

УДК 681.51

DOI: 10.30977/VEIT.2021.20.0.04

Метод вибору системи автоматичного управління автогрейдера

Ільге І. Г.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

***Анотація.** Проаналізовано представлені на ринку системи автоматичного управління автогрейдером. Визначено і обґрунтовано економічні, техніко-експлуатаційні та ергономічні групи критеріїв вибору системи автоматичного управління автогрейдера. Розроблено метод нечіткого багатокритеріального аналізу для вибору системи автоматичного управління автогрейдера в класі 3D систем.*

***Ключові слова:** автогрейдер, система автоматичного управління, теорія нечітких множин, метод вибору, будівництво доріг, критерії.*

Вступ

В сучасних умовах оновлення інфраструктури автомобільних доріг нагальною є потреба ефективного використання дорожніх будівельних машин на всіх етапах дорожнього будівництва.

Однією з основних дорожніх машин, що використовуються при будівництві доріг є автогрейдери, що виконують значний обсяг робіт при профілюванні та планування шарів дорожнього покриття, ремонті та асфальтуванні.

Ефективне застосування автогрейдерів, у першу чергу їх продуктивність і точність профілювання, неможливе без використання сучасних систем автоматичного управління.

Разом з тим проблема вибору доцільної системи автоматичного управління (САУ) автогрейдером є актуальною, тому що на ринку України є в наявності велика кількість зразків таких систем, що відрізняються технічними, експлуатаційними та іншими характеристиками і відсутній науково-обґрунтований метод вибору таких систем, що має враховувати цю сукупність характеристик.

Аналіз публікацій

Автогрейдери розрізняють за агрегуванням, масою, потужністю, типом приводу, конструктивними особливостями [1]. Най-

більш поширеними є самохідні машини з гідромеханічною трансмісією.

Обладнання системами автоматичного управління в даний час характерне для різних типів самохідних автогрейдерів, що вирішують цілу низку різноманітних завдань по будівництву та ремонту доріг [1]:

- переміщення сипучих будівельних матеріалів;
- побудова невеликих насипів;
- профілювання та планування ґрунтових поверхонь;
- розробка та перемішування матеріалів;
- прокладка кюветів та водостічних каналів, тощо.

При виконанні оператором автогрейдера цих завдань з використанням САУ мають місце наступні позитивні риси:

- більш висока точність та стабільність рівня якості виконання робіт;
- зменшення трудомісткості роботи оператора;
- економія робочого часу;
- суттєво зменшення кількості помилок під час виконання робіт;
- можливість виконання робіт в умовах обмеженої видимості робочого майданчика;
- можна більш точно оцінити кількість потрібних будівельних матеріалів.
- отримання необхідного масиву інформації щодо параметрів виробничого процесу

оператором автогрейдера.

В залежності від конкретного типу САУ перелічені вище переваги мають місце в більшій або меншій мірі.

В масштабних проектах дорожнього будівництва використовується велика родина автогрейдерів різних видів, що застосовують виготовлені різними виробниками системи автоматичного управління, але основна частина ринку таких САУ належить декільком корпораціям, а саме Trimble (США), Topcon (Японія), Leica (Швейцарія) та MOBA (Німеччина) [2-4].

Зокрема, цілу низку САУ для автогрейдерів пропонує фірма Trimble у всіх класах таких систем [2].

Так, найпростіша з класу 2D систем - кутова 2D система Trimble містить наступні основні елементи:

- Trimble AS400 датчик нахилу;
- Trimble RS400 датчик обертання;
- Trimble PM400 модуль керування живленням;
- Trimble CB450 або CB460 дисплей керування машиною з програмним забезпеченням.

Ця система дозволяє після встановлення оператором початкового положення відвалу підтримувати постійний поперечний профіль оброблюваної ділянки, отримуючи дані від датчиків кутів повороту, обробляючи їх та формуючи сигнал для гідравліки для автоматичної підтримки кута відвалу заданого оператором. Таким чином, її застосування спрощується керування автогрейдером та знижує вимоги до рівня підготовки оператора автогрейдера.

