

УДК 621.879.4
UDC 621.879.4

DOI:10.33744/0365-8171-2023-114.2-230-244

**ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА РОЗШИРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ
МОЖЛИВОСТЕЙ УНІВЕРСАЛЬНИХ ЗЕМЛЕРИЙНИХ МАШИН УДОСКОНАЛЕННЯМ
КІНЕМАТИКИ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЇХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ В ЗАБОЇ**

**INCREASING THE EFFICIENCY AND EXPANDING THE TECHNOLOGICAL
CAPABILITIES OF THE UNIVERSAL EARTH-MOVING MACHINERY BY IMPROVING THE
KINEMATICS OF THE MOVEMENT OF THEIR OPERATING ELEMENT IN THE SOIL**



Мусійко Володимир Данилович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії машин транспортного будівництва, Національний транспортний університет, e-mail: musvd48@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0001-9983-3296>, [SCOPUS id 57221283646](https://scopus.com/authid/detail.url?authorID=57221283646)



Коваль Андрій Борисович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії машин транспортного будівництва, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: kandr6104@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0003-1295-8200>, [SCOPUS id 57220055768](https://scopus.com/authid/detail.url?authorID=57220055768)



Лазарук Юрій Володимирович, доктор філософії, заступник начальника відділу, Військова частина А4629, e-mail: layuvo@ukr.net,

<https://orcid.org/0000-0002-2019-0687>, [SCOPUS id 57221291717](https://scopus.com/authid/detail.url?authorID=57221291717)



Пасенко Юрій Васильович, аспірант кафедри інженерії машин транспортного будівництва, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: 280bar@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-2986-8781>

Анотація: В статті розглянуто питання створення та оптимізації конструкцій універсальних землерийних машин безперервної дії (УЗМ) здатних забезпечувати відкопування в ґрунтах протяжних виїмок різної ширини, глибини та форми без конструктивних змін робочого обладнання. В роботі виконано детальне обґрунтування актуальності та практичної доцільності створення універсальних землерийних машин безперервної дії.

Аналітичним шляхом визначено необхідну траєкторію переміщення ґрунторозробного робочого органа УЗМ в процесі спорудження широких виїмок (котлованів) в ґрунті, що являє собою лемніскату Бернуллі, переміщення по якій робочого органа УЗМ забезпечує копання ґрунту стружками рівномірної товщини в плані. Це дозволяє здійснювати спорудження котлованів в ґрунті з максимальною продуктивністю виконання робіт, мінімізуючи величину зовнішніх навантажень на робочому органі землерийної машини.

Для реалізації вище викладеного створено фізичну модель роторного робочого обладнання УЗМ та проведено експериментальні дослідження. В основу конструкції приводу переміщення робочого органа УЗМ покладено двоконтурний важільний механізм з обертальними парами п'ятого класу, що забезпечує подачу ґрунторозробного робочого органа на ґрунт забою. Розроблення ґрунту забезпечується в режимі віяльно-поступальної подачі робочого органа на забій. Переміщення робочого органа в забої здійснюється важільним механізмом, що має три ступені вільності, кожна ланка механізму забезпечена індивідуальним приводом повороту в плані за допомогою пари гідроциліндрів відносно шарніра його кріплення.

Синтезовано алгоритм роботи приводу переміщення в забої двоконтурного ґрунторозробного роторного робочого обладнання УЗМ безперервної дії, що забезпечує розроблення ґрунту стружками рівномірної товщини не залежно від ширини виїмки і, як наслідок, підвищення продуктивності роботи машини.

Вирівнювання товщини стружки в плані забезпечується шляхом довороту проміжної рами робочого органу в кінці кожного напівциклу робочого процесу.

Обґрунтовано алгоритм переміщення робочого органа в процесі спорудження в'їзної та виїзної апарелей під час спорудження котлованів в ґрунті за декілька проходів робочого органа.

Ключові слова: універсальна землерийна машина, робочий орган, гідравлічний привод, ґрунт, котлован, алгоритм, апарель.

