

**ВИСОКОЄФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 64.011.56

**ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ
АВТОМАТИЗОВАНОГО СЕРЕДНЬОСЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА***Гацько М. В., Шевченко В. В.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: 01nickgatsko@gmail.com, shevchenko.vadim.pbf@gmail.com*

У статті проведено аналіз попередніх досліджень і публікацій по розробці та застосуванню різних видів автоматизованих транспортних візків, які використовуються у серійному виробництві, з чого можна дійти висновку про необхідність розробки автоматизованого транспортного візка, який можна буде використовувати у приладобудуванні для збільшення продуктивності транспортної системи.

Провівши аналіз, розроблено головний елемент автоматизованої системи транспортування, а саме автоматизований візок на колесах меканум, які здатні забезпечувати рух у будь-якому напрямі без потреби змінювати власну орієнтацію у просторі, із встановленими парою бортових маніпуляторів, які мають змінні захватні пристрої, та індивідуальним змінним накопичувачем. Змінні елементи підвищують гнучкість автоматизованого візка, оскільки така особливість дозволяє адаптувати візок до великої кількості різноманітних технологічних процесів. Використовуючи програмні засоби САД системи, спроектовано схематичну тривимірну модель візка, який використовується у автоматизованій системі транспортування деталей, з врахуванням його всіх важливих елементів, а також детальну тривимірну модель коліс меканум, які використовуються в конструкції візка. Використовуючи параметри розробленого автоматизованого транспортного візка, розраховано кінематику візка і визначено формули для вирішення прямої та зворотної задач кінематики, а також розроблено алгоритми роботи візка, які описують кожен цикл, який виконує візок біля кожного робочого місця. На основі формул для вирішення задач кінематики, визначено формули і методи для нівелювання просторових похибок, які виникають під час переміщення з одної точки до іншої, а також визначено функції для оптимізації процесу переміщення автоматизованого транспортного візка і визначено, як сильно впливає оптимізація на продуктивність.

Ключові слова: автоматизація; транспортування; колесо меканум; точність; оптимізація.

Вступ. Постановка проблеми

Основними частинами виробничого процесу є підготовка виробництва, технологічний процес виготовлення виробу, його транспортування, зберігання і ремонтування. Залежно від самого виробу, від 10 % до 20 % всього виробничого процесу припадає на транспортування [1].

На сьогодні існує велика кількість способів транспортування виробів та його окремих складальних одиниць, деталей, заготовок, в межах виробничих ділянок і складських приміщень. Обрані способи транспортування відрізняються один від одного залежно від того, який тип виробництва використовується, який рівень автоматизації виробництва, як часто змінюється продукція тощо [2].

Наприклад, в одиничному виробництві найчастіше використовуються ручні візки, які мають високий рівень гнучкості, що дозволяє використовувати їх у будь-якому технологічному процесі, і дуже низький рівень автоматизації. Навпаки, у масовому виробництві використовуються най-

більш автоматизовані засоби транспортування з низькою гнучкістю, такі як конвеєрні стрічки. У серійному виробництві є необхідність забезпечення високої гнучкості та автоматизації, тому, як один із засобів транспортування, використовуються тактові столи. Однак, при їх використанні виникає можливість простою виробу, якщо робоче місце не використовується при одному з комплексних технологічних процесів [3].

Іншим засобом транспортування, який може задовольнити потреби серійного виробництва, є автоматизований візок. Завдяки цьому вирішується проблема простою, оскільки він може не зупинятися там, де відсутні операції при даному технологічному процесі. Автоматизовані візки бувають рейковими та безрейковими. Рейкові візки можуть достатньо точно переміщуватися між робочими місцями, оскільки вони мають чітко визначений шлях, а єдине коригування похибки, яке може знадобитися, – це перемістити візок трохи вперед або назад, проте, ці візки не можуть використовув-

ватися у місцях з різкими поворотами та не можуть скорочувати свій шлях. Автоматизовані безрейкові візки мають більше гнучкості, можуть оминати перешкоди, і, загалом, мають більше можливостей для маневрів, проте їх недоліком є те, що на відміну від рейкових візків, з чітко визначеною траєкторією, просторові похибки безрейкових візків складаються не тільки з відхилення вперед-назад, а ще й з відхилень праворуч-ліворуч, а також може бути наявний певний кут відхилення [4].

Тому, метою дослідження цієї статті є оптимізація транспортування деталей приладів в умовах автоматизованого середньосерійного виробництва, що дозволить збільшити продуктивність виробничого процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Ще декілька десятиріч тому більшість підприємств працювало в епоху Третьої Промислової еволюції, яка здебільшого характеризувалася використанням електронно-обчислювальної техніки, завдяки якій можна було до певного рівня автоматизувати велику кількість окремих процесів. Проте у 2000-х роках почалася Четверта Промислова революція, основними характеристиками якої є використання штучного інтелекту на Інтернету речей, завдяки яким вже можна було автоматизовано оброблювати велику кількість інформації та автоматизувати не тільки окремі процеси, а вже й усе підприємство в цілому [5].

