

УДК 621.86.

DOI: 10.15276/pidtt.1.67.2022.03

Михайлов Є. П., Вудвуд О. М., Сивокінь С. В., Швець Б. Р.

*Національний університет «Одеська політехніка»*

## ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ І ЗАСОБІВ НАВІГАЦІЇ ДЛЯ СКЛАДСЬКОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ

**Анотація.** Проведений аналіз існуючих засобів навігації складських транспортних засобів, які можна використовувати для розробки алгоритмів керування переміщенням робота на складі були визначені найпростіші засоби навігації, які дозволяють здійснювати переміщення транспортних засобів за вказаною траєкторією. Розроблені алгоритми навігації транспортного засобу на основі оптичних та одометричних датчиків, а також лазерних сканерів. Наведені залежності параметрів керування транспортних засобів, які потребуються для програмної реалізації цих алгоритмів. Результати роботи використовувались для створення стендів при проведенні лабораторних та практичних занять.

**Ключові слова:** транспортний засіб, складська система, засоби навігації, алгоритми переміщення, система керування, вказівник маршруту, лазерні сканери, одометричні пристрої.

### Вступ

Сучасні промислові системи широко використовують автоматизовані складські системи, які є типовим прикладом обладнання на основі мехатронних пристроїв, тому дуже важливо здійснити навчання фахівців, які здатні здійснити проектування, виготовлення та налагодження автоматизованих складських систем.

Вирішити задачу забезпечення поєднання в освітньому процесі освітньої, наукової та інноваційної діяльності дозволяє використання в освітньому процесі завдань, що за своїми можливостями наближається до реальних виробничих систем.

Підвищення якості навчання можливо здійснити шляхом залучення здобувачів освіти до дослідження транспортних засобів складських систем, що дає можливість здійснити вивчення окремих компонент, які входять до складу таких систем.

Одним з основних питань створення складських логістичних систем є забезпечення ефективного переміщення вантажу, тому метою даної роботи було дослідження алгоритмів переміщення вантажу для складської логістичної системи з використанням різних методів локальної та персональної навігації транспортних засобів, включаючи

алгоритми переміщення на основі лазерних сканерів, а також одометричних та оптичних датчиків.

## **1. Аналіз існуючих засобів навігації складських транспортних засобів**

Важливою задачею, яку треба вирішувати при використанні транспортних роботів є переміщення вантажу у відповідну позицію складу згідно з відповідною траєкторією. Таке переміщення транспортних роботів на складах здійснюється за допомогою різних систем навігації [1, 2, 3].

Система навігації — здійснює функцію прокладення раціональних маршрутів для переміщення робота і функцію орієнтування транспортного засобу та його виконавчих органів у тривимірному світі. Ця система здійснює також визначення положення транспортного засобу з заданою точністю, а таким чином виконує функцію позиціонування мобільного робота. Система навігації може бути окремою системою або частиною системи управління транспортного засобу.

Розрізняють персональну, локальну та глобальну системи навігації.

Персональна система навігації здійснює позиціонування окремих частин транспортного засобу та визначення його положення відносно зовнішніх предметів.

Локальна система навігації здійснює визначення координат відносно деякої точки (за звичай стартової), що важливо для переміщення у визначених приміщеннях, наприклад, у складах.

Глобальна система навігації здійснює визначення абсолютних координат робота при переміщенні за допомогою зовнішніх засобів навігації (наприклад GPS), що важливо при переміщенні по довгим маршрутам.

Системи персональної навігації засновані на використанні датчиків положення окремих частин транспортного засобу та датчиків для визначення положення зовнішніх об'єктів відносно транспортного засобу, до яких належать, наприклад, одометричні засоби, що вимірюють шлях переміщення транспортного засобу, та датчики визначення відстані до об'єктів.

Системи локальної навігації заснована на отриманні інформації з датчиків, що знаходяться на самому транспортному засобі. До таких систем можна віднести, наприклад, системи маршрутослідкування з використанням та індуктивних датчиків, що використовують вказівники маршруту у вигляді дроту, по якому протікає струм (рис. 1, а), оптичних датчиків, що використовують вказівники маршруту у вигляді кольорових смуг (рис. 1, б), та ідентифікатори на шляху пересування транспортного засобу (рис. 1, в).

