

## Аналіз системи керування чіткої логіки колісного робота з диференціальним приводом

Дмитро Міщук<sup>1</sup>, Євген Міщук<sup>2</sup>, Олександр Калашніков<sup>3</sup>

Київський національний університет будівництва і архітектури,  
Повітрофлотський просп. 31, Київ, Україна, 03037

<sup>1</sup>[mischuk.do@knuba.edu.ua](mailto:mischuk.do@knuba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-8263-9400>,

<sup>2</sup>[mischuk.ieo@knuba.edu.ua](mailto:mischuk.ieo@knuba.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-7850-0975>

<sup>3</sup>[kalashnykov\\_os@knuba.edu.ua](mailto:kalashnykov_os@knuba.edu.ua)

Received: 15.04.2021; Accepted: 14.06.2021

<https://doi.org/10.32347/gbdmm2021.97.0201>

**Анотація.** Здатність мобільного робота здійснювати переміщення в навколишньому середовищі є важливою задачею в робототехніці, тому розробка досконалих систем керування роботів є актуальною темою досліджень. Системи керування чіткої логіки роботизованих колісних машин є одними з найбільш розповсюджених. Такі системи прості за конструктивним виконанням, а отже мають найнижчу вартість у порівнянні з іншими. Одним з недоліків подібних систем керування є їх обмежена точність. Зазвичай це пов'язано з недосконалими програмами керування по яких працюють подібні системи та недосконалістю механічної системи перетворювачів приводу, зокрема для колісних роботів з диференціальним приводом можливі такі випадки, коли робот з керуванням за чіткою логікою може безкінечно здійснювати пошук цілі та виконувати переміщення до заданої точки простору навіть за відсутності перешкод на шляху його руху.

В даному дослідженні пропонується аналіз переміщень двоколісного робота за розробленим алгоритмом чіткої логіки. Для цього було розроблено математичну модель покрокового переміщення колісного робота, яка розраховує координати центра рухомої системи координат відомого робота відносно заданого початкового положення в нерухомій системі координат цілі, де таке положення прийнято за базове. На вхід математичної моделі необхідно на кожному кроці руху робота подавати координати положення цілі, а математичний апарат моделі визначає потрібний кут повороту та необхідне переміщення рухомої платформи робота. Система прийняття рішення в розробленій моделі побудована на релейному ("ON-OFF") контро-

лері, в якому кут повороту робота на кожному кроці вибирається з діапазону заданих значень.

Моделювання недосконалості процесу керування роботом виконується за рахунок введення випадкової похибки, яка накладається на значення виміряної роботом координати цілі.

**Ключові слова:** колісний робот, чітка логіка, диференціальний привід, система керування.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Застосування роботизованих систем в будівельному виробництві для виконання, як спеціальних так і рутинних робіт, призводить до зниження пов'язаних з ними витрат та підвищує якість виконання робіт. Колісні роботизовані системи, які пересуваються по плоским поверхням і здатні перевозити вантажі великої маси є найбільш простими в конструктивному виконанні та найбільш розповсюджені на логістичних процесах. В промисловості набули поширення пересувні двоколісні, триколісні і чотириколісні роботаки (роботизовані транспортні системи). Для ефективного функціонування, колісні інтелектуальні роботи обладнують системами сприйняття зовнішнього середовища, засобами аналізу ситуацій і прийняття рішень.

В даний час виконано величезну кількість досліджень, пов'язаних з розробкою алгоритмів управління, які реалізуються мобільними роботами, зокрема, уточнення карт місцевості [1, 2], планування траєкторій для обходу перешкод [3, 4], проникнен-

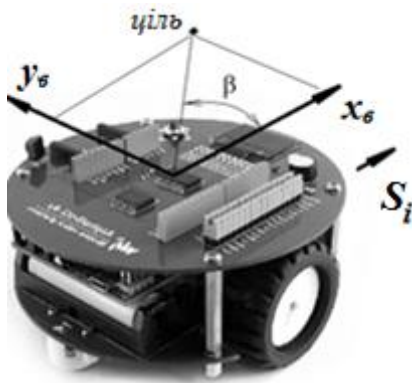
ня у важкодоступні місця, переміщення по складним криволінійним траєкторіям [5] із забезпеченням заданої орієнтації елементів робота в просторі і ін. Проте в багатьох розглянутих працях відсутній якісний аналіз поведінки робота на задану програму керування, зокрема для відомих програм керування роботами не існує зрозумілих тестів за якими можна було б оцінити якість розробленої програми керування для визначного виду робота.

### МЕТА РОБОТИ

Мета дослідження – розробити алгоритм тестування програм керування чіткої логіки та проаналізувати поведінку колісного робота на розробленій програмі прямого управління.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Розглянемо задачу керування колісним роботом з диференціальним приводом, який пересувається на плоскій горизонтальній поверхні. В будь-який проміжок часу руху, положення центральної точки такого робота, як відомо, в прямокутній системі координат буде визначатися двома лінійними координатами та кутом орієнтації. На Рис. 1 зображено розрахункову схему для визначення положення розглядуваної рухомої механічної системи.



**Рис. 1.** Схема колісного робота з диференціальним приводом

**Fig. 1.** Scheme of a wheel robot with a differential drive

Прийmemo, що пересувна система робота має власну систему координат, яка зв'язана з її рухомим геометричним центром, а вісь напрямку руху  $S$  співпадає з віссю  $x$ . Робот повинен переміститися до заданої точки цілі. Якщо центральну точку робота зв'язати з точкою цілі, тоді кут між віссю напрямку руху робота (віссю  $x$ ) та радіус-вектором до цілі буде:

$$\beta = \arctan\left(\frac{x_{ц(B)}}{y_{ц(B)}}\right), \quad (1)$$

де  $x_{ц(B)}$  та  $y_{ц(B)}$  – координати цілі в системі координат робота.

Прийнявши умову, що кут повороту робота  $\phi$  обмежений і змінюється диференціально на задані значення від  $-\phi_{\max}$  до  $\phi_{\max}$ , задано характер його зміни:

$$\phi = \begin{cases} -\phi_{\max}, & \text{при } \beta < 0; \\ 0, & \text{при } \beta = 0; \\ \phi_{\max}, & \text{при } \beta > 0. \end{cases} \quad (2)$$

Дане припущення є справедливим для багатьох реальних систем, які мають обмеження на керування.

Досліджено покрокове переміщення робота до цілі (Рис. 2). На кожному кроці руху робота, величина його переміщення буде:

$$S_i = v \Delta t, \quad (3)$$

де  $v$  – швидкість переміщення, м/с;  $\Delta t$  – тривалість одного кроку, с.

