

МОДЕЛЬ ВИБОРУ САУ ДОРОЖНЬОЇ ФРЕЗИ

Ільге І.Г.¹¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Проведено аналіз ринку систем автоматичного управління дорожніми фрезами холодного фрезерування. Обґрунтовано критерії вибору доцільної системи автоматичного управління дорожньою фрезою. Розроблена структурна ієрархічна модель вибору системи автоматичного управління дорожньою фрезою холодного фрезерування на основі використання методу аналізу ієрархії.

Ключові слова: дорожня фреза, система автоматичного управління, метод аналізу ієрархії, ієрархічна структурна модель, холодне фрезерування, критерії.

Вступ

У сучасних умовах обмеженого фінансування галузі дорожнього будівництва актуальними є роботи з поточного ремонту, що потребують використання дорожніх фрез для зняття пошкодженого дорожнього одягу. Від якості виконання робіт з фрезерування дорожнього полотна значною мірою залежить якість виконання дорожніх робіт загалом.

Забезпечити потрібний рівень якості та продуктивності робіт за умови застосування дорожніх фрез неможливо без використання систем автоматичного управління робочими органами фрези.

Враховуючи наявність на ринку значної кількості пропозицій систем автоматичного управління різних типів, є актуальною проблема доцільного вибору такої системи, що відповідає конкретному типу дорожньої фрези і виробничим завданням.

Аналіз публікацій

Дорожні фрези для холодного фрезерування розрізняють за агрегуванням, типом приводу фрези, конструктивними особливостями та призначенням [1]. Найбільш поширеними є самохідні машини холодного фрезерування.

На сьогодні дорожні фрези, як правило, обладнані автоматичними системами управління.

Застосування САУ робочими органами фрези надає операторові дані щодо функціонування всіх систем машини, забезпечуючи рівність і заданий профіль поверхні, що фрезується, дотримання заданого подовжного і поперечного ухилів, підтримку глибини фрезерування по ширині смуги, відповідність ро-

бочої швидкості зусиллю фрезерування. Положення дорожньої фрези та її робочих органів контролюється за допомогою ультразвукових, лазерних, магнітних та інших датчиків.

Для вирішення завдань дорожнього будівництва застосовують велику родину дорожніх фрез різних типів, виготовлену різними виробниками. Ефективне використання переважної кількості з них неможливе без застосування систем автоматичного управління, які представлені на ринку багатьма пропозиціями розробників цих систем.

Виробництво автоматизованих систем управління для дорожніх машин і, зокрема, для дорожніх фрез ведеться такими корпораціями, як Topcon (Японія), Trimble (США) та Leica (Швейцарія) [2–5].

Зокрема, як показано в роботі [5], система Trimble PCS900 дозволяє автоматично контролювати глибину та поперечний ухил у тривимірному режимі фрезерування, що дає змогу уникнути просідання ділянок, утворення колій та подовжніх хвиль. Застосування системи Trimble PCS900 дозволяє під час подальшого формування дорожнього одягу не використовувати механічні копирні системи і сформувати поверхню заданої рівності із застосуванням мінімального обсягу асфальту. У використанні цієї системи значно зменшуються вимоги до досвіду оператора, скорочується загальний шлях дорожньої фрези за умови досягнення потрібної глибини.

На рис. 1, що наведений у роботі [2], зображено склад бортової частини системи Trimble PCS900:

- бортовий модем SNM940;
- відбивач MT900;

- блоки управління Trimble CB450 і CB460;
- датчик ухилу AS400;
- блок живлення PM400.