Системи глобальної навігації засновані на створенні мапи або плану місцевості, де переміщується транспортний засіб та визначення положення транспортного засобу на цьому плані. Ця інформація використовується для визначення траєкторії переміщення транспортного засобу.

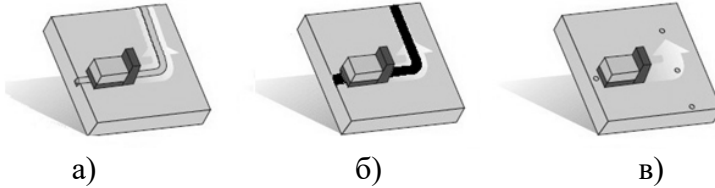


Рисунок - 1. Системи визначення траєкторії переміщення

Для визначення положення транспортного засобу використовують різні засоби, наприклад, системи з лазерними сканерами (рис. 3, а), системи радіоуправління (рис. 3, б), системи супутникової навігації GPS (рис. 3, в).

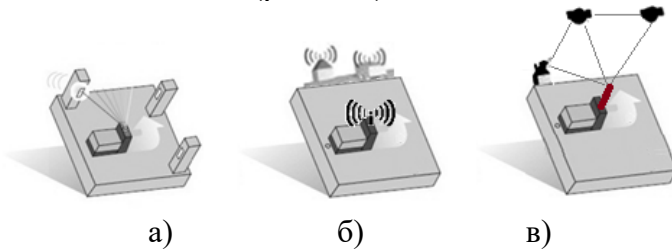


Рисунок - 2. Системи визначення положення

Системи навігації класифікуються ще за однією ознакою - вони можуть бути **пасивними і активними**.

Пасивна система навігації передбачає прийом інформації про характеристики свого руху від зовнішніх джерел.

Активна система навігації розрахована на визначення місця розташування тільки за допомогою обладнання, що встановлено на самому транспортному засобі.

Як правило, всі глобальні схеми навігації пасивні, локальні можуть бути бувають активними і пасивними, а персональні схеми - завжди активні.

До систем навігації можна віднести також пристрої визначення перешкод, оскільки отримана з них інформація використовується для корекції траєкторії пересування транспортного засобу.

На сучасних складах широко використовують найпростіші системи маршрутослідкування на основі оптичних датчиків з вказівниками маршруту у вигляді кольорових смуг, що дає можливість швидкого переналадження маршрутів переміщення (рис. 3, а), а також системи навігації на основі скануючих лазерних датчиків з рефлекторами (рис. 3, б).

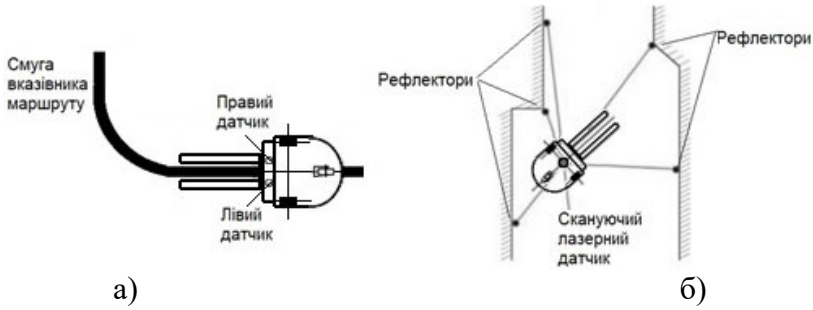


Рисунок - 3. Системи навігації на основі оптичних датчиків з вказівниками маршруту (а) та скануючих лазерних датчиків з рефлекторами (б)

Розглянемо можливості переміщення вантажу на складі з гравітаційними стелажми, яке відбувається за допомогою автоматично керованих транспортних засобів у вигляді вилочних навантажувачів (рис. 4).

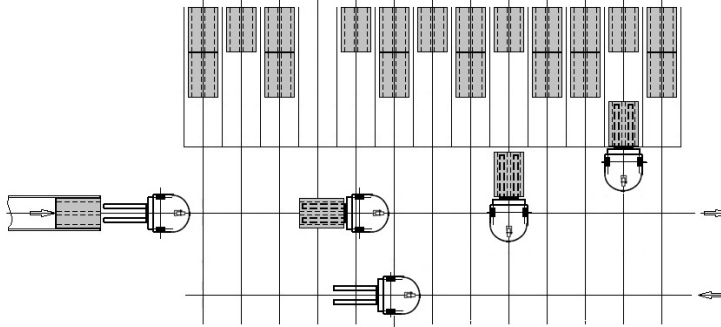


Рисунок - 4. Переміщення вантажу на складі

Вантаж пакується на піддони, далі конвеєром вантаж прибуває на місце загрузки, де навантажувач, оснащений вилочним механізмом, забирає вантаж, та перевозить його на задане місце складу, а після цього повертається за наступним вантажем. Задля збільшення пропускної здатності складу доцільно одночасно застосовувати декілька вилочних навантажувачів.