Більше можливостей надає інша САУ цього класу – лазерна 2D система Trimble, при використанні якої застосовується лазерний будівник площині, що встановлюється оператором перед початком робіт. В її складі порівняно з кутовою системою додатково є щогла Trimble EM400 та лазерний приймач Trimble LR410.

Встановлений на щоглі, що механічно пов'язана з відвалом автогрейдера, лазерний приймач приймає лазерний промінь і передає дані в систему управління, що формує сигнал для керування виконавчими механізмами відвалу. Отже, процес профілювання відбувається в автоматичному режимі з високою точністю, а оператор має можливість контролювати якість поверхні не виходячи з машини. Обмеженням при використанні цієї

системи є те, що її можна застосовувати лише при профілюванні плоских ділянок.

Ультразвукова 2D система Trimble використовує ультразвукові датчики, що встановлені на одному або двох краях відвалу. Оператор позиціонує датчик над струною або іншим копиром і після цього система автоматично підтримує заданий оператором кут і висоту над копиром, а оператор керує напрямком руху автогрейдера. Однак при застосуванні цієї системи час виконання робіт суттєво збільшується за рахунок операцій по встановленню копіра.

В класі 3D Trimble пропонує 3D GPS / ГЛОНАСС систему, що передбачає використання базової станції GNSS (тобто GNSS-приймача з радіомодемом), що має бути встановлена на будівельному майданчику і в точці з визначеними координатами. GNSS-приймачі, що встановлені щоглах, закріплені на відвалі на машині, визначають своє положення з урахуванням даних, отриманих з базової станції через радіоканал, передають ці дані в керуючий блок системи.

Керуючий блок порівнює ці дані з проектними, визначає керуючий сигнал і передає його на виконавчі механізми, що позиціонують відвал.

Таким чином автоматично підтримується відтворення проектною поверхні будь-якого рівня складності з точністю ± 1 см.

Разом з тим треба зазначити, що використання цієї системи потребує 3D моделі поверхні, що не завжди є в наявності. Істотним обмеженням є також суттєвий вплив зовнішнього середовища на передавання даних по радіоканалу та на зв'язок з супутником.

3D UTS система Trimble – ще один представник 3D систем, який застосовується при необхідності виконати чистову обробку поверхні з точністю в декілька міліметрів (наприклад, під укладку асфальту). На відміну від попередньої САУ в даній системі на будівельному майданчику встановлений роботизований тахеометр, зв'язаний по радіоканалу з бортовим комп'ютером. На відвалі автогрейдера закріплений на щоглі відбивач, за положенням якого стежить тахеометр, передаючи дані 20 разів на секунду на комп'ютер. Останній порівнює дані тахеометра з 3D моделлю проектною поверхні і формує керуючий сигнал, що передається на гідравліку відвала. Однак треба зазначити, що тахеометр діє на відстань до 500 метрів.

Корпорація Торсон для автоматизації управління автогрейдером пропонує ще одну модель з класу 3D – систему Торсон 3D mmGPS, в якій зроблено спробу поєднати переваги систем, що використовують глобальну систему супутникової навігації, і систем, що використовують лазерні опорні поверхні [3].

Базовий комплект Торсон 3D mmGPS містить датчики поперечного та поздовжнього ухилів, датчик повороту відвалу, а також ГНСС обладнання та компоненти mmGPS – , передавач лазерної зони PZL-1 та приймач PZS-MC. Використання технології LazerZone збільшує точність висотної складової супутникових вимірювань до міліметрової точності.