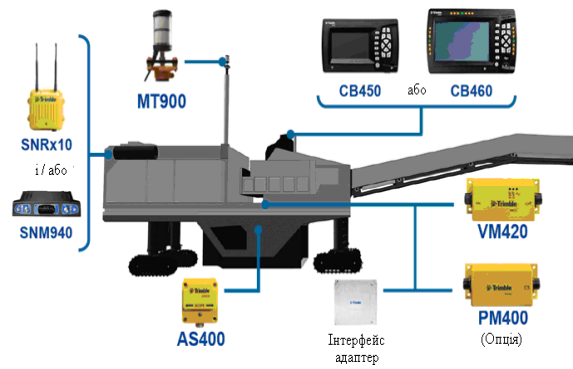


Рис. 1. Схема розташування бортових елементів САУ Trimble PCS900

Представник іншої відомої фірми (система Торсон Р63 3D mmGPS) використовує глобальну систему супутникової навігації та дозволяє отримати точне 3D-положення барабана фрези з точністю меншою ніж сантиметр. Як правило, використання системи mmGPS на фрезах особливо виправдане в роботі на великих об'єктах, де разом з дорожньою фрезою використовуються інші будівельні машини, оснащені 3D-системами нівеляції [3].

Отримати такий самий рівень точності поверхні дозволяє використання системи Торсон 3D LPS для дорожньої фрези [4], що застосовує роботизований електронний тахеометр, який відстежує положення призми на щоглі фрези протягом усієї роботи. Планові координати й висотна відмітка надходять через радіоканал у бортовий комп'ютер, де визначається точне положення барабана фрези і розраховуються відхилення від 3D-моделі проекту.

Система Leica iCON pave milling для дорожніх фрез також підтримує рівень точності менший ніж сантиметр і має змогу використовувати дані про фрезерний барабан машини від високоточного тахеометра або GPS/GNSS-приймача [5].

Отже, на ринку представлена велика кількість зразків САУ дорожніми фрезами, що відрізняються за багатьма параметрами. Однак значна частина параметрів не вказується розробниками, а задекларовані значення не завжди відповідають дійсним, тому вибір САУ відбувається в умовах невизначеності.

Тому для раціонального вибору САУ дорожньої фрези необхідна модель, що дозволить враховувати всю сукупність основних характеристик САУ дорожньої фрези і здійснити науково-обґрунтований вибір в умовах невизначеності.

Моделі вибору дорожніх і будівельних машин та їх САУ досліджувалися в літературі в недостатньому обсязі. Зокрема в роботі [6] наведений вибір лише окремих елементів машин, у працях [7, 8] розглядається вибір трактора та екскаватора, у роботі [9] автор вирішує тільки проблему вибору САУ бульдозера.

У літературі відсутня інформація щодо моделі вибору САУ дорожньої фрези в умовах невизначеності.

Мета і постановка завдання

Метою цієї роботи є підвищення ефективності застосування дорожніх фрез холодного фрезування за рахунок розроблення моделі вибору САУ дорожньої фрези в умовах невизначеності. Для досягнення цієї мети найбільш доцільним є застосування методу аналізу ієрархій [10], що базується на декомпозиції проблеми вибору за допомогою ієрархічної структурної моделі.

Завдання роботи:

- обґрунтувати критерії вибору САУ дорожньої фрези для холодного фрезування;
- розробити ієрархічну структурну модель вибору САУ дорожньої фрези для холодного фрезування із застосуванням обґрунтованих критеріїв.

Обґрунтування критеріїв вибору

Вартість системи автоматичного управління може бути бар'єром, що обмежує можливість її придбання, тому цей критерій не можна оминати в здійсненні вибору.

Не менш важливим критерієм є експлуатаційні витрати, що інтегрально враховують вартість сервісного обслуговування, вартість паливно-мастильних матеріалів, вартість запасних частин тощо. Цей критерій також суттєво впливає на сукупну економічну ефективність функціонування дорожньої фрези і має бути врахованим.

Результат роботи дорожньої фрези оцінюється точністю формування заданої поверхні, дотриманням визначених відміток та кутів нахилу, що забезпечується властивостями системи автоматичного управління, тому то-

чність є одним з найбільш значущих критеріїв у виборі.