Четверта Промислова революція внесла свій внесок і до транспортування, насамперед, збільшивши рівень автоматизації ще більше завдяки застосуванню автоматичних мобільних роботів. Мобільним роботом називають будь-якого робота, який здатен автоматично переміщуватися в просторі та перевозити вантажі. Такі роботи мають набагато більше самостійності, ніж автоматично керовані транспортні засоби, які до цього використовувалися у підприємствах. Наприклад, якщо на шляху автоматично керованих транспортних засобів з'являлася якась перешкода, то через жорстку прив'язку до свого маршруту, вони могли тільки попередити оператора і чекати, поки перешкода не буде прибрана вручну. У той же час, роботи постійно сканують простір навколо себе і завдяки цьому можуть бачити перешкоди на своєму шляху і, якщо є можливість, оминати їх, трохи редагуючи свій маршрут. Тим не менш, завдяки Четвертій промисловій революції, алгоритми дешевших автоматично керованих транспортних засобів також зазнали покращень, тому вони ще довго будуть використовуватися на підприємствах [6].

На підприємствах, головною задачею автоматизованих транспортних візків є переміщення у виробничих дільницях та складах виробів, їх окремих елементів, оснастки інструментів та інших вантажів. Більшість мобільних роботів та автоматично керованих транспортних засобів мо-

жна розділити на ті, які використовуються у виробничих приміщеннях, які використовуються у складах, а також універсальні [7].

Роботи у складах здебільшого імітують роботу звичайних вантажних підйомників, хоча, в окремих випадках можна знайти незвичні транспортні засоби, наприклад такі, які можуть переміщуватися вертикально і горизонтально по стелажах [8].

На відміну від складів, у виробничих дільницях здебільшого використовуються менш габаритні автоматизовані транспортні засоби. Відрізняються ці роботи від попередніх наявністю встановленого на них маніпулятора, і з цієї причини їх також називають мобільними маніпуляторами. Тому, головною задачею таких роботів є переміщення виробів та їх окремих складових між робочими місцями, такими як автоматичні верстати з ЧПК, контрольні стенди, накопичувачі тощо. Також, окремі роботи здатні виконувати основні технологічні операції, такі як зварювання або свердління, хоча такі роботи використовуються тільки в великому машинобудуванні, де стаціонарні маніпулятори не можуть. Якісно налаштований мобільний маніпулятор здатен імітувати просту роботу людини, таку як захват, установка та зняття деталей [9].

Якщо мобільний робот може бути використаний як у складському приміщенні, так і у виробничому, то такий автоматизований транспортний засіб називають універсальним. Найпоширенішим прикладом таких роботів слугують мобільні платформи, основною задачею яких є просто переміщення вантажів. Відсутність будь-яких захватних пристроїв потребує встановлення роботів-маніпуляторів біля кожного робочого місця. Деякі мобільні платформи здатні рухати свою верхню частину, де знаходиться вантаж, наприклад, нахилити вбік, щоб скинути виріб без використання зовнішніх пристроїв. Універсальні автоматизовані транспортні засоби простіші у реалізації, ніж спеціалізовані аналоги, а простота системи дозволяє зробити її надійнішою, тому такі платформи є дуже поширеними на підприємствах, які почали користуватися результатами Четвертої Промислової Революції [10].

Для переміщення автоматизованих транспортних візків використовують колеса, оскільки вони є самим простим та ефективним засобом переміщення. Проте, не дивлячись на їх простоту, людство розробило багато різних типів коліс, і вже активно використовує їх у різноманітних транспортних системах. З плином часу звичні колеса не змогли задовольняти потреби виробництв у багатьох аспектах, тому на їх заміну були розроблені так звані всенаправлені колеса, які здатні забезпечувати переміщення транспортного засобу у всіх напрямках на площині без зміни його орієнтації, або ж змінювати його орієнтацію навіть під час прямолінійного руху. Найпоширенішими типами таких коліс є омні колеса, а також колеса меканум. Омні

колесами називають спеціальний вид коліс, на ободі яких закріплено ролики так, що їх вісі обертання знаходяться під кутом 90° до вісі обертання самого колеса. Для забезпечення постійного контакту з підлогою, ролики розміщують у два, а іноді, і у три ряди. Така будова коліс дозволяє імітувати звичайні колеса, а також створює можливості для переміщення транспортного засобу в інших напрямках, якщо осі обертання цих коліс перетинаються в одній точці. Колесо меканум, яке ще називають шведським колесом, або ж колесом Глона – це таке колесо, на ободі якого встановлено ролики, але вже під кутом 45° до осі обертання колеса. Такі колеса забезпечують всенаправлений рух, якщо встановлені як звичайні колеса, у чотирьох кутках транспортного засобу, завдяки чому вони більш естетичні, ніж омні колеса. Колесо меканум розроблено та запатентовано ще у 1972 році шведським інженером Глоном Бенгтом Ерландом, який на момент патенту працював у компанії «Mecanum», звідки виникла назва колеса [11 - 12].

Тому, з метою забезпечення гнучкості, швидкодії та точності транспортної системи, внаслідок якої збільшиться продуктивність виробничого процесу, розроблено універсальний автоматизований транспортний візок, який встановлено на всенаправлені колеса меканум із встановленими зверху маніпуляторами та індивідуальним накопичувачем. Колеса меканум більше підходять у даному випадку, оскільки вони краще встановлюються на візок прямокутної форми. Як захватні пристрої маніпуляторів, так і індивідуальний накопичувач можна змінювати так, щоб їх форма дозволяла максимально ефективно використовувати автоматизований транспортний візок при різних конфігураціях деталей, які в даний момент підлягають виробництву.

Конструкція візка і коліс меканум

Для створення тривимірної моделі розробленого автоматизованого транспортного візка використано програмні засоби CAD системи SolidWorks 2018, яка спеціалізується на зручній розробці 3D моделей виробів, а також їх окремих елементів, таких як складальні одиниці та деталі. Найважливіша бібліотека ToolBox дозволяє отримувати готові 3D моделі стандартних виробів різних конфігурацій, використовуючи стандарти різних країн, яку, за необхідності, можна заповнювати власними виробами.

