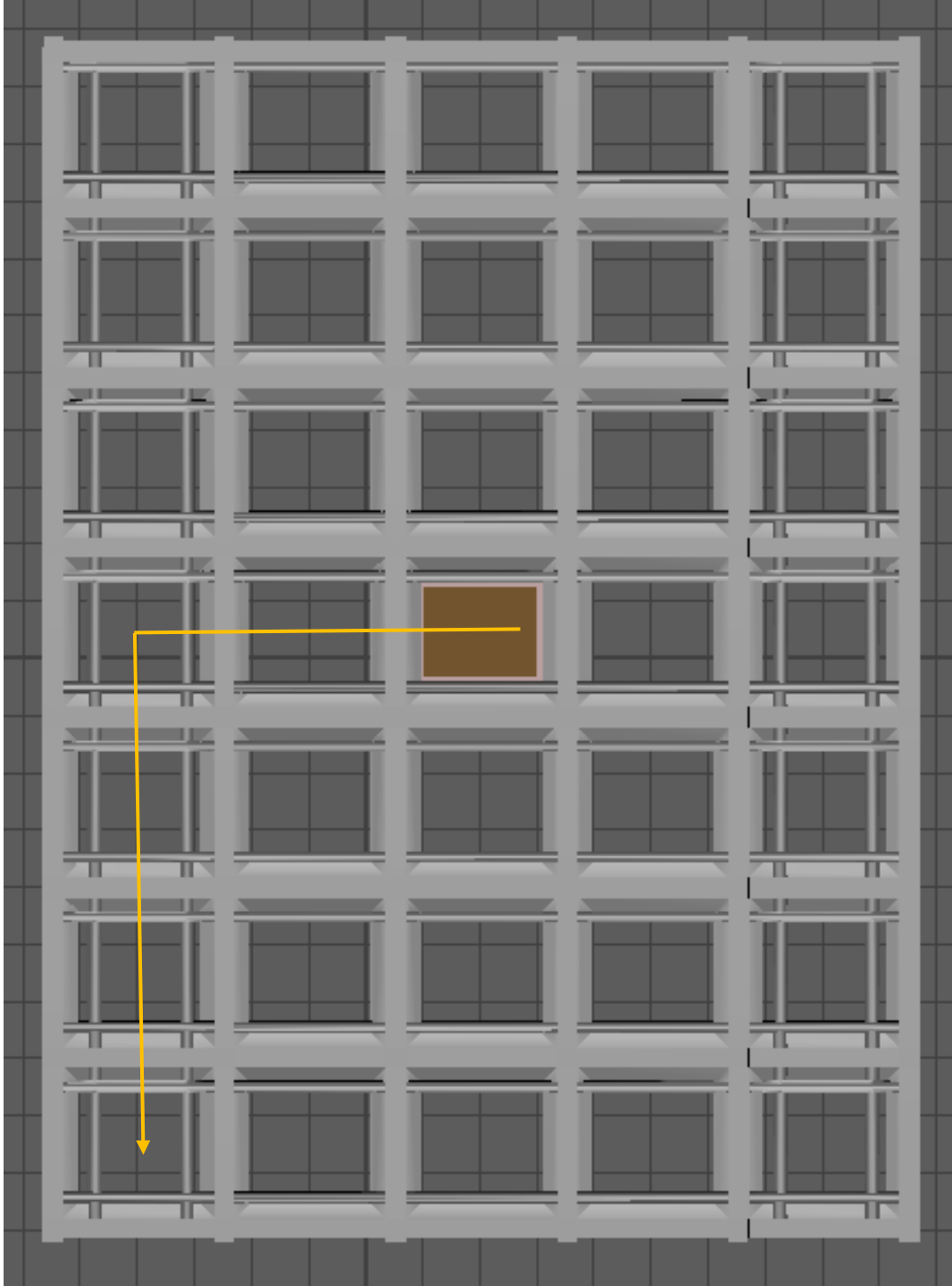


Рисунок 4.2 – Шатл дійшов до грузу

Платформам дійшла до грузу та забрала його, після чого продовжить рух до початкової точки.

На рисунку 4.3 показано повернення на початкову точку шатлу разом із грузом.

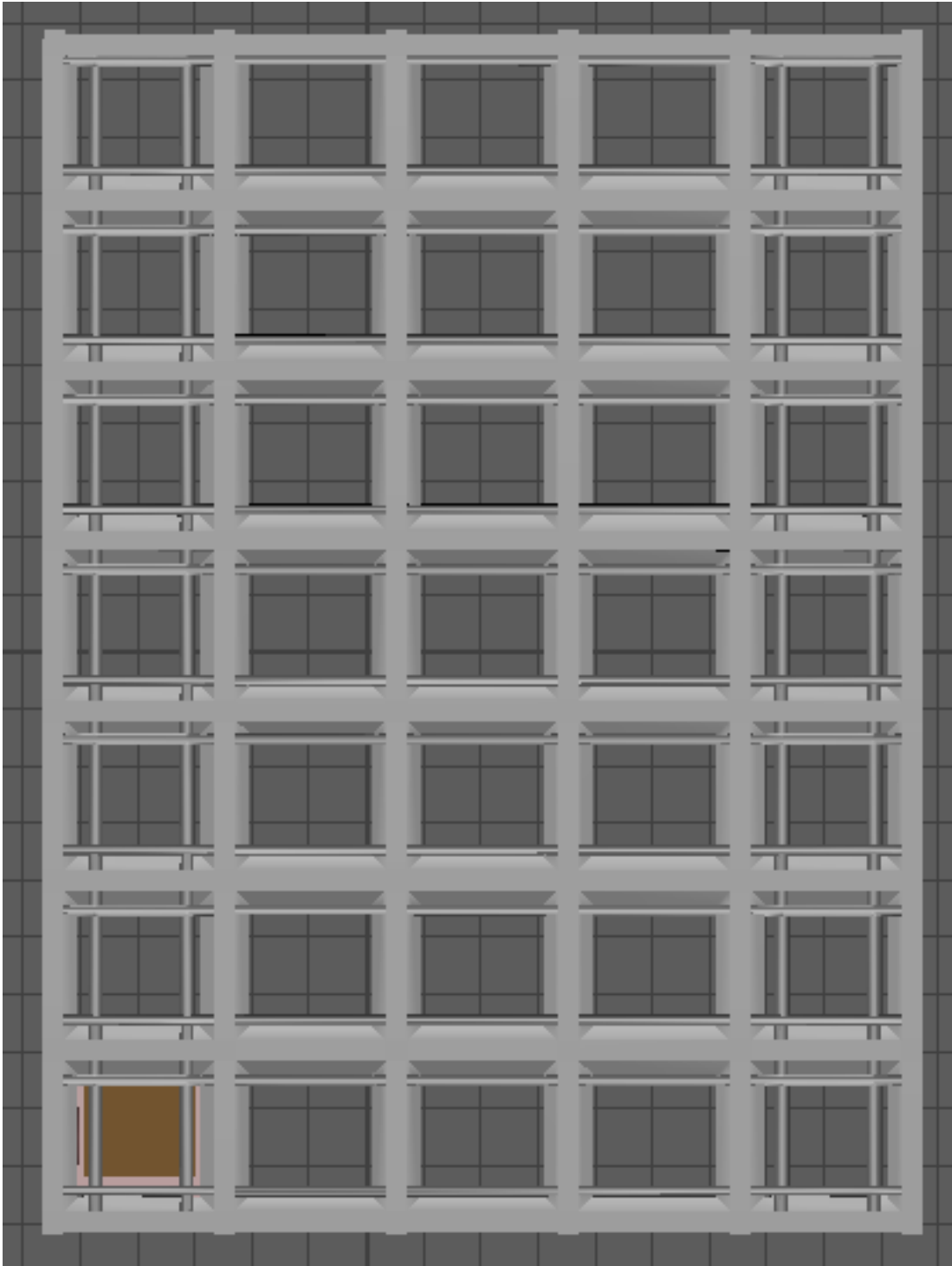


Рисунок 4.3 – Шатл разом із грузом повернувся на початкову точку

Проведемо другий експеримент: встановимо 2 грузи, серед яких потрібно забрати зелений, та побудуємо маршрут за нашим алгоритмом. Результат експерименту зображено на рисунках 4.4 – 4.5.

На рисунку 4.4 показана початкова позиція шатлу та грузу у складській системі та показник шляху і його подальший маршрут.

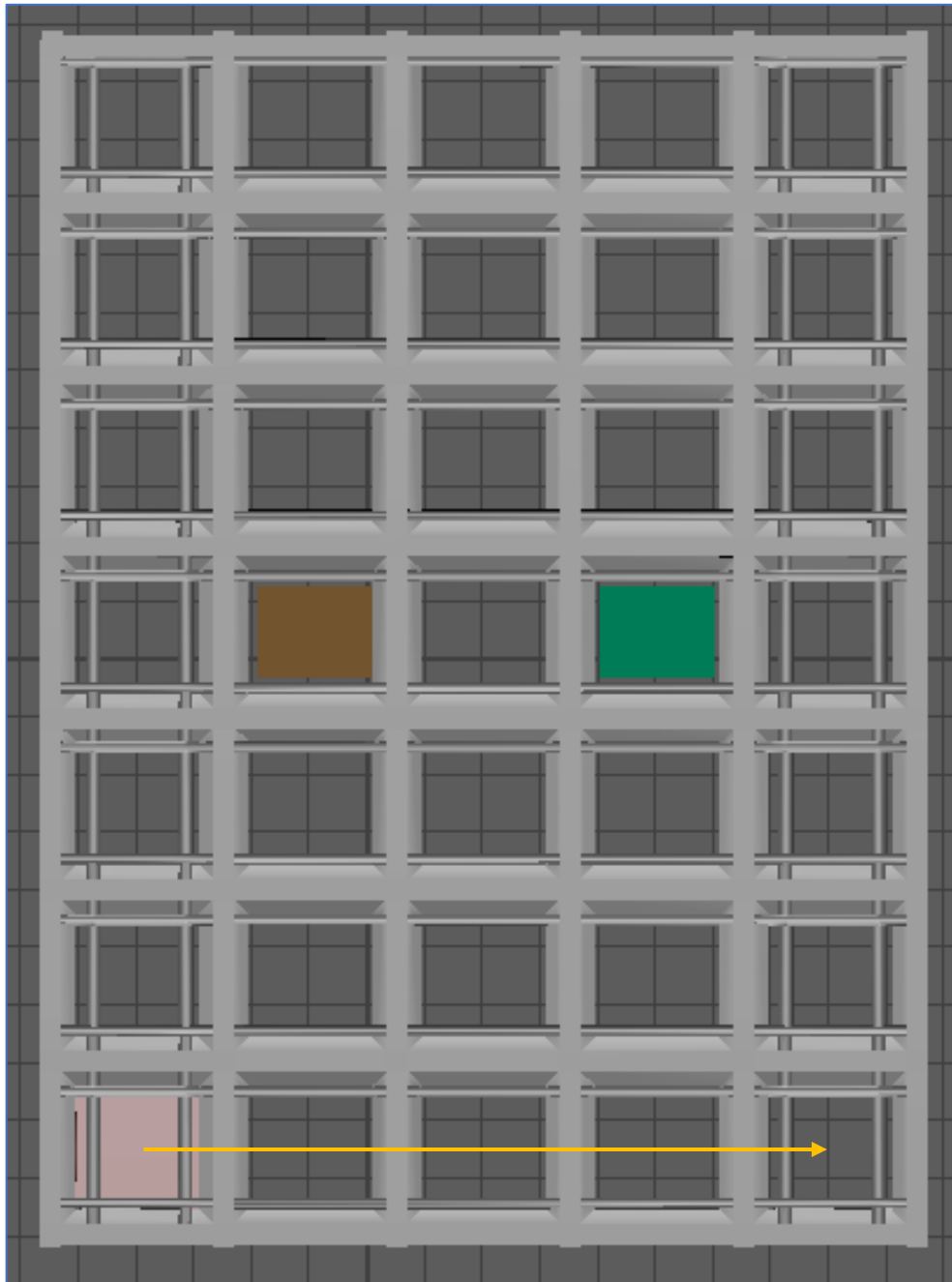


Рисунок 4.4 – Початкова позиція шатлу та грузу у складській системі та показник шляху і його подальший маршрут

На рисунку 4.5 представлена проміжна позиція шатлу у складській системі і його подальший маршрут.

