

УДК 62-932:62.532

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.1.26

КЕРУВАННЯ РУХОМ ФРОНТАЛЬНОГО НАВАНТАЖУВАЧА ЗА ЗАДАНОЮ ТРАЄКТОРІЄЮ

Гурко О. Г., Гурко В. О., Кучеренко А. Ю.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті запропоновано систему керування рухом за заданою траєкторією автономного малогабаритного навантажувача з жорсткою рамою. Система керування складається з двох контурів: розімкнутого та замкнутого. Керувальний вплив розімкнутого контуру системи керування ґрунтується на використанні бажаних швидкостей та прискорень навантажувача. Іншим контуром здійснена лінеаризація кінематичної моделі навантажувача зворотним зв'язком.

Ключові слова: фронтальний навантажувач, стеження за траєкторією, система керування, регулятор стану.

Вступ

Малогабаритні фронтальні навантажувачі (ФН) є машинами, що користуються найбільшим попитом, їх використовують під час навантажувально-розвантажувальних та земляних робіт, транспортування матеріалів, штабелюванні, тощо. Розповсюдженість ФН обумовлена їхньою універсальністю, маневреністю, здатністю розвивати великі питомі зусилля, невеликою масою та вартістю, як порівняти з екскаваторами [1]. Однак під час експлуатації ФН стикаються з частими поломками через великі динамічні навантаження, інтенсивним спрацьовуванням шин, великими витратами палива в процесі робочого циклу, що зумовлено невірними діями оператора. З огляду на трудомісткість керування операціями робочого циклу (оператор під час керування машиною здійснює до 1200 рухів за годину) оператор незалежно від його кваліфікації не може забезпечувати оптимальні режими роботи ФН із прийнятною швидкістю протягом тривалого періоду часу [2, 3, 4]. Крім того, оператор ФН зазвичай працює в складних умовах довкілля (пил, шум, вібрація), з високим ризиком травматизму (наприклад, внаслідок втрати стійкості навантажувача [5]). Керування ФН оператором також обмежує використання цих машин у місцях, небезпечних для перебування людини, наприклад під час ліквідації техногенних катастроф. Рішенням наведених проблем є автоматизація навантажувача та усунення оператора з процесу керування машиною.

Аналіз публікацій

Аналіз сучасних досліджень [3–20] дозволив визначити етапи на шляху до повної автоматизації ФН, що наведені на рис. 1. Процес

автоматизації окремих робочих операцій ФН можна поділити на два типи, одним з яких є автоматичне заповнення ковша.

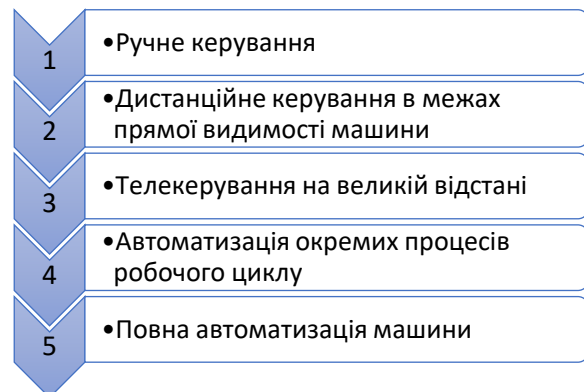


Рис. 1. Етапи автоматизації ФН [21]

Автоматизацію окремих робочих операцій ФН можна поділити на два типи: автоматичне заповнення ковша [7, 14] та автоматичний рух машини до місця розвантаження (транспортування матеріалів) і рух до забою [2, 15–20]. Завдання автоматичного руху машини складається з двох окремих підзавдань: планування траєкторії руху навантажувача; забезпечення його руху за запланованою траєкторією з огляду на потрібну швидкість та забезпечення потрібної орієнтації ФН. Зокрема під час наближення ФН до штабеля матеріалу він має бути орієнтований до штабеля, щоб оптимізувати ефективність зачерпування та уникати небажаних бічних навантажень на гідропривід ковша. Траєкторія ФН під час процесу транспортування матеріалу до місця розвантаження впливає на продуктивність та витрати палива.

Так, на рис. 2 зазначено, що майже однакові за пройденим шляхом траєкторії ФН значно відрізняються за продуктивністю [2].

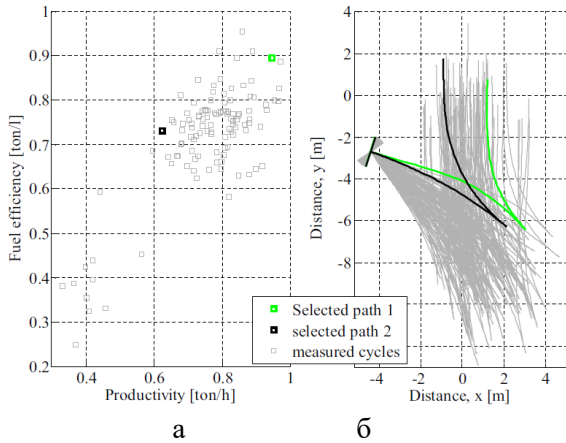


Рис. 2. Вплив траєкторій (б) ФН на продуктивність (а) [2]

Отже, питання планування траєкторій автономного ФН є темою багатьох досліджень [16–19]. Водночас кількість робіт, де аналізується рух навантажувача запланованою траєкторією, є значно меншою. У статті наведено розроблення системи керування, що забезпечує рух автономного ФН заданою траєкторією.