При цьому в Торсон 3D mmGPS декларується реалізація повного автоматичного контролю за робочим обладнанням автогрейдера та максимальна зручність в експлуатації. Також пропонується можливість одночасної роботи різних машин від одного і того ж опорного передавача лазерної зони, при цьому разом з автогрейдерами системою користуються будівельні машини інших типів, оснащені САУ класу 3D. Отже, при застосуванні цієї системи на об'єктах з великими обсягами робіт має додаткові переваги [3]. Разом з тим дана система є залежною від надійності отримання супутникових сигналів і її використання утруднюється в зонах проблемного приймання сигналів.

Ще однією системою в класі 3D від цієї ж корпорації є система Торсон 3D LPS, яка ґрунтується на використанні як опорного елемента роботизованого електронного тахеометра, що знаходиться в контрольній точці з відомими координатами. Застосування електронних тахеометрів дозволяє отримати високу точність позиціонування [3]. Реальне положення відвалу, що відстежується тахеометром, порівнюється з 3D моделлю проекту в бортовому комп'ютері автогрейдера і це дозволяє формувати поверхню з міліметровою точністю. Однак при цьому треба брати до уваги обмежений радіус дії тахеометра і залежність системи від погодних умов.

Система Leica iGG3 [3] реалізує концепцію швидкого монтування та знімання компонентів, дозволяє змінювати конфігурацію з однієї на іншу (змiana панелі контролерів) залежно від вимог до робіт, що виконуються. Безконтактна панель управління цієї системи дозволяє позбутися проблем, що мають місце

при кабельному з'єднанні. 3D система надає можливість працювати незалежно та з максимальною точністю в будь-якому місці проектної поверхні з керуванням GPS системою або роботизованим тахеометром. Ще однією перевагою система Leica iGG3 є автоматичний контроль зміщення відвалу з використанням високоточної технології TriSonic, зокрема є функція автоматичного утримання нахилу. В Leica iGG3 реалізовано повну інтеграцію хмарного рішення та мережної платформи для візуалізації та обміну даними з центральним офісом.

Однак, треба зауважити, що бездротові канали передавання даних, що використані в цій системі, накладають певні обмеження на її застосування, зокрема в зонах суттєвих завд.

Система MOBA 3D-Matic [5] за допомогою ГНСС визначає положення машини та висоту відвалу, при старті руху машини визначається її орієнтація. Ці дані зіставляються із завантаженою інформацією у вигляді 3D проекту, до якого вже внесені всі проектні поздовжні та поперечні ухили, а також висота. При умиканні система MOBA 3D-Matic автоматично встановлює відвал на проектну висоту. Однак системі притаманні всі обмеження, що накладаються на застосування супутникових систем, до того ж бренд MOBA давно і надійно асоціюється з класом 2D систем і його вихід на ринок 3D систем відбувся відносно недавно.

Отже, розробники та постачальники систем автоматичного управління пропонують достатньо широкий вибір моделей САУ для автогрейдерів. Ці моделі характеризуються великим набором параметрів, при цьому значення деяких з них не вказується постачальниками, а достовірність значень багатьох параметрів є сумнівною.

Таким чином, вибір доцільного варіанта САУ автогрейдера відбувається в умовах нечіткого представлення даних щодо параметрів цих систем.

Розробка моделей вибору альтернатив технічних систем в умовах невизначеності останнім часом відбувалася методами, що мають за основу метод аналізу ієрархій [6-9].

В роботі [6] було розглянуто застосування варіанту методу аналізу ієрархій з частковим урахуванням нечіткості даних для вибору ріжучого інструменту, в роботі [7] застосовано класичний варіант методу аналізу ієрархій для вибору трактора для сільськогоспо-

дарських робіт. Комбінація методу аналізу ієрархій з методом функцій переваг запропоновано для вибору конструкцій в роботі [8].

Також метод аналізу ієрархій застосовувався для вибору альтернатив серед САУ для окремих класів дорожніх машин, зокрема САУ дорожньої фрези [9].

Однак для вибору доцільної альтернативи необхідно, по можливості, охопити як можна більше характеристик, а при зростанні кількості критеріїв при застосуванні методу аналізу ієрархій виникають певні труднощі [10].