Вступ. Транспортне, цивільне та промислове будівництво пов'язано з розробкою та переміщенням сотень тисяч кубічних метрів ґрунту. Виконання таких обсягів робіт можливо виключно з використанням високопродуктивних землерийних машин, в першу чергу екскаваторів безперервної дії, продуктивність яких в 4 – 6 разів більша ніж екскаваторів циклічної дії.

Важливої уваги заслуговує створення універсальних землерийних машин (УЗМ) безперервної дії, які здатні здійснювати відкопування у ґрунті протяжних виїмок різних лінійних розмірів без конструктивних змін робочого обладнання.

Випробування перших зразків ланцюгових ківшевих УЗМ (ПЗМ-1) [1], показали, що до 50 % сил опору, які виникають в процесі роботи жорстко направлених ланцюгів, ґрунторозробного робочого органа (РО) складає опір тертя ланцюгів по направляючим, якого слід би було уникнути.

З часом було розроблено ланцюг однобічного перегину [2] і, зрештою, ланцюгово-балковий РО [3, 4], якому не характерні вище приведені недоліки. Використання на машині ПЗМ-2 (рис. 1) ланцюгово-балкового РО дозволило зменшити енергоємність розробки ґрунту до 0,17 – 0,29 кВт·год./м³.



Рисунок 1 – Полкова землерийна машини ПЗМ-2
Figure 1 – PZM-2 Battalion Earthmoving Machine

Дослідження УЗМ з ланцюгово-балковим РО проведені Биковим О.В. [1] під час відкопування котловану на номінальному режимі роботи (швидкість ланцюга $V_{\lambda} = 2,05$ м/с, швидкість подачі машини $V_e = 56$ м/год) розкрили характер зміни потужності приводу РО, сили тяги і сили опору його поперечному переміщенню за час робочого циклу. Встановлено, що витрати потужності N_{po} на привід РО мінімальні, коли бічні фрези робочого органа знаходяться поблизу центру виїмки, в міру підходу РО до стінок котловану – потужність приводу різко зростає. Відношення максимального значення потужності до середнього складає 1,7 – 2,5. Сила опору P_b бічному переміщенню РО плавно зростає, від мінімального значення на початку циклу поворотного руху до певного значення і досягає максимуму під час включення в роботу бічних фрез. Відношення максимального до середнього значення цієї сили складає 3 – 3,2.

Можна стверджувати, що головною причиною зміни навантажень на РО є циклічна зміна від мінімуму до максимуму сумарної площі стружок, що зрізуються усіма різцями, які знаходяться в забої. Результати тензометричних досліджень УЗМ ПЗМ-3-01 з ланцюгово-балковим РО, проведених нами [5, 6] підтверджують цей висновок.

Енергоємність розробки ґрунту, як універсальний показник ефективності робочого процесу землерийних машин, під час відривання траншей складає 0,35 – 0,43 кВт·год/м³, а котлованів – 0,408 кВт·год/м³.

Аналізуючи ефективність роботи УЗМ ПЗМ-2, ПЗМ-3 і ПЗМ-3-01 з ланцюгово-балковими РО слід зазначити, що резерви підвищення їх продуктивності, в процесі відривання поздовжніх виїмок заданих розмірів, практично вичерпано. Не вирішеним залишається питання розширення технологічних можливостей машин, оптимізації процесу копання ґрунту в котлованному режимі. Це, на наш погляд, має забезпечити значне підвищення продуктивності розроблення ґрунту, зниження енергоємності копання ґрунту.

Колективом кафедри дорожніх машин НТУ (з 27.01.2022 – кафедра інженерії машин транспортного будівництва) було проведено комплекс наукових робіт зі створення роторних УЗМ [7, 8]. Об'єктами експериментальних досліджень були фізичні моделі робочого обладнання УЗМ з безківшевими (рис. 2 а) [7] та ківшевими (рис. 2 б) роторними РО [8], виконаними в масштабі 1:5.