Таким чином робот буде переміщуватися поступово з одного положення в інше. Наступне положення робота буде визначатися координатами його переміщення до цілі на попередньому кроці. В абсолютній системі координат переміщення робота на кожному кроці при русі до цілі буде:

$$\begin{pmatrix} \Delta x_{A(i)} \\ \Delta y_{A(i)} \end{pmatrix} = A_0 \bar{R}_{P(i)}, \quad (4)$$

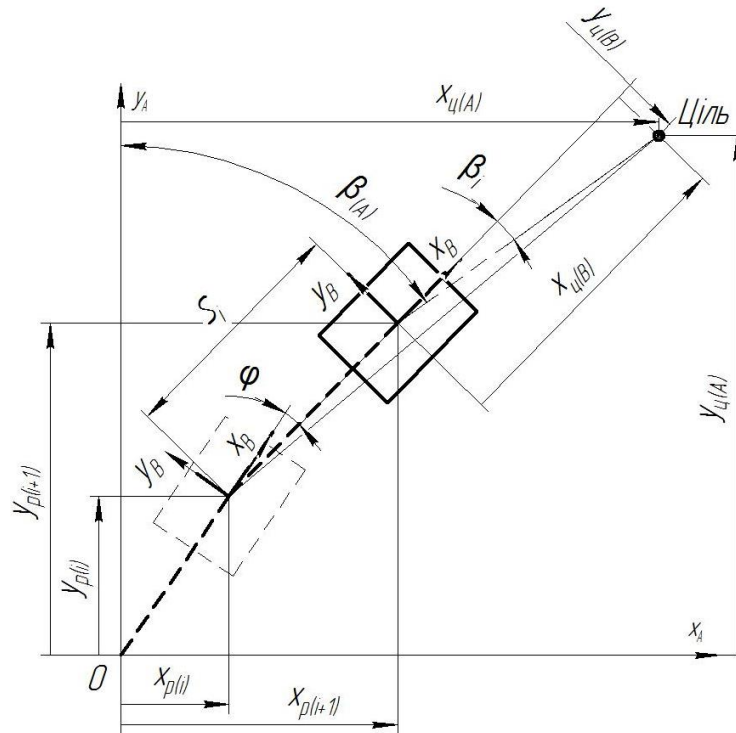


Рис. 2. Схема розрахунку покрокового переміщення робота

Fig. 2. Scheme for calculating the stepwise movement of the robot

де  $A_0$  – матриця переносу координат при повороті з рухомої системи координат робота в абсолютну систему координат

$$A_0 = \begin{pmatrix} \cos(-\varphi + \varphi_0) & -\sin(-\varphi + \varphi_0) \\ \sin(-\varphi + \varphi_0) & \cos(-\varphi + \varphi_0) \end{pmatrix};$$

$\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$  – прийнятий кут повороту робота в абсолютній системі координат відносно базових осей і заміряний перед початком переміщення при встановленні робота в

початковій позиції;  $\bar{R}_{p(i)} = \begin{pmatrix} S_i \\ 0 \end{pmatrix}$  – радіус-вектор, який характеризує переміщення робота у власній рухомій системі координат.

Координати наступних точок переміщення робота в абсолютній системі координат будуть:

$$x_{p(i+1)} = x_{p(i)} + \Delta x_{A(i)}; \quad (5)$$

$$y_{p(i+1)} = y_{p(i)} + \Delta y_{A(i)}, \quad (6)$$

де  $x_{p(i)}$ ,  $y_{p(i)}$  – поточні координати робота (початкові значення приймаються нульовими);  $x_{p(i+1)}$ ,  $y_{p(i+1)}$  – координати переміщення на наступному кроці.

З кожним кроком руху робота, його відстань до цілі буде зменшуватися і в абсолютній системі координат визначатиметься наступною залежністю:

$$\Delta x_{uA(i+1)} = x_{u(A)} - x_{p(i+1)}; \quad (7)$$

$$\Delta y_{uA(i+1)} = y_{u(A)} - y_{p(i+1)}, \quad (8)$$

де  $x_{u(A)}$ ,  $y_{u(A)}$  – координати цілі в абсолютній системі координат.

Так як згідно виразу (1) кут між напрямком руху робота та координатами цілі визначається в системі координат робота, тоді необхідно визначити оновлені значення координат цілі в системі координат робота за наступним виразом:

$$\begin{pmatrix} x_{u(B)} \\ y_{u(B)} \end{pmatrix} = A_1 \bar{R}_{u(i)}, \quad (9)$$

де  $A_1$  – матриця переносу координат зміни відстані цілі до робота з абсолютної систе-

ми координат в рухому систему координат робота ( $A_1 = \begin{pmatrix} \cos(-\varphi) & \sin(-\varphi) \\ -\sin(-\varphi) & \cos(-\varphi) \end{pmatrix}$ );

$\bar{R}_{u(i)} = \begin{pmatrix} \Delta x_{uA(i)} \\ \Delta y_{uA(i)} \end{pmatrix}$  – радіус-вектор координат,

який визначає відстань цілі до робота в абсолютній системі координат.

Для розрахунку траєкторії переміщення робота за представленими виразами (1) – (9) необхідно встановити його пересувну систему в початкове положення на відстані до цілі, яке визначається довільно та для кожного кроку переміщення розрахувати координати і кути повороту. В даному дослідженні пропонується на кожному кроці задавати швидкість переміщення та кут ротації механічної системи робота.

На Рис. 3 представлено схему траєкторії переміщення колісного робота з диференціальним приводом на якій графічно накладено проекції руху моделі робота на траєкторії змодельовані геометричним способом та за допомогою розглянутих вище математичних виразів в системі Mathematica 10.0

для шести кроків переміщення при наступних параметрах системи:  $v = 100$  мм/с;  $x_{u(A)} = 500$  мм;  $y_{u(A)} = 400$  мм;  $\Delta t = 1$  с;  $\varphi_{\max} = 10^\circ$ .

З представленого графіка на Рис. 3 видно, що шести кроків переміщення для даного робота із заданими параметрами руху не достатньо для досягнення ним цілі, а для якісного розуміння необхідно мати показник, за яким можна буде визначати умову зупинки руху. В подальшому, для обмеження кількості кроків виконаних роботом, введено показник похибки, яким оцінюється відстань робота до цілі за лінійними обмеженнями:

$$\Delta x_{uA(i+1)} < \varepsilon \quad (10)$$

або

$$\Delta y_{uA(i+1)} < \varepsilon, \quad (11)$$

де  $\varepsilon$  – задана границя похибки.