Спочатку вантаж, встановлений на європіддонах, подається за допомогою конвеєра. Вилочні навантажувачі переміщують вантаж вздовж стелажу гравітаційного складу та встановлюють його у відповідну комірку. При використанні декількох навантажувачів для запобігання зіткнення встановлені різні шляхи переміщення у різні сторони.

## 2. Розробка алгоритмів навігації транспортного засобу на основі оптичних та одометричних датчиків

Розглянемо питання реалізації переміщення навантажувача за допомогою оптичних та одометричних датчиків [4-5].

Системи маршрутослідкування на основі оптичних датчиків

використовують вказівники маршруту у вигляді кольорових або контрастних смуг, на цій смузі можна встановлювати додаткові ідентифікатори, наприклад, поперечні смуги, для керування пересуванням транспортного засобу.

На рис. 5 наведений транспортний засіб, який здійснює маршрутослідкування за допомогою двох оптичних датчиків.

Візок має два привода – правий та лівий та два оптичних датчика – справа та зліва від смуги вказівника маршруту. У вихідному положенні оптичні датчики знаходяться справа та зліва від смуги вказівника маршруту (датчики не спрацьовують) і включені обидві двигуна (візок переміщується прямо).

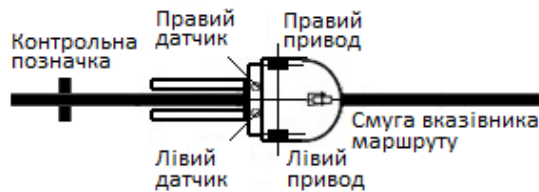


Рисунок - 5. Візок з маршрутослідкуванням за допомогою двох оптичних датчиків

Якщо на смугу попадає лівий датчик, то він спрацьовує та здійснюється поворот вправо (зменшується швидкість лівого двигуна), а якщо на смугу попадає правий датчик, то здійснюється поворот вліво (зменшується швидкість правого двигуна).

Спрацювання обох датчиків на контрольній позначці визначає встановлену дію, наприклад, зупинку, точку повороту або точку підрахунку позицій зміни маршруту.

На рис. 6 наведений приклад використання щілинного оптичного датчика для вирішування задач одометрії, а саме, вимірювання кута обертання колеса для визначення шляху переміщення, яке здійснюється шляхом підрахунку імпульсів датчика.



Рисунок - 6. Щілинний оптичний датчик вимірювання кута обертання колеса

Шлях  $l$ , що проходить колесо, яке має діаметр  $d$ , за одне обертання дорівнює

$$l = \pi d.$$

Якщо кількість імпульсів за одне обертання колеса складає  $n_c$ , то відстань  $l_n$ , яку пройде колесо за  $n_l$  імпульсів дорівнює

$$l_n = \pi d n_l / n_c.$$

Звідси маємо кількість імпульсів  $n$ , яка потрібна для переміщення на відстань  $l_n$ ,

$$n_l = n_c l_n / \pi d.$$

Якщо привод колеса використовує кроковий двигун, то  $n_d$  визначається кількістю імпульсів, яке треба подати для одного обертання колеса. У цьому разі датчик не потребується.

Недоліком такого методу є накопичування помилки, оскільки кожне нове вимірювання здійснюється відносно результату попереднього, тому його доцільно використовувати при переміщенні на невеликі відстані з невеликою кількістю зміни маршруту.

Встановлення вантажу на стелаж навантажувач може здійснювати завдяки маршрутослідкуванню або засобам одометрії.

На рис. 7 наведена одна з можливих послідовностей руху навантажувача у випадку, коли для переміщення вантажу використовується один навантажувач.

Цей шлях складається з переміщення по прямій лінії, та розворотів на місці.