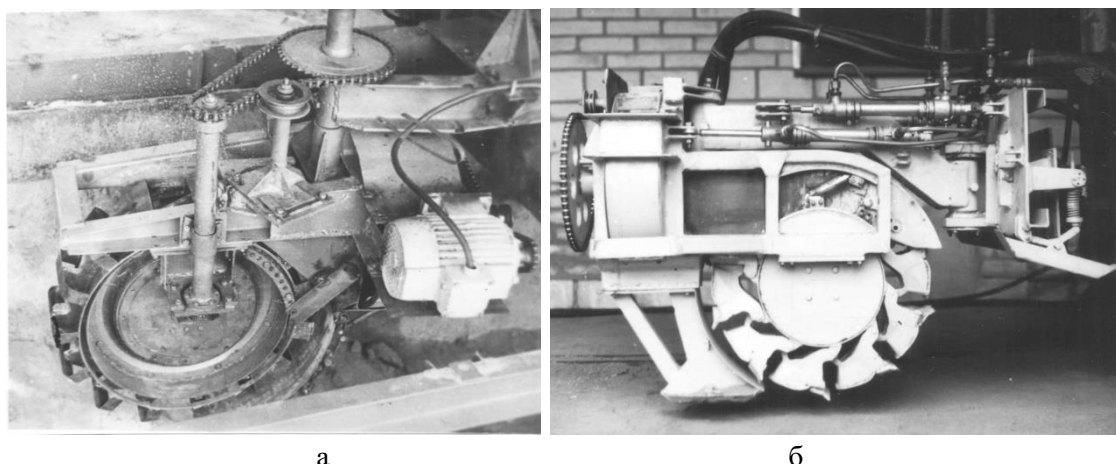


Рисунок 2 – Моделі робочого обладнання УЗМ: а – з безківшевим ротором; б – з ківшевим ротором
Figure 2 – Models of working equipment for UCAEM: a - with a bucketless rotor; b - with a bucket rotor

Експериментальними дослідженнями УЗМ з ківшевим роторним РО із відцентровим розвантаженням, який змонтовано на двоконтурному механізмі поперечного (бічного) переміщення, встановлено, що силове навантаження РО залежить від режимів роботи і в значній мірі від форми стружки, яку розробляє РО в горизонтальній площині. Характер змін, наприклад крутного моменту $M_{кр}$ на роторі за час циклу, залишається однаковим на різних режимах роботи, проте абсолютні значення $M_{кр}$ суттєво змінюються.

Найбільш навантаженим є режим максимальної продуктивності під час розробки ґрунту ротором на швидкості різання $V_p = 6$ м/с та бічної подачі $V_{бп} = 0,7$ м/с. За такої умови, значення крутного моменту складає: максимальне $M_{кр} = 74$ кНм, мінімальне – 14 кНм [8], коефіцієнт зміни зовнішнього навантаження за напівцикл становить $k_{Мкр} = 5,3$. Зменшення величини крутного моменту від максимального до мінімального, в момент зміни напрямку бічного переміщення ротора, відбувається на протязі 0,8 – 1,1 с. Така різка зміна навантаження приводу ротора під час роботи за кожен напівцикл є негативним явищем, що значно знижує надійність приводу РО.

Наведені результати дозволяють стверджувати про існуючу можливість вирівнювання і мінімізації величини зовнішніх навантажень на роторі в процесі його бічного переміщення в режимі копання ґрунту та крутного моменту на приводі, шляхом надання РО необхідної кінематики руху, за якої в горизонтальній площині ґрунт в забої буде розроблятися стружками незмінної товщини на різних швидкостях поздовжньої подачі машини на забій. Це дозволить забезпечити підвищення продуктивності УЗМ по виносній здатності РО майже в два рази, розширити технологічні можливості машин.