Розробивши схематичні моделі для кожного окремого важливого елемента конструкції автоматизованого транспортного візка, зібрано тривимірну модель візка, витримавши габаритні та міжосьові відстані, які є найбільш важливими у даному випадку. Готову 3D модель автоматизованого транспортного візка показано на рисунку 1.

На рисунку 2 показано розроблену модель автоматизованого транспортного візка в розгорну-

тому вигляді, оскільки в зібраному вигляді модель є недостатньо інформативною.

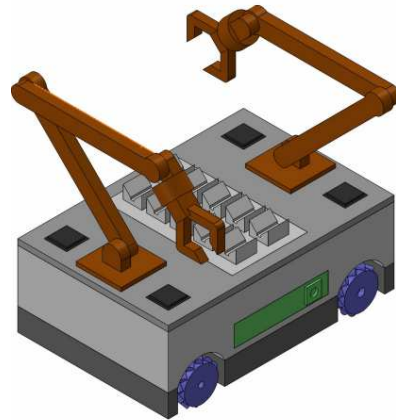


Рис. 1. Зовнішній вигляд автоматизованого візка

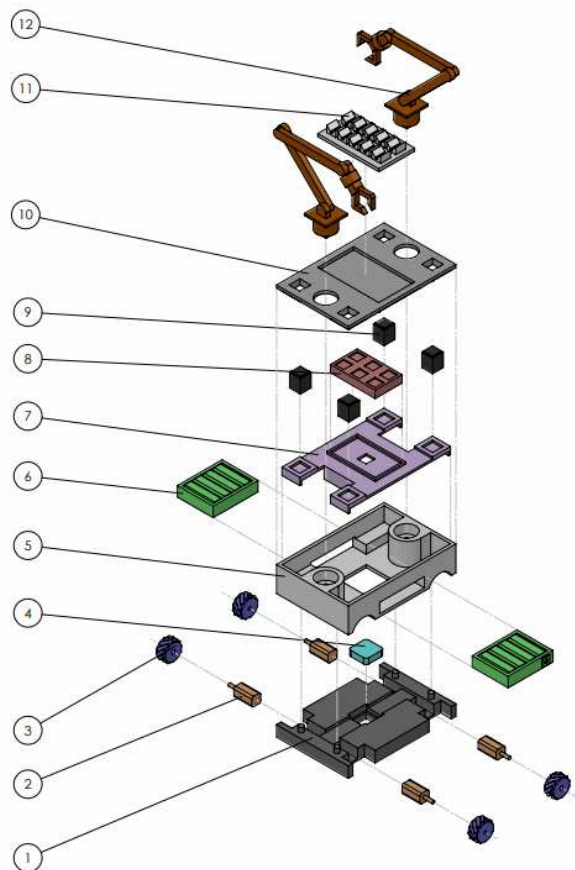


Рис. 2. Візок у розібраному вигляді, де: 1 – основа; 2 – двигун; 3 – колесо меканум; 4 – оптичний датчик; 5 – корпус; 6 – батарея; 7 – під ложка; 8 – блок обробки інформації; 9 – додатковий модуль; 10 – кришка; 11 – накопичувач; 12 – маніпулятор

Детальну тривимірну модель колеса меканум зображено на рисунку 3, розгорнутий вигляд моделі колеса меканум – на рисунку 4.



Рис. 3. Колесо меканум

Розрахунок кінематики візка

Встановлення візка на колеса меканум істотно змінює його кінематику, порівняно із звичай-

ними колесами. Ролики, встановлені на колесах, впливають на вектори рушійних сил, які виникають внаслідок обертання коліс, таким чином, що вони дозволяють переміщувати транспортний засіб без зміни його орієнтації.

Параметри, які необхідні для розрахунку кінематики автоматизованого транспортного візка, встановленого на колеса меканум, показано рисунку 5. Пов'язавши ці параметри між собою, можна вирішити пряму та зворотну задачу кінематики.

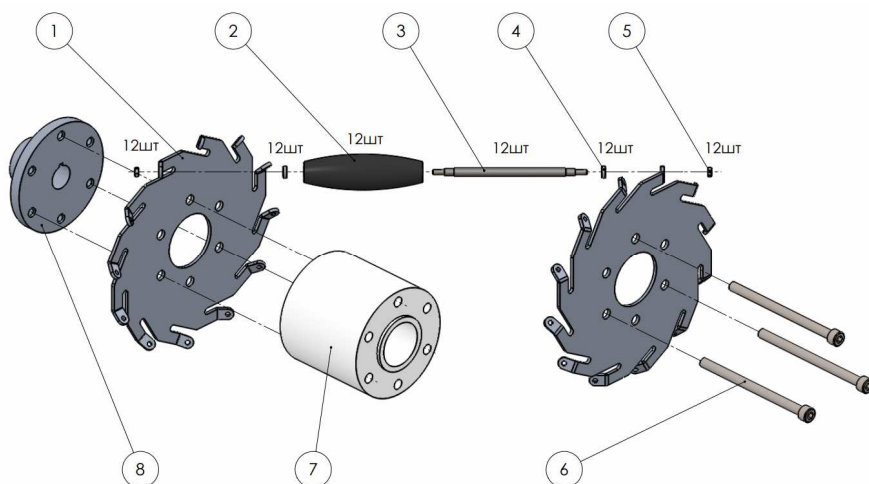


Рис. 4. Колесо меканум в розгорнутому вигляді, де: 1 – пластина; 2 – ролик; 3 – вісь; 4 – підшипник; 5 – гайка; 6 – гвинт; 7 – центр; 8 – фланець