Мета та постановка завдання

Метою цієї роботи є підвищення продуктивності та енергетичної ефективності ФН через забезпечення його руху заданою траєкторією. Об'єктом дослідження є процес керування малогабаритним пневмоколісним навантажувачем з жорсткою рамою та бортовим поворотом.

Для досягнення мети необхідно побудувати модель руху ФН, синтезувати закон керування та способом моделювання перевірити його ефективність.

Кінематична модель навантажувача

Для керування рухом ФН розглянемо його кінематичну модель. Відомо, що ФН рухається рівною поверхнею. Приєднаємо до центру мас (ЦМ) машини локальну систему координат $L\{x_l, y_l, z_l\}$, вісь x_l якої спрямована вперед, вісь y_l спрямована вліво, а вісь z_l – вгору. Положення та орієнтація ФН на площині в глобальній системі координат $G\{X_g, Y_g\}$ визначається вектором $q = [x \ y \ \theta]^T$ (рис. 3).

Нехай навантажувач рухається з лінійною швидкістю, вираженою в локальній системі координат L вектором $v = [v_x \ v_y \ 0]^T$, і повертається з кутовою швидкістю $\omega = [0 \ 0 \ \omega]^T$, де $\omega = \dot{\theta}$. Перетворення між

швидкостями, вираженими у локальній системі координат L , та узагальненими швидкостями можна записати так:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix}. \quad (1)$$

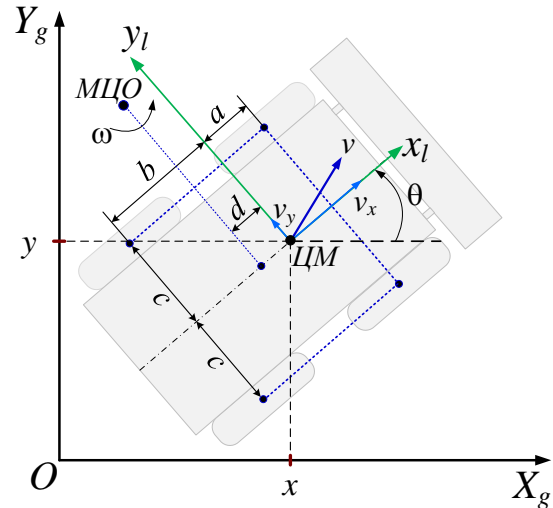


Рис. 3. Вид зверху плоскої моделі ФН

Нехай a і b – відстані між центрами передніх і задніх коліс до ЦМ, а c – відстань між лівими і правими колесами і поздовжньою віссю навантажувача (рис. 3).

Поворот ФН здійснюється навколо миттєвого центру обертання (МЦО), координата $d \in (0, b)$ якого за віссю x може змінюватися, а її визначення є окремою задачею. Більшість підходів щодо вирішення цієї проблеми під час автоматичного керування транспортними засобами з бортовим поворотом ґрунтується на застосуванні поправочних коефіцієнтів, які визначаються експериментальним способом [22, 23, 24]. Водночас у [25] зазначено, що за незмінної опорної поверхні різкі зміни значення d відповідають ситуаціям ковзання.

Якщо значення d відоме, то рівняння (1) можна переписати так:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -d \sin \theta \\ \sin \theta & d \cos \theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \boldsymbol{\eta}, \quad (2)$$

де $\boldsymbol{\eta} = [v_x \ \omega]^T$ – вектор керування.

Зв'язок між керувальними змінними v_x і ω за відсутності проковзування коліс такий:

$$v_x = r \frac{\omega_L + \omega_R}{2}, \quad (3)$$

$$\omega = r \frac{\omega_L - \omega_R}{2c}, \quad (4)$$

де r – радіус коліс;

ω_L та ω_R – кутові швидкості лівих та правих коліс.

Як було зазначено вище, проекція d МЦО на вісь x_l не може бути більшою за b , оскільки за інших умов ФН втратить стійкість внаслідок заносу вздовж осі y_l . Тому необхідно застосувати неголономне обмеження для запобігання боковому заносу [22]

$$v_y - d\omega = 0, \quad (5)$$

або в термінах узагальнених координат

$$\begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & -d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = 0. \quad (6)$$

Синтез системи керування

Структура системи керування. Планування траєкторії ФН є складним окремим завданням, що не розглядається цій роботі. Тому вважатимемо, що траєкторія ФН вже задана як функція часу в глобальній системі координат: $q_d(t) = [x_d(t), y_d(t), \theta_d(t)]^T$, де нижній індекс « d » визначене як бажане значення.

