

кореляційних взаємозв'язках. Запропонована стаття надає можливість поширити інструментарій для вирішення актуальних задач реального виробництва за допомогою класичного підходу до процесу моделювання з використанням методу динамічного програмування. Запропоновані підходи обумовлені власним досвідом вирішення таких задач магістрантами при виконанні кваліфікаційних робіт. Застосування зазначеного методу оптимізації не обмежується тільки задачами, наведеними у статті, і може бути поширеним на вирішення й інших економічних задач, що є предметом подальших досліджень.

Список літератури

1. Освітньо-професійна програма «Економіка» другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 051 «Економіка» галузь знань «05 Соціальні та поведінкові науки» кваліфікація магістр з економіки. URL: <https://eoup.knu.edu.ua/projects>
2. Зеленко С.В., Гуляницька Д.В. Економіко-математичне моделювання отриманого прибутку підприємства. *Економічні науки. Серія «Облік і фінанси»*. 2019. Вип. 16 (61). С. 72-84.
3. Щербініна С.А., Клименко О.Г., Марочко Т.Р. Застосування економіко-математичного моделювання для аналізу діяльності промислового підприємства. URL: <http://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/6151>
4. Хорошун В.В., Науменко І.А. Економіко-математичні методи та моделі прогнозування збутової логістики торговельного підприємства. *Причорноморські економічні студії*. 2018. Вип. 28-2. С. 179-183.
5. Назаренко І.М. Економіко-математичне моделювання залежності фінансового стану підприємств від складових капіталу. *Економіка та держава*. 2016. № 2. С. 65-68.
6. Юрчук Н.П. Використання економіко-математичних методів в управлінні економічним розвитком інноваційних систем. *Інвестиції: практика та досвід*. 2015. №18. С. 28-32.
7. Паршина О.А., Паршин Ю.І. Економіко-математичне моделювання виробництва гірничорудних машин крупного машинобудівного підприємства. *Економічний вісник НГУ*. 2005. №1. С. 128-134.
8. Гончаренко Я.В. Економіко-математичні методи та моделі в системі підготовки студентів математичних та економічних спеціальностей. URL: <http://enpuir.npu.edu.ua/handle/123456789/15441>
9. Бугір М.К. Математика для економістів: посібник. Київ: Видавничий центр «Академія», 2003. 520 с.

Рукопис подано до редакції 17.02.2023

УДК 622.684: 622.271

В.І. ПАХОМОВ, канд. техн. наук, доц., І.В. ГІРІН, ст. викл.
Криворізький національний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ АВТОТРАНСПОРТУ ГЛИБОКИХ КАР'ЄРІВ

Мета. Метою роботи є розробка методу енергетичної оцінки та практичних рекомендацій щодо зниження енергоємності транспортних систем глибоких кар'єрів за рахунок підвищення інтенсивності використання технологічних автосамоскидів шляхом оптимізації та вдосконалення планування їх продуктивності в конкретних умовах залізорудних кар'єрів.

Методи дослідження. У роботі використано методи статистичного та кореляційно-регресійного аналізу, аналітичні розрахунки, виконано узагальнення опублікованих теоретичних розробок. Наукові положення, висновки та рекомендації обґрунтовані аналізом досвіду планування продуктивності технологічних автосамоскидів на залізорудних кар'єрах; достатнім обсягом експериментальних досліджень із оцінкою точності результатів за критеріями математичної статистики; збіжністю результатів теоретичних досліджень із результатами дослідно-промислових випробувань; ефективністю впровадження на кар'єрах Криворізького басейну норм змінної продуктивності та рекомендацій щодо раціональних умов продуктивної експлуатації технологічних автосамоскидів, розроблених на основі виконаних досліджень.

Наукова новизна роботи полягає у: - розробці диференційованого методу вибору параметрів доріг, залежно від просторового розвитку поля кар'єра та вантажності автосамоскида; - встановленні схеми утворення раціональних профілів кар'єрних автошляхів; - створення нової методології для оцінки значущості та ступеня впливу факторів, що визначають економічність інформаційної панелі автомобілів на основі положень теорії планування екстремальних експериментів та дозволяють передбачити ресурсозбереження транспортних засобів в динаміці технічних умов експлуатації.

Практична цінність роботи полягає у підвищенні продуктивності автотранспорту на кар'єрах Криворізького басейну за рахунок застосування: - зон ефективної роботи автотранспорту в кар'єрі залежно від його вантажопідйомності, удосконалення приводу трансмісії та рівня технічного стану автосамоскидів; - раціональних параметрів поздовжніх профілів автомобільних з'їздів; - підвищення надійності та точності планування змінної роботи транспортних засобів.