Для виконання дорожньою фрезою виробничих завдань у визначений термін необхідне оперативне реагування на зміни, що постійно виникають у процесі фрезування. Це завдання покладається на САУ, і якість його виконання характеризується швидкістю системи, що є важливим критерієм її вибору.

У багатьох випадках дорожня фреза застосовується в обмеженому просторі, зокрема у виконанні робіт на вузьких поворотах або в умовах міста, де має бути виконане фрезування на малих радіусах. Така операція потребує від САУ сумісного управління двигуном і ходовою частиною фрези, і від його ефективності залежить якість сформованої поверхні, тому функція опрацювання малих радіусів має враховуватися в моделі вибору САУ [1].

Виконання фрезування робіт на нерівних, похилих ділянках потребує від САУ опції автоматичного вирівнювання шасі паралельно поверхні, бо покладення на оператора цієї функції відволікатиме його від стеження за основними параметрами виробничого процесу [1], що, безумовно, тягне за собою зниження якості роботи, тому автоматичне вирівнювання фрези є важливим критерієм вибору.

Пробуксовування окремих елементів ходової частини в процесі фрезування призводить до зниження точності формування поверхні, тому наявність та ефективність адаптивного регулювання швидкості цих елементів, яку виконує САУ, є важливим критерієм.

Значну роль у виборі САУ також відіграє ефективність підсистеми регулювання двигуна фрези, що забезпечує доцільний режим його роботи і раціональне використання пального [1].

Дорожні фрези працюють у складних умовах забрудненого зовнішнього середовища, потужних вібраційних навантажень та високих температур, що висуває високі вимоги до надійності САУ, яка також є важливим критерієм їхньої оцінки.

Час відновлення працездатності САУ у випадку її відмовлення впливає на загальну ефективність її застосування, що визначає рівень сервісного обслуговування як один з важливих критеріїв вибору.

Зручність монтажу і настроювання САУ також мають бути враховані у виборі, тому

що вони впливають на витрати часу за умови введення САУ в експлуатацію [2].

Наявність вбудованої в САУ підсистеми діагностики і реєстрації дозволяє контролювати працездатність дорожньої фрези і раціонально планувати її експлуатацію, що дозволяє економити ресурси і час на підтримку фрези в робочому стані.

У разі виникнення потреби візуального контролю оператором процесу фрезування зовні без втрати контролю за всіма параметрами процесу важливою стає можливість зовнішнього управління фрезою, зокрема за допомогою мобільних екранів. Ефективність реалізації цієї функції САУ є суттєвим критерієм для оцінки САУ.

Оператор фрези повинен вчасно і в наочній формі отримувати від САУ весь обсяг необхідних даних щодо фрезерування для ефективного керування цим процесом, тому важливим критерієм є якість візуального подання необхідної інформації [1, 2].

Для забезпечення концентрації уваги оператора на керуванні виробничим процесом САУ має підтримувати комфортні умови його роботи, зокрема температурно-кліматичний режим. Ефективність виконання САУ цієї функції також є критерієм її оцінки [1, 2].

Отже, розглянуті вище критерії мають бути враховані в моделі вибору САУ.

Розробка ієрархічної моделі вибору САУ дорожньої фрези

На верхньому рівні ієрархічної моделі розташована сама проблема, що розглядається – вибір САУ дорожньої фрези.

Другий рівень містить групи критеріїв, що характеризують САУ. Проаналізовані вище критерії належать до економічної, технічної, експлуатаційної та ергономічної груп.

Самі критерії, що становлять певну групу, розташовані на третьому рівні ієрархічної моделі.

Економічні критерії:

- вартість САУ;
- експлуатаційні витрати.

Технічні критерії:

- точність;
- швидкодія;
- адаптивне регулювання швидкості;
- управління двигуном;
- вирівнювання фрези;
- опрацювання малих радіусів.

Експлуатаційні критерії:

- надійність;
- діагностика та реєстрація;
- зручність монтажу і настроювання;
- зовнішнє управління;
- сервісне обслуговування.