Складність забезпечення стеження за траєкторією $q_d(t)$ полягає в наявності неголономних обмежень (5). Асимптотична стійкість відповідної системи керування може бути отримана в процесі використання складних нелінійних законів керування. Однією з можливостей уникнути таких обмежень є використання комбінованої структури системи керування з двома ступенями свободи, де один ступінь – розімкнуте керування, а інший – керування зі зворотним зв'язком.

Синтез розімкнутого контуру системи керування. Завдання регулятора зі зворотним зв'язком полягає в мінімізації помилки $e(t)$ стеження за $q_d(t)$ на кінцевому часовому інтервалі $t = [0, T]$:

$$e(t) = q_d(t) - q(t) = \begin{bmatrix} x_d(t) - x(t) \\ y_d(t) - y(t) \\ \theta_d(t) - \theta(t) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Метою регулятора є забезпечення певних значень компонентів вектора $\eta = [v_x \ \omega]^T$, які за випадкових початкових умов робить похибку стеження $e(t)$ такою, щоб

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| \rightarrow 0. \quad (8)$$

З рис. 3 можна отримати такий вираз для швидкості $v_x(t)$:

$$v_x(t) = \sqrt{\dot{x}_d^2(t) - \dot{y}_d^2(t)}, \quad (9)$$

де $\dot{x}_d(t)$ та $\dot{y}_d(t)$ – бажані узагальнені швидкості поступального руху.

Кут орієнтації ФН $\theta(t)$ залежить від співвідношення цих узагальнених швидкостей:

$$\theta(t) = \arctg \left(\frac{\dot{y}_d(t)}{\dot{x}_d(t)} \right). \quad (10)$$

Кутову швидкість можна знайти, продиференціювавши за часом $\theta(t)$:

$$\omega(t) = \frac{\dot{x}_d(t)\ddot{y}_d(t) - \dot{y}_d(t)\ddot{x}_d(t)}{\dot{x}_d^2(t) + \dot{y}_d^2(t)}, \quad (11)$$

функція (11) не визначена лише у випадку, коли швидкість $v_x = 0$.

Рівняння (9), (11) визначають швидкості, з якими необхідно переміщатися ФН для руху за визначеною траєкторією, що задана $x_d(t)$ і $y_d(t)$. Тому ці рівняння можуть бути використані в розімкнутому контурі керування. Цей контур забезпечує рух ФН за заданою траєкторією в ідеальному випадку, коли кінематична модель точно описує рух ФН і відсутні збурення, помилки вимірювання початкової та поточної просторово-часової орієнтації. Ці припущення ніколи повністю не виконуються [26], тому необхідно застосувати в системі керування контур зі зворотним зв'язком.

Синтез замкнутого контуру системи керування. Рівняння (2) руху ФН є нелінійними, що істотно обмежує застосування відносно простих законів керування. Тому приведемо систему керування до лінійної. З цією метою відповідно до підходу, запропонованого в [27], застосуємо новий вектор помилки $e(t) = [e_l(t) \ e_\theta(t)]^T$, де $e_l(t)$ – помилка за положенням (рис. 4), яка є відстанню між ЦМ ФН і дотичною до бажаної траєкторії в точці

$(x_d(t), y_d(t))$, а $e_\theta(t)$ – кут між поточним напрямком руху ФН і дотичним до траєкторії. Значення $e_l(t)$ можна знайти за допомогою бортової навігаційної системи [27].

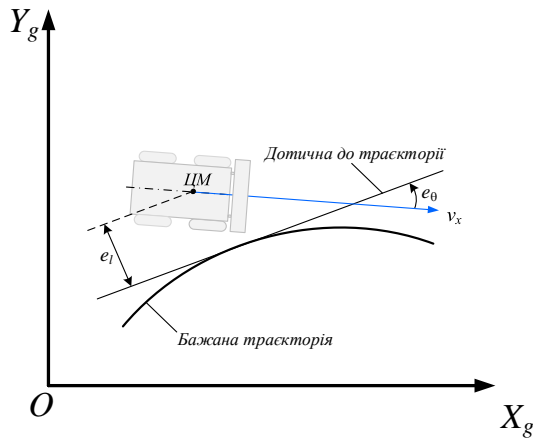


Рис. 4. Визначення помилок відстеження траєкторії

Продиференціювавши $e_l(t)$ і $e_\theta(t)$, отримуємо:

$$\dot{e}_l = v_x \sin e_\theta, \quad (12)$$

$$\dot{e}_\theta = \omega. \quad (13)$$

Тепер застосуємо координати стану $z_1 = e_l$ та $z_2 = v_x \sin e_\theta$. У цьому випадку динаміка системи описується рівнянням другого порядку:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

або в компактній формі:

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{B}\mathbf{u}. \quad (15)$$

де \mathbf{u} – новий керувальний вплив, що підлягає визначенню.