Разом з тим для здійснення вибору в умовах нечіткої інформації використовують методи, що ґрунтуються на теорії нечітких множин [11]. Зокрема, в роботі [12], виконано порівняння цих методів з методом аналізу ієрархій і показана їх конкурентоспроможність. В роботі [13] методи теорії нечітких множин використані в задачі прийняття рішення про купівлю будинку. В роботі [14] вказані методи застосовані для вибору проєктної команди. Методи теорії нечітких множин використані для вибору бренд-проєкту в роботі [15].

Разом з тим в літературі відсутні дані щодо методу вибору САУ автогрейдерів в умовах нечіткого представлення інформації.

Мета та постановка задачі

Метою даної роботи є підвищення ефективності застосування автогрейдерів в дорожньому будівництві за рахунок доцільного вибору САУ автогрейдера. Для досягнення цієї мети найбільш доцільним є застосування теорії нечітких множин [12].

Завдання роботи:

- обґрунтування критеріїв вибору САУ автогрейдера для дорожнього будівництва;
- розробка методу вибору САУ в умовах невизначеності для дорожнього будівництва на основі теорії нечітких множин із застосуванням обґрунтованих критеріїв.

Обґрунтування критеріїв вибору

Ефективність застосування систем автоматичного управління дорожніх машин залежить від сукупності технічних, економічних та ергономічних факторів.

В сучасних умовах дорожньому будівництву приділяється достатньо велика увага, але досить високий рівень цін на сучасні системи автоматичного управління дорожніми машинами та значна вартість їх обслуговування,

особливо в класі 3D систем, можуть стати пороговими критеріями при виборі САУ, навіть з урахуванням швидкої окупності цих витрат при великих обсягах виконуваних робіт. Тому критерії вартості придбання САУ і вартості їх застосування мають бути враховані при виборі САУ.

При виконанні автогрейдером дорожніх будівельних робіт бажано отримувати заданий кінцевий результат з максимальною продуктивністю і потрібною точністю, що має бути забезпечено саме застосуванням системи автоматичного управління, яка дозволяє знизити кількість проходів відвала до необхідного мінімуму та виконувати операції з недосяжною для навіть досвідченого оператора точністю. Отже, критерії точності та підвищення продуктивності у великій мірі визначають ефективність застосування САУ і тому мають бути враховані при виборі.

Час монтажу САУ на автогрейдер, трудомісткість її налагодження є суттєвим фактором, що впливає на питому вагу часу корисного використання автогрейдера, тому цей критерій потрібно враховувати при виборі САУ.

Вихід з ладу будь-якої САУ дорожньої машини, зокрема автогрейдера, під час виконання робіт тягне за собою неефективне використання або навіть неможливість продовження виконання запланованих робіт, тому надійність має також бути врахована при виборі САУ.

Якщо в застосуванні САУ все ж виникли певні проблеми, то від швидкості їх вирішення залежить подальше ефективне використання автогрейдера. Тому наявність і якість сервісного обслуговування САУ є необхідним критерієм при оцінюванні САУ.

Автогрейдер є багатофункціональною дорожньою машиною, тому важливо мати можливість використання переваг застосування САУ у як можна ширшому колі виконуваних ним операцій, що висуває операційний діапазон застосування в якості критерія оцінки САУ.

При цьому рівень складності завдань, пов'язаний, наприклад, з неплоским характером поверхні, що має виконувати автогрейдер, також в значній мірі визначається класом та структури побудови САУ, що застосовується. Тобто можливість автоматичного виконання складних завдань також є важливим критерієм вибору САУ.

Перелік завдань і складність завдань, що має вирішувати САУ автогрейдера, можуть змінюватися. При такій зміні важливо мати можливість модернізувати наявну систему до необхідного рівня, не витрачаючи кошти на придбання нової. Отже, можливість модернізації також є суттєвим критерієм оцінювання САУ автогрейдера.

