

УДК 62-932:004.89

АРХІТЕКТУРА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НАВАНТАЖУВАЧЕМ

Гурко В.О., Аксьонова Л.А.

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
Харків*

Фронтальні навантажувачі є одними з найпоширеніших будівельних машин, що широко застосовуються для переміщення сипучих матеріалів у будівництві, комунальному господарстві та складських операціях. Ефективність їх роботи визначається якістю виконання робочого циклу, основною частиною якого є процес наповнення ковша матеріалом. Саме на цьому етапі виникають найбільші енергетичні витрати та суттєві змінні навантаження на робоче обладнання, що ускладнює автоматизацію.

Одним із перспективних шляхів підвищення продуктивності, економічності та зменшення навантаження на оператора є створення систем автоматичного керування робочим процесом навантажувача. Проте реалізація такої системи пов'язана зі значними труднощами: властивості ґрунту або іншого матеріалу можуть змінюватися навіть у межах однієї захватної зони, а сили взаємодії ковша з матеріалом мають нелінійний і непередбачуваний характер. У таких умовах традиційні модельно-орієнтовані підходи часто є недостатньо ефективними. Тому актуальним є створення інтелектуальної системи керування, яка поєднує математичну модель руху робочого обладнання з адаптивними методами вибору керуючих дій.

Кінематику робочого обладнання навантажувача доцільно подати як дволанковий механізм із послідовним з'єднанням стріли та важеля ковша [1]:

$$x = f_1(\theta_1, \theta_2), \quad y = f_2(\theta_1, \theta_2) \quad (1)$$

де θ_1 та θ_2 – узагальнені координати стріли та ковша.

Швидкість їхнього руху визначається через матрицю Якобі:

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}}, \quad (2)$$

що дозволяє перетворювати бажані швидкості на переміщення гідроциліндрів.

Динаміку робочого обладнання можна отримати методом Лагранжа другого роду та подати у відомому з робототехніки матричному вигляді:

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{Q}, \quad (3)$$

де $\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})$ – матриця інерції, $\mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ – матриця коріолісових і відцентрових сил, $\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta})$ – вектор сил тяжіння, а \mathbf{Q} – вектор узагальнених моментів, що створюються виконавчими гідроциліндрами.

В даній роботі пропонується архітектура інтелектуальної системи керування навантажувачем (рис. 1), яка поєднує математичну модель, класичні й інтелектуальні алгоритми, вимірювальні засоби та механізми безпеки в єдиний замкнений контур.

Робота системи керування починається з визначення стану навантажувача за допомогою вимірювального блоку – бортового вимірювального комплексу. Вимірюються кути стріли та ковша, їхні кутові швидкості, тиск у гідросистемі та швидкість руху навантажувача.

Результати вимірювань поступають до блоку оцінки стану. Цей блок відповідає не лише за збір даних від різних джерел, але й за їх синхронізацію, фільтрацію та узгодження. У результаті формується структурований опис стану:

$$\mathbf{s} = [\theta_1, \theta_2, \dot{x}, \dot{y}, \ddot{x}, \ddot{y}, p_{\text{гидр}}, F_{\text{оп}}, v], \quad (4)$$

який надходить до блоку прогнозування. Цей блок, використовуючи рівняння динаміки (2), оцінює наслідки можливих керуючих дій: очікувані прискорення ланок, навантаження на робоче обладнання, граничні значення тиску у гідроприводі, а також здатність ковша зберегти раціональний кут входження в матеріал. Це забезпечує проактивну поведінку системи, дозволяючи уникати небажаних режимів до їх фактичного виникнення.

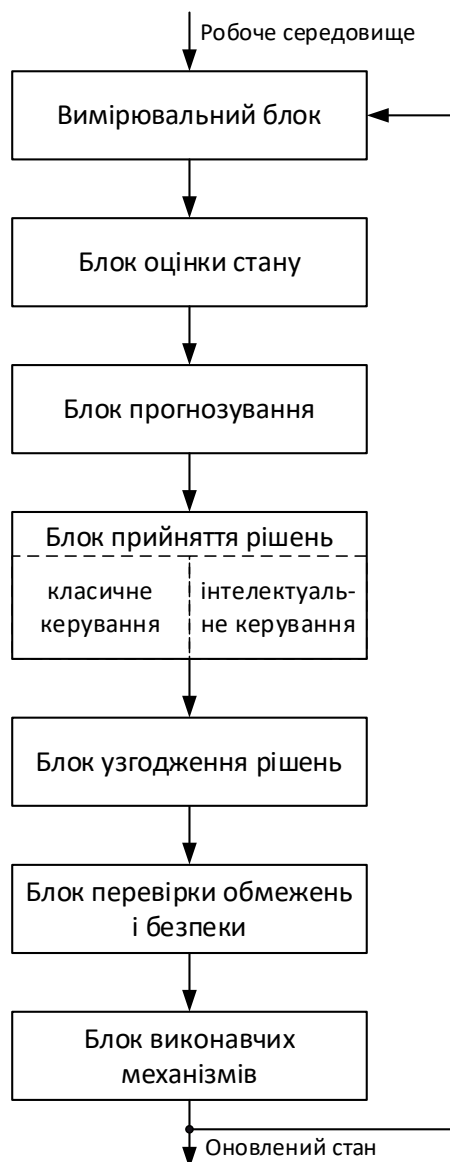


Рис. 1. Архітектура інтелектуальної системи керування навантажувачем

Подальше формування керуючих впливів виконує гібридна підсистема прийняття рішень, що складається з двох паралельних гілок. Гілка класичного керування реалізує наперед задані закономірності руху: підтримання заданої траєкторії ковша, керування кутом повороту ковша та швидкістю проникнення до палі. Вона гарантує стійкість та передбачуваність поведінки машини. Гілка інтелектуального керування працює як адаптивний агент [2], який, використовуючи сформовану під час попереднього навчання стратегію та поточний стан навантажувача і робочого середовища, здатний

аналізувати ефективність дій системи керування та адаптувати їх до змінних умов роботи навантажувача, які важко описати математичною моделлю.

Обидві гілки працюють одночасно, а вироблені ними керуючі впливи оцінюються блоком узгодження рішень, який поєднує стійкість класичного керування з гнучкістю адаптивних методів. Такий підхід відповідає сучасним принципам «shared autonomy» та «hybrid control», де прийняття рішень розподілене між детермінованим методом та адаптивним агентом.

Перед подачею команд на виконавчі механізми їх перевіряє блок контролю обмежень і безпеки. Вона враховує допустимі значення тисків, моментів, прискорень, а також відповідність керуючих впливів кінематичним та динамічним обмеженням. Якщо керуючий вплив від блоку керування може призвести до перевантаження обладнання чи відхилення від безпечного режиму, він коригується.

Наприкінці керуючий сигнал подається на виконавчі механізми: гідроциліндри стріли й ковша, а також на систему навігації, що регулює швидкість наближення навантажувача до забою. Рух машини призводить до зміни її стану, який знову вимірюється датчиками, утворюючи замкнений контур керування.

Література:

1. Гурко В.О. Кінематична модель робочого обладнання фронтального навантажувача. Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві : матеріали всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищ. освіти і молодих учених, 22 листоп. 2023 р. / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків, 2023. – С. 16–20. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/17772>
2. Кириченко І. Г., Гурко В. О. Застосування машинного навчання в інтелектуальній системі керування ковшем навантажувача. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. Вип. 108. 2025. С. 78-88. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.108.0.78>