На Рис. 4 – 6 представлено результати моделювання руху двоколісного робота за розробленою моделлю контролера.

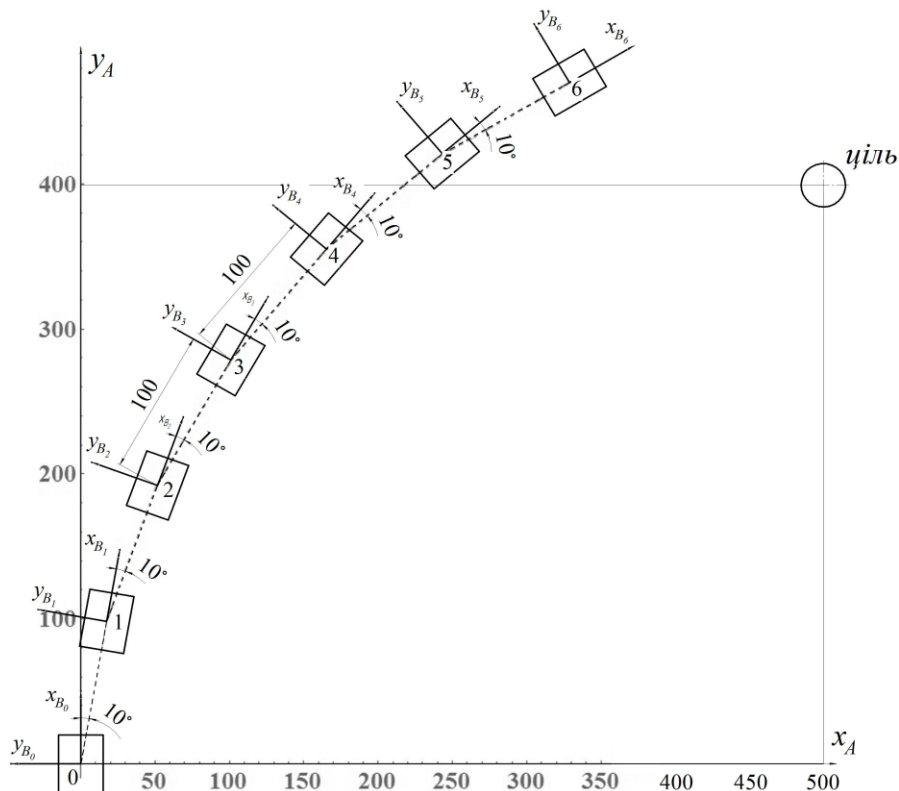
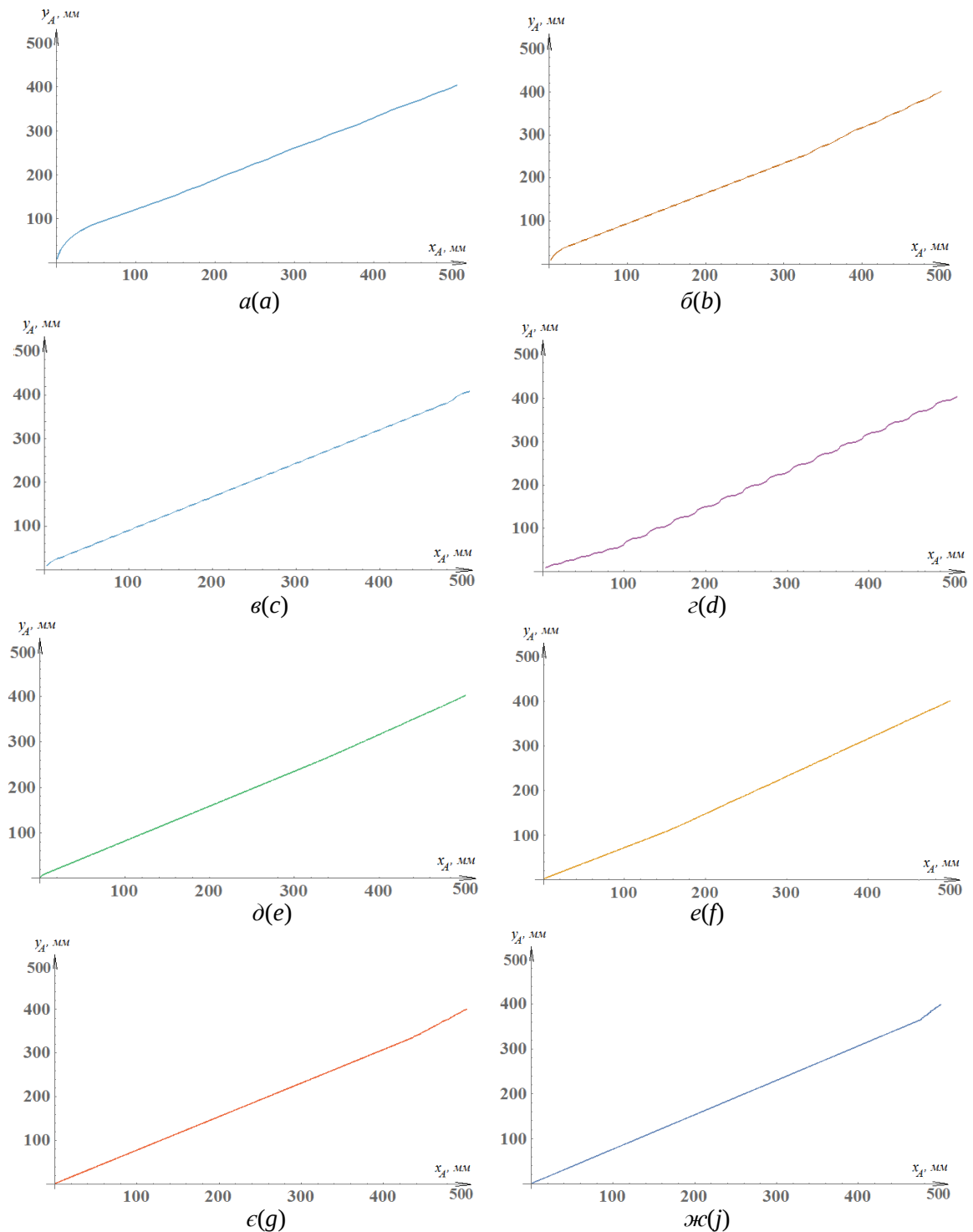