У [13] виведено формули, завдяки якій можна вирішити пряму задачу кінематики, що являє собою визначення кутових швидкостей обертання кожного колеса та їх напрямків, щоб змусити транспортний засіб переміщуватися у необхідному напрямі:

$$\begin{cases} w_1 = \frac{1}{r}(v_x - v_y - w_z(a+b)), \\ w_2 = \frac{1}{r}(v_x + v_y + w_z(a+b)), \\ w_3 = \frac{1}{r}(v_x + v_y - w_z(a+b)), \\ w_4 = \frac{1}{r}(v_x - v_y + w_z(a+b)), \end{cases} \quad (1)$$

де r – радіус коліс меканум;
 v_x, v_y – проєкції вектору v на вісь x та y , відповідно;
 w_z – кутова швидкість обертання візка проти годинникової стрілки;
 a, b – відстані від центру візка до центру коліс за осями x та y , відповідно.

Формули для зворотної задачі кінематики, тобто визначення напрямку руху транспортного засобу, знаючи кутові швидкості обертання коліс, виглядають наступним чином:

$$\begin{cases} v_x = \frac{r}{4}(w_1 + w_2 + w_3 + w_4) \\ v_y = \frac{r}{4}(-w_1 + w_2 + w_3 - w_4) \\ w_z = \frac{r}{4(a+b)}(-w_1 + w_2 - w_3 + w_4) \end{cases} \quad (2)$$

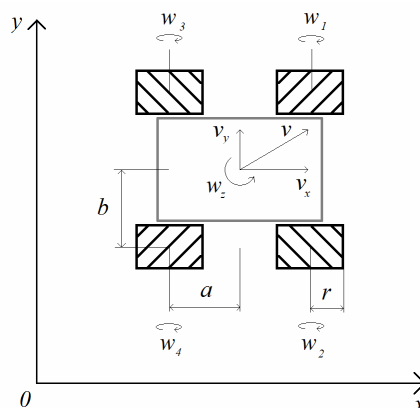


Рис. 5. Параметри для розрахунку кінематики візка, встановленого на колеса меканум

На рисунку 6 показано параметри для вирішення прямої задачі кінематики розробленого автоматизованого транспортного візка. На цьому

рисунок зображено візок при вигляді зверху так, що видно розміщення коліс.

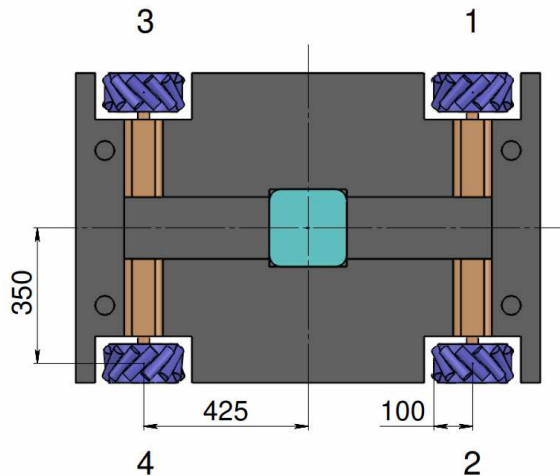


Рис. 6. Геометричні параметри автоматизованого візка, необхідні для вирішення задач кінематики

Тому, формули для розрахунку кінематики виглядають наступним чином

Пряма задача:

$$\begin{cases} w_1 = 10 \cdot (v_x - v_y - 0,775w_z), \\ w_2 = 10 \cdot (v_x + v_y + 0,775w_z), \\ w_3 = 10 \cdot (v_x + v_y - 0,775w_z), \\ w_4 = 10 \cdot (v_x - v_y + 0,775w_z). \end{cases} \quad (3)$$

Зворотна задача:

$$\begin{cases} v_x = 0,025 \cdot (w_1 + w_2 + w_3 + w_4), \\ v_y = 0,025 \cdot (-w_1 + w_2 + w_3 - w_4), \\ w_z = 0,032257 \cdot (-w_1 + w_2 - w_3 + w_4). \end{cases} \quad (4)$$

Алгоритм роботи системи

На рисунку 7 показано загальний алгоритм роботи автоматизованої системи транспортування деталей у вигляді блок-схеми. Алгоритм працює циклічно і кожен цикл починається біля кожного робочого місця, а закінчується в момент прибуття до наступного робочого місця.

Нівелювання похибки положення візка

Першим етапом у загальному алгоритмі роботи є визначення візком власного положення у просторі, що може бути визначено як глобально, так і локально.

Використовуючи бортову камеру, розташовану в нижній частині корпусу, візок здатен з точністю до декількох сантиметрів визначити власне положення. Це відбувається внаслідок зчитування маркеру-зображення, яке знаходиться біля робочого місця. Нейронною мережею визначається кількісне значення похибки, базуючись на відхиленні маркеру [14].

Якщо маркер не може бути зчитаний камерою, то це означає, що візок має значне відхилення від необхідного положення. В такому випадку

похибка визначається глобально, використовуючи систему визначення положення об'єкту за допомогою ультразвукової локації [15].