Результати. В результаті проведених теоретичних досліджень встановлено, що при застосуванні автосамоскидів великої вантажності раціональним поздовжнім профілем для автодоріг глибоких кар'єрів є увігнутий, який за-

безпечує швидкість руху навантажених автомобілів-самоскидів на 2-5% вище, ніж прямо похилий та на 3-9% вище, ніж опуклий

Ключові слова: кар'єрний автосамоскид, поздовжній профіль, умови експлуатації

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. В теперішній час при видобутку корисних копалин відкритим способом дедалі гостріше постає проблема суттєвого скорочення споживання палива. Витрати на технологічний транспорт для середніх по глибині залізрудних кар'єрів досягають 50% повної собівартості видобутку корисної копалини, а для глибоких кар'єрів перевищують цей показник. При цьому рівень використання паливних ресурсів за основними показникам не відповідає сучасним вимогам. Тому підвищення ефективності функціонування транспортних систем кар'єрів робить суттєвий внесок у зниження собівартості видобутку корисних копалин. Одним із засобів скорочення витрати палива у найближчій перспективі є створення інноваційних, у тому числі комбінованих силових установок, які дозволять використовувати особливості експлуатації таких автосамоскидів на конкретних кар'єрах гірничодобувних підприємств. Іншим шляхом вирішення цієї проблеми є удосконалення дорожніх умов експлуатації автотранспорту, які становлять суттєвий вплив на паливну економічність рухомого складу

Аналіз досліджень і публікацій. Широке застосування в США і Канаді отримала технологія малої добавки водню до дизельного палива в системі живлення великих вантажівок. Особливість системи живлення вантажівок полягає в тому, що вона оснащується системою впорскування водню СНЕС НFI. Система СНЕС НFI за допомогою електролізного апарату розкладає дистильовану воду на водень і кисень, та направляє отримані гази у впускний колектор двигуна. При цьому апарат виділяє зовсім небагато водню (близько 5% за вагою), якого, звісно ж, не вистачає для роботи дизельного двигуна - останній основну енергію, як і раніше, отримує від згорання дизельного палива. Однак результати експлуатації підтвердили теоретичні висновки вчених про те, що невелике додавання водню підвищує повноту згорання дизельного палива. При цьому різко (на 60÷70%) знижується токсичність викидів, зменшуються експлуатаційні витрати дизельного палива на 10% і збільшується ККД двигуна.

В даний час розроблена система переобладнання дизелів на роботу за газодизельним процесом із застосуванням стисненого природного газу і постійною добавкою (уприскуванням 15-20%) запального заряду дизельного палива [6]. Кількість метану, яка подається, залежить від навантаження двигуна. Система включає стандартну паливну апаратуру конвертованого дизеля і додаткову газову систему живлення, яка містить балони високого тиску для стисненого природного газу. Крім того, в систему входять апаратура обмеження подачі паливного насоса і прилади контролю та управління.

Робота двигуна за газодизельним процесом дає наступні переваги по відношенню до дизельного: знижується витрата дизельного палива на 80-90%; підвищується термічний ККД двигуна на 5%; знижується на 70-80% вміст токсичних речовин у відпрацьованих газах; збільшується в 2-3 рази термін служби моторної оливи і в 1,5-2 рази двигуна; зменшується трудомісткість переобладнання двигуна, внаслідок меншого обсягу конструктивних змін дизеля при його конвертації на газове паливо.

Постановка завдання. Враховуючи сталий стан з енергоносіями, який в тому числі значно відчутний при роботі кар'єрного автотранспорту, для підвищення ефективності його роботи можливо рухатися у напрямку удосконалення приводу трансмісії автосамоскидів, а також сформулювати новітній підхід до проектування кар'єрних доріг, особливо тих їх параметрів, які істотно впливають на економічність експлуатації автосамоскидів, а також обумовлюють витрати на гірничі роботи в цілому. Тож обґрунтування параметрів автошляхів, що розташовані у системі постійних кар'єрних виробок та забезпечують умови ефективного застосування великовантажних автосамоскидів на кар'єрах в теперішній час є завданням, яке має практичне та наукове значення.

Викладення матеріалу та результати. При переобладнанні дизельного двигуна на газодизельний процес спостерігається зменшення ефективної потужності всього на 3-5%. Це зниження пов'язане не тільки з меншою енергоємністю газоповітряної суміші, а й істотно меншими

швидкостями її згорання по відношенню до дизельно-повітряної суміші. Швидкість поширення фронту полум'я згорання метану становить 0,45 м/с і тому при використанні стисненого природного газу (СПГ) необхідно здійснювати займання з великим випередженням впорскування запального палива. Оптимальні значення кутів випередження впорскування запального палива для метану на 5-10% вище по відношенню до дизельного палива.