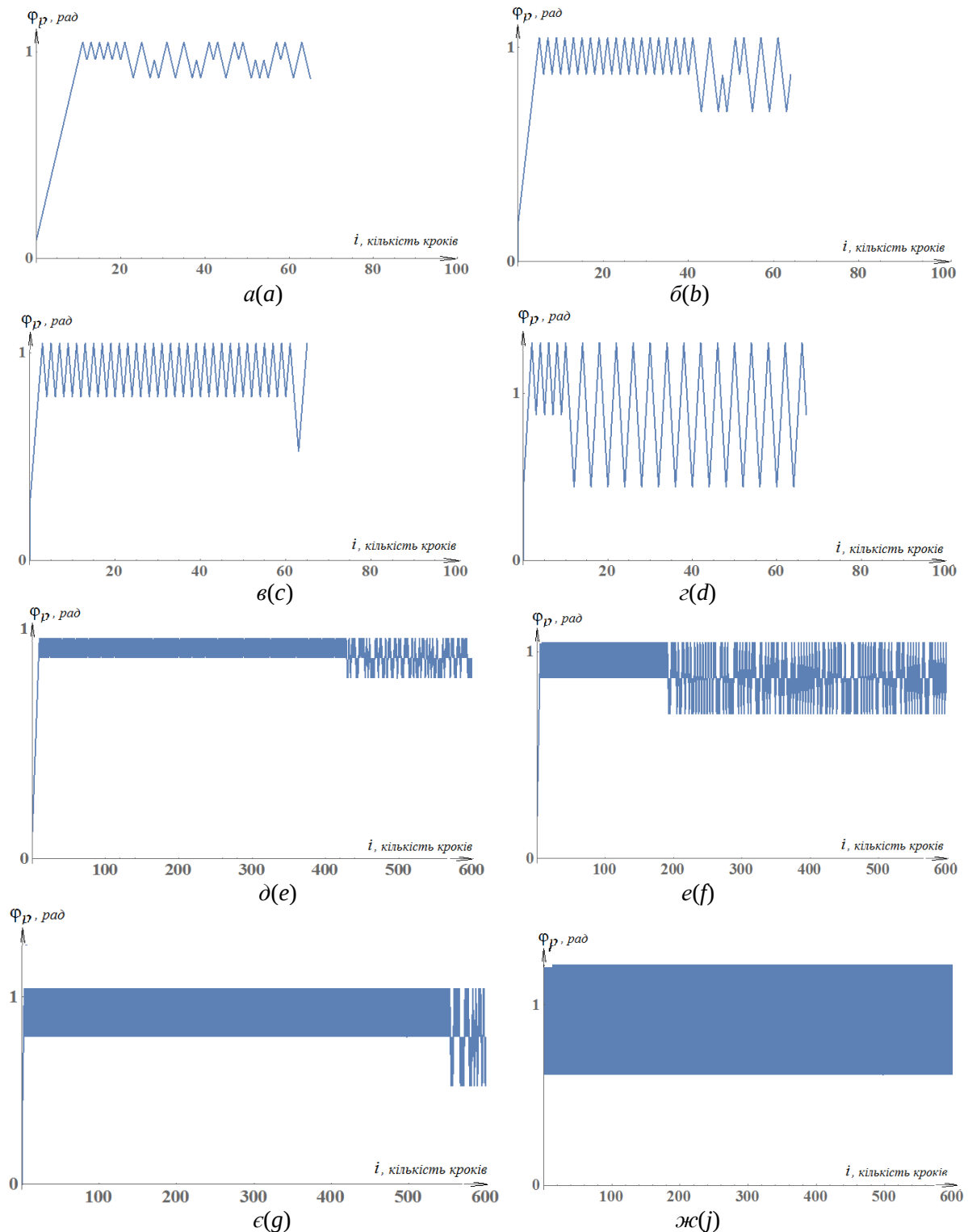
Рис. 3. Схема зміни траєкторії руху робота при його переміщенні до заданої точки цілі

Fig. 3. Scheme of changing the robot's trajectory when it moves to a given point of the target



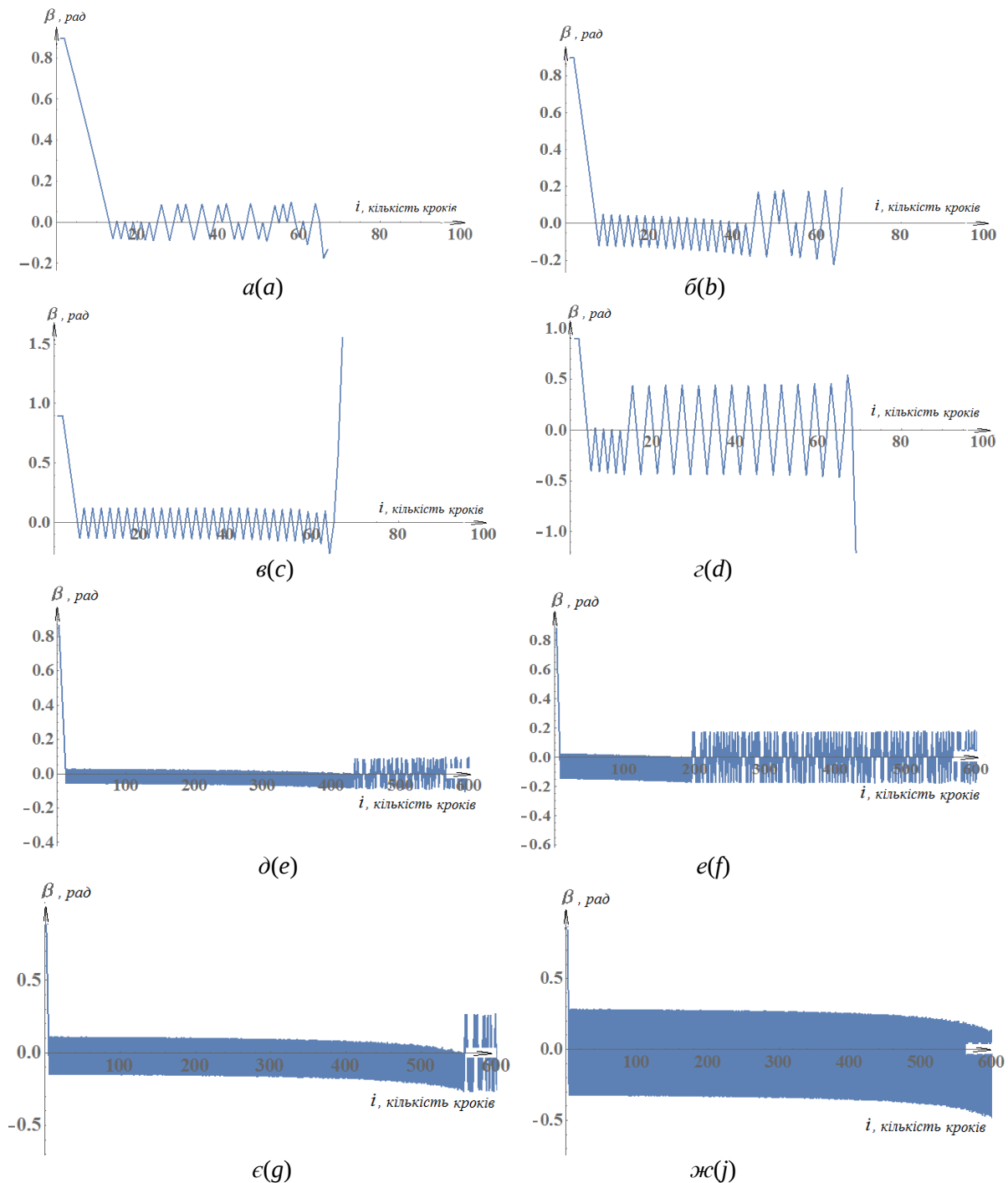
**Рис. 4.** Графіки траєкторій руху колісного робота з диференціальним приводом і системою керування чіткої логіки при різних параметрах керування:  $a - v = 100 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 5^\circ$ ;  $b - v = 100 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 10^\circ$ ;  $c - v = 100 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 15^\circ$ ;  $d - v = 100 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 35^\circ$ ;  $e - v = 10 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 5^\circ$ ;  $f - v = 10 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 10^\circ$ ;  $g - v = 10 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 15^\circ$ ;  $ж - v = 10 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 35^\circ$