Алгоритм руху навантажувача в цьому випадку має таку послідовність переміщень:

1. Забрати вантаж та почати рух до місця вивантаження.
2. Знайти позицію встановлення вантажу на стелаж.
3. Розвернутися.
4. Пересунути до стелажу та вивантажити піддон.
5. Повернутися на лінію слідкування.
6. Розвернутися та перейти до місця завантаження.

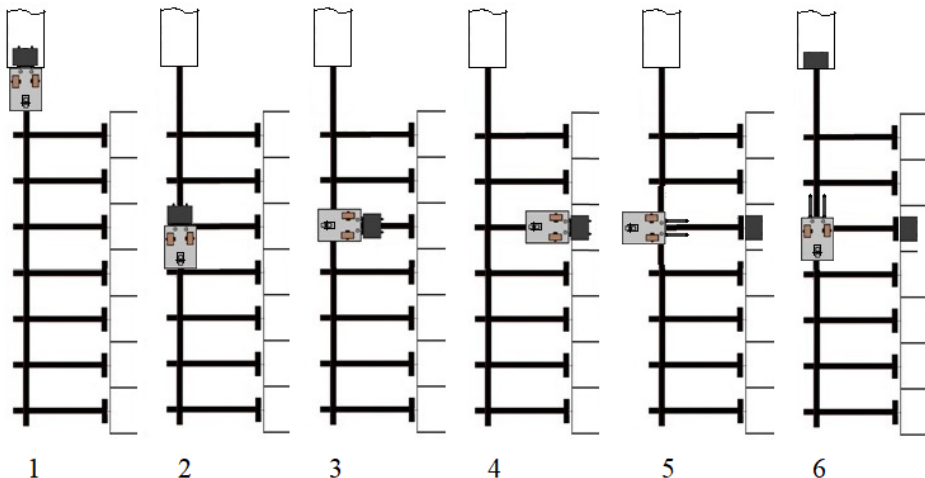


Рисунок - 6. Послідовність руху навантажувача у випадку, коли для переміщення вантажу використовується один навантажувач

Відповідна блок-схема алгоритму має вигляд, наведений на рис. 7.

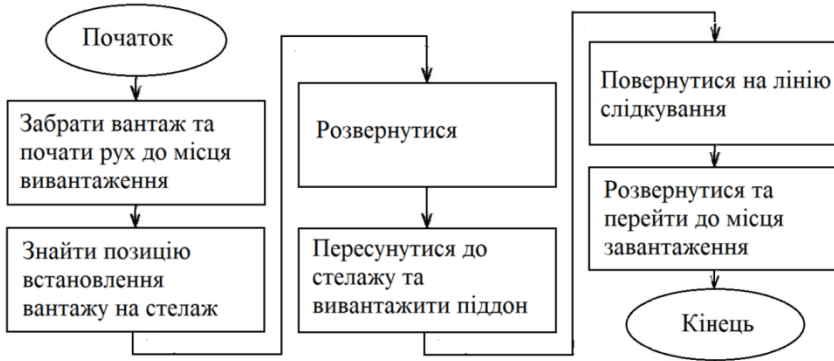


Рисунок - 7. Блок-схема алгоритму переміщення по складу

Для переміщення на короткі дистанції можна використовувати засобу одометрії, які дозволяють зменшити кількість смуг слідування, особливо у місцях, де важко нанести смуги на підлогу, наприклад, безпосередньо біля стелажів.

У цьому випадку траєкторія переміщень буде мати вигляд, наведений на рис. 8.

У цьому разі встановлення вантажу на стелаж, а саме, поворот та переміщення до стелажу здійснюється за допомогою засобів одометрії, коли кутове та лінійне переміщення визначається кількістю імпульсів.