Система (14) є керованою, оскільки ранг матриці керованості $\mathbf{H} = [\mathbf{B} \ \mathbf{AB}]$:

$$\text{rank}(\mathbf{H}) = 2 \neq 0.$$

Таким чином, як регулятор основного контуру системи керування ми можемо використовувати регулятор стану:

$$\dot{\mathbf{z}} = (\mathbf{A} - \mathbf{BK})\mathbf{z}, \quad (16)$$

де $\mathbf{K} = [K_1 \ K_2]$ – вектор коефіцієнтів підсилення регулятора. Вибором значень компо-

нентів вектора \mathbf{K} можна досягти необхідного розташування полюсів замкненої системи в лівій півплощині комплексної s площини, що відповідатиме бажаній якості системи керування.

Згідно з (14) керувальний вплив є скаляром:

$$u = \omega v_x \cos e_\theta, \quad (17)$$

що також дозволяє визначити кутову швидкість:

$$\omega = \frac{u}{v_x \cos e_\theta}, \quad v_x \neq 0, \quad e_\theta \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right). \quad (18)$$

Схематичне зображення всієї системи керування наведено на рис. 5.

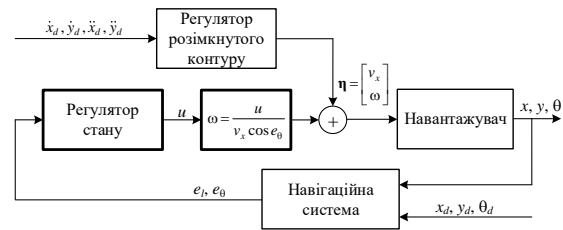


Рис. 5. Структура системи керування рухом навантажувача

Результати моделювання

Для перевірки ефективності синтезованої системи керування здійснено моделювання руху ФН у пакеті MATLAB. Система керування повинна була забезпечити рух з заданою швидкістю $v_{xd} = 10$ м/с за траєкторією у вигляді кола, радіусом $r = 15$ м, що задане такими рівняннями:

$$x = r \cos \frac{v_{xd}}{r} t, \quad (19)$$

$$y = r \sin \frac{v_{xd}}{r} t, \quad (20)$$

$$\theta_d = \frac{\pi}{2} + \frac{v_{xd}}{r} t \quad (21)$$

За початкових умов, що $x(0) = 15$ м, $y(0) = 0$ м, $\theta(0) = 9\pi$ рад.

Задана траєкторія наведена для прикладу, і синтез траєкторій для ФН є окремою задачею, що не розглядається в цій роботі.

Під час моделювання вважалося, що початкові умови відрізнялися від розрахункових внаслідок помилки визначення положення та орієнтації ФН та мали такі значення (рис.6): $x(0) = 16$ м, $y(0) = 2$ м, $\theta(0) = 0,9\pi$ рад. Для визначення матриці K коефіцієнтів регулятора стану використано функцію MATLAB `acker()`. Під час моделювання також вважалося, що шум датчиків, які визначають положення та орієнтацію ФН, дорівнює 0,1 %.

Результати моделювання наведені на рис. 6 – 10.

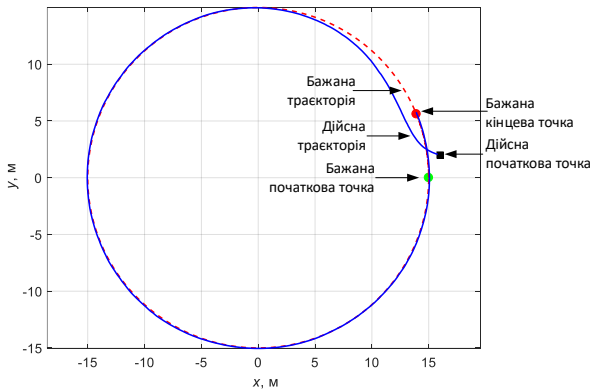


Рис. 6. Бажана та дійсна траєкторії

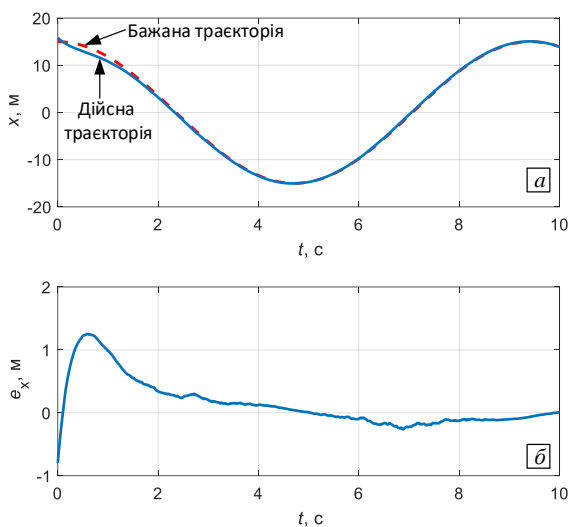


Рис. 7. Бажана та дійсна траєкторії за координатою x (а) та помилка стеження (б)

Результати моделювання демонструють високу якість стеження ФН за заданою траєкторією: незважаючи на відмінність між розрахунковими та дійсними початковими умовами, ФН приблизно протягом 3 с достатньо близько наближається до бажаної траєкторії, отже, подальша помилка стеження не перевищує 0,3 м як за віссю x , так і за віссю y глобальній системі координат G .