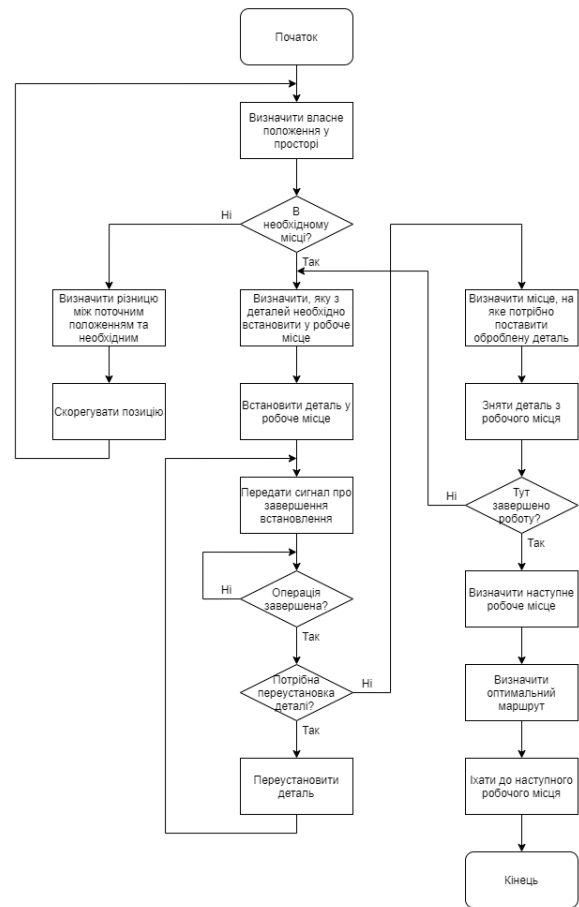


Рис. 7. Загальний алгоритм роботи автоматизованої системи транспортування

Сам процес нівелювання похибки поділяється на два етапи. На першому етапі нівелюється просторова похибка відхилення так, щоб поточне та необхідне положення центру візка співпадали, не змінюючи положення самого візка. На другому етапі нівелюється кутова похибка, завдяки обертанню візка навколо свого центру (рис. 8).

На основі формули (3), на першому етапі розраховується кутова швидкість кожного окремого колеса механум. Так, значення v_x та v_y перетворюються у пропорційні до них, але від'ємні, значення $\Delta x \cdot c^{-1}$ та $\Delta y \cdot c^{-1}$, а w_z прирівнюється до нуля:

$$\begin{cases} w_1 = 10 \cdot (-\Delta x \cdot c^{-1} + \Delta y \cdot c^{-1}), \\ w_2 = 10 \cdot (-\Delta x \cdot c^{-1} - \Delta y \cdot c^{-1}), \\ w_3 = 10 \cdot (-\Delta x \cdot c^{-1} - \Delta y \cdot c^{-1}), \\ w_4 = 10 \cdot (-\Delta x \cdot c^{-1} + \Delta y \cdot c^{-1}). \end{cases} \quad (5)$$

Отримані з формули (5) значення w_1, w_2, w_3, w_4 нормалізуються, використовуючи наступну формулу:

$$w_{\text{н}} = \frac{W_{\text{норм}} \cdot W_i}{W_{\text{max}}}, \quad (6)$$

де $w_{\text{норм}}$ – нормалізуюче значення кутової швидкості;
 w_{max} – максимальне значення серед w_1, w_2, w_3, w_4 .

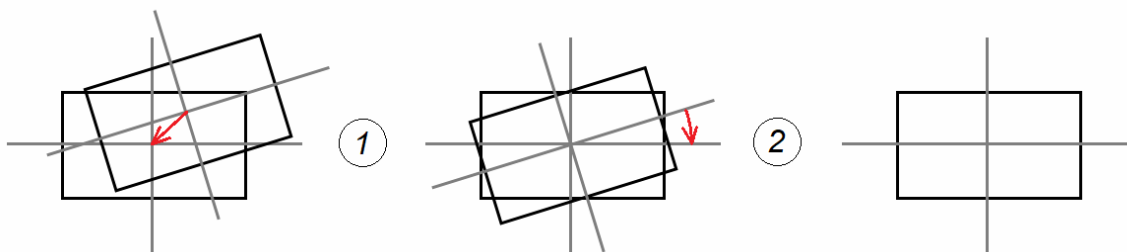


Рис. 8. Процес нівелювання похибки

Час, який необхідно витратити на переміщення, використовуючи нормалізовані значення кутових швидкостей, розраховується за наступною формулою:

$$t_n = \frac{w_{\text{max}}}{w_{\text{норм}}}. \quad (7)$$

Аналогічно, використовуючи формулу (3), на другому етапі визначаються напрями обертання кожного окремого колеса, щоб забезпечити поворот візка навколо своєї осі. При даній операції кутові швидкості коліс будуть дорівнювати нормалізованому значенню. Визначивши напрями обертання коліс, за формулою (7) розраховується час, за який необхідно приводити в рух колеса, щоб зменшити кут відхилення. Результатом виконання цих двох етапів є нівельована просторова похибка автоматизованого транспортного візка.

Оптимізація процесу переміщення

При переміщенні візка між різними робочими місцями, його початкова і кінцева орієнтація може бути різною, і замість того, щоб переміщуватися із однієї точки в іншу, а потім обернутися (рис. 9. а) можна поєднати ці два етапи в один (рис. 9. б), що дозволить оптимізувати процес переміщення візка.