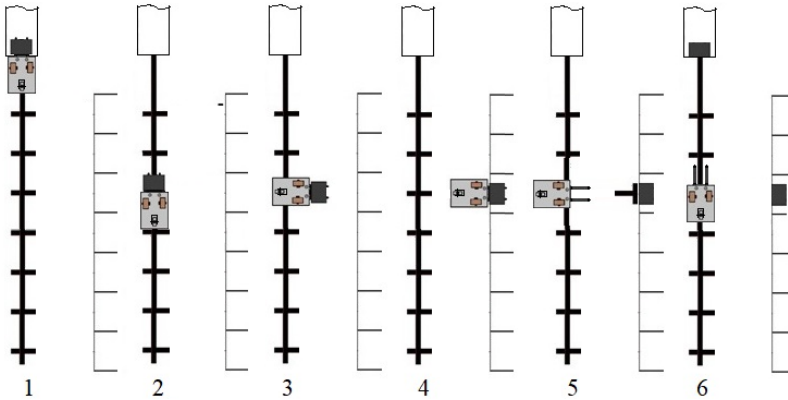


Рисунок - 8. Траєкторія переміщень у випадку використання засобів одометрії

Для визначення траєкторії переміщення найчастіше використовуються лінійна та колова інтерполяції, тому розглянемо математичну модель переміщення найбільш поширених типів навантажувачів по прямій лінії та по дузі кола з урахуванням можливості визначення параметрів для програмного керування на основі засобів одометрії для триколісного транспортного засобу (трицикла) та транспортного засобу з диференціальним приводом, що



найчастіше використовуються в автоматичних вилочних навантажувачах.

Найбільш простим є алгоритм переміщення з використанням кусочно-ламаної траєкторії. Для програмування шляху переміщення транспортного засобу при цьому використовують переміщення по прямій та поворот на місці. У робота з диференційним приводом це дає можливість не використовувати вимірюванням швидкості переміщення для кожного з коліс з високою точністю.

Основним параметром для керування переміщенням є шлях, який проходять ведучі колеса. Вище було показано, що для визначення цього шляху  $l_n$  при використанні крокових двигунів та фотоімпульсних одометричних датчиків треба знайти кількість імпульсів  $n_l$ , яка залежить від кількості імпульсів на одне обертання колеса  $n_c$  та його діаметра  $d$ .

$$n_l = n_c l_n / \pi d.$$

Схема повороту на місці транспортних засобів з диференційним приводом та приводом типу трицикл наведена на рис. 9.

Для транспортного засобу з диференційним приводом поворот на місці двома колесами (одне вперед, друге назад) на кут  $\Delta\theta$  маємо таку кількість імпульсів:

$$n_{\Delta\theta} = n_c W \Delta\theta / 2d,$$

де  $W$  - відстань між колесами транспортного засобу.

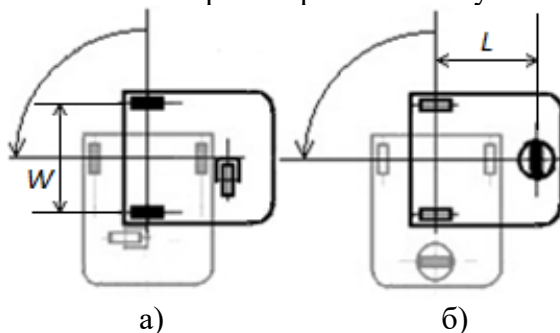


Рисунок – 9. Схема розвороту на місці транспортних засобів з диференційним приводом (а) та приводом типу трицикл (б).

Для повороту транспортного засобу з приводом типу трицикл на кут  $\Delta\theta$  у радіанах маємо таку кількість імпульсів:

$$n_{\Delta\theta} = n_c L \Delta\theta / d,$$

де  $L$  - відстань між осями ведучого рульового та опірних коліс транспортного засобу.

У даному випадку треба здійснити поворот на  $90^\circ$  ( $\Delta\theta = \pi/2$ ), тому отримаємо:

$$n_{\Delta\theta} = n_c W \pi / 4d, \quad n_{\Delta\theta} = n_c L \pi / 2d.$$



Ці значення використовуються системою керування для визначення шляху переміщення ведучих коліс при повороті транспортного засобу.

### 3. Розробка алгоритмів навігації транспортного засобу на основі лазерних сканерів

Лазерні сканери досить широко використовують для навігації транспортних засобів. Прикладом таких пристроїв можуть бути лазерні сканери LD-OEM фірми SICK з робочою зоною 0,5 - 250 м, кутом огляду 360°, з роздільною здатністю 0,125° - 1,5°, частотою сканування 5 - 15 Гц і точністю вимірювання  $\pm 38$  мм [7].

Розглянемо алгоритм переміщення транспортного засобу на основі лазерного сканеру у вказану позицію з координатами  $(X_p, Y_p)$  транспортного засобу, який знаходиться у позиції  $(X, Y)$  з кутом орієнтації  $\alpha_r$ .

Для цього треба визначити напрямок руху  $\alpha_p$  до вказаної позиції  $(X_p, Y_p)$  (рис. 10).