Дещо відмінним від дизельного палива виявився вплив на індикаторну характеристику двигуна складу газоповітряної суміші [6]. Так коефіцієнт наповнення циліндрів двигуна при роботі на СПГ на 4-6% менше, ніж при роботі на дизельному паливі через малу щільність метану. Максимальні значення ефективної потужності досягнуті при $\alpha = 0,95-1,05$. Швидкість дифузії і коефіцієнт дифузії метану в повітрі в 3-4 рази вище, ніж дизельного палива. Тому застосування газового палива забезпечує відносно високу рівномірність розподілу заряду по циліндрах і в результаті цього спостерігається більш м'яка робота двигуна. Застосування СПГ сприяє підвищенню термічного ККД газодизельних двигунів на 5%, абсолютне значення яких вище ніж газових турбін, і для чотиритактного двигуна становить 38-41%.

Використання СПГ сприяє зниженню корисної вантажопідйомності автомобіля до 10% через високу питому металоемність газобалонної установки. На 1 кг стисненого газу припадає 9-12 кг маси металу. Залежно від марки сталі відношення маси балона до його ємності складає: - 1,6-1,9 кг/л (для вуглецевої сталі); - 0,9-1,2 кг/л (для легованої сталі); - 0,5-0,7 кг/л (для фіброметалу, що застосовується італійською фірмою Faber).

Характерною особливістю робочого процесу, що визначає надійність газодизельного двигуна в цілому, є більш м'яка його робота. Це обумовлено властивостями газового палива, тобто якісним, рівномірно-однорідним складом горючої суміші. Крім того, відсутність рідких фракцій в робочій суміші, що надходить в камеру згорання двигуна, захищає мастило від розрідження і збільшує терміни його служби, а головне, поліпшуються умови змащення і збільшуються терміни міжремонтного пробігу двигуна. При сприятливих умовах змащення моторне мастило в меншій мірі забруднюється механічними домішками, що дозволяє збільшити регламентовані інтервали зміни не тільки моторного мастила, але і масляних фільтрів. Наявність меншої кількості відкладень сприяє зменшенню зносу тертьових деталей двигуна, в результаті чого ресурс газодизельного двигуна, що працює в більш сприятливих умовах, на 30-50% вище дизельного. Залежно від режиму роботи двигуна на стиснутому природному газі зниження шуму досягає 7-8 дБ.

В цілому газове паливо дає менше відкладень як в самому двигуні, так і в системі живлення. Низька інтенсивність старіння моторного мастила пояснюється тією обставиною, що зміст абразивних забруднюючих домішок, а також сірки в газовому паливі в 4-5 разів менше, ніж в дизельному паливі. Крім того, повнота згорання газового палива значно вище, ніж дизельного палива, що веде в свою чергу до різкого зниження кількості продуктів неповного згорання в газових двигунах [6].

При рівних потужностях двигунів і однаковому пробігу кількість забруднень в газових двигунах в 10-20 разів менше, ніж в дизельних двигунах. Тому рекомендується режим заміни моторного мастила і масляних фільтрів для газобалонних автомобілів збільшити в 5 разів до 10 тис. км пробігу.

При переобладнанні дизельного двигуна на газодизельний процес мінімальна питома витрата палива по зовнішній характеристиці у газового двигуна на 3-4% більше, ніж у дизеля. Однак у зв'язку з тим, що вартість газу в три рази менше, ніж дизельного палива, експлуатаційні витрати на паливо при роботі на газі становитимуть лише 10-15%, в той час як частка витрат на дизельне паливо в собівартості перевезення для кар'єрних автосамоскидів складає 25-40%.

Економічність використання стисненого природного газу на автомобілях з дизельним двигуном обумовлюється тим, що природний газ має більш високе (100-110) октанове число, ніж бензин. Тому в дизелях внаслідок застосування високих ступенів стиснення і розширення з газовим паливом досягаються найбільші індикаторний і ефективний ККД перетворення паливної енергії в корисну роботу, а питома перевитрата газу щодо дизельного палива мінімальна.

Крім того, питома витрата оливи в газодизелях менше на 5-10%, а в газових двигунах на 10-20%, ніж в дизелях, що пов'язано з меншим забрудненням мастила і збільшенням його термінів служби до заміни в 1,5-2 рази.

Зараз, як ніколи раніше, екологічні переваги газобалонних автомобілів повинні обумовлювати доцільність їх застосування при роботі в кар'єрах, де забруднення повітряного басейну створює серйозну загрозу здоров'ю працівників та жителів міста. Стиснений природний газ володіє властивістю більш повного згорання в двигуні зі значно меншим утворенням токсичних речовин у відпрацьованих газах [6].