Переваги від застосування САУ можуть значно зрости, якщо є можливість одночасного її використання для декількох автогрейдерів. З цього випливає необхідність врахування даного критерію при порівнянні САУ.

Умови виконання дорожніми машинами, і зокрема, автогрейдером, окремих видів виробничих завдань можуть бути важкими або небезпечними. В цьому випадку наявність і якість дистанційного керування виробничим процесом має велике значення і її теж треба врахувати при виборі САУ.

При виконанні проектів будівництва доріг цінною для ефективної організації проектних робіт є можливість оперативного контролю з боку центрального офісу за ходом виконання операцій, а також можливість оперативного уточнення проектних даних і звірки їх на місці робіт. Наявність і якість даної опції САУ є суттєвою для її оцінки.

Незважаючи на розвинені можливості сучасних САУ остаточні рішення в процесі виконання робіт приймає оператор автогрейдера, тому важливою є раціональна організація його взаємодії з САУ, що передбачає, поперше, наявність простого та зручного інтерфейсу, по-друге розвинену систему екранної візуалізації операцій, що виконує автогрейдер, і по-третє наявність ефективної підсистеми клімат-контролю і захисту оператора від впливів зовнішнього середовища. Перелічені фактори також необхідно врахувати при виборі САУ.

Ефективне використання дорожніх машин і зокрема, автогрейдерів, потребує наявності вбудованої підсистеми діагностики і реєстрації, що здійснює самодіагностику САУ і контроль систем автогрейдера. Наявність і розвиненість цієї підсистеми дозволяє попередити про можливий вихід автогрейдера з ладу і мінімізувати втрати при виникненні такої ситуації, що є значущими при виборі САУ [2].

Таким чином, метод вибору САУ автогрейдера має врахувати перелічені вище критерії.

Розробка методу вибору САУ автогрейдера

Метод вибору САУ автогрейдера буде створена на основі теорії нечітких множин [11].

Вибір САУ автогрейдера проводитимемо на основі порівняльного аналізу лідерів цього сегменту ринку в класі 3D, а саме систем:

- Trimble 3D GPS / ГЛОНАСС;
- 3D UTS система Trimble;
- Topcon 3D ГНСС;
- Leica iGG3.

Оцінка САУ автогрейдерів буде виконуватися за економічними, техніко-експлуатаційними та ергономічними групами критеріїв.

В економічній групі критеріями є вартість придбання САУ та вартість експлуатації САУ.

В техніко-експлуатаційній групі містяться наступні критерії:

- точність;
- продуктивність;
- трудомісткість монтажу і налагодження;
- надійність;
- рівень сервісного обслуговування САУ;
- діапазон операцій, що підтримується САУ;
- адаптованість до виконання складних завдань;
- можливості модернізації;
- використання для декількох автогрейдерів;
- дистанційне управління;
- взаємодія з центральним офісом;
- підсистема діагностики і реєстрації.

Ергономічна група містить наступні критерії:

- зручність інтерфейсу;
- візуалізація операцій;
- підсистема клімат-контролю.

Вважаємо при постановці завдання вибору САУ автогрейдера, що перераховані вище критерії однаково важливі. Множина альтернатив X при виборі складається з чотирьох вище перерахованих систем автоматичного управління, які позначаються x_i :

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}, \quad (1)$$

де x_1 – Trimble 3D GPS / ГЛОНАСС; x_2 – 3D UTS система Trimble; x_3 – Topcon 3D ГНСС;

x_4 – Leica iGG3.