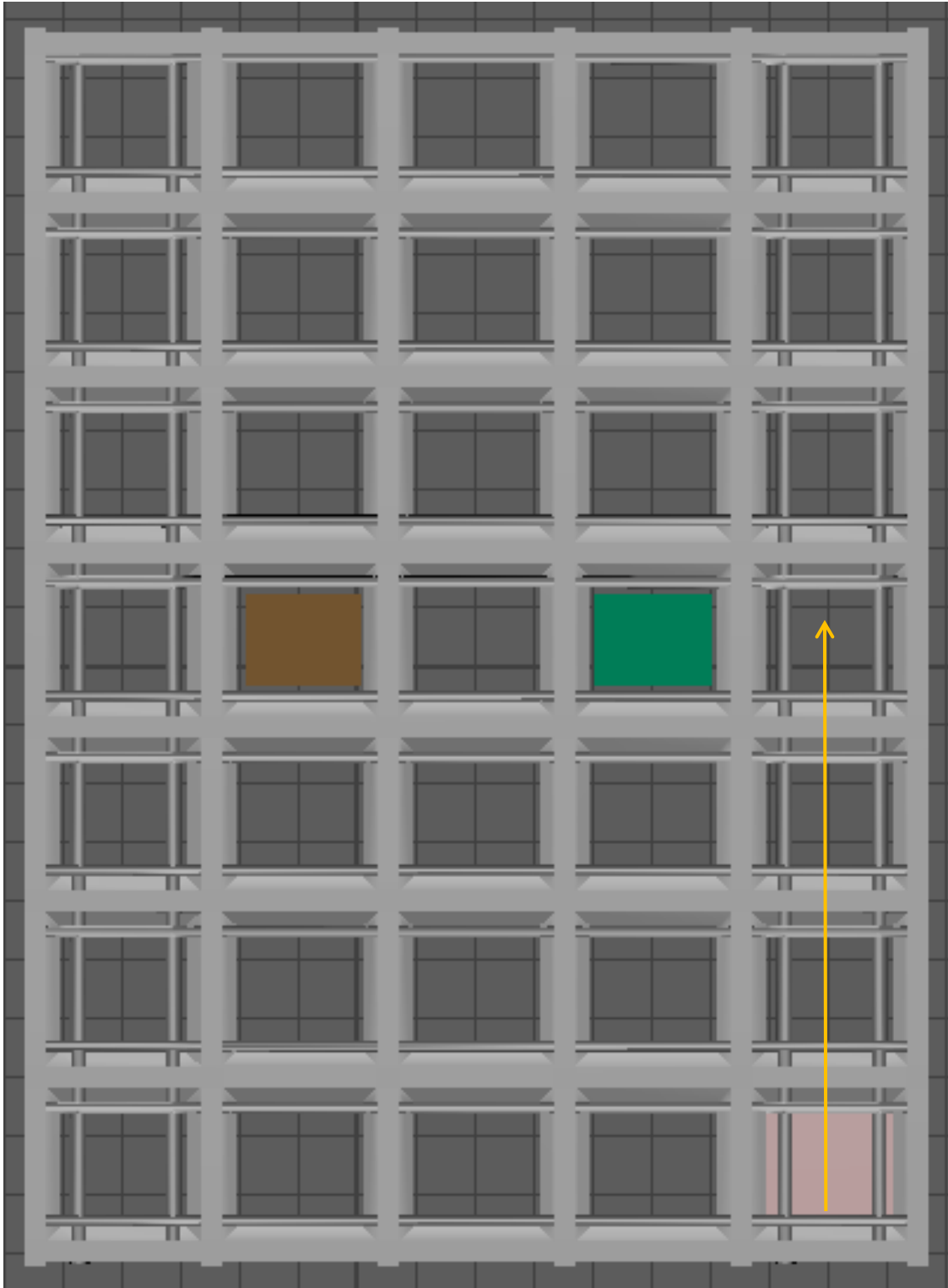


Рисунок 4.5 – Проміжна позиція шатлу у складській системі і його подальший маршрут

Проведемо другий експеримент: встановимо 2 грузи, серед яких потрібно забрати зелений, та побудуємо маршрут за нашим алгоритмом. Результат експерименту зображено на рисунках 4.6 – 4.7.

На рисунку 4.6 представлена проміжна позиція шатлу у складській системі і його подальший маршрут.

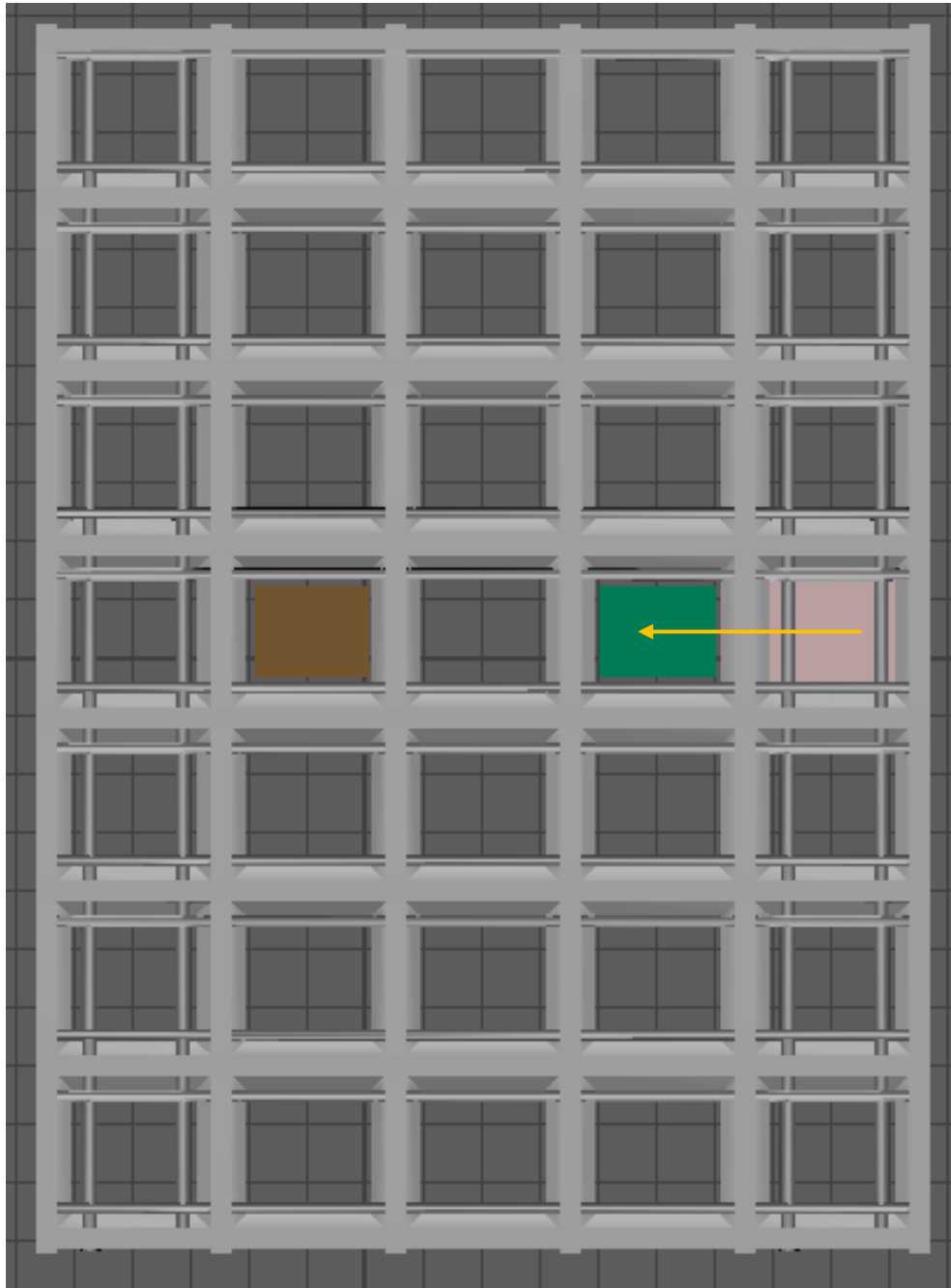


Рисунок 4.6 – Проміжна позиція шатлу у складській системі і його подальший маршрут

На рисунку 4.7 представлена кінцева позиція шатлу у складській системі під грузом і його подальший маршрут.