Дослідженням та створенням високопродуктивних ЗМ безперервної дії, конструкцій їх РО та приводів займалися багато науково-дослідних і наукових установ під керівництвом відомих вчених і конструкторів [9-11]. Опубліковані результати їх досліджень і конструкторських розробок стали основою, що дає можливість конструкторам і дослідникам вирішувати основні питання розрахунку і конструювання землерийних машин безперервної дії.

Однак створення високопродуктивних і надійних УЗМ безперервної дії потребує додаткового вирішення зазначених вище, до цих пір не розв'язаних, завдань.

Об'єктом дослідження є роторні робочі органи універсальних землерийних машин безперервної дії та кінематика їх переміщення в режимі копання ґрунту під час спорудження котлованів, в'їзної та виїзної апарелей в'їзду – виїзду з котловану.

Виклад основного матеріалу. Характерною особливістю УЗМ безперервної дії є спроможність одним і тим самим РО, без конструктивних змін, в режимі віяльно-поступальної подачі, розробляти поздовжні виїмки різних лінійних розмірів. Мінімальна ширина виїмки (траншея) відповідає ширині РО, максимальна ширина – визначається конструктивними і кінематичними параметрами навіски РО. Розроблення виїмок глибиною, що перевищує максимальну глибину копання за один прохід здійснюється за декілька послідовних проходів [12], рис. 3.

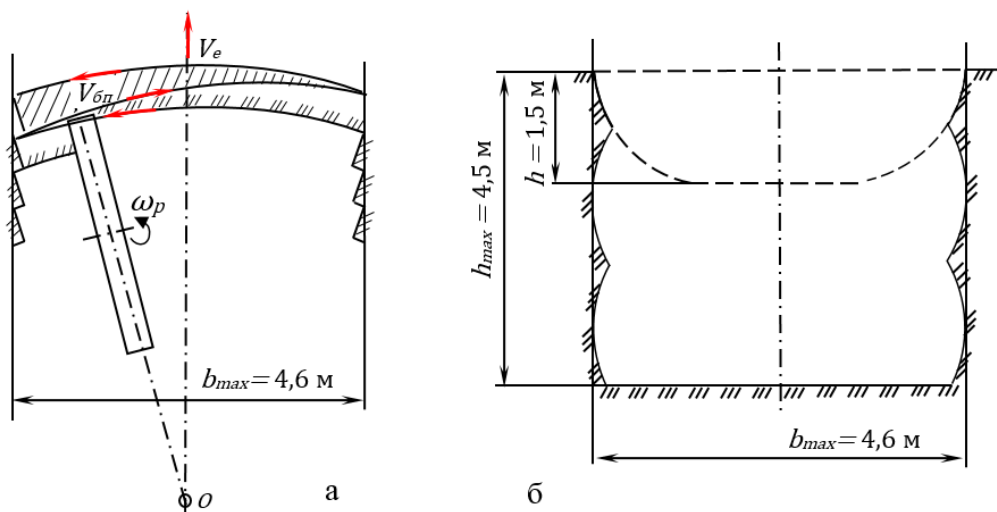


Рисунок 3 – Схема розроблення котловану: а – вид в плані; б – поперечний переріз виїмки сформований за три проходи машини

Figure 3 – Excavation scheme: a - plan view; b - cross-sectional profile of the trench formed in three passes of the machine

Для спорудження виїмки в ґрунті типу котловану, машина повинна на в'їзді та виїзді в цей котлован відкопати виїмку в ґрунті дно якої матиме вигляд нахиленої площини. Виїмки з нахиленим дном відносно поверхні ґрунту мають назву апарелей. Без їх відкопування спорудити котлован не можливо. Алгоритм переміщення робочого органа УЗМ в режимі спорудження в'їзної, або виїзної апарелей в ґрунті потребує свого дослідження та оптимізації. Характерною особливістю робочого процесу УЗМ є його циклічність. Повний цикл переміщення РО в забої здійснюється за рахунок його руху від одного крайнього положення (бічної стінки виїмки в ґрунті) до протилежної бічної стінки та в зворотньому напрямку, тобто повернення у вихідне положення. Переміщення РО від одної бічної стінки котловану до протилежної складає напівцикл його робочого процесу.