**Fig. 4.** Graphs of trajectories of the wheel robot with a differential drive and a logic control system at the next control parameters:  $a - v = 100 \text{ mm/s}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ ;  $\varphi_{\max} = 5^\circ$ ;  $b - v = 100 \text{ mm/s}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ ;  $\varphi_{\max} = 10^\circ$ ;  $c - v = 100 \text{ mm/s}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ ;  $\varphi_{\max} = 15^\circ$ ;  $d - v = 100 \text{ mm/s}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ ;  $\varphi_{\max} = 35^\circ$ ;  $e - v = 10 \text{ mm/s}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ ;  $\varphi_{\max} = 5^\circ$ ;  $f - v = 10 \text{ mm/s}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ ;  $\varphi_{\max} = 10^\circ$ ;  $g - v = 10 \text{ mm/s}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ ;  $\varphi_{\max} = 15^\circ$ ;  $j - v = 10 \text{ mm/s}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ ;  $\varphi_{\max} = 35^\circ$



**Рис. 5.** Графіки зміни кута ротації колісного робота з диференційним приводом і системою керування чіткої логіки при різних параметрах керування:  $a - v = 100$  мм/с;  $\Delta t = 0,1$  с;  $\varphi_{\max} = 5^\circ$ ;  $b - v = 100$  мм/с;  $\Delta t = 0,1$  с;  $\varphi_{\max} = 10^\circ$ ;  $c - v = 100$  мм/с;  $\Delta t = 0,1$  с;  $\varphi_{\max} = 15^\circ$ ;  $d - v = 100$  мм/с;  $\Delta t = 0,1$  с;  $\varphi_{\max} = 35^\circ$ ;  $e - v = 10$  мм/с;  $\Delta t = 0,1$  с;  $\varphi_{\max} = 5^\circ$ ;  $f - v = 10$  мм/с;  $\Delta t = 0,1$  с;  $\varphi_{\max} = 10^\circ$ ;  $g - v = 10$  мм/с;  $\Delta t = 0,1$  с;  $\varphi_{\max} = 15^\circ$ ;  $ж - v = 10$  мм/с;  $\Delta t = 0,1$  с;  $\varphi_{\max} = 35^\circ$

**Fig. 5.** Graphs of change an angle of rotation a wheel robot with the differential drive and logic control system at the next control parameters:  $a - v = 100$  мм/с;  $\Delta t = 0,1$  с;  $\varphi_{\max} = 5^\circ$ ;  $b - v = 100$  мм/с;  $\Delta t = 0,1$  с;  $\varphi_{\max} = 10^\circ$ ;  $c - v = 100$  мм/с;  $\Delta t = 0,1$  с;  $\varphi_{\max} = 15^\circ$ ;  $d - v = 100$  мм/с;  $\Delta t = 0,1$  с;  $\varphi_{\max} = 35^\circ$ ;  $e - v = 10$  мм/с;  $\Delta t = 0,1$  с;  $\varphi_{\max} = 5^\circ$ ;  $f - v = 10$  мм/с;  $\Delta t = 0,1$  с;  $\varphi_{\max} = 10^\circ$ ;  $g - v = 10$  мм/с;  $\Delta t = 0,1$  с;  $\varphi_{\max} = 15^\circ$ ;  $j - v = 10$  мм/с;  $\Delta t = 0,1$  с;  $\varphi_{\max} = 35^\circ$



**Рис. 6.** Графіки зміни виміру роботом кута до цілі при різних параметрах керування:  $a - v = 100 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 5^\circ$ ;  $b - v = 100 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 10^\circ$ ;  $c - v = 100 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 15^\circ$ ;  $d - v = 100 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 35^\circ$ ;  $e - v = 10 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 5^\circ$ ;  $f - v = 10 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 10^\circ$ ;  $g - v = 10 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 15^\circ$ ;  $ж - v = 10 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 35^\circ$

**Fig. 6.** Graphs of change of measurement an angle by a robot to the purpose at next control parameters:  $a - v = 100 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 5^\circ$ ;  $b - v = 100 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 10^\circ$ ;  $c - v = 100 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 15^\circ$ ;  $d - v = 100 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 35^\circ$ ;  $e - v = 10 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 5^\circ$ ;  $f - v = 10 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 10^\circ$ ;  $g - v = 10 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 15^\circ$ ;  $j - v = 10 \text{ мм/с}$ ;  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ ;  $\varphi_{\max} = 35^\circ$

При математичному моделюванні траєкторій руху робота в програмний засіб моделювання вносились похибка, яка в реальному світі також буде присутньою, зокре-

ма, через неточність вимірювань роботом координат цілі. Для цього застосовано функцію з псевдо випадковим генератором чисел, який в даному дослідженні моделював

неточність датчика відстані та програмно записується у вигляді наступної системи рівнянь:

$$x_{u(A)} = x_{u(A)} \cdot \text{Rand}(z), \quad (12)$$

$$y_{u(A)} = y_{u(A)} \cdot \text{Rand}(z), \quad (13)$$

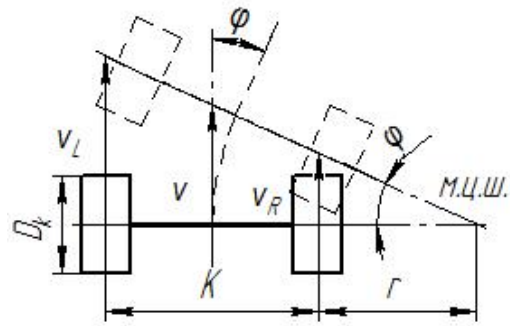
де  $z$  – число величини генератора чисел;  $\text{Rand}()$  – функція генератора випадкового числа.