Альтернативи будемо оцінювати із використанням множини, що містить 17 рівнозначних критеріїв:

$$K = \{K_i\}, i = \overline{1,17}, \quad (2)$$

де K_1 – вартість придбання САУ; K_2 – вартість експлуатації САУ; K_3 – точність; K_4 – продуктивність; K_5 – трудомісткість монтажу і налагодження; K_6 – надійність; K_7 – рівень сервісного обслуговування САУ; K_8 – діапазон операцій, що підтримується САУ; K_9 – адаптованість до виконання складних завдань; K_{10} – можливості модернізації; K_{11} – використання для декількох автогрейдерів; K_{12} – дистанційне управління; K_{13} – взаємодія з центральним офісом; K_{14} – підсистема діагностики і реєстрації; K_{15} – зручність інтерфейсу; K_{16} – візуалізація операцій; K_{17} – підсистема клімат-контролю.

Оцінки альтернатив по кожному з критеріїв, що входять до множини $\{K_i\}$, можна представити як нечітку множину [11]:

$$V(K_i) = (\tau_{K_i}(x_1), \tau_{K_i}(x_2), \tau_{K_i}(x_3), \tau_{K_i}(x_4)), \quad (3)$$

де $\tau_{K_i}(x_l)$ – оцінка альтернативи x_l $l = \overline{1,4}$ за критерієм K_i ($i = \overline{1,17}$).

Рішенням завдання вибору є альтернатива x_l , що у найбільшій мірі відповідає вимогам за всією сукупністю критеріїв.

Вирішальне правило P для вибору найкращої альтернативи лежить на перетині відповідних нечітких множин:

$$P = V(K_1) \cap V(K_2) \cap V(K_3) \dots \cap V(K_i). \quad (4)$$

Використовуючи визначення операції перетину [12] нечітких множин можна визначити функцію приналежності шуканого рішення за допомогою залежності:

$$\tau_p(x_l) = \min_{i=1,17} (\tau_{V(K_i)}(x_l)), l = \overline{1,4}. \quad (5)$$

Найкращою буде альтернатива x^* , для якої значення функції належності $\tau_p(x_l)$ виявиться максимальним, тобто буде виконано співвідношення:

$$\tau_p(x_l^*) = \max_{l=1,4} (\tau_p(x_l)). \quad (6)$$

Таким чином, рішенням завдання вибору САУ автогрейдера є альтернатива x^* , що найбільшою мірою задовольняє всім критеріям у сукупності.

Для визначення ступеня відповідності (функції належності) кожної з альтернатив кожному з вищеописаних критеріїв за допомогою методики, викладеної в роботі [15], складено Таблицю 1, виходячи з даних робіт [2-4].

Таблиця 1. Значення функції належності

Часткові критерії	Значення функцій належності альтернатив за частковими критеріями			
	$\tau(x_1)$	$\tau(x_2)$	$\tau(x_3)$	$\tau(x_4)$
$V(K_1)$	0,5	0,7	0,6	0,7
$V(K_2)$	0,4	0,8	0,5	0,6
$V(K_3)$	0,6	0,8	0,6	0,8
$V(K_4)$	0,7	0,7	0,8	0,7
$V(K_5)$	0,5	0,7	0,5	0,8
$V(K_6)$	0,6	0,8	0,5	0,6
$V(K_7)$	0,6	0,6	0,7	0,8
$V(K_8)$	0,7	0,7	0,6	0,8
$V(K_9)$	0,5	0,6	0,5	0,7
$V(K_{10})$	0,6	0,6	0,6	0,8
$V(K_{11})$	0,6	0,4	0,8	0,6
$V(K_{12})$	0,7	0,6	0,7	0,6
$V(K_{13})$	0,8	0,5	0,8	0,7
$V(K_{14})$	0,5	0,6	0,5	0,6
$V(K_{15})$	0,7	0,6	0,7	0,7
$V(K_{16})$	0,6	0,5	0,6	0,6
$V(K_{17})$	0,7	0,7	0,6	0,6
Найменше значення	0,4	0,4	0,5	0,6

Знаходимо шукану альтернативу як перетин приведених в таблиці множин використовуючи вирішальне правило P :

$$P = \{(x_1; 0,4), (x_2; 0,4), (x_3; 0,5), (x_4; 0,6)\}. \quad (7)$$

Отже, в результаті порівняння між собою отриманих функцій приналежності кожної з альтернатив виявлено, що найкращою альтернативою є x_4 , тобто. система Leica iGG3.