Відома одноконтурна конструктивна схема навіски ґрунторозробного РО на кормі базового шасі, забезпечує розроблення широких, протяжних виїмок в ґрунті стружками серповидної форми, нерівномірної товщини, яка змінюється від нуля до визначеного максимуму за кожен напівцикл переміщення РО в забої (рис. 4). Процес розроблення ґрунту характеризується значними змінними

(пульсуючими) навантаженнями елементів конструкції РО, нерівномірністю навантаження приводу робочого органа та машини в цілому, що в свою чергу призводить до зниження потенційної теоретичної продуктивності землерийної машини майже вдвічі [13].

Враховуючи вищезазначене, можна стверджувати, що підвищення продуктивності УЗМ може бути досягнуто завдяки зниженню і стабілізації навантажень на РО шляхом розроблення ґрунту стружками рівномірної товщини. Питання пошуку оптимального алгоритму переміщення робочого органа під час спорудження апарелей також має вирішуватись шляхом оптимізації копання ґрунту в процесі заглиблення, чи виглиблення робочого органа, що розробляє ґрунт в режимі віяльно-поступальної подачі його на ґрунт забою.

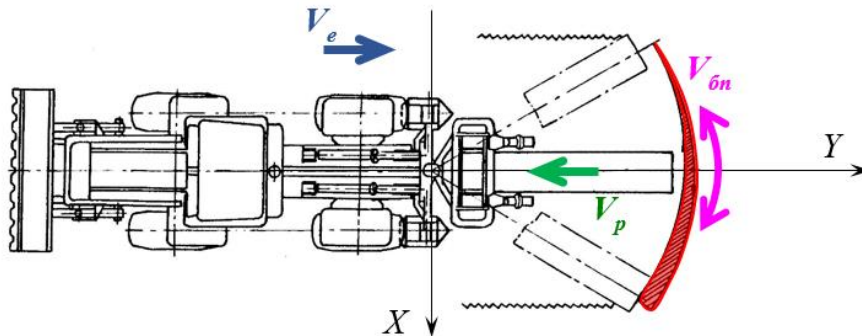


Рисунок 4 – Розробка ґрунту стружками нерівномірної товщини
Figure 4 – Excavation of soil with uneven thickness chips

Під час суміщення поступального руху машини вздовж вісі котловану OY та бічної подачі РО в напрямку вісі OX (див. рис. 4) припустимо, що швидкість руху машини V_e , за період робочого циклу, постійна ($V_e = const$). Швидкість бічної подачі РО, в кожній точці траєкторії руху в забої за напівцикл, буде середньою $V_{бп}$. У результаті векторного складання швидкостей руху машини \vec{V}_e і бічної подачі $\vec{V}_{бп}$ РО (рис. 5) отримаємо вектор сумарної швидкості переміщення робочого органу \vec{V}_{po} [14] в горизонтальній площині. При такому характері руху РО в забої утворюється стружка у вигляді клина. Кут γ між векторами швидкостей \vec{V}_{po} і $\vec{V}_{бп}$ визначається із співвідношення:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{V_e}{V_{бп}}. \quad (1)$$

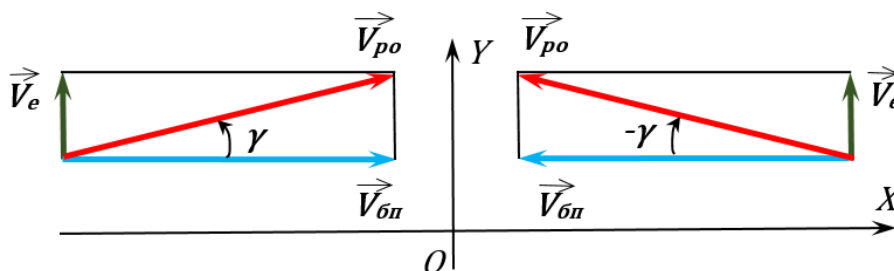


Рисунок 5 – Швидкість переміщення робочого органа за суміщення рухів
Figure 5 – The speed of movement of the operating element due to the combination of motions

Аналіз рівняння (1) свідчить, що вирівнювання товщини стружки ґрунту можливо шляхом керування процесом її утворення, зокрема механізмом бічного переміщення РО, який буде надавати РО необхідне “компенсуюче” додаткове переміщення.