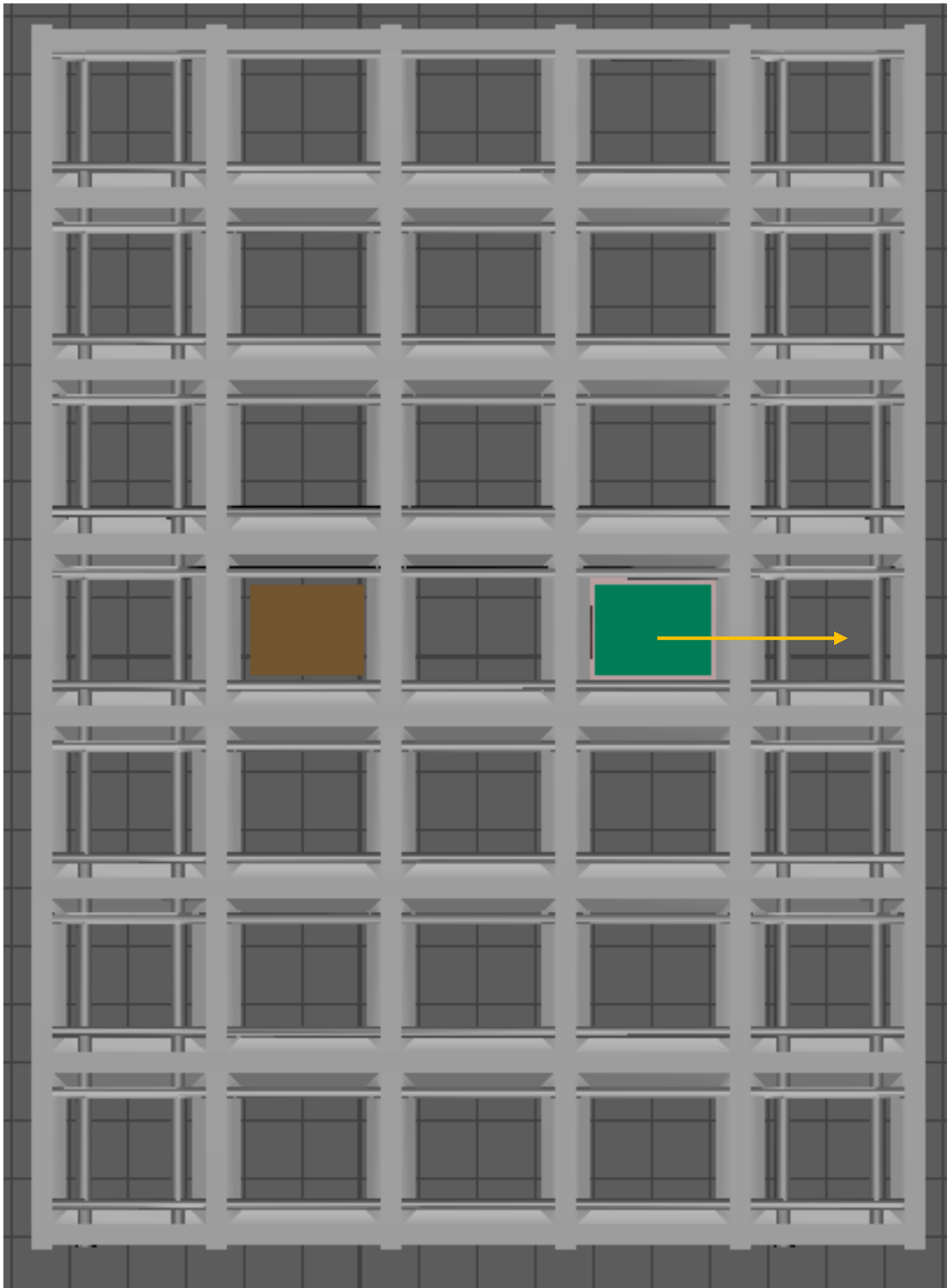


Рисунок 4.7 – Кінцева позиція шатлу у складській системі під грузом

Проведемо другий експеримент: встановимо 2 грузи, серед яких потрібно забрати зелений, та побудуємо маршрут за нашим алгоритмом. Результат експерименту зображено на рисунках 4.8 – 4.9.

На рисунку 4.8 представлена проміжна позиція шатлу у складській системі із грузом і його подальший маршрут.

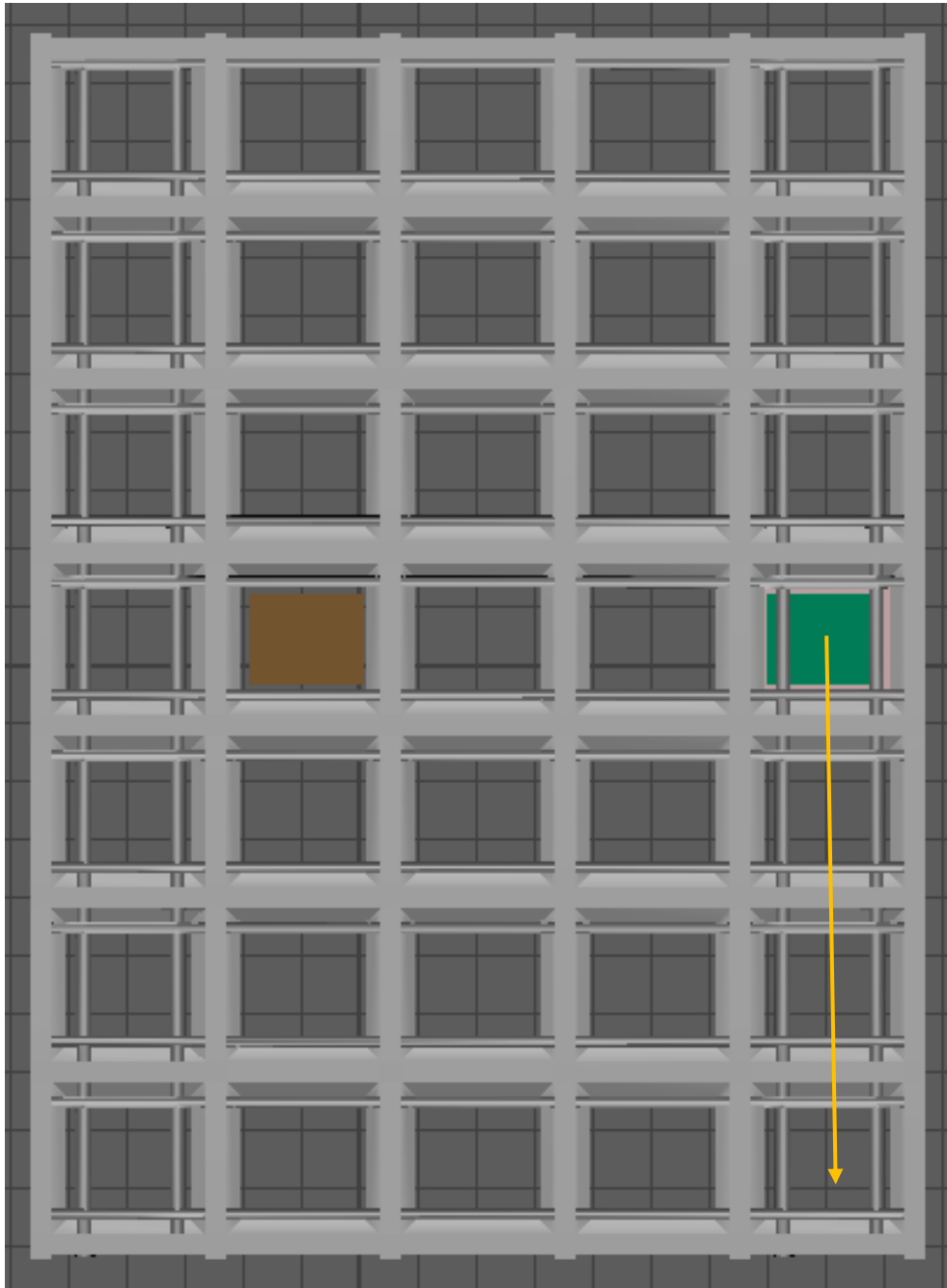


Рисунок 4.8 – Проміжна позиція шатлу у складській системі із грузом і його подальший маршрут

На рисунку 4.9 представлена проміжна позиція шатлу у складській системі із грузом і його подальший маршрут.

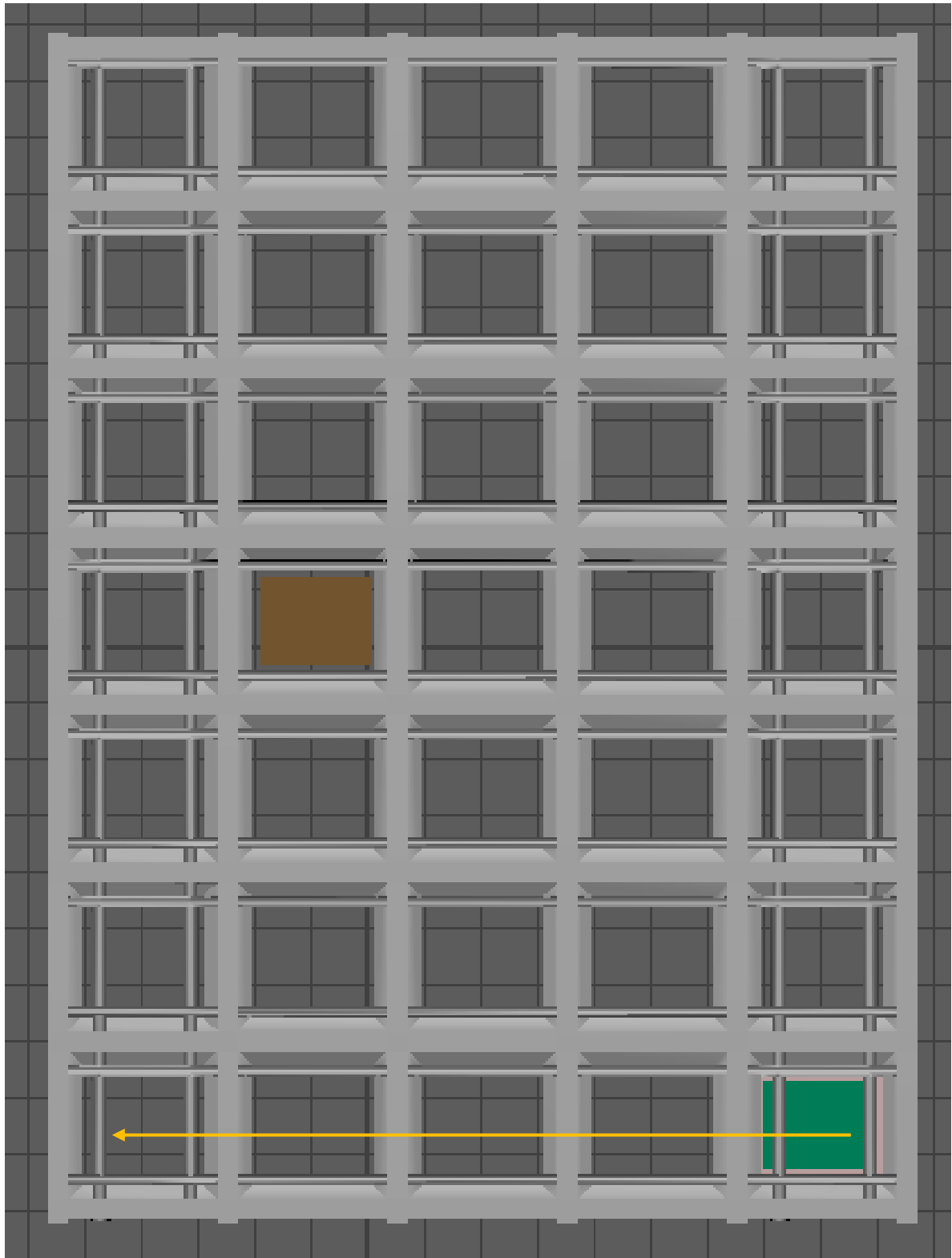


Рисунок 4.9 – Проміжна позиція шатлу у складській системі із грузом

Проведемо другий експеримент: встановимо 2 грузи, серед яких потрібно забрати зелений, та побудуємо маршрут за нашим алгоритмом. Результат експерименту зображено на рисунках 4.10.