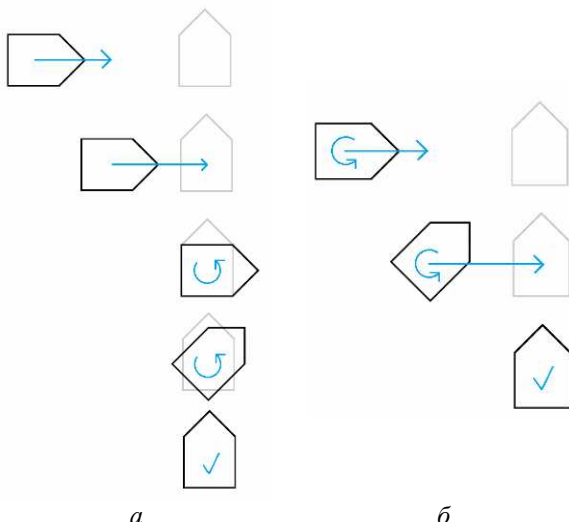


Рис. 9. Оптимізація процесу переміщення, де: а – переміщення без оптимізації, б – оптимізоване переміщення

Поєднання процесу переміщення в один етап збільшує складність розрахунку кутових швидкостей кожного окремого колеса механум. Причиною є те, що вектор переміщення візка змінюється прямо під час руху (рис. 10).

Результатом запровадження оптимізованого руху є те, що кутові швидкості коліс механум із констант перетворюються на деякі функції від часу.

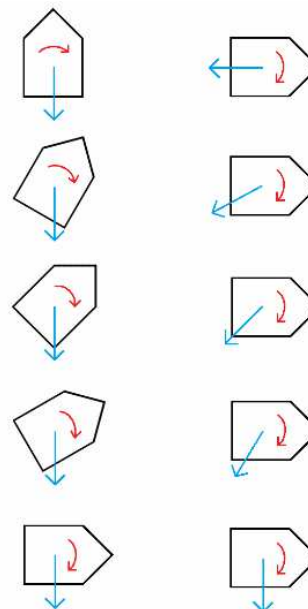


Рис. 10. Зміна вектору швидкості відносно візка

На підприємствах максимально безпечною швидкістю переміщення автоматизованих візків є 2 м/с. Відповідна кутова швидкість коліс механум, яка при прямолінійному русі становить 20 рад/с. Базуючись на цьому, максимальна кутова швидкість обертання розробленого автоматизованого транспортного візка становить:

$$w_{z \text{ max}} = 0,032257 \cdot 20 \cdot 4 = 2,58063 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (8)$$

Поведінку вектору швидкості залежно від напрямку обертання автоматизованого транспортного візка під час руху показано на рисунку 11.

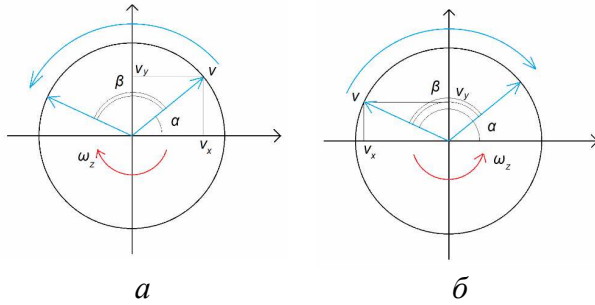


Рис. 11. Поведінка вектору швидкості залежно від напрямку обертання, де: а – проти годинникової стрілки, б – за годинниковою стрілкою

З рисунку 11. а видно, що при обертанні візка проти годинникової стрілки, горизонтальна та вертикальна складові вектору швидкості будуть представлені у вигляді наступних функцій:

$$\begin{cases} v_x(t) = v_{\max} \cos(\omega_z t + \alpha) = 2 \cos(2,58063t + \alpha), \\ v_y(t) = v_{\max} \sin(\omega_z t + \alpha) = 2 \sin(2,58063t + \alpha), \end{cases} \quad (9)$$

де α – початкове відхилення вектору швидкості, зазначене у радіанах.

З рисунку 11. б аналогічним чином видно, що при обертанні візка за годинниковою стрілкою, складові вектору швидкості будуть мати наступну залежність:

$$\begin{cases} v_x(t) = v_{\max} \cos(\alpha - \omega_z t) = 2 \cos(\alpha - 2,58063t), \\ v_y(t) = v_{\max} \sin(\alpha - \omega_z t) = 2 \sin(\alpha - 2,58063t). \end{cases} \quad (10)$$

Підставивши необхідні складові вектору швидкості у формулу (3), визначено формули для розрахунку кутових швидкостей коліс меканум у кожний момент часу.

Для візка, який обертається за годинниковою стрілкою:

$$\begin{cases} w_1 = 20 \cos(2,58063t + \alpha) - 20 \sin(2,58063t + \alpha), \\ w_2 = 20 \cos(2,58063t + \alpha) + 20 \sin(2,58063t + \alpha), \\ w_3 = 20 \cos(2,58063t + \alpha) + 20 \sin(2,58063t + \alpha), \\ w_4 = 20 \cos(2,58063t + \alpha) - 20 \sin(2,58063t + \alpha). \end{cases} \quad (11)$$

Для візка, який обертається проти годинникової стрілки:

$$\begin{cases} w_1 = 20 \cos(\alpha - 2,58063t) - 20 \sin(\alpha - 2,58063t), \\ w_2 = 20 \cos(\alpha - 2,58063t) + 20 \sin(\alpha - 2,58063t), \\ w_3 = 20 \cos(\alpha - 2,58063t) + 20 \sin(\alpha - 2,58063t), \\ w_4 = 20 \cos(\alpha - 2,58063t) - 20 \sin(\alpha - 2,58063t). \end{cases} \quad (12)$$

Час, протягом якого візок повинен обертатися, розраховується за наступною формулою:

$$t_o = \frac{\beta}{\omega_z} = \frac{\beta}{2,58063}, \quad (13)$$

де β – необхідний кут повороту візка, зазначений у радіанах.