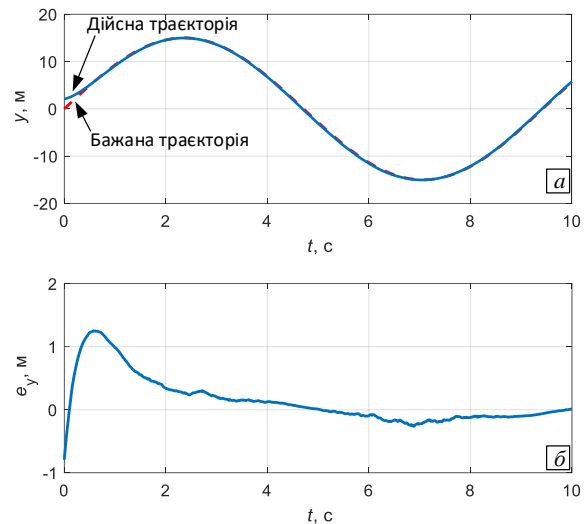


Рис. 8. Бажана та дійсна траєкторії за координатою y (а) та помилка стеження (б)

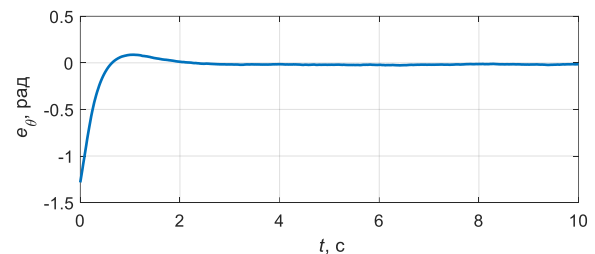


Рис. 9. Помилка орієнтації ФН

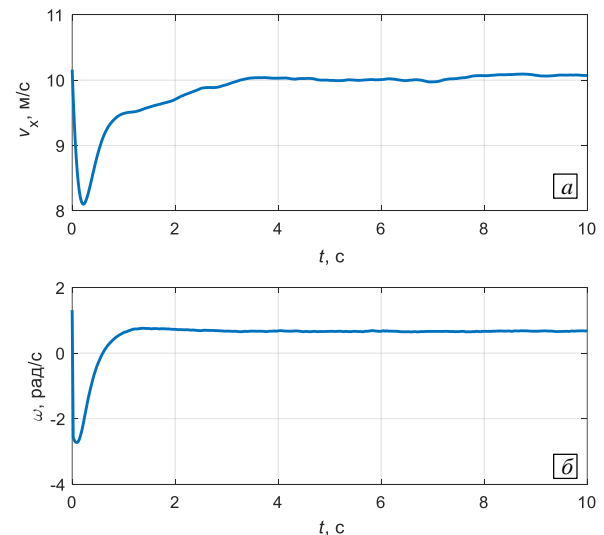


Рис. 10. Керувальні впливи: лінійна швидкість $v_x(t)$ (а) та кутова швидкість $\omega(t)$ (б)

Варто зазначити, що під час моделювання враховувалася лише кінематична модель навантажувача, тому на практиці помилка відстеження траєкторії буде більшою.

Висновки

Підвищення ефективності та безпеки експлуатації фронтальних навантажувачів залежить від їх автоматизації та роботизації. Одним із завдань автоматизованого ФН є рух до забою та від забою до місця розвантаження за заданою траєкторією.

У нашій роботі синтезовано двоконтурну систему керування, що забезпечує рух малогабаритного навантажувача з жорсткою рамою та бортовим поворотом за заданою траєкторією з точністю до 0,3 м. Для визначення керувального впливу розімкнутого контуру системи керування використовується співвідношення, що використовують параметри бажаної траєкторії. Регулятором замкнутого контуру є регулятор стану. Як координати стану використано відстань ФН від бажаної траєкторії у цей момент часу та курсовий кут навантажувача.

Варто зазначити таке: 1) під час синтезу регулятора стану всі координати стану вимірюються, водночас на практиці їх можна отримати лише опосередкованим способом на підставі вимірювань поточних положення та орієнтації ФН, що призведе до додаткової помилки; 2) результати моделювання ґрунтуються лише на кінематичній моделі навантажувача, що з огляду на його динаміку може призвести до значно більших помилок стеження за траєкторією; 3) розглянута кінематична модель ФН не враховує ефект проковзування коліс.

Подальша робота авторів буде враховувати зазначені аспекти.