На рисунку 4.10 представлена кінцева позиція шатлу у складській системі із грузом.

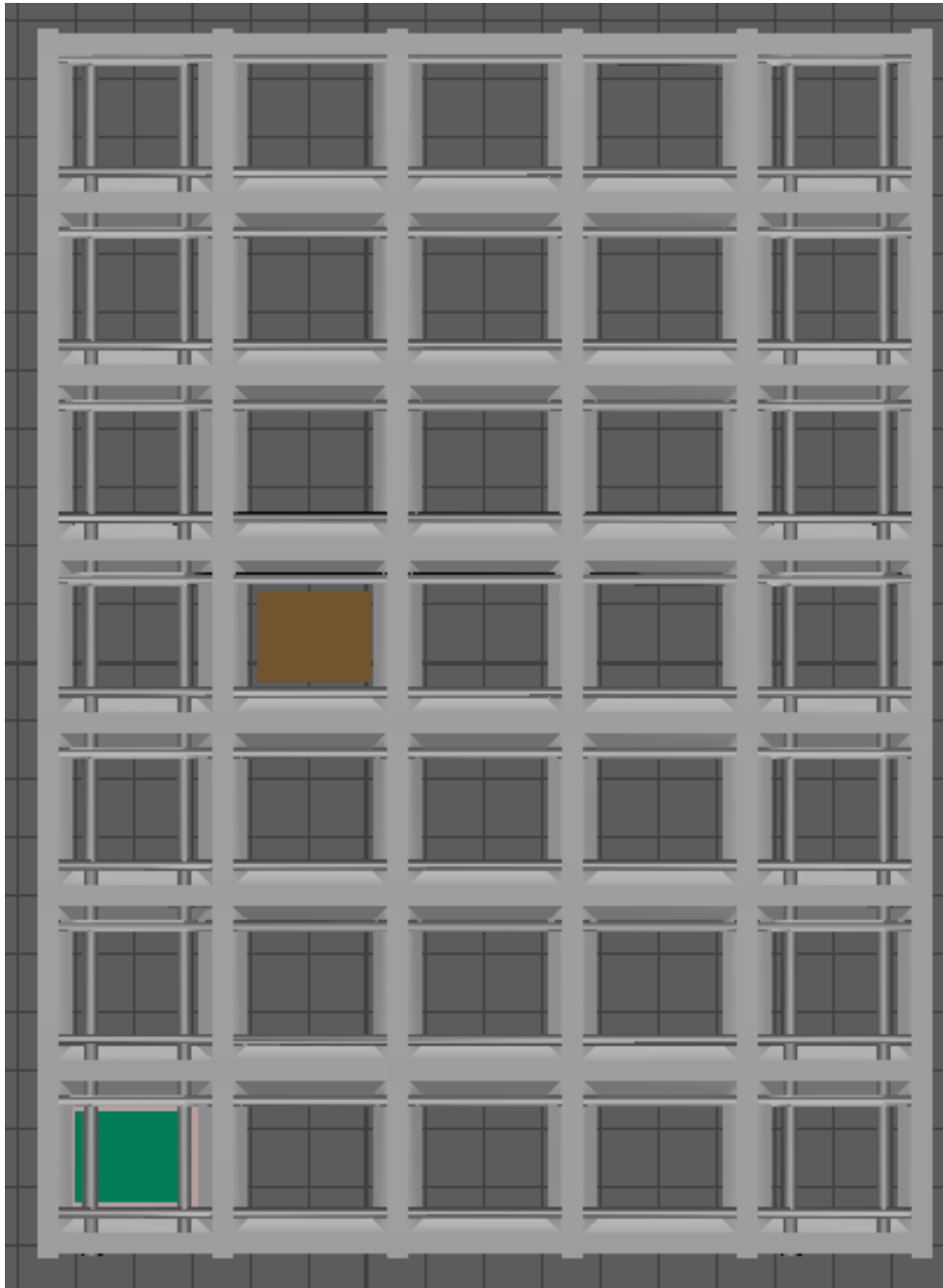


Рисунок 4.10 – Кінцева позиція шатлу у складській системі із грузом

Проведемо третій експеримент: встановимо 4 грузи, серед яких потрібно забрати жовтий, та відвезти його у початкову точку. Побудуємо маршрут за нашим алгоритмом. Результат експерименту зображено на рисунках 4.11 – 4.12.

На рисунку 4.11 показана початкова позиція шатлу та грузу у складській системі та показник шляху і його подальший маршрут.

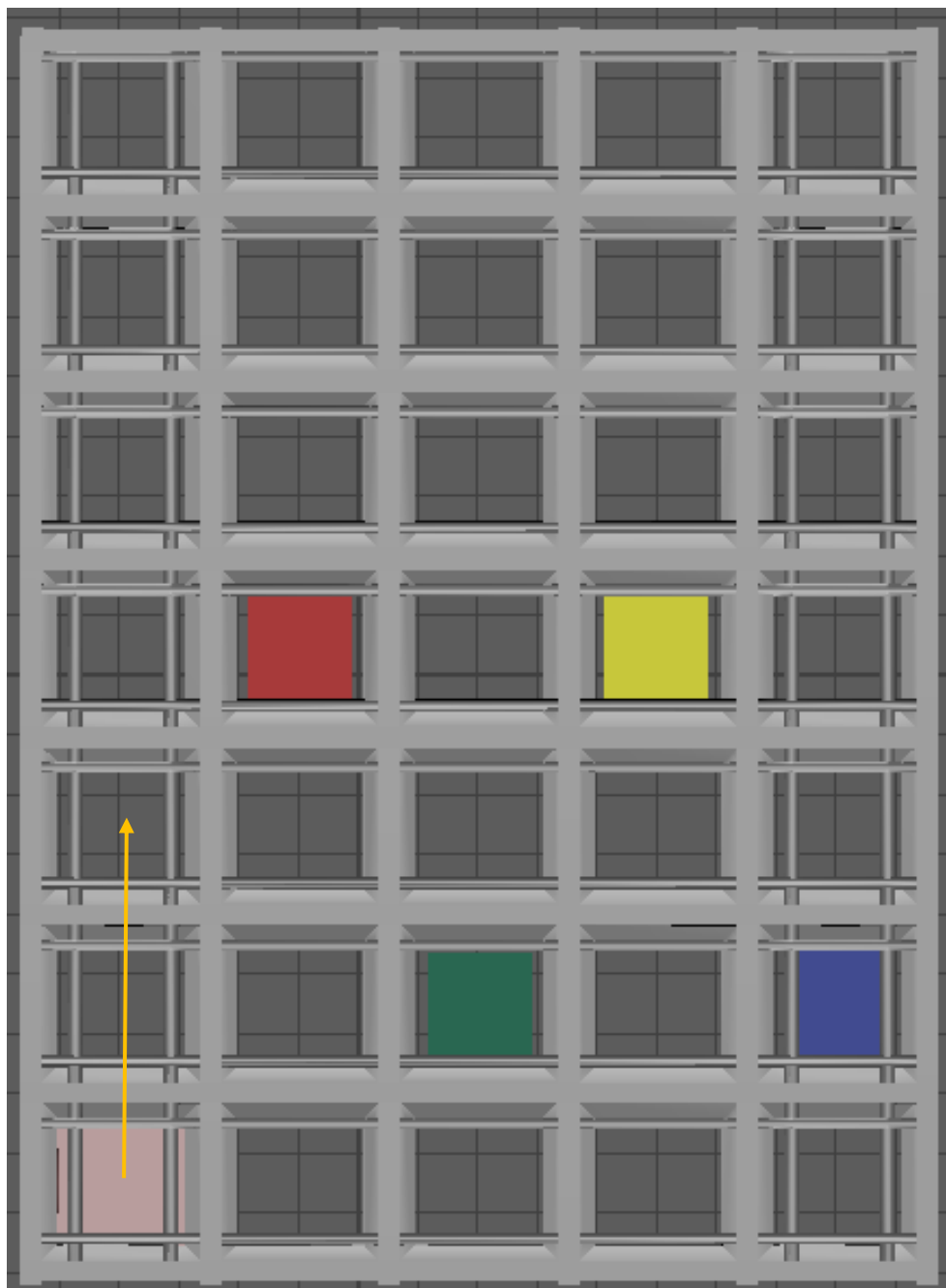


Рисунок 4.11 – Початкова позиція шатлу та грузу у складській системі та показник шляху і його подальший маршрут

На рисунку 4.12 представлена проміжна позиція шатлу у складській системі і його подальший маршрут.