Отримані результати показують, що при швидкості робота 100 мм/с на кожному кроці при величині одного кроку 0,1 с для досягнення цілі роботу необхідно виконати 65-68 кроків, а при швидкості 10 мм/с кількість кроків збільшується до 644-675. Величина кута ротації робота на одному кроці як і швидкість переміщення також впливає на точність переміщення. Зокрема при малих кутах ротації на початковій стації руху, робот поступово і плавно починає рухатися до точки цілі, здійснюючи при цьому незначне відхилення траєкторії, що пояснюється саме обмеженим кутом його повороту. Проте при під'їзді до цілі в тому випадку, коли напрям руху робота значно не співпадає з напрямом до цілі, робот може проїхати точку цілі. При малих швидкостях руху це явище менше спостерігається, що пояснюється корекцією шляху на попередніх етапах руху. При цьому можуть виникати такі випадки, при яких робот взагалі не може відшукати точку цілі, зокрема, якщо по одній з координат переміщення вже було досягнуто заданого параметра, а по іншій – ні.

Таким чином очевидним і відомим недоліком даної системи керування робота є застосування "ON-OFF" контролера, який не здатний врахувати похибки переміщення на кожному кроці [6, 7].

Виконання повороту двоколісного робота з диференціальним приводом на заданий кут ротації можна здійснити за рахунок обертання коліс з різною швидкістю, при цьому швидкості можуть мати однаковий напрям або різний [8, 9]. Якщо напрям швидкостей коліс двоколісного робота співпадають, тоді буде здійснюватися його

переміщення по криволінійній траєкторії (Рис. 7).



**Рис. 7.** Схема повороту робота за умови співпадіння напрямку векторів швидкостей коліс

**Fig. 7.** The scheme of rotation of the robot under the coincidence of the direction of the vectors of wheel speeds

Кут ротації робота для схеми на Рис. 7 буде визначатися через лінійні швидкості центру коліс:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{v_L - v_R}{K}\right), \quad (14)$$

де  $v_L$  та  $v_R$  – швидкості центру лівого та правого коліс робота;  $K$  – колія або відстань між центрами лівого та правого коліс.

У випадку, коли одна зі швидкостей колеса буде дорівнювати нулю, робот буде обертатися навколо центра контакту даного колеса з опорною поверхнею. Якщо за виразом (12) кут буде зі знаком «-», тоді обертання відбуватиметься в протилежну сторону до зображеного на схемі Рис. 7.

Відстань від центру повороту (миттєвого центру швидкостей) до центру правого колеса згідно Рис. 7:

$$r = \frac{K}{\left(\frac{v_L}{v_R} - 1\right)}. \quad (15)$$

Також кут ротації платформи двоколісного робота може бути визначено через довжину дуги пройденої одним його колесом при повороті, град:

$$\varphi = \frac{180^\circ l_R}{\pi r} \quad (16)$$

або

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{180^\circ v_R \Delta t (\frac{v_L}{v_R} - 1)}{\pi K} = \\ &= \frac{180^\circ \Delta t (v_L - v_R)}{\pi K}, \end{aligned} \quad (17)$$

де  $l_R$  – довжина дуги пройденої колесом (для розглянутої схеми на Рис. 7 правого колеса).

Якщо на колесі робота встановлено датчик, який розраховує кількість його обертів, тоді довжина шляху пройдена колесом буде

$$l_{L(R)} = \pi D_k \frac{\sum N}{N_{en1}}, \quad (18)$$

де  $N_{en1}$  – кількість тактів перемикання датчика (енкодера) за один оберт колеса;  $\sum N$  – загальна кількість перемикачів датчика за заданий проміжок часу або на заданій ділянці переміщення;  $D_k$  – діаметр колеса робота.

Кількість обертів колеса на заданій ділянці переміщення [10]:

$$n = \frac{l_{L(R)}}{\pi D_k}. \quad (19)$$

Частота обертання колеса за період часу  $\Delta t$ :

$$n_k = \frac{n}{\Delta t} = \frac{v_{L(R)}}{\pi D_k}. \quad (20)$$

Кутова швидкість обертання колеса

$$\omega_k = \frac{2v_{L(R)}}{D_k}. \quad (21)$$

При перекочуванні колеса робота по твердій поверхні, динамічне рівняння його руху може бути виражено наступною залежністю:

$$(J_k + \frac{m_{np} D_k^2}{4}) \frac{d\omega_k}{dt} = \sum M, \quad (22)$$

де  $J_k = \frac{m_k D_k^2}{8}$  – момент інерції колеса;

$m_{np}$  – маса робота приведена до центру обертання колеса;  $\sum M$  – сумарний момент рушійних сил та сил опору

$$\sum M = M_{кр} - M_{mp} \mp M_i + M_{нов}, \quad (23)$$

де  $M_{кр}$  – крутний момент на колесі;  $M_{mp}$  – момент опору від тертя колеса по поверхні;  $M_i$  – момент від ухилу поверхні;  $M_{нов}$  – момент опору тертя при повороті робота.

Застосовуючи представлені залежності виконано дослідження динамічних характеристик двоколісного навчального робота AlphaBot-2 на базі мікроконтролера Arduino UNO Plus. На платформі робота встановлені два мотор-редуктори постійного струму з робочою напругою 6 вольт, діаметр коліс складає 44 мм, відстань між центрами коліс – 90 мм, передавальне відношення редуктора – 30:1, номінальний момент на валу одного двигуна 7,3 Н·см (при струмі 1,5А). Управління рухом робота здійснюється за допомогою спеціальної програми, завантаженої на контролер. Зміна швидкостей обертання коліс виконується за допомогою широтно-імпульсної модуляції (PWM) обертання двигунів.