Ергономічні критерії:

- візуалізація параметрів;
- комфортність для оператора.

На нижньому рівні ієрархічної моделі розташовані альтернативи, тобто конкретні зразки САУ, один з яких буде обраний за сукупною оцінкою за всіма критеріями. Пропонується як альтернативи обрати, наприклад, такі САУ від найбільш знаних виробників:

- Trimble PCS900;
- Topcon P63 3D mmGPS;
- Topcon 3D LPS;
- Leica iCON pave milling.

Отже, ієрархічна структурна модель вибору САУ фрези, що зображена на рис. 2, містить усі перелічені вище рівні в упорядкованому вигляді.

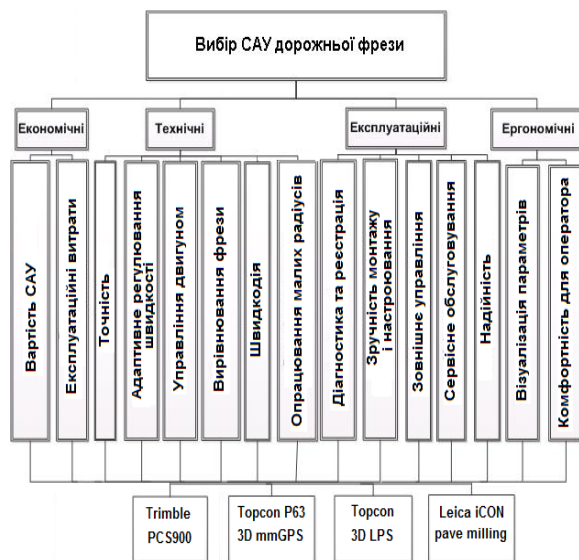


Рис. 2. Структурна ієрархічна модель вибору САУ дорожньої фрези

Побудована ієрархічна структурна модель дає змогу реалізувати процес методу аналізу ієрархій [10], тобто побудувати на основі суджень експертів матриці парних порівнянь, визначити вагові коефіцієнти для елементів кожного рівня ієрархії щодо того елемента верхнього рівня, від якого вони залежать, обчислити узагальнені вагові коефіцієнти для альтернатив і обрати найбільш доцільну альтернативу за всіма критеріями.

Висновки

У роботі проаналізовано проблеми вибору системи автоматичного управління дорожньою фрезою холодного фрезування, а саме проведено аналіз САУ провідних виробників цих систем і визначено необхідність побудови моделі вибору, що дозволить враховувати всю сукупність основних характеристик САУ дорожньої фрези та здійснити науково-обґрунтований вибір в умовах невизначеності.

Визначено й обґрунтовано економічні, технічні, експлуатаційні та ергономічні групи критеріїв, що характеризують САУ дорожньої фрези.

Побудовано ієрархічну структурну модель вибору САУ дорожньої фрези, що дозволяє реалізувати процес методу аналізу ієрархій і обрати доцільну альтернативу.

У подальших дослідженнях буде виконана програмна реалізація розробленої моделі у вигляді експертної системи вибору САУ дорожньої фрези.