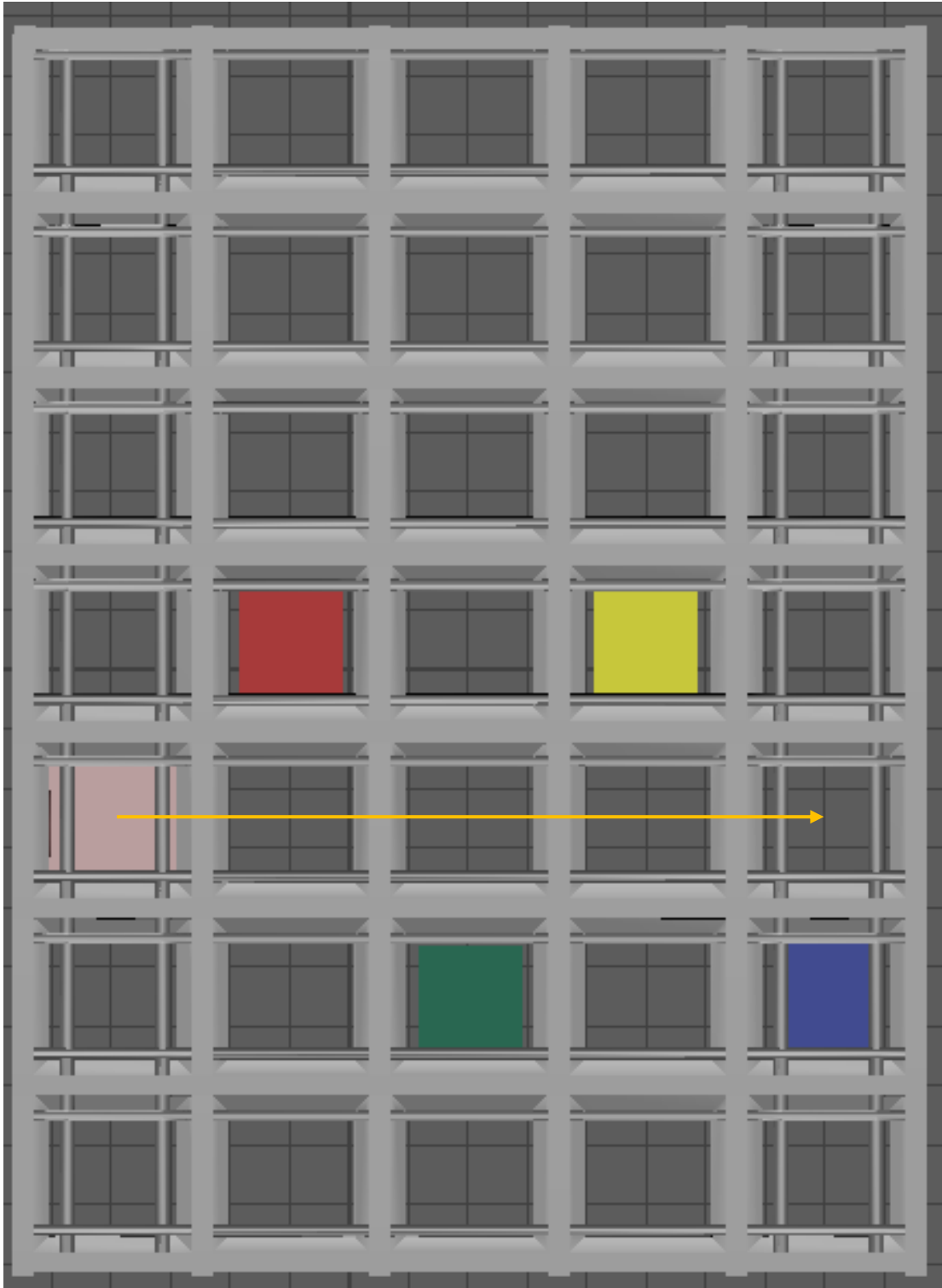


Рисунок 4.12 – Проміжна позиція шатлу у складській системі і його подальший маршрут

Проведемо третій експеримент: встановимо 4 грузи, серед яких потрібно забрати жовтий, та відвезти його у початкову точку. Побудуємо маршрут за нашим алгоритмом. Результат експерименту зображено на рисунках 4.13 – 4.14.

На рисунку 4.13 представлена проміжна позиція шатлу у складській системі і його подальший маршрут.

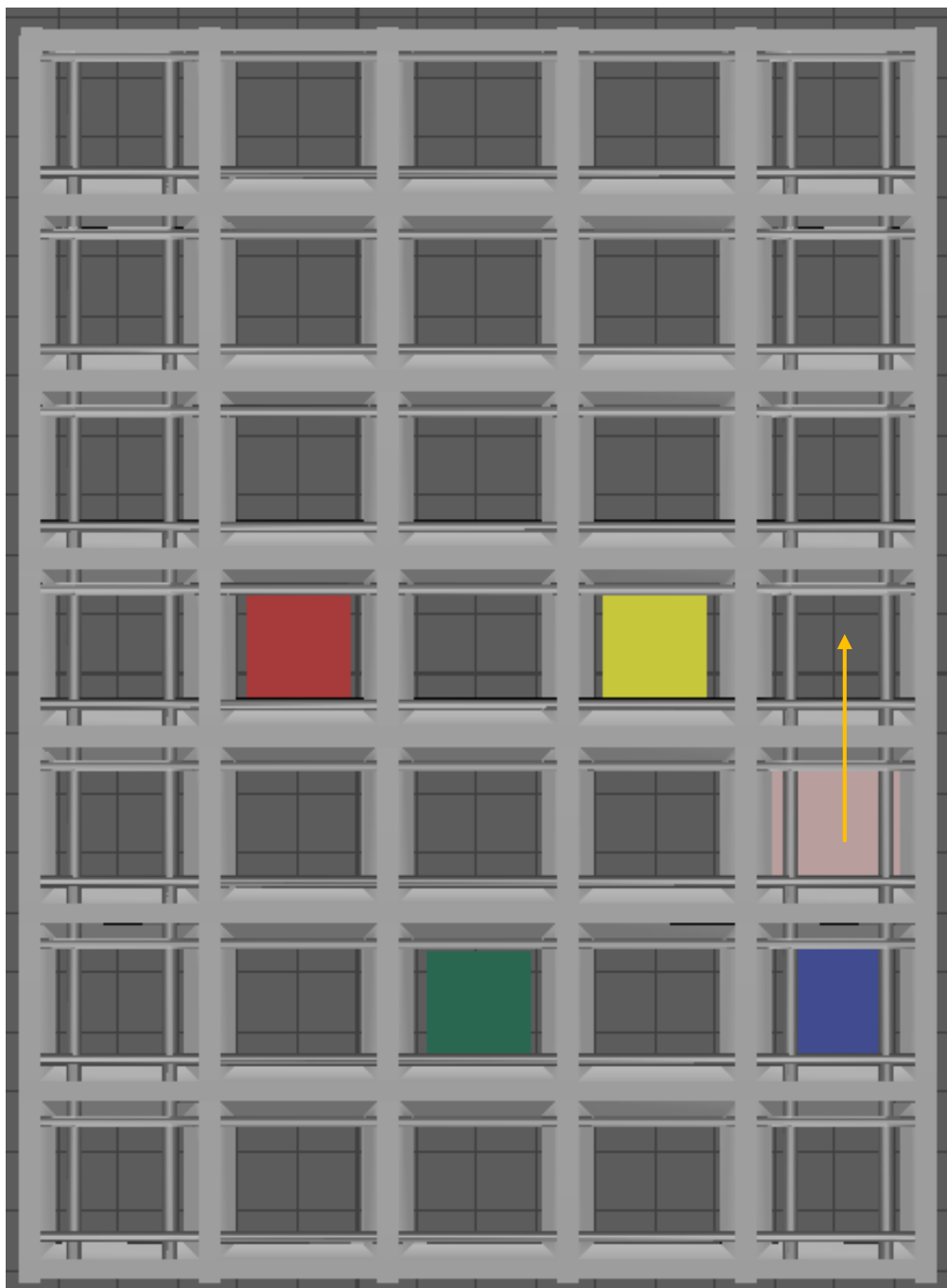


Рисунок 4.13 – Проміжна позиція шатлу у складській системі і його подальший маршрут

На рисунку 4.14 представлена проміжна позиція шатлу у складській системі і його подальший маршрут.

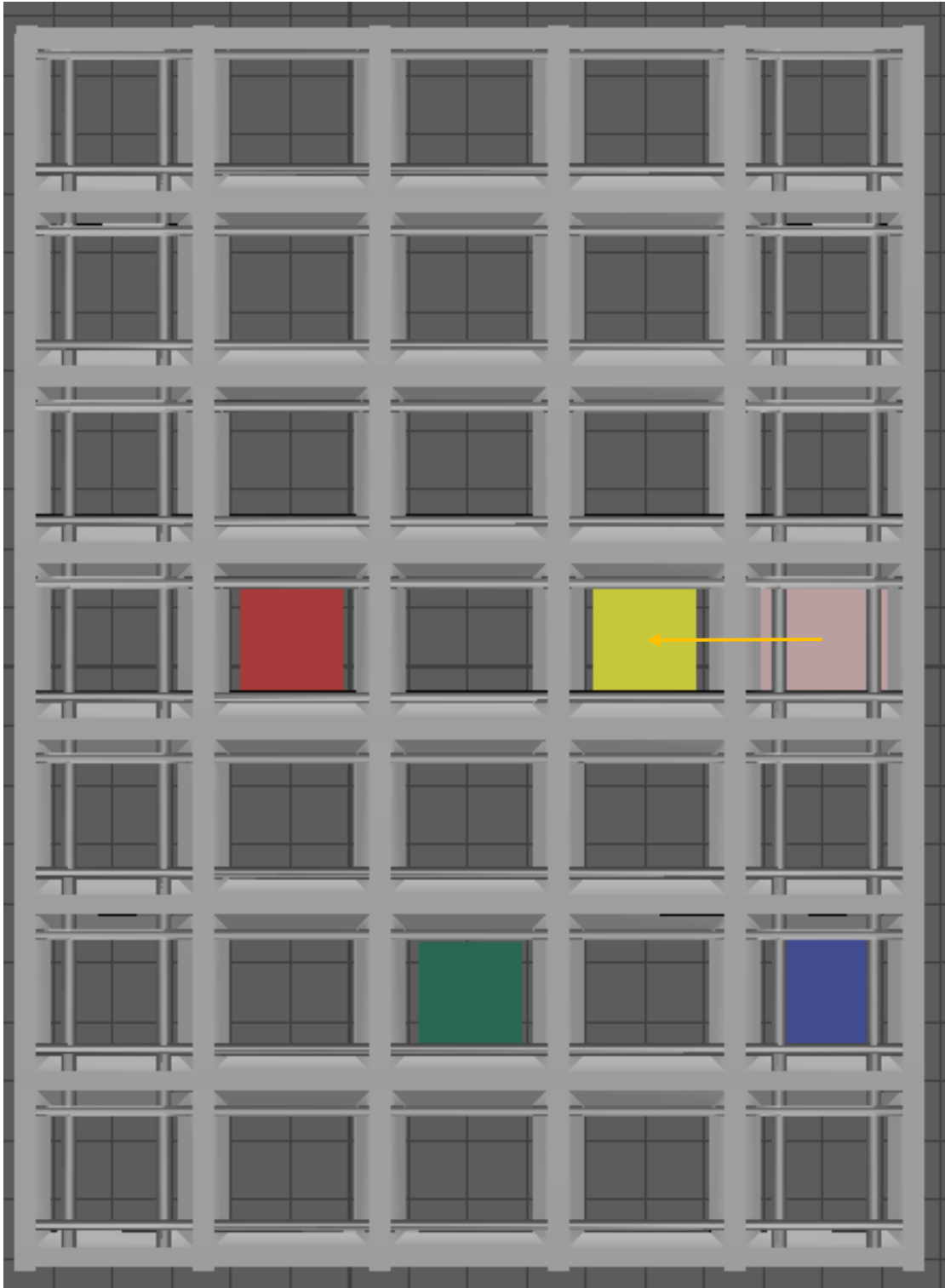


Рисунок 4.14 – Проміжна позиція шатлу у складській системі і його подальший маршрут

Проведемо третій експеримент: встановимо 4 грузи, серед яких потрібно забрати жовтий, та відвезти його у початкову точку. Побудуємо маршрут за нашим алгоритмом. Результат експерименту зображено на рисунках 4.15 – 4.16.

На рисунку 4.15 представлена кінцева позиція шатлу у складській системі під грузом і його подальший маршрут.