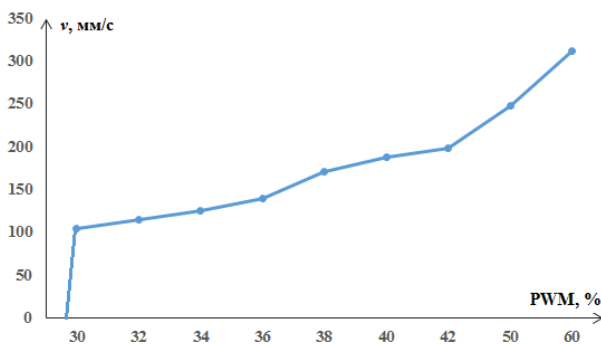
На першому етапі дослідження виконано заміри часу проходження лінійних ділянок траси довжиною 140 мм та 280 мм при різних режимах PWM керування. Результати досліджень представлено в Табл. 8, а на Рис. 8 показано графік зміни швидкості робота, розрахованої за результатами з представленої таблиці.

**Таблиця.** Час проходження роботом ділянок прямолінійної траси в залежності від величини PWM, с

**Table.** The time the robot travels sections of a straight line depending on the value of PWM, s

| №<br>п.п. | Довжина ділянки 140 мм |      |      |      | Довжина ділянки 280 мм |      |      |      |      |
|-----------|------------------------|------|------|------|------------------------|------|------|------|------|
|           | PWM                    |      |      |      |                        |      |      |      |      |
|           | 30                     | 32   | 34   | 36   | 38                     | 40   | 42   | 50   | 60   |
| 1         | 1,38                   | 1,13 | 1,09 | 0,96 | 1,57                   | 1,56 | 1,41 | 1,17 | 0,93 |
| 2         | 1,3                    | 1,16 | 1,18 | 0,96 | 1,62                   | 1,42 | 1,42 | 1,2  | 0,9  |
| 3         | 1,38                   | 1,28 | 1,17 | 1,03 | 1,52                   | 1,56 | 1,41 | 1,16 | 0,91 |
| 4         | 1,43                   | 1,28 | 1,12 | 1,06 | 1,71                   | 1,47 | 1,36 | 0,95 | 0,87 |
| 5         | 1,24                   | 1,23 | 1,06 | 1    | 1,7                    | 1,45 | 1,4  | 1,16 | 0,85 |
| 6         | 1,3                    | 1,23 | 1,09 | 0,99 | 1,82                   | 1,49 | 1,43 | 1,12 | 0,9  |
| 7         | 1,35                   | 1,2  | 1,14 | 1    | 1,51                   | 1,51 | 1,46 | 1,14 | 0,92 |

Як видно з представленого графіка, рух розглядуваного робота починається при сигналі PWM 30%, що пояснюється недостатньою потужністю на колесі при менших значеннях PWM сигналу керування.



**Рис. 8.** Графік зміни швидкості колісного робота AlphaBot-2 при прямолінійному переміщенні по гранітній поверхні

**Fig. 8.** Graph of changes in the speed of the wheel robot AlphaBot-2 in a straight line on a granite surface

Виразимо крутний момент на колесі через момент на двигуні:

$$M_{кр} = M_{дв} i \eta_{заг}, \quad (24)$$

де  $\eta_{заг} = 0,9$  – загальний коефіцієнт корисної дії приводу робота;  $i$  – загальне передавальне число редуктора приводу колеса,  $M_{дв}$  – крутний момент на валу двигуна.

Момент опору тертя колеса по поверхні

$$M_{тр} = m_p g f \frac{D_k}{2}, \quad (25)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя колеса по поверхні;  $m_p$  – маса робота.

Враховуючи залежності (24), (25) та (22) визначено характер зміни привідного моменту на двигуні для двокісного робота з диференціальним приводом при його русі прямолінійно по горизонтальній поверхні без ухилу:

$$M_{дв} = \left( (m_k + m_{np}) \frac{\Delta v_{L(R)}}{\Delta t} + m_p g f \right) \frac{D_k}{2 i \eta_{заг}}, \quad (26)$$

де  $\Delta v_{L(R)}$  – зміна швидкості на кожному кроці переміщення.

## ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень були отримані залежності для аналізу силових факторів на привідному двигуні двокісного робота з диференціальним приводом, а також практично досліджено залежність зміни швидкості переміщення робота для різних сигналів керування двигуном. Широтно-імпульсне керування (PWM) електричним двигуном є найбільш розповсюдженим в робототехніці, проте чіткі залежності про те як змінюється потужність приводу від режиму роботи генератора імпуль-

сів відсутні. В даній роботі здійснено спробу встановити співвідношення між режимом сигналу PWM і поведінкою колісного робота при його переміщенні. Це у подальшому дасть можливість удосконалити існуючі системи керування роботів, зокрема і на базі нейронних мереж [12].

## ЛІТЕРАТУРА

1. **Кучерский Р. В.** Алгоритмы локальной навигации и картографии для бортовой системы управления автономного мобильного робота / Р. В. Кучерский, С. В. Манько // Известия ЮФУ. Технические науки, – 2012. – №3. <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritmy-lokalnoy-navigatsii-i-kartografii-dlya-bortovoy-sistemy-upravleniya-avtonomnogo-mobilnogo-robota>.
2. **Oriolo Giu.** Wheeled Robots Encyclopedia of Systems and Control / O. Giu // Springer-Verlag. – London, – 2014. – P. 1-19. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5102-9\\_178-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5102-9_178-1).
3. **Umili E.** Communication-based and communication-less approaches for robust cooperative planning in construction with a team of UAVs / E. Umili, M. Tognon, D. Sanalidro, G. Oriolo, A. Franchi // 2020 Int. Conf. on Unmanned Aircraft Systems, Athens, Greece, – pp. 279-288. <https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9214044>.
4. **Scianca N.** A behavior-based framework for safe deployment of humanoid robots / N. Scianca, P. Ferrari, D. De Simone, L. Lanari, G. Oriolo // Autonomous Robots, – Vol. 45, – No. 4, – 2021. – pp. 435-456. <https://doi.org/10.1007/s10514-021-09978-5>.
5. **Pesterev A.** Stabilization problem for a wheeled robot following a curvilinear path on uneven terrain / A. Pesterev, Lev. Rapoport // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2010. No. 49. – pp. 672-680. <https://doi.org/10.1134/S1064230710040155>.
6. **Siciliano B.** Robotics: modelling, planning and control / B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo // Springer, – 2009. – London. – 632 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-642-1>.
7. **Iwasaki T.** (Generalized) KYP lemma and applications. In: Baillieul J., Samad T. (eds) // Encyclopedia of Systems and Control. Springer, London. – 2013. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5102-9\\_160-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5102-9_160-1).
8. **Aguilar C.** Numerical solutions to the dynamic programming equations of optimal control. In: Proceedings of the 2012 / C. Aguilar, A. J. Krener // American control conference. – 2012.
9. **Vachálek J., Tóth F., Krasňanský P., Čapucha Ľ.** Design and Construction of a Robotic Vehicle with Omni-directional Mecanum Wheels / J. Vachálek, F. Tóth, P. Krasňanský, Ľ. Čapucha // Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava, Mechanical Series. – No 60. – 2014. – pp. 97-104. <https://doi.org/10.22223/tr.2014-1/1983>.
10. **Casini M., Garulli A., Giannitrapani A., Vicino A.** A Remote Lab for Experiments with a Team of Mobile Robots // Sensors. – 2014, Vol. 14. – pp. 16486–16507. <https://doi.org/10.3390/s140916486>.
11. **Karalekas G., Vologiannidis S., & Kalomiros J.** EUROPA: A Case Study for Teaching Sensors, Data Acquisition and Robotics via a ROS-Based Educational Robot / G. Karalekas, S. Vologiannidis, J. Kalomiros // Sensors, – Vol. 20(9), – 2020. – 2469 p. <https://doi.org/doi:10.3390/s20092469>.
12. **Мищук Д., Бойченко А.** Розробка концепції системи керування роботом для штучатурних робіт на основі нейронної мережі / Д. Мищук, А. Бойченко // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. 2019. – №93. – С. 46-60. <https://doi.org/10.32347/gbdmm2019.93.0501>.