Теоретичні дослідження по визначенню впливу дорожніх умов експлуатації на паливну економічність автомобілів-самоскидів полягали в розробці математичної моделі і прикладних програм на комп'ютері для визначення раціонального поздовжнього і поперечного профілю кар'єрних автодоріг [4,5]. У розробленій математичній моделі використовується диференціальне рівняння швидкості руху автомобіля-самоскида від довжини маршруту, в якому враховується залежність коефіцієнта сумарного опору кар'єрних автодороги від відстані перевезення [25]

$$\frac{dV}{dl} = \frac{g(D(V) - \Psi(l))}{\delta(V) \cdot V_{cp}(l)} \quad (1)$$

де g - прискорення сили тяжіння; D - динамічний фактор автомобіля; $\Psi(l)$ - сумарний опір дороги руху; $V_{cp}(l)$ - середня швидкість автомобіля на пройденому відрізку ділянки; $\delta(V)$ - коефіцієнт урахування впливу обертових мас автомобіля.

Для розв'язання поставленого завдання вирішимо щодо швидкості V рівняння динамічного фактора D

$$D = \frac{P_k - P_w}{G} \quad (2)$$

де $P_w = k \cdot F \cdot V^2$ - сила опору повітря, H ; F - лобова площа автомобіля, m^2 ; k - коефіцієнт опору повітря, що залежить від форми і якості поверхні автомобіля, $H \cdot сек^2/m^4$; P_k - тягова сила на ведучих колесах самоскида, H ; G - повна вага автомобіля, H .

Для кар'єрних автосамоскидів з електромеханічною трансмісією потужність, що передається від первинного (дизельного) двигуна на ведучі колеса автомобіля, дорівнює

$$N_k = N_e \eta_p \eta_d \eta_{есп} \eta_c = N_\Gamma \eta_p \eta_d = I_\Gamma U_\Gamma \eta_d \eta_p \times 10^{-3}, \quad (3)$$

де N_k - потужність на ведучих колесах автомобіля-самоскида, кВт; $\eta_{есп}$ - коефіцієнт, що враховує втрати потужності двигуна на привід допоміжного обладнання; η_c - к.к.д. електричної мережі; N_e - ефективна потужність двигуна, кВт; η_p - к.к.д. редуктора мотор-колеса; N_Γ , I_Γ , U_Γ - відповідно потужність, сила струму і напруга силового генератора; η_d - к.к.д. тягового електродвигуна

Потужність, споживана генератором автомобіля-самоскида БелАЗ-7519, дорівнює $N_{св} = 870$ кВт - вільна потужність.

$$N_\Gamma = I_\Gamma U_\Gamma \cdot \eta_c N_{св} = 0,92 \times 870 = 800 \text{ кВт},$$

де $\eta_c = \eta_\Gamma \cdot \eta_B = 0,945 \times 0,975 = 0,92$; η_B - к.к.д. випрямляча; η_Γ - к.к.д. генератора

Тягові електродвигуни забезпечують реалізацію заданої граничної і часткової тягових характеристик автомобіля відповідно до виразу

$$N_k = P_k V \times 0,272 \times 10^{-3} \quad (4)$$

Прирівнявши вирази (3) і (4), отримаємо залежність тягового зусилля P_k на ведучих колесах від швидкості руху V автомобіля при номінальній вільній потужності $N_{св}$

$$P_k V \times 0,272 \times 10^{-3} = I_\Gamma U_\Gamma \eta_d \eta_p \times 10^{-3},$$

$$P_k = (3,68 \eta_d \eta_p I_\Gamma U_\Gamma) / V, \quad (5)$$

де V - швидкість руху автосамоскида, км/год.

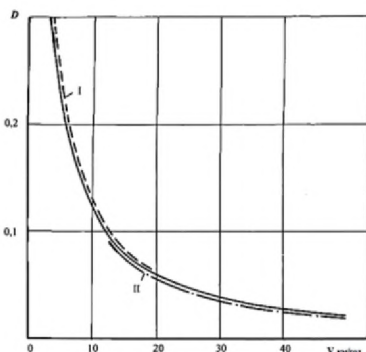


Рис. 1. Динамічна характеристика $D=f(V)$ самоскида БелАЗ-7519

З використанням формули (2) і залежностей $P_k = f(V)$, $P_w = f(V)$ отримана залежність динамічного фактора для навантаженого автомобіля-самоскида БелАЗ-7519 (рис. 1). Вирінювання кривої $D=f(V)$ з високою точністю зробимо по гіперболі виду

$$D = \frac{A}{B+C \cdot V}, \quad (6)$$

де A , B , C - емпіричні константи для даного автомобіля-самоскида, які визначаються з умови, що отримана крива по-

винна збігатися з кривої, яка вирівнюється в трьох точках: D_{max} ($V = V_0$), D_{cp} ($V = V_{cp}$), D_{min} ($V = V_{max}$).