Утворення стружки ґрунту рівномірної товщини, шляхом надання додаткового переміщення РО відносно базового шасі, повинно забезпечувати положення вектора сумарної швидкості його переміщення (\vec{V}_{po}) перпендикулярно вісі OY руху машини (рис. 6). Оскільки рух РО в забої є циклічним, а кут γ при цьому змінює свій знак на протилежний, то й додатковий урівноважувальний рух повинен бути циклічним і забезпечувати рівність кута γ нулю $\gamma = 0$.

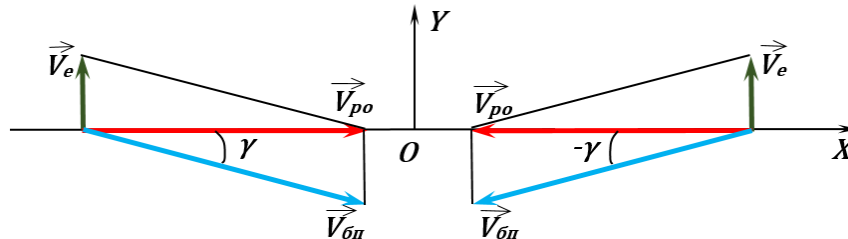


Рисунок 6 – Положення вектора сумарної швидкості переміщення РО під час розроблення забою рівномірними стружками

Figure 6 – Position of the vector of the total speed (PO) of the operating element during the development of the face with uniform chips.

Враховуючи, що під час зміни напрямку руху РО біля бічної стінки забою кут γ змінює свій знак, то додатковий урівноважувальний рух повинен починатися від крайніх положень РО в забої (біля стінок котловану) і підтримуватися в процесі переміщення РО по усій ширині виїмки, що розробляється. Разом з тим, для отримання стружки рівномірної середньої товщини необхідно в початковий момент її утворення здійснити додаткову подачу ріжучих периметрів ківшів РО по вісі OY на величину середньої товщини стружки за цикл $c/2$, а після цього надати їм складену швидкість бічної подачі \vec{V}_{bp} , відносно поздовжньої вісі базового шасі, яка буде векторно протилежною швидкості поздовжньої подачі \vec{V}_e до крайнього положення РО біля протилежної стінки забою (рис. 7).

Величина випереджаючої подачі РО функціонально пов'язана з кутом утворення клиновидності стружки γ в плані:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{c}{2b}, \quad (2)$$

де, c – подача машини на забій за час циклу;

b – ширина виїмки, що розробляється РО.

Отже, вирівнювання товщини стружки в плані можливо забезпечити шляхом надання РО додаткового поперечного змінного руху відносно поздовжньої вісі машини OY .

Надання РО додаткового поперечного змінного руху, в процесі розроблення забою стружками рівної товщини в горизонтальній площині XOY , забезпечить:

– рівномірність на протязі циклу (напівциклу) заповнення ківшів робочого органу ґрунтом, що в свою чергу дасть змогу підвищити його продуктивність по виносній здатності під час спорудження виїмок в ґрунті різної ширини (більшої конструктивної ширини ротора) та глибини;

– можливість вирівнювання навантажень на робочому обладнанні, які виникають під час розроблення забою та прямо пропорційні площі стружки, що розробляється;

– підвищення надійності та строків служби механізмів машини та її приводів.