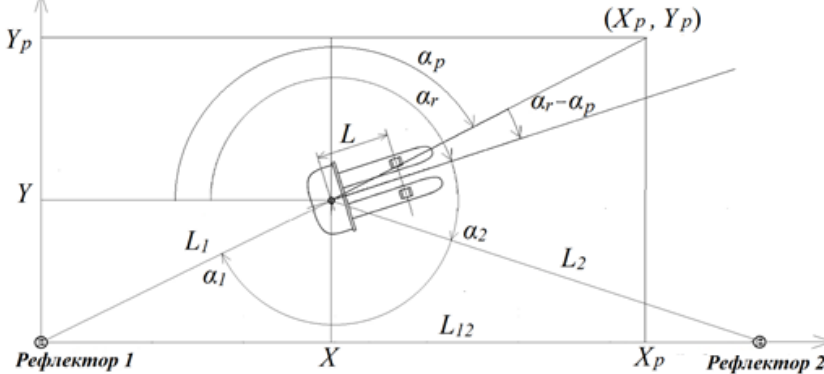


Рисунок – 10. Вихідні дані для переміщення у вказану позицію

У даному випадку цей напрямок можна визначити як:

$$\alpha_p = 90^\circ + \arctg((X_p - X) / (Y_p - Y)).$$

За допомогою лазерного сканера визначаємо положення транспортного засобу:

$$X = (L_1^2 + L_{12}^2 - L_2^2) / 2 L_{12};$$

$$Y = (L_1^2 - X^2)^{1/2}.$$

$$\alpha_r = 270^\circ - \alpha_2 - \arccos(Y / L_2).$$

Для переміщення транспортного засобу у вказану позицію з координатами  $(X_p, Y_p)$  треба здійснити рух за умовою:

$$\alpha_p = \alpha_r, \text{ або } \alpha_p - \alpha_r = 0.$$

При використанні транспортного засобу з диференціальним приводом траєкторія руху залежить від швидкості переміщення лівого та правого коліс  $V_L, V_R$ .

Якщо  $V_L = V_R > 0$ , здійснюється рух вперед прямо по прямій лінії.

Якщо  $V_L > V_R$ , здійснюється поворот за дугою кола направо.

Якщо  $V_L < V_R$ , здійснюється поворот за дугою кола наліво.

Якщо  $V_R = -V_L$ , розворот на місці направо.

Якщо  $V_L = -V_R$ , розворот на місці наліво.

Алгоритм переміщення у вказану позицію з координатами  $(X_p, Y_p)$  буде складатися з такої послідовності переміщень:

- 1) визначити напрямок руху  $\alpha_p$ ;
- 2) визначити орієнтацію транспортного засобу  $\alpha_r$ ;
- 3) якщо  $\alpha_p > \alpha_r$ , здійснити поворот наліво;
- 4) якщо  $\alpha_p < \alpha_r$ , здійснити поворот направо;
- 5) якщо  $\alpha_p = \alpha_r$ , здійснити рух прямо;
- 6) якщо  $(X, Y) = (X_p, Y_p)$ , зупинити транспортний засіб.

Блок-схема алгоритму переміщення наведена на рис. 11.

Якщо для переміщення вантажу на один стелаж використовується один транспортний засіб, то він знімає вантаж з конвеєру, здійснює пересування вздовж стелажу по прямій з зупинкою навколо вказаного осередка стелажу, поворот на  $90^\circ$ , переміщення в осередок, встановлення вантажу та повернення до конвеєру.