Вирішуючи систему рівнянь

$$D(V) \begin{cases} D_{max} = A/(B + CV_0) = A/B & V_0 = 0, & D_{max} = 1,2; \\ D_{cp} = A/(B + CV_0) & V_{cp} = 15 \text{ км/год} & D_{cp} = 0,08; \\ D_{min} = A/(B + CV_0) & V_{min} = 50 \text{ км/год} & D_{min} = 0,02, \end{cases}$$

отримуємо вираз для визначення констант

$$A = \frac{D_{max}^2 \cdot D_{cp} \cdot V_{cp}}{D_{min}^2 \cdot (D_{max} - D_{cp}) \cdot V_{max}}; \quad (7)$$

$$B = \frac{D_{max} \cdot D_{cp} \cdot V_{cp}}{D_{min}^2 \cdot (D_{max} - D_{cp}) \cdot V_{max}}; \quad (8)$$

$$C = \frac{D_{max}}{D_{min}^2 \cdot V_{max}}. \quad (9)$$

При підстановці значень швидкості автомобіля V в м/сек, гіперболічна функція $D(V)$ має вигляд

$$D = \frac{77,14}{69,29 + 216 \cdot V}.$$

Сумарний опір дороги руху визначається з виразу

$$\Psi = f_k \pm i \quad (10)$$

де f_k - коефіцієнт опору кочення; i - ухил поздовжнього профілю дороги.

Коефіцієнт опору кочення на всіх ділянках прийнятий умовно постійним, так як рух кар'єрного автотранспорту відбувається, як правило, по добре укоченим щебеневим і гравійним дорогам, що оброблені мінеральними або рідкими в'язкими речовинами. При цьому сумарний опір руху залежить в основному від геометричних елементів поздовжнього профілю кар'єрних доріг, які відрізняються один від одного величиною, чергуванням і протяжністю ухилів.

Для визначення залежності $\Psi = f(l)$ розглянемо геометричні елементи поздовжнього профілю типовою кар'єрних дороги кар'єру «Північного ГЗК», яка представлена на рис. 2. Інформація про геометричні елементи поздовжнього профілю кар'єрних доріг при висоті підйому гірничої маси $H_n = 100$ м виписана з робочих проектів кар'єра. При цьому для кожного елемента поздовжнього профілю з робочого проекту виписуються такі величини: ухил i , виражений в %, зі знаком плюс на підйомі і кратний 10 %; довжина l ділянки постійного ухилу, виражена в кілометрах.

Рис. 2. Залежність ухилу поздовжнього профілю (i) типової автомобільної дороги від її довжини (l) для умов нижніх горизонтів кар'єру «Північного ГЗК»

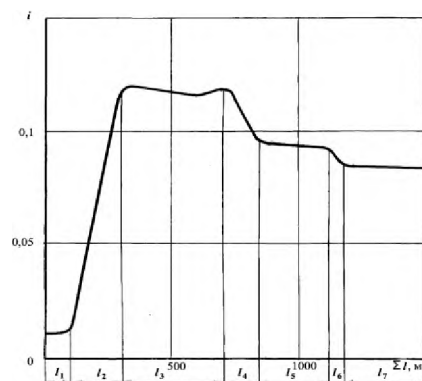
Інтерполююча функція $\Psi = f(l)$ представлена поліномом Ньютона

$$\Psi(l) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot l^i = a_0 + a_1 \cdot l + a_2 \cdot l^2 + \dots + a_n \cdot l^n. \quad (11)$$

Беручи коефіцієнт опору коченню рівним $f_k = 0,05$ і використовуючи програму, обчислюємо коефіцієнти $a_0 \dots a_n$ степеневого многочлена. Коефіцієнт обліку обертових мас автомобіля з механічною коробкою зміни передач визначається з виразу

$$\delta = 1 + \left[(I_m + I_n) \cdot U_{T,max}^2 + \sum I_k \right] \cdot \frac{g}{r_k^2 \cdot G}, \quad (12)$$

де I_n - зведений момент інерції обертових деталей двигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ (без маховика); I_m - момент інерції маховика двигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $U_{T,max}$ - передавальне число трансмісії; $\sum I_k$ - сумарний момент інерції усіх коліс, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; r_k - радіус колеса; g - прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; G - повна вага автомобіля, кг .