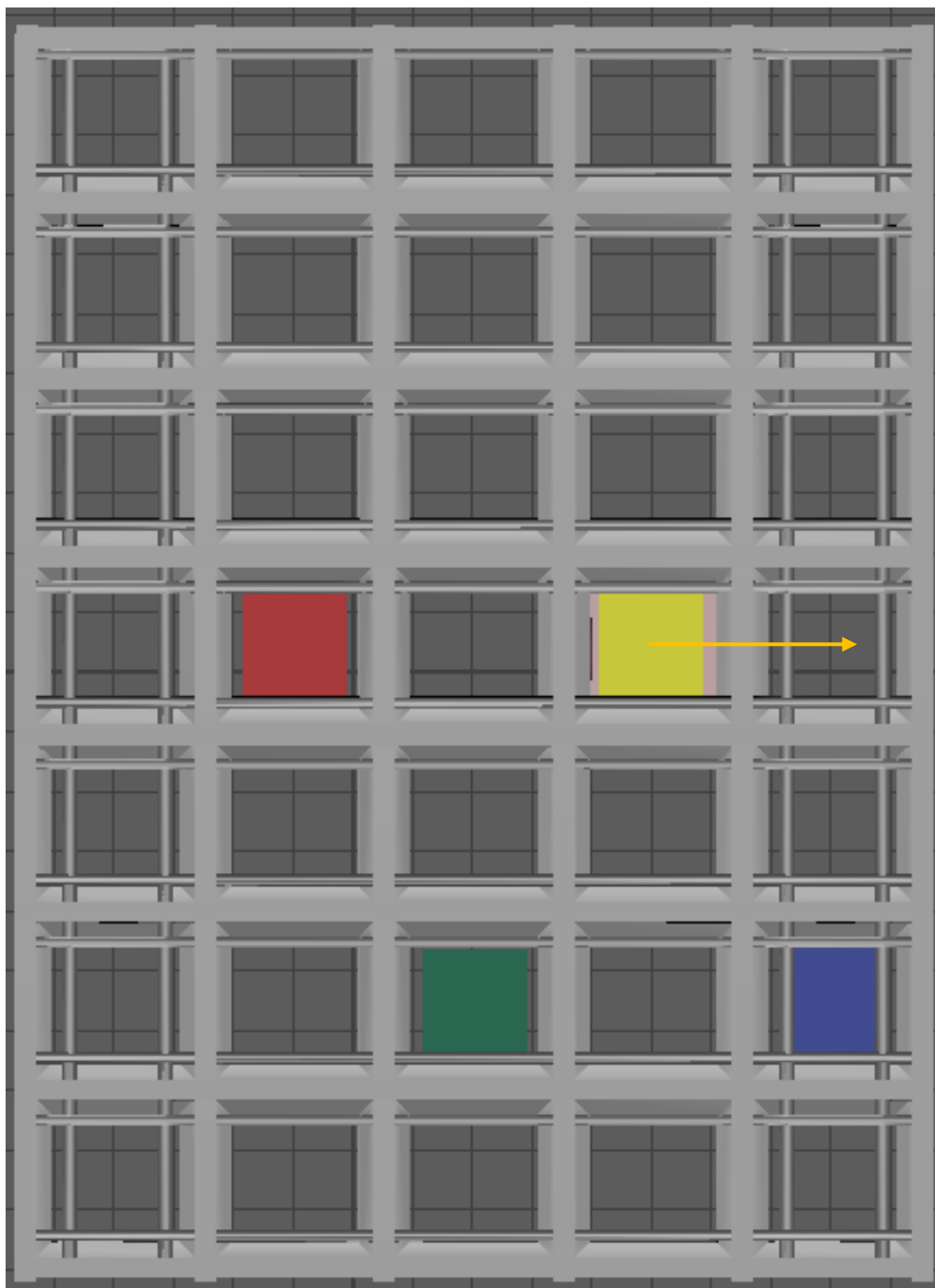


Рисунок 4.15 – Кінцева позиція шатлу у складській системі під грузом

На рисунку 4.16 представлена проміжна позиція шатлу у складській системі із грузом і його подальший маршрут.

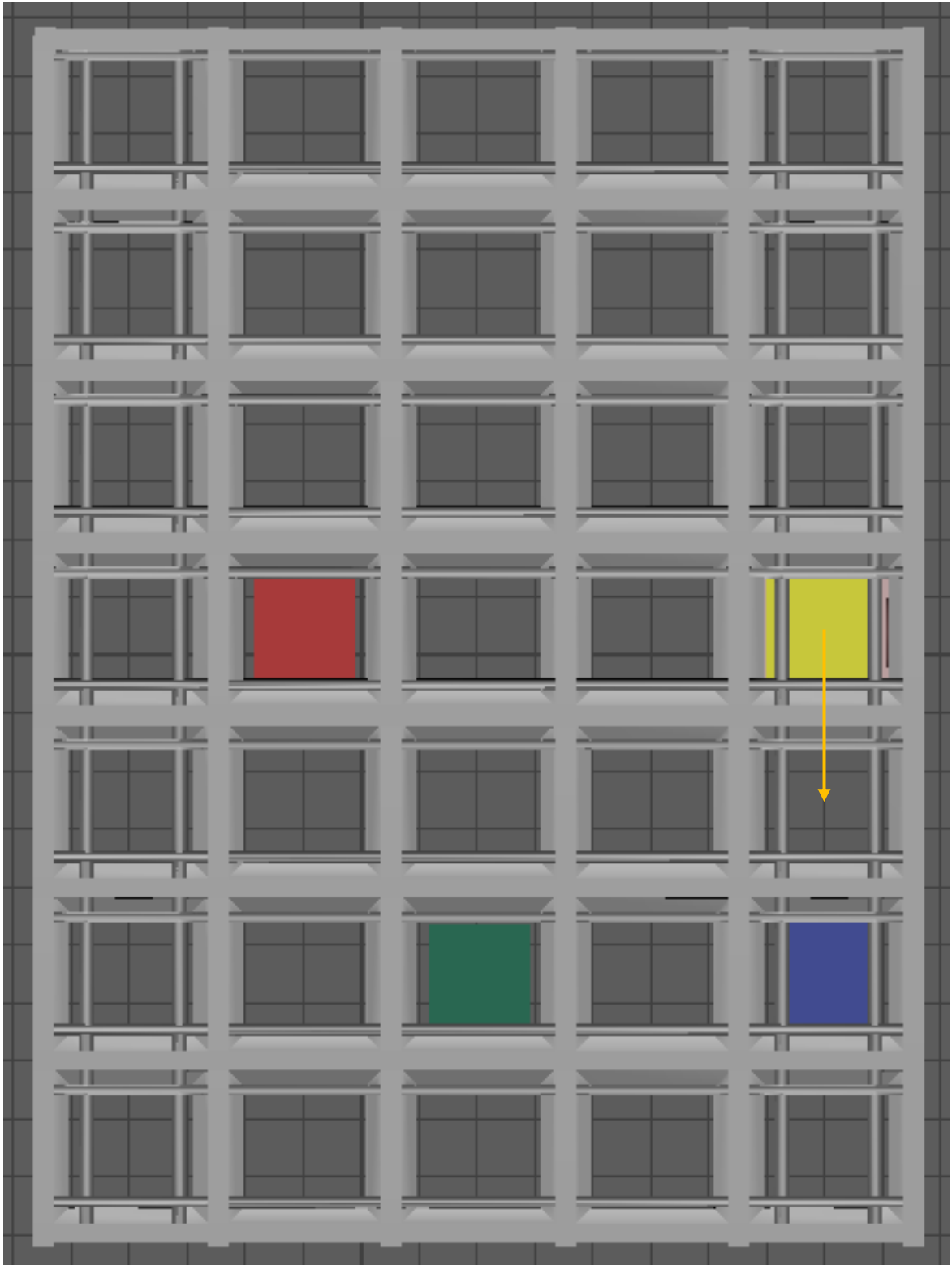


Рисунок 4.16 – Проміжна позиція шатлу у складській системі із грузом і його подальший маршрут

Проведемо третій експеримент: встановимо 4 грузи, серед яких потрібно забрати жовтий, та відвезти його у початкову точку. Побудуємо маршрут за нашим алгоритмом. Результат експерименту зображено на рисунках 4.17 – 4.18.

На рисунку 4.17 представлена проміжна позиція шатлу у складській системі із грузом і його подальший маршрут.

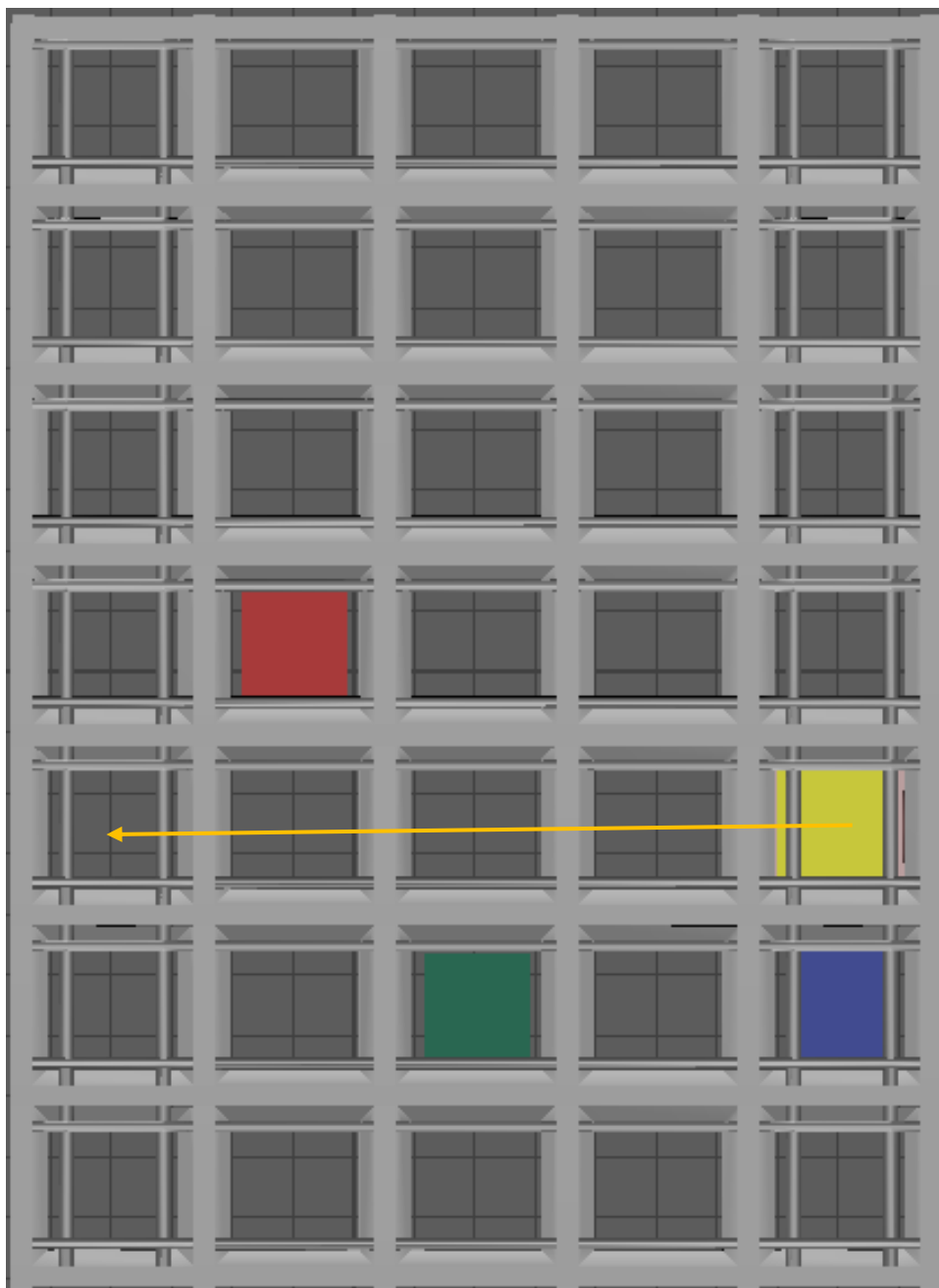


Рисунок 4.17 – Проміжна позиція шатлу у складській системі із грузом і його подальший маршрут

На рисунку 4.18 представлена проміжна позиція шатлу у складській системі із грузом і його подальший маршрут.