Література

1. Разарьонов Л., Розенфельд М., Вороновський Д. Аналіз технічного розвитку малогабаритних навантажувачів із бортовою системою повороту. Вісник ХНАДУ. 2021. № 95. С. 102–106. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.95.0.102>.
2. Nezhadali V., Frank B., Eriksson L. Wheel loader operation – Optimal control compared to real drive experience. Control engineering practice. 2016. Vol. 48. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.12.015>.
3. Frank B., Skogh L., Alaküla M. On wheel loader fuel efficiency difference due to operator behaviour distribution. The second international commercial vehicle technology symposium: Proceedings. 2012. URL: https://www.iea.lth.se/publications/Papers/Frank_2012.pdf.
4. Filla R. An event-driven operator model for dynamic simulation of construction machinery. The ninth scandinavian international conference on fluid power: Proceedings, Linköping. 2005. URL: <http://www.arxiv.org/abs/cs.CE/0506033>.
5. Разарьонов Л. Оцінка квазістатичної стійкості малогабаритного навантажувача типу ПМТС-1200. Вісник ХНАДУ. 2014. № 65–66. С. 107–112.
6. Larsson J., Broxvall M., Saffiotti A. An evaluation of local autonomy applied to teleoperated vehicles in underground mines. 2010 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA 2010). Anchorage. AK. 3–7 May 2010. 2010. URL: <https://doi.org/10.1109/robot.2010.5509276>.
7. Filla R., Obermayr M., Frank B. A study to compare trajectory generation algorithms for automatic bucket filling in wheel loaders. 3rd commercial vehicle technology symposium: Proceedings. 2014. P. 588–605.
8. Dadhich S., Bodin U., Andersson U. Key challenges in automation of earth-moving machines. Automation in construction. 2016. Vol. 68. P. 212–222. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.009>.
9. From Tele-Remote Operation to Semi-Automated Wheel-Loader / S. Dadhich et al. International journal of electrical and electronic engineering & telecommunications. 2018. P. 178–182. URL: <https://doi.org/10.18178/ijeetc.7.4.178-182>.
10. Halbach E. Autonomous area clearing with a robotic wheel loader. 15th symposium on advanced space technologies in robotics and automation: Proceedings, Noordwijk. 2019.
11. Continuous control of an underground loader using deep reinforcement learning / Backman S. et al. Machines. 2021. Vol. 9. No. 10. P. 216. URL: <https://doi.org/10.3390/machines9100216>.
12. Frank B., Skogh L., Filla R. On increasing fuel efficiency by operator assistant systems in a wheel loader. International conference on advanced vehicle technologies and integration: Proceedings, Changchun. 2012. P. 155–161.
13. Deep learning-based prediction of throttle value and state for wheel loaders / Huang J. et al. Energies. 2021. Vol. 14. 7202.
14. Azulay O., Shapiro A. Wheel loader scooping controller using deep reinforcement learning. IEEE access. 2021. Vol. 9. P. 24145–24154. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3056625>.
15. Planning the trajectory of an autonomous wheel loader and tracking its trajectory via adaptive model predictive control / J. Shi et al. Robotics and autonomous systems. 2020. Vol. 131. P. 103570. URL: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103570>.
16. Path planning of wheel loader type robot for scooping and loading operation by genetic algorithm / Takei T. et al. 13th international conference on control, automaton and systems (ICCAS), Gwangju, Korea (South), 20–23 October 2013. URL: <https://doi.org/10.1109/iccas.2013.6704123>.

17. Nezhadali V., Eriksson L. Optimal lifting and path profiles for a wheel loader considering engine and turbo limitations, у Optimization and Optimal Control in Automotive Systems. Cham: Springer International Publishing, 2014. С. 301–324. [Онлайн]. Доступно: https://doi.org/10.1007/978-3-319-05371-4_18.
18. Sarata S., Weeramhaeng Y., Tsubouchi T. Approach path generation to scooping position for wheel loader", у 2005 IEEE Int. Conf. Robot. Automat., Barcelona, Spain. IEEE. Дата звернення: 30 берез. 2023. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.1109/robot.2005.1570376>.
19. Alshaer B. J., Darabseh T. T., Alhanouti M. A. Path planning, modeling and simulation of an autonomous articulated heavy construction machine performing a loading cycle. Applied mathematical modelling. 2013. Vol. 37. No. 7. P. 5315–5325. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.10.042>.
20. Autonomous wheel loader trajectory tracking control using LPV-MPC / R. Song et al. 2022 american control conference (ACC): Proceedings, Atlanta. 2022. P. 2063–2069.
21. Гурко О., Ляшов Р. Планування рухів автономного фронтального навантажувача. Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., м. Харків, 2021. С. 64–67.
22. Caracciolo L., de Luca A., Iannitti S. Trajectory tracking control of a four-wheel differentially driven mobile robot. International conference on robotics and automation, Detroit, MI, USA. URL: <https://doi.org/10.1109/robot.1999.773994>.
23. Kozłowski K., Pazderski D. Modeling and control of a 4-wheel skid-steering mobile robot. International journal of applied mathematics and computer science. 2004. Vol. 14. No. 4. P. 477–496.
24. Wu X., Xu M., Wang L. Differential speed steering control for four-wheel independent driving electric vehicle. 2013 IEEE 22nd international symposium on industrial electronics (ISIE), Taipei, Taiwan, 28–31 May 2013. URL: <https://doi.org/10.1109/isie.2013.6563667>.
25. Modeling and motion stability analysis of skid-steered mobile robots / Hongpeng Wang et al. 2009 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA), Kobe, 12–17 May 2009. URL: <https://doi.org/10.1109/robot.2009.5152342>.
26. Nikonov O., Kyrychenko I., Shuliakov V. Simulation modeling of external perturbations affecting wheeled vehicles of special purpose. The third international workshop on computer modeling and intelligent systems (CMIS-2020): Proceedings, Zaporizhzhia, 2020. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2608/paper42.pdf>.
27. Marshall J., Barfoot T., Larsson J. Autonomous underground tramming for center-articulated vehicles. Journal of field robotics. 2008. Vol. 25. No. 6–7. P. 400–421. URL: <https://doi.org/10.1002/rob.20242>.