Література

1. Wirtgen: Efficient removal and granulation of road surfaces. The World of Wirtgen Cold Milling Machines. URL: https://www.wirtgen-group.com/binary/full/o19159v77_W_brochure_ColdMillingMachines_0520_V3_EN.pdf (last accessed: 03.10.2020).
2. OPERATOR'S MANUAL. TrimblePCS900 Paving Control System for Asphalt Pavers. URL: ftp://www.myconnectedsite.com/TCC/trimblegs/Machines/PCS900%20Manuals/PCS900_OpMan.pdf (last accessed: 03.10.2020).
3. Система Topcon P63 3D mmGPS. URL: <https://www.gsi.ru/art.php?id=607> (дата звернення: 03.10.2020).
4. Система Topcon 3D LPS. URL: <https://www.gsi.ru/art.php?id=606> (дата звернення: 03.10.2020).
5. Leica iCON pave asphalt. Your complete solution for 3D asphalt paving. URL: <https://leica-geosystems.com/products/machine-control-systems/pavers-and-cold-planers/leica-icon-pave-asphalt> (last accessed: 03.10.2020).
6. Phung XL, Truong HS, Bui NT. Expert system based on integrated fuzzy AHP for automatic cutting tool selection. Applied Sciences (Switzerland). 2019, Oct 1; 9(20). URL: <https://doi.org/10.3390/app9204308>.
7. Amini S., Asoodar M.A., Selecting the most appropriate tractor using Analytic Hierarchy Process – An Iranian case study. Information Processing in Agriculture. Vol. 3, Iss. 4, 2016. P. 223–234. URL: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.08.003>.

8. Temiz I., Calis G. Selection of Construction Equipment by using Multi-criteria Decision Making Methods, *Procedia Engineering*, Vol. 196, 2017. P. 286–293. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.201>.
9. Ільге І.Г., Мереха Р.Ю. Модель вибору САУ робочими органами бульдозера. *Технологія приборостроєння*. 2019. □ № 2. □ С. 75–78.
10. Saaty, Thomas L. *Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*. Pittsburgh, Pennsylvania: RWS Publications, 1999. ISBN 0-9620317-8-X.

References

1. Wirtgen: Efficient removal and granulation of road surfaces. *The World of Wirtgen Cold Milling Machines* URL: https://www.wirtgen-group.com/binary/full/o19159v77_W_brochure_ColdMillingMachines_0520_V3_EN.pdf (last accessed: 03.10.2020).
2. OPERATOR'S MANUAL. TrimblePCS900 Paving Control System for Asphalt Pavers. URL: ftp://www.myconnectedsite.com/TCC/trimblegs/Machines/PCS900%20Manuals/PCS900_OpMan.pdf (last accessed: 03.10.2020).
3. Sistema Topcon P63 3D mmGPS. (System Topcon P63 3D mmGPS.) URL: <https://www.gsi.ru/art.php?id=607> (accessed: 03.10.2020).
4. Sistema Topcon 3D LPS. (System Topcon 3D LPS) URL: <https://www.gsi.ru/art.php?id=606> (accessed: 03.10.2020).
5. Leica iCON pave asphalt. Your complete solution for 3D asphalt paving URL: <https://leica-geosystems.com/products/machine-control-systems/pavers-and-cold-planers/leica-icon-pave-asphalt> (last accessed: 03.10.2020).
6. Phung XL, Truong HS, Bui NT. Expert system based on integrated fuzzy AHP for automatic cutting tool selection. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2019, Oct 1; 9(20). URL: <https://doi.org/10.3390/app9204308>.
7. Amini S., Asoodar M.A., Selecting the most appropriate tractor using Analytic Hierarchy Process – An Iranian case study. *Information Processing in Agriculture*. Vol. 3, Iss. 4, 2016. P. 223–234. URL: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.08.003>.
8. Temiz I., Calis G., Selection of Construction Equipment by using Multi-criteria Decision Making Methods, *Procedia Engineering*. Vol. 196. 2017. P. 286–293. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.201>.
9. Ільге І.Г., Мереха Р.Ю. Model' vybora SAU robochimi organami bul'dozera [Model of the choice of ACS by the working bodies of the bulldozer]. *Tekhnologija priborostroeniia. The Technology of the Instrumentation*. 2019, no 2. P. 75–78.

10. Saaty, Thomas L. *Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*. Pittsburgh, Pennsylvania: RWS Publications, 1999. ISBN 0-9620317-8-X.