Для чисельного рішення диференціального рівняння (1) формулу (12) в представленому вигляді використовувати не можна, так як вона не відображає зв'язок ні зі швидкістю, ні з відстанню перевезень. Для кар'єрних самоскидів родини БелАЗ іншими дослідниками була експериментально встановлена залежність зміни коефіцієнта інерції оберткових мас від швидкості навантаженого автомобіля (до $V_{\max} = 15$ м/с) [5]

$$\delta = 0,00046 \cdot V^2 - 0,0152 \cdot V + 1,188. \quad (13)$$

Представлена залежність може бути використана для чисельного рішення диференціального рівняння (1) і визначення залежності $V = f(l)$

$$dV = \frac{[D(V) - \Psi(l)] \cdot g}{\delta(V) \cdot V_{cp}(l)} \cdot dl.$$

Для визначення раціонального поздовжнього профілю автомобільної дороги при розробці глибоких горизонтів кар'єра диференціальне рівняння (1) вирішимо чисельним методом Рунге-Кутта при початкових умовах $l_0 = 0$, $V_0 = 1,0$ м/с і постійному кроці рішення $h = 2$ м. В результаті застосування комп'ютерного моделювання тягового режиму руху автомобілів-самоскидів вантажопідйомністю 110т встановлено, що раціональним поздовжнім профілем автодоріг на глибоких горизонтах є увігнутий, який забезпечує швидкість руху навантажених автомобілів-самоскидів на 3-9% вище, ніж опуклий і на 2-4% вище, ніж прямо похилий. Досягнення на увігнутому поздовжньому профілі більшої швидкості руху пояснюється, перш за все, тим, що такий профіль обумовлює більш сприятливий навантажувальний режим роботи вузлів і агрегатів автомобіля-самоскида, а також сприяє раціональному використанню сили інерції автомобіля, що рухається. При цьому енергетичні витрати автомобіля-самоскида при русі по автодорозі з увігнутим поздовжнім профілем менші, ніж при русі по прямо похилому і опуклому профілю [4,5]. За рахунок раціонального використання сили інерції автомобіля-самоскида, що рухається по автодорозі з увігнутим профілем, досягається більш висока швидкість при входженні його на ділянки з ухілами поздовжнього профілю більш 90-100 %.

Величина відносного перевищення швидкості автомобіля-самоскида на увігнутому поздовжньому профілі визначається з виразу

$$\eta_v = \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{\bar{V}_2} \cdot 100\%. \quad (14)$$

де \bar{V}_1 та \bar{V}_2 - середня швидкість навантаженого автомобіля-самоскида на увігнутому і опуклому профілях дороги.

Розрахунки швидкості руху для реальної дороги та дороги, яка моделюється з увігнутим поздовжнім профілем, показали хорошу збіжність результатів. Згода кривих розподілу відхилення швидкості при натуральному експерименті і моделюванні режиму руху оцінювалося за критерієм Пірсона χ^2 . Для кривої моделювання величина $\chi^2 = 4,159$, а експериментальної - $\chi^2 = 7,815$ [5]. Порівняння значення критерію χ^2 показує, що на 5% -му рівні значущості розроблена модель адекватна реальному процесу.

Висновки і напрямки подальших досліджень. В результаті проведених теоретичних досліджень встановлено, що раціональним поздовжнім профілем для кар'єрних автодоріг є увігнутий, який забезпечує швидкість руху навантажених автомобілів-самоскидів на 3-9% вище, ніж опуклий і на 2-5% вище, ніж прямо похилий.

Дослідження також дозволили встановити, що раціональним поперечним профілем кар'єрної автодороги є також увігнутий, який забезпечує зменшення величини коефіцієнта опору каченню коліс на 12-23%, що обумовлює збільшення швидкості руху автомобілів-самоскидів. По питомій витраті палива на увігнутому поздовжньому і поперечному профілі досягається економія в розмірі 2-5% в порівнянні з опуклим поперечним і поздовжнім профілем.

Досягнення на увігнутому поздовжньому профілі більшої швидкості руху пояснюється, перш за все, тим, що такий профіль обумовлює більш сприятливий навантажувальний режим роботи вузлів і агрегатів автомобіля-самоскида, а також сприяє раціональному використанню сили інерції автомобіля, що рухається. Це в свою чергу призводить до зменшення енергетичних витрат на виконання транспортної роботи.

Таким чином поліпшення умов експлуатації автомобілів-самоскидів шляхом зменшення сил опору їх руху за рахунок застосування раціонального поздовжнього і поперечного профілю кар'єрних автодоріг є важливим завданням для відповідних підрозділів гірничорудних підприємств.