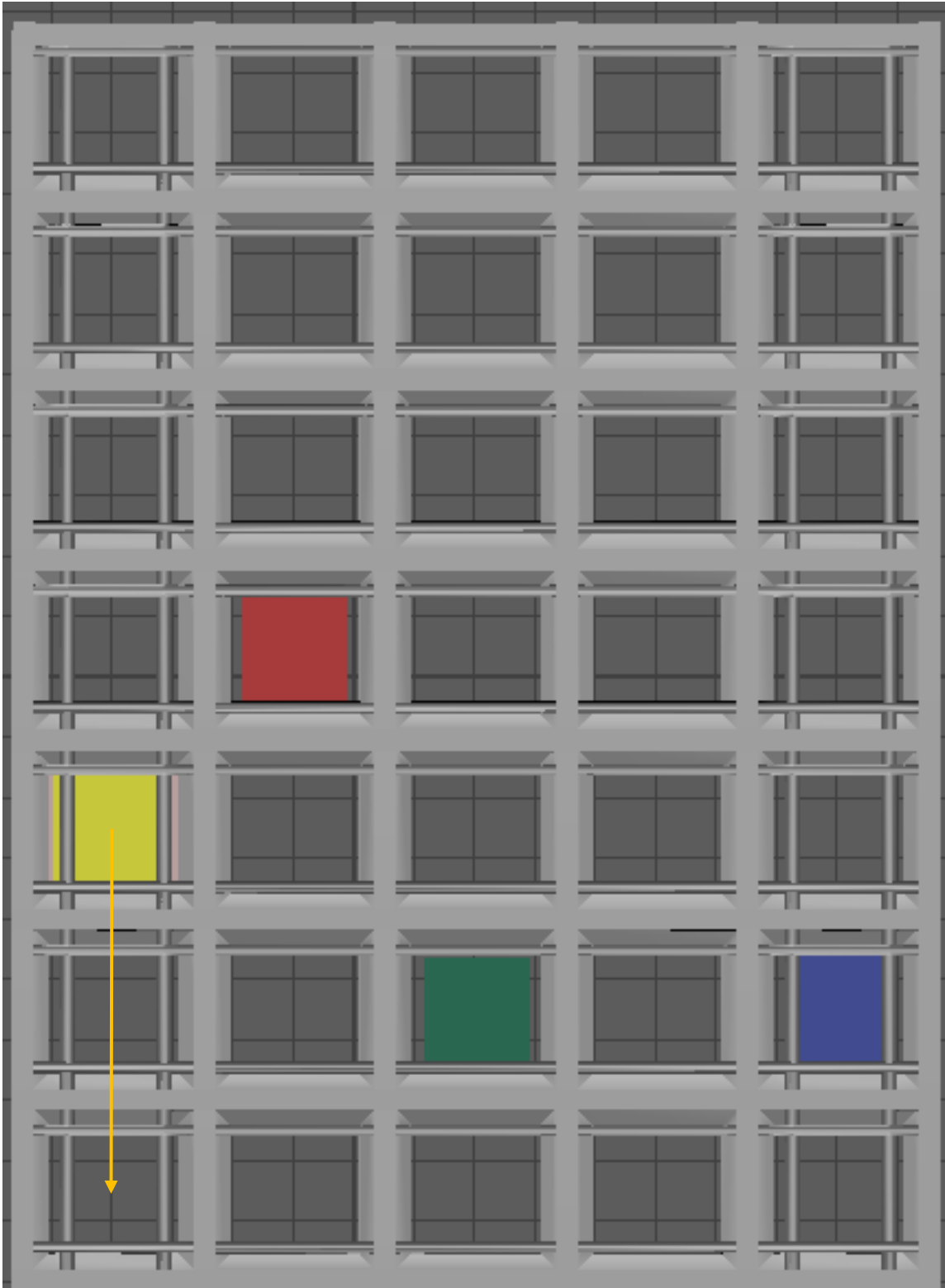


Рисунок 4.18 – Проміжна позиція шатлу у складській системі із грузом і його подальший маршрут

Проведемо третій експеримент: встановимо 4 грузи, серед яких потрібно забрати жовтий, та відвезти його у початкову точку. Побудуємо маршрут за нашим алгоритмом. Результат експерименту зображено на рисунках 4.19.

На рисунку 4.19 представлена кінцева позиція шатлу у складській системі із грузом.

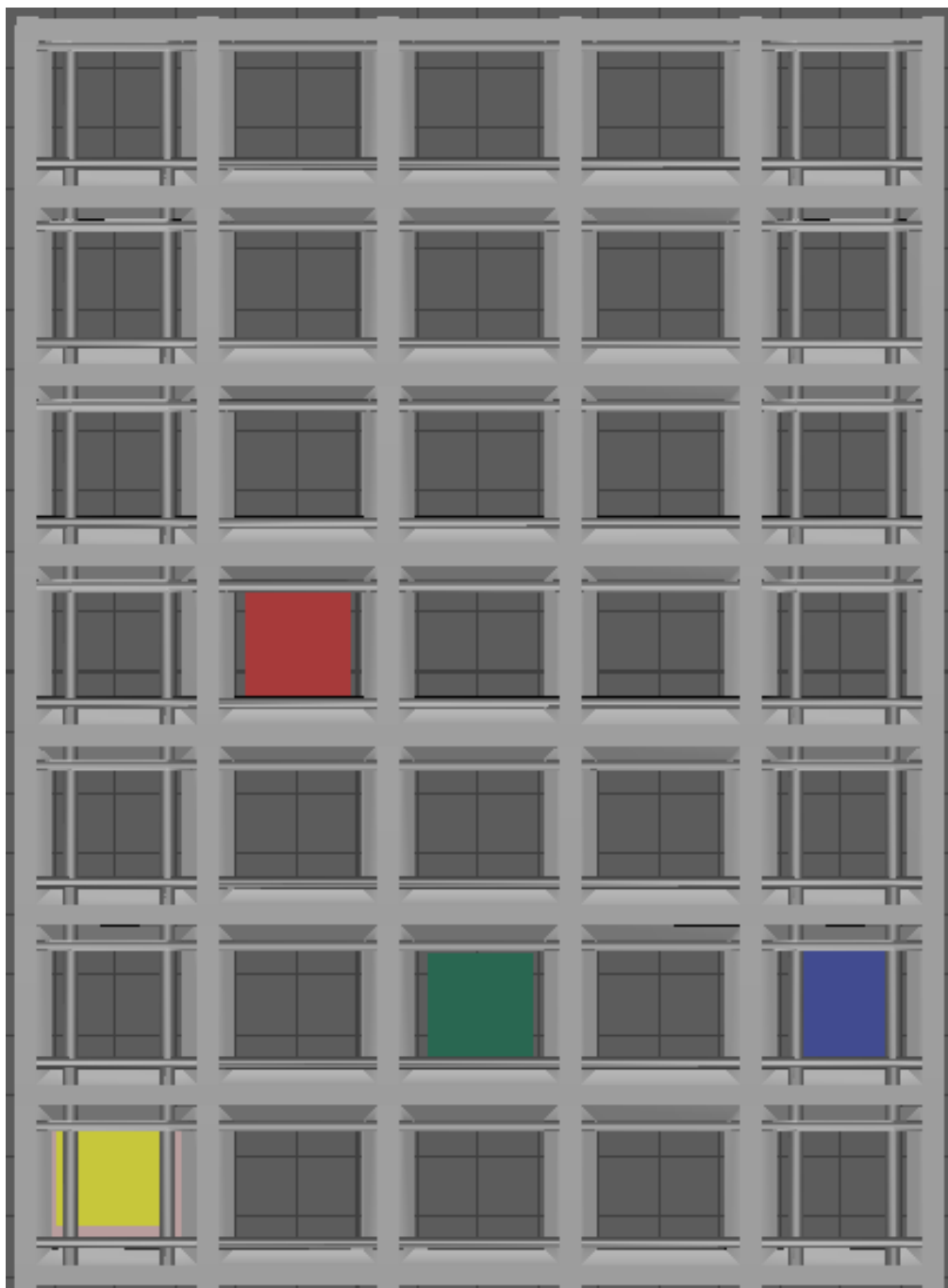


Рисунок 4.19 – Кінцева позиція шатлу у складській системі із грузом

За результатами експериментів можемо зробити наступний графік, що показує ефективність методу хвильового пошуку маршруту у різних ситуаціях в залежності від кількості перешкод (рис. 4.20).



Рисунок 4.20 – Графік залежності кількості пройдених відділень від кількості перешкод

4.3 Розрахунок освітлення

Роботи в приміщенні виготовляються сидячи і не потребують систематичного фізичного напруження. Робота відноситься до категорії легкої Ia (енерговитрати до 120 ккал/год). Оптимальні норми мікроклімату згідно з ДСН 3.3.6.042-99, наведені в таблиці 4.1.

На мікроклімат впливають такі джерела тепла: люди, що знаходяться в приміщенні, штучне освітлення, сонячна радіація, тепло, яке передається через стіни. Аналізуючи нормативні та фактичні значення мікроклімату, можна сказати, що температура повітря перевищує допустимі значення. Забезпечення умов, наведених у таблиці 4.1, в теплий період року здійснюється за допомогою припливної вентиляції (встановлюються кондиціонери); в холодний і перехідний

період – за допомогою вентиляції та опалення, передбачається також природна вентиляція.