Ільге Ігор Генріхович¹, к.т.н., доц. кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, тел. +38 050-401-91-69, ilge_igor@ukr.net.
¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

The ACS selection model for road milling machine

Abstract. *The paper analyzes the problem of choosing an automatic control system for a road milling cutter for cold milling. The analysis of the ACS of the leading manufacturers was carried out, the typical structure of the ACS, the features of their functioning was determined, the necessity of building a selection model was substantiated, which would take into account the entire set of the main characteristics of the ACS of the road milling machine and make a scientifically grounded choice in conditions of uncertainty. The purpose of this work is to increase the efficiency of the use of cold milling cutters by developing a model for choosing an ACS for a road milling cutter under uncertainty. To achieve this goal, the most appropriate is the use of the Analytic Hierarchy Process (methodology) based on the decomposition of the choice problem using a hierarchical structural model. Economic criteria (cost of ACS, operating costs), technical criteria (accuracy, speed, adaptive speed control, engine control, alignment of the cutter, working out of small radii), operational criteria (reliability, diagnostics and registration, ease of installation and adjustment, external control, service) and ergonomic criteria (visualization of parameters, operator comfort) that characterize the ACS of a road milling machine. The originality consists in the construction, on the basis of these groups of criteria, of a hierarchical structural model for choosing an ACS for a road milling cutter, which makes it possible to implement an Analytic Hierarchy Process and choose a reasonable alternative. The practical value lies in the fact that the use of the developed model will make it possible to carry out a scientifically grounded choice of the ACS of the road milling cutter, taking into account the entire set of economic, technical, operational and ergonomic groups of criteria. In the course of further research, the software implementation of the developed model will be carried out in the form of an expert system for choosing the ACS of a road milling machine.*

Key words: *road milling machine, automatic control system, hierarchy analysis method, hierarchical structural model, cold milling, criteria.*

Igor Ilge¹, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, tel. тел. +38 050-401-91-69, ilge_igor@ukr.net.

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Модель выбора САУ дорожной фрезы

Аннотация. В работе проведен анализ **проблемы** выбора системы автоматического управления дорожной фрезой для холодного фрезерования. Проведен анализ САУ ведущих производителей, определена типовая структура САУ, особенности их функционирования, обоснована необходимость построения модели выбора, которая позволит учитывать всю совокупность основных характеристик САУ дорожной фрезы и осуществить научно обоснованный выбор в условиях неопределенности. **Целью** данной работы является повышение эффективности применения дорожных фрез для холодного фрезерования за счет разработки модели выбора САУ дорожной фрезы в условиях неопределенности. Для достижения этой цели наиболее целесообразным является применение **метода** анализа иерархий, основанный на декомпозиции проблемы выбора с помощью иерархической структурной модели. Определены и обоснованы экономические критерии (стоимость САУ, эксплуатационные расходы), технические критерии (точность, быстродействие, адаптивное регулирование скорости, управление двигателем, выравнивание фрезы, отработка малых радиусов), эксплуатационные критерии (надежность, диагностика и регистрация, удобство монтажа и настройки, внешнее

управление, сервисное обслуживание) и эргономические критерии (визуализация параметров, комфортность оператора), которые характеризуют САУ дорожной фрезы. **Научная новизна** состоит в построении на основе указанных групп критериев иерархической структурной модели выбора САУ дорожной фрезы, которая позволяет реализовать аналитический иерархический процесс и выбрать целесообразную альтернативу. **Практическая значимость** состоит в том, что использование разработанной модели позволит осуществить научно-обоснованный выбор САУ дорожной фрезы с учетом всей совокупности экономических, технических, эксплуатационных и эргономических групп критериев. В ходе дальнейших исследований будет выполнена программная реализация разработанной модели в виде экспертной системы выбора САУ дорожной фрезы.

Ключевые слова: дорожная фреза, система автоматического управления, метод анализа иерархий, иерархическая структурная модель, холодное фрезерование, критерии.

Ильге Игорь Генрихович¹, к.т.н., доц. каф. автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий, тел. +38 050-401-91-69, ilge_igor@ukr.net.

¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, улица Ярослава Мудрого, 25, Харьков, Харьковская область, 61000.