## REFERENCES

1. **Kucherskij R. V., Manko S. V.** (2012). Algoritmy lokalnoj navigacii i kartografii dlya bortovoj sistemy upravleniya avtonomnogo mobilnogo robota [Local navigation and mapping algorithms for the on-board control system of an autonomous mobile robot]. Izvestia SFedU. Technical science, No 3. <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritmy-lokalnoy-navigatsii-i-kartografii-dlya-bortovoy-sistemy-upravleniya-avtonomnogo-mobilnogo-robota>.
2. **Oriolo Giu.** (2014). Wheeled Robots Encyclopedia of Systems and Control Springer-Verlag London. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5102-9\\_178-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5102-9_178-1).
3. **Umili E., Tognon M., Sanalidro D., Oriolo G., Franchi A.** (2020). Communication-based and communication-less approaches for robust cooperative planning in construction with a team of UAVs, 2020 Int. Conf. on Unmanned Aircraft Systems, Athens, Greece, 279-288,

- <https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9214044>.
4. Scianca N., Ferrari P., De Simone D., Lanari L., Oriolo G. (2021). A behavior-based framework for safe deployment of humanoid robots, *Autonomous Robots*, Vol. 45, No. 4, 435-456, <https://doi.org/10.1007/s10514-021-09978-5>.
  5. Pesterev A., Rapoport Lev. (2010). Stabilization problem for a wheeled robot following a curvilinear path on uneven terrain. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 49. 672-680. <https://doi.org/10.1134/S1064230710040155>.
  6. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. (2009). *Robotics: modelling, planning and control*. Springer, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-642-1>
  7. Iwasaki T. (2013). (Generalized) KYP lemma and applications. In: Baillieul J., Samad T. (eds) *Encyclopedia of Systems and Control*. Springer, London. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5102-9\\_160-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5102-9_160-1).
  8. Aguilar C., Krener A. J. (2012). Numerical solutions to the dynamic programming equations of optimal control. In: *Proceedings of the 2012 American control conference*.
  9. Vachálek, Ján & Tóth, Filip & Krasňanský, Pavol & Čapucha, Ľubomír. (2014). Design and Construction of a Robotic Vehicle with Omni-directional Mecanum Wheels. *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava, Mechanical Series*. 60. 97-104. <https://doi.org/10.22223/tr.2014-1/1983>.
  10. Casini M., Garulli A., Giannitrapani A., Vicino A. (2014). A Remote Lab for Experiments with a Team of Mobile Robots. *Sensors*, Vol. 14, 16486–16507. <https://doi.org/10.3390/s140916486>.
  11. Karalekas, G., Vologiannidis, S., & Kalomiros, J. (2020). EUROPA: A Case Study for Teaching Sensors, Data Acquisition and Robotics via a ROS-Based Educational Robot. *Sensors*, 20(9), 2469. <https://doi.org/10.3390/s20092469>.
  12. Mischuk, D., Bojchenko A. (2019). Rozrobka koncepciyi sistemi keruvannya robotom dlya shtukaturnih robit na osnovi nejronnoyi merezhi [Development of the concept of control system work for plaster works based on neural network]. *Girnichy, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini* [Mining, Constructional, Road and Melioration Machines], No. 93, 46-60. – (in

Ukrainian). <https://doi.org/10.32347/gbdmm2019.93.0501>.

### Analysis of the control system of the clear logic of the wheel drive with a differential drive

Dmytro Mishchuk<sup>1</sup>, Yuvgen Mishchuk<sup>2</sup>,  
Oleksandr Kalashnikov<sup>3</sup>

*Kyiv National University of  
Construction and Architecture*

**Abstract.** The ability of a mobile robot to move in the environment is an important task in robotics, so the development of advanced control systems for robots is a hot topic of research. Clear logic control systems for robotic-wheeled machines are one of the most common. Such systems are simple in design, but still have the lowest cost compared to others. One of the disadvantages of such control systems is their limited accuracy. This is usually due to imperfect control programs on which similar systems work and the imperfection of the mechanical system of drive converters, in particular for wheeled robots with differential drive, there may be cases where the robot with clear logic control can endlessly search for targets and move to a given point in space, even in the absence of obstacles in its path.

This study proposes an analysis of the movements of a two-wheeled robot according to the developed algorithm of clear logic. A mathematical model of step-by-step movement of a wheeled robot was developed, which calculates the coordinates of the center of the mobile system. The decision-making system in the developed model is built on a relay ("ON-OFF") controller.

In this study work, the authors also proposed a method for determining the moment on the rotor of the drive motor of the robot wheel, depending on the speed of the robot on a straight surface. In addition, the dependences of the change in the speed of a wheeled robot with a differential drive depending on the change in the PWM frequency in the range from 30 to 60% have been studied and presented.

Graphs were presented that show how the switching frequency of the robot controller changes when it moves to the desired goal of movement in a straight line without obstacles.

**Keywords:** wheel robot, clear logic, differential drive, control system.