Список літератури

1. **Монастирський Ю. А.** Питання експлуатації та безпеки роботи кар'єрного автотранспорту / Жуков С. О., Монастирський Ю. А., Янова Л. О. // – Кривий Ріг: Видавничий дім, 2008. – 202 с.
2. **Почужевський О.Д.** Шляхи скорочення витрат дизельного пального під час експлуатації самохідних машин / О.Д. Почужевський // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. пр. – Кривий Ріг, 2014. – Вип. 36. – С. 267-272.
3. **Сістук В. О.** Результати лабораторних та промислових досліджень концепції застосування силового довороту на великовантажних кар'єрних самоскидах / В. О. Сістук // Вісник КНУ. – Вип. № 35. – Кривий Ріг. – 2012. – С. 262– 266.
4. **Пахомов В.И.** Обоснование рациональных условий организации эксплуатации автомобилей-самосвалов в процессе разработки глубоких горизонтов карьеров: Дис. на здобуття наукового ступеня кандидата техн. наук.- К.: КАДІ, 1991.-206с.
5. **Пахомов В.И.** Обоснование рациональных дорожных условий при эксплуатации автомобилей-самосвалов на глубоких горизонтах карьеров. / Пахомов В.И., Босняк Н.Г., Лепский К.Г.// Матеріали Всеукраїнської Науково-технічної конференції «Шляхи вирішення проблем експлуатації спеціалізованих автотранспортних засобів», -Кривий Ріг. - КТУ -2003. - С.24-26.
6. **Пахомов В.И.** Эффективность использования газодизельной системы питания на карьерных автосамосвалах. / Пахомов В.И., Гирин И.В. // Матеріали Всеукраїнської Науково-технічної конференції «Шляхи вирішення проблем експлуатації спеціалізованих автотранспортних засобів», -Кривий Ріг. - ДВНЗ КНУ -2012. - С.49-63.
7. **Галиев С.Ж.** The Automated System Of Disputcing Of ExcavatorRailway Complex Work On Open-Pit – «ADIS-RT» / С.Ж. Галиев, А.С. Бектуреев, К.К. Жусупов, К.К. Иванов., Е.Н. Сейтаев, Е.Н. Татишев, Е.А. Шабельников // Proceedings of the 16th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection (MPES 2007) and the 10th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production (SWEMP 2007). – Bangkok, Thailand. – 2007. – P. 330–337.
8. **Zberovskiy V.A.** Enhancing the environmental safety of opencast vehicles / V.A. Zberovskiy, A.N. Korobochka, В.Е. Sobko // Scientific Report on Resource Issues 2016. – Volume 1. – Bergakademie Freiberg. – 2016. – p. 420-425.
9. **Latino M.A.** BehavioralBasedReliability [Электронный ресурс] / М.А. Latino// 2000 MachineryReliabilityConference. –Электронные текстовые данные. –2000. –April. –Режим доступа: <http://reliability.com/industry/articles/article36.pdf>
10. **Шамрай О.В.** Формування кар'єрних рудопотоків для стабілізації якості руди: дисертація на здобуття вченого ступеню кандидата техн. наук : 05.15.03 / О.В. Шамрай.// – Кривий Ріг, 2009. – 140 с.
11. **Azaryan Vladimir** Use of Bourger-Lambert-Bera law for the operative control and quality management of mineral raw / Albert Azaryan, Vladimir Azaryan // Metallurgical and Mining Industry : Ukrmetallurginform"STA" Ltd. Украина, 2015. – No. 1. – С. 4–8.
12. **Kuo Y.** Highway earthwork and pavement production rates for construction time estimation // Ph.D. Thesis, University of Texas, USA. – 2004.
13. **Лучко М.І.** Вдосконалення роботи промислового автотранспорту в умовах кар'єру на підставі раціонального планування транспортного процесу / Лучко М.І., Купченко В.І. // -Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. - 2004. - № 7 (77) ЧІ. - С. 230-234.
14. **Зберовський В.О.** Оптимізація витрат дизельного палива та рівня забруднення атмосферного повітря продуктами його згорання при експлуатації кар'єрних автосамоскидів / В.О. Зберовський // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми екологічної безпеки» 8-9 жовтня 2014 р. м. Кременчук, КрНУ, 2014.- С. 20.
15. **Brown C.** Autonomous vehicle technology in mining // Engineering and Mining Journal – January 2012 – P. 30-32.
16. **Крейсман Е.А.** Аналіз гірничо-технічних умов експлуатації та режимів руху великовантажних самоскидів Криворізького регіону / Крейсман Е.А., Монастирський Ю.А., Веснін А.В., Гальченко А.В. // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: Науково-виробничий збірник / АДІ ДонНТУ. –2012. – № 1(14). – С. 115-119
17. **Bastos G.S.** A single-dependent agent approach for stochastic timedependent truck dispatching in open-pit mining / G.S. Bastos, L.E. Souza, F.T. Ramos, C.H. Ribeiro // 14th Int. IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. – Washington DC, USA, 5-7 Oct 2011. – P. 1057-1062
18. **Kaufman Walter W.** Design of surface mine haulage raads -a manual. / Kaufman Walter W., Ault James C // Inform. Circ. Bur. Mines. U.S. Dep. Inter., 1977, №8758.- 68 pp.
19. **Garcia Jvejero** Dumperes y pistas de acarreo sudiseno, pendientes, longitudes y costes de construcción. / Garcia Jvejero // "Rocas y miner", 1987, 15, №188.- p.76-84, 87-89.
20. **Prizzell E.M.** Trucks versus high-angle conveyor haulage in open pit mines. / Prizzell E.M., Mivissen E.A. // Mining Congress S., 1981, v.67, pp.19-26.
21. **Himehaugh A.E.** Computer-based truck dispatching in the Tyrone Mine. / Himehaugh A.E. // -Mining Congress J., 1980, No.66, 11, pp. 16-21.
22. **Wayne K. Schroeder.** Energy regeneration for surface-mine haulage trucks / K. Schrotder Wayne // Mining Magazine. 1993. - Vol. 148. - №6. - P. 456 -463.