Висновки

Проаналізовано проблему вибору системи автоматичного управління автогрейдером, а саме проведено аналіз існуючих зразків САУ від лідерів по виробництву даних систем і

визначено необхідність побудови методу вибору, що дає можливість враховувати сукупність основних характеристик САУ автогрейдера в умовах нечіткості інформації.

Обґрунтовано сукупність критеріїв вибору доцільного варіанта системи автоматичного управління автогрейдером.

Розроблено метод вибору САУ автогрейдера на базі застосування теорії нечітких множин, що дозволяє, на відміну від існуючих, визначити доцільну альтернативу з урахуванням нечіткості інформації.

Запропонований метод дозволяє підвищити ефективність застосування автогрейдерів в дорожньому будівництві за рахунок доцільного вибору САУ.

При подальших дослідженнях планується узагальнити розроблений метод на інші класи дорожніх будівельних машин.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Л. А. Хмара, С. В. Кравець, & В. В. Нічке (2010) *Машины для земляных работ : навч. посіб.* (Рівне-Дніпропетровськ-Харків) L. A. Khmara, S. V. Kravets, & V. V. Nichke (2010) *Mashyny dlia zemlianykh robit : navch. posib.* [Machines for earthworks: textbook.] Monograph. (Rivne-Dnipropetrovsk-Kharkiv): [in Ukrainian]
2. Trimble Grade Control Systems GCS900 2D for Mo-tor Graders. URL: https://sitech.ch/fileadmin/datenblaetter/Trimble_Spec_GCS900_GRADER_E.pdf (Last accessed:03.11.2021).
3. Motor Grader - 3D. URL: <http://www.topconcare.com/en/hardware/grading-systems/motorgrader-3d-gps/> (Last accessed:03.11.2021).
4. Grader. URL: <https://leica-geosystems.com/en-in/products/machine-control-systems/grader> (Last accessed:03.11.2021)
5. В.А. Тумаков. (2019). Системы нивелирования МОБА для дорожно-строительных машин (ООО «КОРРУС-Техникс») V.A. Tumakov(2019). *Sistemyi nivelirovaniya MOBA dlya dorozhno-stroitelnyih mashin* [MOBA leveling systems for road construction machines] Monograph (ООО «KORRUS-Tehniks»)[in Russian]
6. Phung XL, Truong HS, Bui NT. (2019). Expert system based on integrated fuzzy AHP for automatic cutting tool selection. *Applied Sciences* (Switzerland). 2019 Oct 1;9(20). <https://doi.org/10.3390/app9204308>
7. Amini S., Asoodar M.A. (2016), Selecting the most appropriate tractor using Analytic Hierarchy Process – An Iranian case study. *Information Processing in Agriculture*, 3(4), 223-234. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.08.003>.
8. I. Temiz, G. Calis. (2017), Selection of Construction Equipment by using Multi-criteria Decision Making Methods, *Procedia Engineering*, 196, 286-293. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.201>
9. Ільге, І.Г., Модель вибору САУ дорожньої фрези. (2021) Ilhe, I.H., Model vyboru SAU dorozhnoi frezy. (2021)[Model of the choice of ACS of a road mill.] *Vestnik HNADU: sb. nauch. tr.* 92. 103-108[in Ukrainian] <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.0.103>
10. Коробов В.Б., Тутыгин А.Г.(2016) Проблемы использования метода анализа иерархий и пути их решения. /Korobov V.B., Tutuyigin A.G.(2016) *Problemyi ispolzovaniya metoda analiza ierarhiy i puti ih resheniya.* [Problems of the Analytic Hierarchy Process and Some Solutions]. *Ekonomika i upravlenie. sb. nauch. tr.* (8):60-65. [In Russian]
11. Zadeh, L. A. (2013). Fuzzy logic. In *Computational Complexity: Theory, Techniques, and Applications* (Vol. 9781461418009, pp. 1177–1200). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1800-9_73.
12. P. Natraj, S. Sandhiya, & K. Selvakumari. (2020). FUZZY SETS AND ITS APPLICATION IN DECISION MAKING PROBLEMS BY COMPARING THREE METHODS. *PalArch's Journal of Archaeology of Egypt / Egyptology*, 17(7), 4841-4848.
13. Hemlata Aggarwal, H., Arora, D., & Vijay Kumar(2019) A Decision-making Problem as an Applications .of Intuitionistic Fuzzy Set. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 9(2), 5259-5261 DOI: 10.35940/ijeat.A1053.129219
14. Нефедов, Л. И., Петренко Ю. А., & Шевченко М. В. (2012). Методологические основы синтеза офисов по управлению программами и проектами. Nefedov, L. I., Petrenko Yu. A., & Shevchenko M. V. (2012). *Metodologicheskie osnovyi sinteza ofisov po upravleniyu programmami i proektami.* [Methodological foundations for the synthesis of offices for program and project management]. Monograph. Rivne: NUVGP. Harkov: HNADU. [in Russian] ISBN 978-966-303-419-5.
15. Ротштейн А. П., Штовба С. Д. & Штовба Е. В. (2006). Многокритериальный выбор бренд-проекта с помощью нечетких парных сравнений альтернатив. Rotshteyn A. P., Shtovba S. D. & Shtovba E. V. (2006). *Mnogokriterialnyiy vyibor brend-proekta s pomoschyu nechetkih parnyih sravneniy alternativ.* [Multi-criteria choice of a brand project using fuzzy pairwise comparisons of