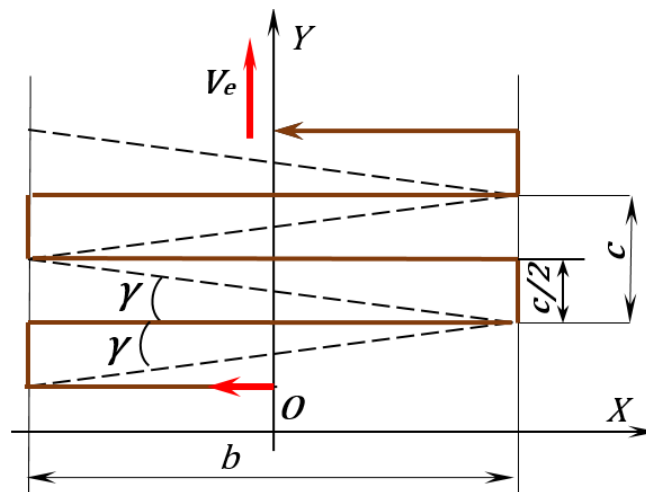


Рисунок 7 – Розроблення забою стружками ґрунту рівної товщини
Figure 7 – Excavation of the face with soil chips of uniform thickness

Оскільки ґрунторозробне робоче обладнання УЗМ є жорсткою конструкцією з фіксованим розміщенням ріжучих периметрів ківшів ротора відносно вісі його обертання, то рух ріжучих периметрів в горизонтальній площині забою, можна охарактеризувати як рух описової точки M положення якої визначається перетином горизонтальної площини, що проходить через вісь обертання ротора та центра зовнішніх периметрів ріжучих кромки.

З урахуванням зазначених умов траєкторія, що описується точкою M за робочий цикл руху РО, за умови виключення поздовжнього переміщення базового шасі ($V_e = 0$), буде мати вигляд лемніскати Бернуллі [15, 16] (рис. 8).

Лемніската Бернуллі – площинна алгебраїчна крива, яка визначається як геометричне місце точок, добуток величини відстаней від яких до двох заданих точок F_1 і F_2 (фокусів) є величиною постійною і дорівнює квадрату половини відстані між фокусами [16]. У декартовій системі координат лемніската Бернуллі описується рівнянням $(x^2+y^2)^2 - 2a^2(x^2 - y^2) = 0$.

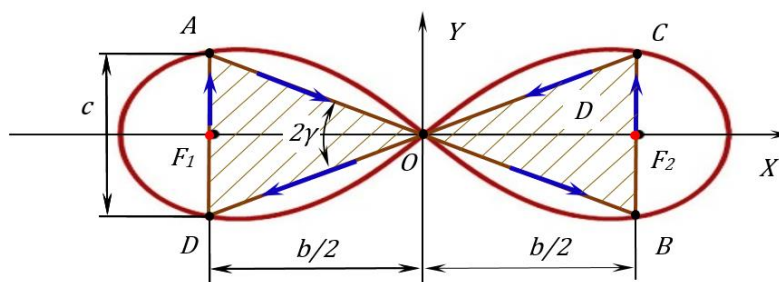


Рисунок 8 – Лемніската Бернуллі. Траєкторія, що описується точкою M
Figure 8 – Bernoulli's lemniscate. Trajectory described by point M

Лемніската Бернуллі, рис. 8, має ряд оригінальних геометричних властивостей [16, 17], а саме: – складається з двох пелюсток, які симетричні відносно точки O , що є центром між її фокусами F_1 і F_2 ;

– крива є геометричним місцем точок, які симетричні відносно точки O і можуть бути окреслені описовою точкою вихідної ланки;

– крива має два максимуми, які рівновіддалені від точки O і відповідають її фокусам F_1 і F_2 , та два мінімуми, що є серединою відрізка між її фокусами;

– відстань від максимуму до мінімуму (F_1O або OF_2), що знаходяться по один бік від серединного перпендикуляру відрізка між фокусами O дорівнює відстані від максимуму (або мінімуму) до точки O ;

– механізми, описова точка вихідної ланки яких описує лемніскату є механізмами циклічної дії.