При переміщенні автоматизованого транспортного візка з однієї точки у іншу з одночасною зміною орієнтації, може відбутися одна з двох

подій: автоматизований візок отримає необхідну орієнтацію раніше, ніж досягне наступного робочого місця або ж, навпаки, він досягне наступного робочого місця раніше, ніж отримає необхідну орієнтацію.

У першому випадку, коли візок набуде необхідної орієнтації, він продовжить прямолінійний рух до наступної точки, але вже без обертання. Необхідні кутові швидкості розраховуються за формулами (5)–(6), а час, який витрачається на таке переміщення визначається за формулою:

$$t = |t_l - t_o|, \quad (14)$$

де t_l – час, витрачений на лінійне переміщення; t_o – це час, витрачений на обертання.

У випадку, коли візок досягне наступного робочого місця раніше, ніж отримає необхідну орієнтацію, він продовжить обертатися на місці. Визначивши напрями обертання коліс меканум за формулою (3), час, витрачений на таке обертання, розраховується за формулою (14).

Критерієм оптимізації є час, який витрачено на переміщення між робочими місцями. Більш наглядно ефективність оптимізації характеризує введений коефіцієнт оптимізації $K_{\text{опт}}$, який розраховується за наступною формулою:

$$K_{\text{опт}} = \frac{t_3 - t_{\text{опт}}}{t_{\text{опт}}}, \quad (15)$$

де t_3 – теоретичний час, який необхідно було б витратити на процес переміщення без його оптимізації:

$$t_3 = t_l + t_o; \quad (16)$$

$t_{\text{опт}}$ – час, витрачений на оптимізоване переміщення візка:

$$t_{\text{опт}} = \max(t_l, t_o). \quad (17)$$

В ідеальному випадку, якщо $t_l = t_o$, час, витрачений на оптимізоване переміщення буде в два рази менше, ніж той, що без оптимізації. Якщо ж орієнтація у початковій та кінцевій точці буде однаковою, тоді оптимізованого переміщення не буде і тоді $t_o = t_l$.

Залежність коефіцієнту оптимізації від часу, зекономленого завдяки оптимізації, показано на графіку (рис. 12).

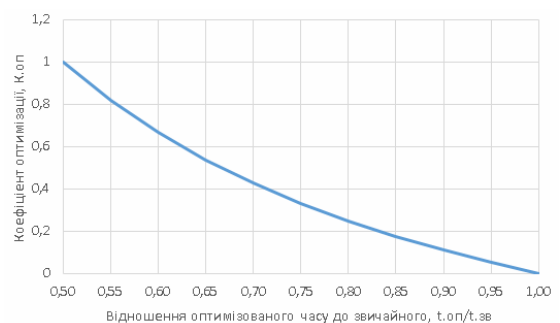


Рис. 12. Значення коефіцієнту оптимізації залежно від зекономленого часу

Ведений коефіцієнт оптимізації $K_{\text{опт}}$ приймає значення в межах від нуля до одиниці, причому нуль означає відсутність оптимізації, а одиниця – найбільший вплив оптимізованого процесу переміщення на витрачений час.

Загальний коефіцієнт оптимізації розраховується за формулою:

$$K_{\text{опт}3} = \frac{\sum_{i=1}^{n+m} t_{3i} - \sum_{i=1}^{n+m} t_{\text{опт}i}}{\sum_{i=1}^{n+m} t_{\text{опт}i}}, \quad (18)$$

де n – кількість робочих місць;

m – кількість допоміжних точок переміщення;

t_{3i} – час, який міг бути витрачений на i -му відрізку, використовуючи переміщення без оптимізації;

$t_{\text{опт}i}$ – час, витрачений на i -му відрізку шляху, при якому було використано оптимізований процес переміщення.

Тому, для забезпечення найбільшої ефективності процесу переміщення візку між робочими місцями, варто використовувати оптимізований процес переміщення, оскільки це може зробити час переміщення автоматизованого транспортного візку до двох разів меншим порівняно з переміщенням без оптимізації.

Висновки

Протягом цього дослідження розглянуто проблему транспортування деталей приладів в умовах серійного виробництва. Розглянувши різні види існуючих автоматизованих систем транспортування та порівнявши їх, спроектовано власну систему, основою якої є автоматизований транспортний візок, засобом його переміщення обрано всенаправлені колеса механум. На робочій частині візка встановлено індивідуальний змінний накопичувач, а також пара маніпуляторів із різними захватними пристроями.

Для спроектованого автоматизованого візка розроблено тривимірні схематичні моделі його основних складових, використовуючи програмні засоби САД системи SolidWorks, а більш ретельне деталювання проведено для коліс механум. На основі розроблених моделей проведено розрахунки прямої та зворотної задач кінематики та визначено загальний алгоритм роботи автоматизованої системи транспортування.

Для забезпечення належної роботи автоматизованої системи транспортування, реалізовано процес нівелювання просторової похибки розташування автоматизованого транспортного візка визначенням методу нівелювання похибок і розрахунку формул, необхідних для реалізації процесу. Для зменшення часу, витраченого на переміщення автоматизованого візка між робочими місцями, запроваджено оптимізацію процесу переміщення, що дозволило збільшити рівень швидкодії, точності та гнучкості транспортної системи, внаслідок

чого збільшився рівень продуктивності виробничого процесу.

Тим не менш, все ще є можливості навіть більш удосконаленої оптимізації процесу транспортування з використанням коліс механум, якщо нівелювати просторові похибки прямо під час переміщення автоматизованого транспортного візка, завдяки чому він буде прибувати до робочого місця одразу з необхідною точністю. Це потребує неперервного контролю точного положення візка у кожен момент часу, а також більш досконалих алгоритмів і формул, які будуть розроблені на основі тих, які представлені у цьому дослідженні.