23. **Golubeva A.S.** Improved economic stimulation mechanism to reduce vehicle CO₂ emissions/ A.S. Golubeva, E.R. Magaril// WIT Transactions on the Built Environment, 130. – UK: WIT Press, 2013. – P. 485-494
24. **I. N. Varakin.** Application of ultracapacitors as traction energy sources / I. N. Varakin et al // Thesis of 7th International Seminar on Double Lauer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, December 8-10, 1997. Florida: Deerfield Beach, 1997.-P. 87-91.
25. **Pakhomov V.I.** Rational profile for career roads / Pakhomov V.I., Hirin I.V., Monastyrskyi Yu.A., Tyshchenko V.Yu. // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2021. – Вип. 53. – С. 102–107.

Рукопис подано до редакції 24.02.2023

UDC 524.382

D.V. SHVETS, N.O. KARABUT, Senior Lecturers
Kryvyi Rih National University

HARNESSING THE POWER OF ARDUINO SIMULATORS FOR EFFECTIVE IOT EDUCATION

Purpose. The Internet of Things (IoT) is changing the way we interact with the world around us. By connecting the devices and systems around us through the Internet, this technology is driving innovation in a multitude of industries. It increases the demand for professionals with knowledge and skills in IoT systems and technologies. To meet this demand, educational institutions are increasingly incorporating IoT-focused curricula and hands-on training for information technology professionals. This paper aims to explore the role of Arduino simulators in IoT training, especially in distance learning, and to comprehensively analyze the functionality and benefits of these virtual tools.

Research methods. A combination of literature review and analysis of popular Arduino simulators, by studying their advantages and disadvantages in the context of IoT learning.

Scientific novelty. An in-depth examination of the advantages of Arduino simulators as a powerful tool for teaching IoT in a distance learning environment. Providing a comprehensive analysis of their functionality and integration strategies, the importance of these virtual platforms in IoT education is justified.

Practical significance. The benefits of Arduino simulators are to demonstrate IoT education in distance learning environments. The analysis can contribute to developing effective strategies for using these virtual tools in IoT education. The potential of Arduino simulators for facilitating access to quality education and training of skilled professionals in the field of information technology is also highlighted.

Results. The study demonstrates the effectiveness of Arduino simulators in improving the quality of IoT education in distance learning. Through a detailed analysis of their functionality and benefits, the paper demonstrates the potential of these virtual platforms in developing interactive and dynamic learning experiences. The study highlights the applicability of Arduino simulators for facilitating teacher-student interaction, enhancing collaborative project development and experience sharing, and facilitating assessment of learning achievements.

Key words: Arduino simulators, IoT education, virtual platforms, pedagogical strategies, distance learning, blended learning.

The problem and its connection with scientific and practical tasks. The Internet of Things (IoT) is rapidly evolving and becoming an integral part of modern society, with its ubiquitous presence in industries such as healthcare, agriculture, smart cities, and Industry 4.0. This technology connects the devices and systems around us to the Internet allowing real-time data collection, analysis, and decision-making [1,2].

IoT education faces many challenges, especially implementing distance learning programs. Traditional teaching methods have often been based on hands-on activities with physical equipment, which are difficult to replicate in remote environments. In addition, the dynamic and interdisciplinary nature of the IoT requires teachers to use innovative approaches to convey complex concepts and develop practical skills in students.

Arduino simulators have become a powerful solution to these challenges, offering a virtual environment that exactly mimics the functionality of physical Arduino boards. These simulators allow students to learn, practice, and experiment with programming and electronics, even in remote environments, and provide instructors with versatile tools to create engaging and interactive learning experiences.