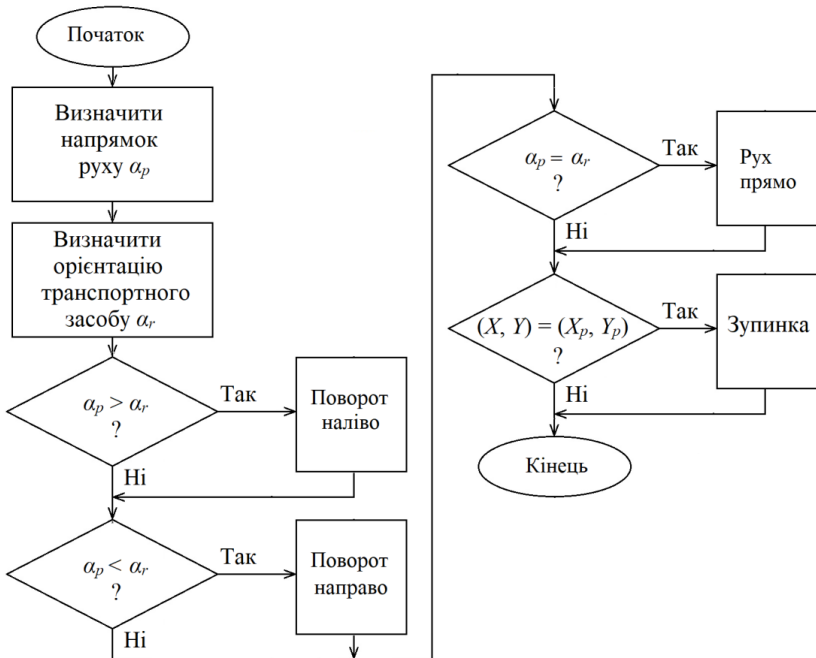


Рисунок – 11. Блок-схема алгоритму переміщення

Маршрут переміщення, коли для переміщення вантажу на один стелаж використовується один транспортний засіб, показаний на рис. 12.

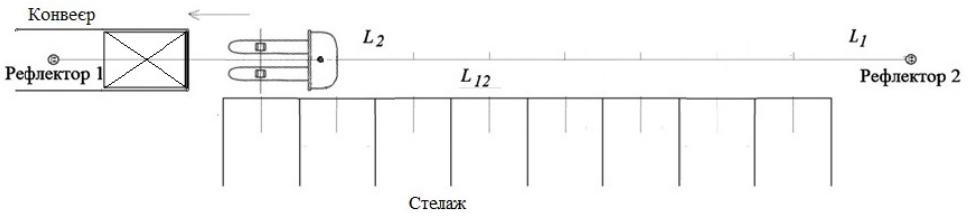


Рисунок – 12. Маршрут переміщення

Блок-схема алгоритму переміщення для цього випадку наведена на рис. 13.

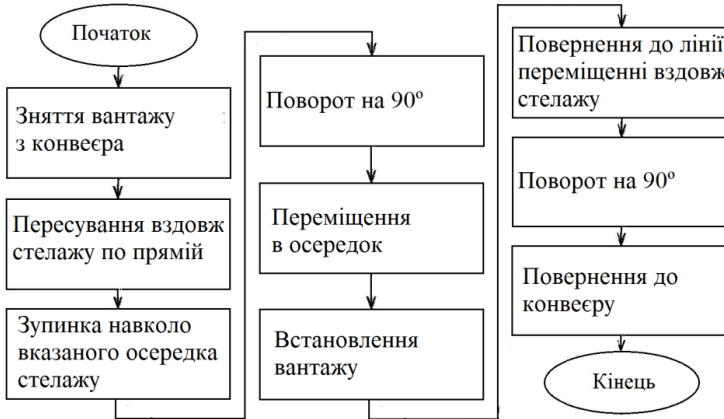


Рисунок – 13. Блок-схема алгоритму переміщення

На рис. 14 наведена траєкторія переміщення транспортних засобів у випадку використання декількох транспортних засобів.

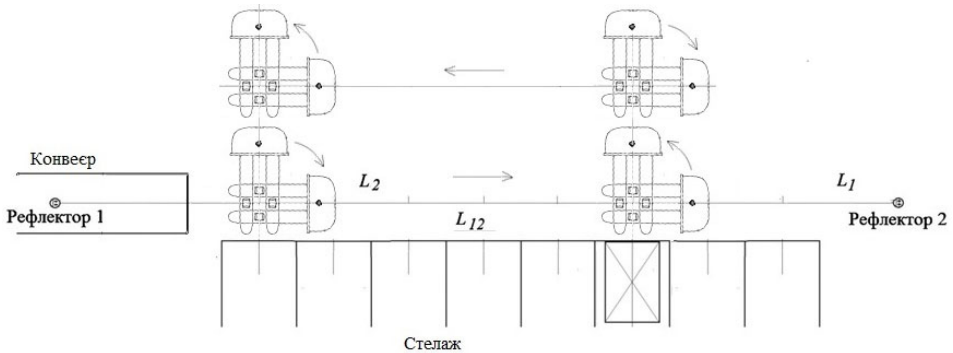


Рисунок – 14. Траєкторія переміщення транспортних засобів у випадку використання декількох транспортних засобів

При цьому використовуються маршрути переміщення з поділом шляху встановлення вантажу в комірку стелажу та повернення до конвеєра.