References

- Razarenov L., Rozenfel'd N., Voronovskyy D. Analysis of technical development of small-sized loaders with on-board swing system. *Bull. Kharkov Nat. Automobile Highway Univ.* No. 95. P. 102–106. 2021. doi: <https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2021.95.0.102>. (in Ukrainian).
- Nezhadali V., Frank B., Eriksson L. Wheel loader operation – Optimal control compared to real drive experience. *Control engineering practice.* 2016. Vol. 48. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.12.015>.
- Frank B., Skogh L., Alaküla M. On wheel loader fuel efficiency difference due to operator behaviour distribution. The second international commercial vehicle technology symposium: Proceedings. 2012. URL: https://www.iea.lth.se/publications/Papers/Frank_2012.pdf.
- Filla R. An event-driven operator model for dynamic simulation of construction machinery. *Ninth Scand. Int. Conf. Fluid Power*, Linköping, Sweden. 2005. Available at: <http://www.arxiv.org/abs/cs.CE/0506033/>
- Razarenov L. Assessment of the quasi-static stability of PMTS-1200 skid-steer loaders. *Bull. Kharkov Nat. Automobile Highway Univ.* No. 65–66. Pp. 107–112, 2014 (in Ukrainian).
- Larsson J., Broxvall M., Saffiotti A. An evaluation of local autonomy applied to teleoperated vehicles in underground mines. 2010 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA 2010). Anchorage. AK. 3–7 May 2010. 2010. URL: <https://doi.org/10.1109/robot.2010.5509276>.
- Filla R., Obermayr M., Frank B. A study to compare trajectory generation algorithms for automatic bucket filling in wheel loaders. 3rd commercial vehicle technology symposium: Proceedings. 2014. P. 588–605.
- Dadhich S., Bodin U., Andersson U. Key challenges in automation of earth-moving machines. *Automation in construction.* 2016. Vol. 68. P. 212–222. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.009>.
- From Tele-Remote Operation to Semi-Automated Wheel-Loader / S. Dadhich et al. *International journal of electrical and electronic engineering & telecommunications.* 2018. P. 178–182. URL: <https://doi.org/10.18178/ijeetc.7.4.178-182>.
- Halbach E. Autonomous area clearing with a robotic wheel loader. 15th symposium on advanced space technologies in robotics and automation: Proceedings, Noordwijk. 2019.
- Continuous control of an underground loader using deep reinforcement learning / Backman S. et al. *Machines.* 2021. Vol. 9. No. 10. P. 216. URL: <https://doi.org/10.3390/machines9100216>.