Література

- [1] Технологія приладобудування: навчальний посібник для студентів напрямку підготовки 6.051003 «Приладобудування», 7.090902 «Наукові, аналітичні та екологічні прилади та системи» приладобудівного ф-ту, Уклад.: Шевченко В. В., Осадчий О. В., Симуца М. О. Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2010.
- [2] В. В. Прохорова, О. Ю. Давидова. Організація виробництва: навч. посібник, Харків, Україна: Вид-во Іванченка І.С., 2018.
- [3] В. Б. Струтинський, Н. Р. Веселовська, “Окремі аспекти автоматизації гнучких виробничих систем механообробки”, *Вібрації в техніці та технологіях*, № 1(53), с. 74 – 79, 2009.
- [4] V. K. Chawla, D. A. Chanda, D. A. Chanda, D. S. Angra, and D. S. Angra, “Automatic Guided Vehicle Systems in Flexible Manufacturing System –A review”, *Int J Ind Eng*, vol. 26, no. 5, Oct. 2019. DOI: 10.23055/ijietap.2019.26.5.3746
- [5] G. Fracapane, D. Ivanov, M. Peron, et al. “Increasing flexibility and productivity in Industry 4.0 production networks with autonomous mobile robots and smart intralogistics”, *Ann Oper Res*, vol. 308, is. 1, pp. 125–143, 2022. DOI: 10.1007/s10479-020-03526-7
- [6] Liaqat, A., Hutabarat, W., Tiwari, D. et al. “Autonomous mobile robots in manufacturing: Highway Code development, simulation, and testing” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 104, is. 9, pp. 4617–4628, 2019. DOI: 10.1007/s00170-019-04257-1.
- [7] G. Campion, G. Bastin and B. Dandrea-Novell, “Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots,” in *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 1, pp. 47-62, Feb. 1996. DOI: 10.1109/70.481750.
- [8] Kaveh Azadeh, René De Koster, Debjit Roy, “Robotized and Automated Warehouse Systems: Review and Recent Developments”, *Transportation Science*, vol. 53, no. 4, pp. 917-945, 2019. DOI: 10.1287/trsc.2018.0873

- [9] Das, Suman “Design and Methodology of Automated Guided Vehicle. IOSR journal of mechanical and civil engineering”, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). Special Issue - AETM'16, pp. 29-35, 2016.
- [10] Anna Jaskot, Bogdan Posiadała, Szczepan Śpiewak, “Dynamics modelling of the four-wheeled mobile platform”, *Mechanics Research Communications*, vol. 83, pp. 58-64, 2017. DOI:10.1016/j.mechrescom.2017.05.007
- [11] Дж. Блумріч. Омні спрямоване колесо: пат. US3789947А Сполучені Штати, заявл. 17.04.1972; опубл. 05.02.1974.
- [12] Б. Е. Люн. Колеса для курсової стійкої самохідної машини, які можуть рухатися в будь-якому бажаному напрямку на землі або іншій базі: пат. DE2354404A1 Німеччина; заявл. 30.10.1973; опубл. 16.05.1974.
- [13] Kevin M. Lynch and Frank C. Park. 2017. *Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control* (1st. ed.). Cambridge University Press, USA.
- [14] M. Košťák and A. Slabý, “Designing a Simple Fiducial Marker for Localization in Spatial Scenes Using Neural Networks,” *Sensors*, vol. 21, no. 16, p. 5407, Aug. 2021, DOI: 10.3390/s21165407.
- [15] F. Ijaz, Hee Kwon Yang, A. W. Ahmad and Chankil Lee, "Indoor positioning: A review of indoor ultrasonic positioning systems", in *15th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT)*, 2013, pp. 1146-1150.

UDC 64.011.56

M. V. Hatsko, V. V. Shevchenko

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
AUTOMATED DEVICE PARTS TRANSPORTATION SYSTEM IN THE CONDITIONS OF MEDIUM-SERIES PRODUCTION

The article analyzes previous research and publications on the development and application of various types of automated transport carts used in serial production, from which a conclusion is drawn about the need to develop an automated transport cart that can be used in instrument manufacturing and which will increase the productivity of the transport system.

After conducting the analysis, the main element of the automated transportation system was developed, which is an automated transport cart mounted on mecanum wheels, which ensure its all-directional movement, without changing the orientation in space or its change regardless of the direction of movement, with two on-board manipulators that have removable gripping devices, and an individual removable storage device. Changeable elements increase the flexibility of the automated cart, because this feature allows the cart to be adapted to a large number of various technological processes. With the help of the CAD system, a three-dimensional model of the schematic design of the automated transport cart was developed, which takes into account all its important elements, as well as a detailed model of the mecanum wheels, designed specifically for the design of the cart.

Using the parameters of the developed automated transport cart, the kinematics of the cart were calculated and formulas for solving the forward and inverse kinematics problem were determined, as well as the algorithms of the cart operation were developed, which describe each cycle performed by the cart at each workplace. Based on formulas for solving kinematics problems, formulas and methods for leveling spatial errors that occur during movement from one point to another are defined, as well as functions for optimizing the process of moving an automated transport cart are defined, and how optimization affects performance is determined.

Keywords: automation; transportation; mecanum wheel; precision; optimization.

*Надійшла до редакції
25 листопада 2022 року*

*Рецензовано
28 квітня 2023 року*



© 2023 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).