Таблиця 4.1 – Оптимальні параметри мікроклімату

Пора року	Температура повітря, °С	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодне	від 22 до 24	від 40 до 60	до 0,1
Тепле	23-25	40-60	до 0,1

Так як в приміщенні проводиться робота з персональними комп'ютерами, природне світло повинне проникати через бічні світлові прорізи, зорієнтовані на північ. Вікна мають регулюючі пристосування для відкривання, жалюзі.

Для розрахунку природного освітлення необхідно визначити площу віконних прорізів, яка забезпечить нормоване значення КПО. Потім необхідно порівняти розраховану площу з реальною.

Умови праці вважаються нормальними, якщо виконується співвідношення (4.1):

$$S_{ок} \leq S_{реал}, \quad (4.1)$$

де $S_{ок}$ – площа вікон;

$S_{реал}$ – реальне значення площі вікон в приміщенні. Необхідну площу світлового прорізу, при бічному природному освітленні обчислюється за формулою (4.2):

$$S_{окон} = \frac{e_n \cdot \eta_0 \cdot K_{зл} \cdot K_3 \cdot S_{пола}}{100 \cdot \tau_{общ} \cdot r_1}, \quad (4.2)$$

де $S_{окон}$ – площа світлових прорізів, яка забезпечить нормоване значення КПО в

приміщенні;

$S_{\text{пола}}$ – площа підлоги приміщення;

e_n – нормоване значення КПО для 4-го кліматичного світлового поясу,

$e_n = 1,35$; η_0 – світлова характеристика вікна;

$K_{\text{зл}}$ – коефіцієнт, що враховує затінення вікон противостоящими будинками, $K = 1$;

K_3 – коефіцієнт запасу (залежить від концентрації пилу в приміщенні і від періодичності очищення стекол), $K_3 = 1,4$;

$\tau_{\text{общ}}$ – загальний коефіцієнт світлопропускання, що визначається залежно від коефіцієнта пропускання скла, втрат світла в оправах вікна, шару його забруднення, наявності сонцезахисних конструкцій, $\tau_{\text{общ}} = 0,94$;

r_1 – коефіцієнт, що враховує підвищення КПО за рахунок відбиття.

4.4 Висновки до розділу 4

У цьому розділі було проведено експеримент, у ході якого було виявлено, що запропонована модель та концепція шатлу для складських систем високої щільності та метод переміщення цього шатлу у складській системі є більш оптимальними за існуючі аналоги. Дана модель дозволяє зберігати різні товари на одному складі, через здатність шатлу рухатись у будь якому напрямку, та дозволяє зберігати більшу кількість товарів, тому що для такого типу шатлів буде достатньо однієї точки входу на склад, через всенаправлені колеса шатлу. Отримані дані було проаналізовано та представлено графіком. З аналізу отриманих даних видно, що при збільшенні кількості перешкод, збільшується шлях платформи.

ВИСНОВКИ

Дана робота присвячена модернізації існуючих моделей та концепцій роботизованих платформ шатлів у складських системах Індустріх 4.0.

У першому розділі було проведено аналіз сучасних систем складування в Індустрії 4.0. Було проведено аналіз видів складування, аналіз методів складування, аналіз існуючих робототехнічних платформ шатлів та аналіз методів переміщення у системі складування робототехнічних платформ. Було виявлено їх недоліки та проведена постановка завдань дослідження.

У другому розділі було проведено розробку методу побудови маршруту переміщення шатлу. Було проведено удосконалення конструкції шатла з використанням всенаправленого колеса, розробку методу переміщення шатла та удосконалення методу побудови маршруту.

У третьому розділі було зроблено удосконалення робототехнічної платформи та створення 3D моделі. Було проведено розробку 3D моделей елементів робототехнічної платформи, розробку 3D моделі зборки робототехнічної платформи, розробку 3D моделі системи складування та створення візуальної моделі системи складування

У четвертому розділі було проведено експеримент з використанням модифікованої робототехнічної платформи шатлу та проведено розрахунок освітлення робочого приміщення. Отримані дані було проаналізовано та представлено графіком.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. An integrated simulation modelling approach for a warehouse 4.0 [Електронний ресурс]. URL: <https://assets.researchsquare.com/files/rs-317679/v1/5c0f89fe-d09a-44f9-840c-96f7328fe727.pdf?c=1631880541> (дата звернення: 1.11.2022).
2. Композиція та аналіз робочого процесу в автоматизації складу Industry 4.0 [Електронний ресурс]. URL: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-cim.2019.0017> (дата звернення: 1.11.2022).
3. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи [електронний ресурс]. URL: https://drive.google.com/file/d/1K1Dt-_16lnvNkU6P0McC7MxореXSfgIB/view (дата звернення: 1.11.2022).
4. Структура та правила оформлення, ДСТУ 3008:2015 [Електронний ресурс]. URL: <https://drive.google.com/file/d/1714Epz74IVhgBKSvMobd9g2Rdt0MMDzp/view> (дата звернення: 1.11.2022).
5. Warehousing 4.0 in Logistics 4.0 [Електронний ресурс]. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-5644-6_7 (дата звернення: 1.11.2022).
6. Аліна Кулик. Аналіз роботизованих шатловських платформ у WMS // Manufacturing & Mechatronic Systems 2022: Proceedings of VIst International Conference, Kharkiv, October 21-22, 2022: Theses of Reports / [Ed. I.Sh. Nevlyudov (chief editor).] - Kharkiv .: [electronic version], 2022. - 136 p. with. P. 127-129. (дата звернення: 2.11.2022).
7. Evolutions of group management development of mobile robotic platforms in warehousing 4.0. [Електронний ресурс]. URL: <http://journals.uran.ua/itssi/article/view/250328> (дата звернення: 2.11.2022).
8. Francesco, F., Oleśków-Szłapka, J., Ranieri, L., Urbinati, A. (2020), «Модель

зрілості для логістики 4.0: емпіричний аналіз і дорожня карта для майбутніх досліджень», Сталість. № 12 (1): 86. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12010086> (дата звернення: 2.11.2022).

9. Тутам, М. (2022), "Складування 4.0 у логістиці 4.0", у Логістиці 4.0 та майбутньому ланцюгів поставок, С. 95–118. (дата звернення: 3.11.2022).

10. Лерхер, Т. (2018), «Складування 4.0 за допомогою човникових систем зберігання та пошуку», Transactions FME, 46 (3), P.381–385. DOI: [10.5937/fmet1803381L](https://doi.org/10.5937/fmet1803381L). (дата звернення: 3.11.2022).

11. Аналіз стратегій зберігання виробів в автоматизованому інтелектуальному складі [Електронний ресурс]. URL: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/20419> (дата звернення: 3.11.2022).

12. Industry 4.0 technologies and sustainable warehousing [Електронний ресурс]. URL: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IJLM-05-2021-0277/full/html> (дата звернення: 4.11.2022).

13. Industry 4.0 Technologies and Sustainable Warehousing [Електронний ресурс]. URL: <http://ieomsociety.org/proceedings/2021indonesia/26.pdf> (дата звернення: 4.11.2022).

14. Всеспрямоване колесо [Електронний ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Omni_wheel (дата звернення: 5.11.2022).

15. Система транспортування для палет [Електронний ресурс]. URL: <https://www.directindustry.com/prod/changchun-rochiev-intelligent-equipment-manufacturing-co-ltd/product-235282-2374929.html> (дата звернення: 5.11.2022).

16. Nantee, N., Sureeyatanapas, P. (2021), «Вплив логістики 4.0 на корпоративну стійкість: оцінка ефективності автоматизованих складських операцій», Benchmarking: An International Journal, Vol. переддрукований, No переддрукований. DOI: <https://doi.org/10.1108/BIJ-11-2020-0583> (дата звернення: 6.11.2022).

17. Букова, Б., Брумерчікова, Е., Черна, Л., Дроздзель, П. (2018), «Позиція галузі 4.0 у світових логістичних ланцюгах», LOGI–Науковий журнал з

транспорту та логістики, вип. 9, № 1, С. 18-23. DOI: 10.2478/logi-2018-0003. (дата звернення: 7.11.2022).

18. Складування товарів як функція фізичного розподілу [Електронний ресурс]. URL: https://pidru4niki.com/15800119/marketing/skladuvannya_tovariv_funktsiya_fizichnogo_rozpodilu (дата звернення: 7.11.2022).

19. Система транспортовки для паллет [Електронний ресурс]. URL: <https://www.directindustry.com/prod/jiangsu-ebil-intelligent-storage-technology-co-ltd/product-240726-2428017.html> (дата звернення: 8.11.2022).

20. Система транспортування для паллет ISC series [Електронний ресурс]. URL: <https://www.directindustry.com/prod/nanjing-toco-warehouse-equipment-co-ltd/product-229963-2360043.html> (дата звернення: 8.11.2022).

21. Система транспортування для паллет RS150 [Електронний ресурс]. URL: [directindustry.com/prod/bt/product-15939-433461.html](https://www.directindustry.com/prod/bt/product-15939-433461.html) (дата звернення: 9.11.2022).

22. Невлюдов І., Євсєєв В., Максимова С., Філіппенко І. (2020), «Розробка архітектурно-логічної моделі для автоматизації управління процесом створення складних кіберфізичних промислових систем», Східно-Європейський журнал корпоративних технологій, № 4(3 (106), С. 44–52. DOI:10.15587/1729-4061.2020.210761 (дата звернення: 10.11.2022).

23. Логістика складування [Електронний ресурс]. URL: https://studopedia.com.ua/1_13822_lektsiya--logistika-skladuvannya.html (дата звернення: 10.11.2022).

24. Розробка методу побудови маршруту переміщення робототехнічної платформи у системі складування [Електронний ресурс]. URL: <https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/19618/1/7706e958-7c7d-45dc-b6fa-0d65cbe9f98f-191-195.pdf> (дата звернення: 12.11.2022).

25. Транспортування в межах складу [Електронний ресурс]. URL: <https://ssk.ua/ua/solution/transportirovka-po-skladu> (дата звернення: 13.11.2022).

26. Всенаправлені конвеєрні ролики Celluveyor [Електронний ресурс]. URL: <https://www.imvo.lviv.ua/blog/vsenappravleni-konveierni-rolyky-celluveyor>

(дата звернення: 13.11.2022).

27. Всенаправлене ліве колесо Mecanum [Електронний ресурс]. URL: <https://uamper.com/mecanum-omnidirectional-left-wheel-60mm-black> (дата звернення: 13.11.2022).

28. Всеспрямоване колесо Mecanum [Електронний ресурс]. URL: <http://ua.roboct-tech.com/mobile-robot-components/mecanum-wheel/mecanum-omnidirectional-wheel.html> (дата звернення: 14.11.2022).

29. Колесо Ілона [Електронний ресурс]. URL: https://www.wiki.uk-ua.nina.az/%D0%9A%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D1%81%D0%BE_%D0%86%D0%BB%D0%BE%D0%BD%D0%B0.html (дата звернення: 16.12.2022).

30. [Електронний ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/7300592/page:11/> (дата звернення: 15.11.2022).