alternatives] Upravlenie proektami i programmami. 2, 138—146. [in Russian]

Ільге Ігор Генріхович¹, к.т.н., доц. каф. автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, e-mail: ilge_igor@ukr.net, тел. +38 050-401-91-69, ORCID: 0000-0002-0585-8685

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Method of selecting automatic control system of a motor grader

Abstract. Problem. *Effective use of motor graders is impossible without the use of automatic control systems, especially in modern conditions of large volumes of road construction. However, among the large number of samples of such systems, which differ in various parameters, it is impossible to make an appropriate choice without a scientifically sound approach, taking into account the set of their characteristics. It was found that these systems are characterized by a large set of parameters, with the values of some of them unknown, and the reliability of the values of many parameters is questionable, i.e. the choice must take place in conditions of fuzzy information. The methods of choosing alternatives in conditions of uncertainty described in the literature, in particular when choosing technical systems based on Analytic Hierarchy Process and fuzzy set theory, are analyzed and the latter is taken to develop a method of choosing a motor grader ACS. The goal of the work is to increase the efficiency of motor*

graders in road construction due to the appropriate choice of ACS. The methodology of constructing the method is the theory of fuzzy sets. The economic, technical-operational and ergonomic groups of criteria for choosing a motor grader ACS are determined and substantiated. The construction of the method was performed to select the ACS in the 3D class. As the alternatives, the systems which are the leaders of this segment were chosen. The above criteria are a set of criteria. The solution to the problem of choice is an alternative that best meets the requirements of the whole set of criteria. The results of the work are the development of a method of fuzzy multicriterion analysis for the selection of a motor grader ACS in the class of 3D systems. Originality lies in constructing the method of choosing a motor grader ACS in conditions of fuzzy information on the basis of reasonable criteria. The practical value is the fact that the use of the developed method will allow to make a scientifically sound choice of the ACS of a motor grader taking into account the whole set of criteria.

Key words: motor grader, automatic control system, fuzzy set theory, selection method, road construction, criteria.

Igor Ilge¹, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, e-mail: ilge_igor@ukr.net, tel. +38 050-401-91-69, ORCID: 0000-0002-0585-8685

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