12. Frank B., Skogh L., Filla R. On increasing fuel efficiency by operator assistant systems in a wheel loader. International conference on advanced vehicle technologies and integration: Proceedings, Changchun. 2012. P. 155–161.
 13. Deep learning-based prediction of throttle value and state for wheel loaders / Huang J. et al. Energies. 2021. Vol. 14. 7202.
 14. Azulay O., Shapiro A. Wheel loader scooping controller using deep reinforcement learning. IEEE access. 2021. Vol. 9. P. 24145–24154. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3056625>.
 15. Planning the trajectory of an autonomous wheel loader and tracking its trajectory via adaptive model predictive control / J. Shi et al. Robotics and autonomous systems. 2020. Vol. 131. P. 103570. URL: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103570>.
 16. Path planning of wheel loader type robot for scooping and loading operation by genetic algorithm / Takei T. et al. 13th international conference on control, automaton and systems (ICCAS), Gwangju, Korea (South), 20–23 October 2013. URL: <https://doi.org/10.1109/iccas.2013.6704123>.
 17. Nezhadali, V., Eriksson, L. (2014). Optimal Lifting and Path Profiles for a Wheel Loader Considering Engine and Turbo Limitations. In: Waschl, H., Kolmanovsky, I., Steinbuch, M., del Re, L. (eds) Optimization and Optimal Control in Automotive Systems. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Vol 455. Springer, Cham, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-05371-4_18.
 18. Sarata S., Weeramhaeng Y., Tsubouchi T. Approach Path Generation to Scooping Position for Wheel Loader. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, 2005. Pp. 1809–1814, doi: [10.1109/ROBOT.2005.1570376](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570376).
 19. Alshaer B. J., Darabseh T. T., Alhanouti M. A. Path planning, modeling and simulation of an autonomous articulated heavy construction machine performing a loading cycle. Applied mathematical modelling. 2013. Vol. 37. No. 7. P. 5315–5325. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.10.042>.
 20. Autonomous wheel loader trajectory tracking control using LPV-MPC / R. Song et al. 2022 american control conference (ACC): Proceedings, Atlanta. 2022. P. 2063–2069.
 21. Gurko O, Liashov R. Movements planning of an autonomous front loader. *Ukrainian conference Computer-integrated technologies for automating technological processes in transport and manufacturing*, Kharkiv, Ukraine, 2021. Pp. 64–67. (in Ukrainian).
 22. Caracciolo L., de Luca A., Iannitti S. Trajectory tracking control of a four-wheel differentially driven mobile robot. International conference on robotics and automation, Detroit, MI, USA. URL: <https://doi.org/10.1109/robot.1999.773994>.
 23. Kozłowski K., Pazderski D. Modeling and control of a 4-wheel skid-steering mobile robot. International journal of applied mathematics and computer science. 2004. Vol. 14. No. 4. P. 477–496.
 24. Wu X., Xu M., Wang L. Differential speed steering control for four-wheel independent driving electric vehicle. 2013 IEEE 22nd international symposium on industrial electronics (ISIE), Taipei, Taiwan, 28–31 May 2013. URL: <https://doi.org/10.1109/isie.2013.6563667>.
 25. Modeling and motion stability analysis of skid-steered mobile robots / Hongpeng Wang et al. 2009 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA), Kobe, 12–17 May 2009. URL: <https://doi.org/10.1109/robot.2009.5152342>.
 26. Nikonov O., Kyrychenko I., Shuliakov V. Simulation modeling of external perturbations affecting wheeled vehicles of special purpose. The third international workshop on computer modeling and intelligent systems (CMIS-2020): Proceedings, Zaporizhzhia, 2020. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2608/paper42.pdf>.
 27. Marshall J., Barfoot T., Larsson J. Autonomous underground tramming for center-articulated vehicles. Journal of field robotics. 2008. Vol. 25. No. 6–7. P. 400–421. URL: <https://doi.org/10.1002/rob.20242>.
- Гурко Олександр Геннадійович**, д.т.н., проф. каф. автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, gurko@khadi.kharkov.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9905-8584>.
- Гурко Володимир Олександрович**, асистент кафедри комп'ютерних технологій і мехатроніки, volgurko@khadi.kharkov.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9216-6682>.
- Кучеренко Артем Юрійович**, аспірант, kucherenkoart7@gmail.com.
- Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, м. Харків, Україна.

Controlling wheel loader motion along a desired trajectory

Abstract. Problem. Rigid-frame skid steer front loaders are popular material-handling machines widely used in various industries. However, such loaders experience frequent breakdowns due to high dynamic loads; they are often subjected to intensive tyre wear and excessive fuel consumption. Frequently, these issues arise from the improper actions of an operator. Given the labour intensity of the workflow, an operator, regardless of qualification, cannot ensure optimal loader control at an acceptable speed for a long time. In addition, an operator usually works in harsh environments with a high risk of injury, e.g. due to loss of stability. Manual control of loaders also limits the use of these machines in places that are dangerous for humans,

for example, during the response to disasters. The solution to these issues is to automate the loader and exclude the operator from the machine work. One of the tasks of loaders automation is to ensure their movement along a given trajectory from the face to the place of unloading the material and back in the opposite direction. **Goal.** This work aims to increase the productivity and energy efficiency of a rigid-frame skid steer loader by ensuring its following along a given trajectory. **Methodology.** Based on the kinematics model of the loader, a two-loop control system for motion along a desired trajectory is designed. The control system combines feedforward and feedback loops. The feed-forward control is based on the desired speeds and accelerations. The closed loop is a state controller that uses the loader distance from the desired trajectory at a given time and the course angle as the state variables. **Results.** According to the simulation results, the proposed two-loop control system ensures the movement of the loader along a desired trajectory with an accuracy of up to 0.3 m. **Originality.** Further development of the up-to-date control theory was achieved by applying it

to a new object, namely a skid steer front loader with a rigid frame. **Practical value.** The implementation of the proposed control system will increase the productivity of the loader, as well as reduce the number of accidents at construction sites.

Key words: wheel loader, trajectory tracking, control system, state space control.

Gurko Oleksandr, professor, Doct. of Science, Automation and Computer-Integrated Technologies Department, gurko@khadi.kharkov.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9905-8584>.

Hurko Volodymyr, Teaching assistant, Computer Technologies Mechatronics Department, volgurko@khadi.kharkov.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9216-6682>.

Kucherenko Artem, PhD student, kucherenkoart7@gmail.com.

Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