Наведені залежності параметрів керування транспортних засобів, дозволяють здійснити програмну реалізацію цих алгоритмів.

Отримані результати використовувались для створення стендів, за допомогою яких проводилось дослідження засобів навігації складських транспортних засобів під час проведення лабораторних та практичних та лабораторних занять спеціалізації «Інженерія логістичних систем».

### **Висновки**

В результаті проведеного аналізу існуючих засобів навігації складських транспортних засобів, які можна використовувати для розробки алгоритмів керування переміщенням робота на складі були визначені найпростіші засоби навігації, які дозволяють здійснювати переміщення транспортних засобів за вказаною траєкторією.

Проведена розробка алгоритмів навігації транспортного засобу на основі оптичних та одометричних датчиків, а також алгоритмів навігації на основі лазерних сканерів.

Наведені залежності параметрів керування транспортних засобів, які потребуються для програмної реалізації цих алгоритмів.

Результати роботи використовувались для створення стендів, на основі яких проводилось дослідження засобів навігації складських транспортних засобів під час проведення лабораторних та практичних занять спеціалізації «Інженерія логістичних систем».

### **Список використаної літератури**

1. Михайлов Е. П., Кнюх О.Б., Козеровська В. О. Стенд для дослідження мехатронних пристроїв логістичних систем. Подъемно-транспортная техника, 2019. №2 (61), с.60-74.

2. Інтернет ресурс. Automated guided vehicle. URL: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Automated\\_guided\\_vehicle&oldid=1087463869](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Automated_guided_vehicle&oldid=1087463869) (дата звернення 09.06.2022).

3. Інтернет ресурс. AGV Navigation: Methods, Comparison, Pros and Cons - Illustrated Guide/ URL: <https://www.agvnetwork.com/types-of-navigation-systems-automated-guided-vehicles> (дата звернення 09.06.2022).

4. Навчальний посібник з дисципліни «Машини і обладнання складів і логістика» для студентів магістрів, спеціальності: 131 - Прикладна механіка, спеціалізація: – Інженерія логістичних систем, / Укл.: Михайлов Е. П., Вудвуд О. М. – Одеса: ОНПУ, 2019. - 227с.

5. Mobile Robot Navigation. Edited by Alejandra Barrera. Published by InTech. Croatia. 2010. Printed in Croatia, A free online edition of this book is available at [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com).

6. Mykhaylov, Y. Verwendung von Laserscannern für lokale Navigation der fahrerlosen Transportfahrzeugen / Y. Mykhaylov, V. Lingur, O. Matveiko // Hebezeuge und Fördermittel. - 2018. - № 2 (58). - С. 82-89.

7. Rocla. Maximizing your logistic performance. Rocla-agv-2019. URL: <https://www.rocla-agv.com/sites/default/files/sample-files/rocla-agv-2019.pdf>
8. Siegwart R. Nourbakhsh I. R. Introduction to Autonomous Mobile Robots. A Bradford Book The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England © 2004 Massachusetts Institute of Technology p. 336.
9. Інтернет ресурс. SICK Sensor Intelligence. Датчики 2D-LiDAR. URL: <https://www.sick.com/ru/ru/detection-and-ranging-solutions/-2d-lidar/c/g91900> (дата звернення 09.06.2022).
10. Blum J. Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry John Wiley & Sons, Inc., 2013. — 385 с. — ISBN: 978-1-118-54936-0.

## RESEARCH OF ALGORITHMS AND NAVIGATION MEANS FOR WAREHOUSE TRANSPORT SYSTEM

Mykhaylov Ye., Vudvud O., Syvokin S., Shvets B.  
Odessa Polytechnic State University

**Abstract.** *The analysis of the existing means of navigation of warehouse vehicles, which can be used to develop algorithms for controlling the movement of work in the warehouse, identified the simplest means of navigation that allow the movement of vehicles on the specified trajectory. Algorithms for vehicle navigation based on optical and odometric sensors, as well as laser scanners have been developed. The dependences of vehicle control parameters required for software implementation of these algorithms are given. The results of the work were used to create stands for laboratory and practical classes.*

**Keywords:** *vehicle, warehouse system, navigation means, movement algorithms, control system, route indicator, laser scanners, odometric devices.*