Таким чином, переміщення РО УЗМ в процесі копання ґрунту по траєкторії, що описується лемніскатою Бернуллі слід вважати “ідеальною”, тобто такою, що відповідає визначеним умовам роботи УЗМ за заданих значень параметрів b , c , V_e і $V_{\text{бп}}$.

Траєкторію руху ріжучих периметрів РО, як деякої функції $y = f(x)$ у декартовій системі координат, можна виразити рівнянням:

$$y = \frac{V_e}{V_{\text{бп}}} x \sqrt{1 - \frac{2^{2n}}{b^{2n}} x^{2n}}, \quad (3)$$

де, V_e , $V_{\text{бп}}$ – швидкості подачі машини на забій та бічної подачі РО;

x – поточне значення координати, що характеризує бічне переміщення РО;

n – натуральне число з $N = 1, 2 \dots$, до того ж $n \rightarrow \infty$.

Для спрощення, в рівняння (3) вводяться обмеження показника ступеня $n=16$, який обрано з конструктивних міркувань. Тоді наближений математичний опис траєкторії можна виразити рівнянням (4), а графічне зображення траєкторії набуде виду (рис. 9), коли її відхилення від ідеальної траєкторії не перевищує 5 %.

$$y = 1,27 \cdot \frac{V_e}{V_{\text{бп}}} \cdot x \sqrt{1 - \frac{4,3 \cdot 10^9}{b^{32}} \cdot x^{32}}. \quad (4)$$

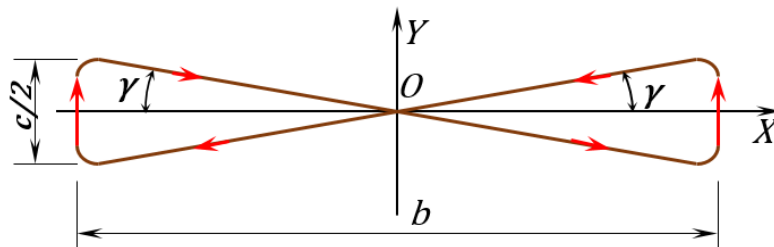


Рисунок 9 – Траєкторія руху центру (точка M) ріжучих периметрів ківшів РО

Figure 9 – Trajectory of the movement of the center (point M) of the cutting perimeters of the operating element's buckets

Слід зауважити, що чим вищий показник ступеня n , тим більше траєкторія переміщення описової точки M вихідної ланки буде набувати вигляду “ідеальної” (див. рис. 9).

Реалізація руху реальної конструкції РО за заданою траєкторією (див. рис. 9) що описується в загальному вигляді рівнянням (3), дозволяє створити УЗМ, що спроможна ефективно розробляти виїмки різної ширини в різних ґрунтових умовах. Це може бути забезпечено за умови виконання рівності:

$$c = y_{\text{max}} = 2b \frac{V_e}{V_{\text{бп}}}, \quad (5)$$

де, $b = const$, $V_{on} = const$, $V_e = var$.

У результаті вище викладеного аналізу, можна стверджувати, що для реалізації переміщення РО за заданою траєкторією, яка описується рівнянням лемніскати Бернуллі, необхідно створити механізм навіски з приводом бічного переміщення, що здатен здійснювати адаптивне керування випереджаючою подачею робочого органу, шляхом застосування необхідного алгоритму переміщення робочого обладнання в залежності від швидкості подачі РО на забій. Величина випереджаючої подачі c РО на забій, в кінці кожного напівциклу, має бути функціонально пов'язана з швидкістю подачі машини V_e на забій та шириною виїмки b .

Такий механізм створено нами [18]. Він являє собою двоконтурний важільний механізм з обертальними парами п'ятого класу. Розроблення ґрунту робочим органом УЗМ забезпечується важільним механізмом подачі ротора на забій з трьома ступенями вільності. Переміщення кожної ланки механізму в горизонтальній площині забезпечується механізмом бічного переміщення РО з індивідуальним приводом повороту кожної ланки, що включає по два гідроциліндри на кожному з ланок.

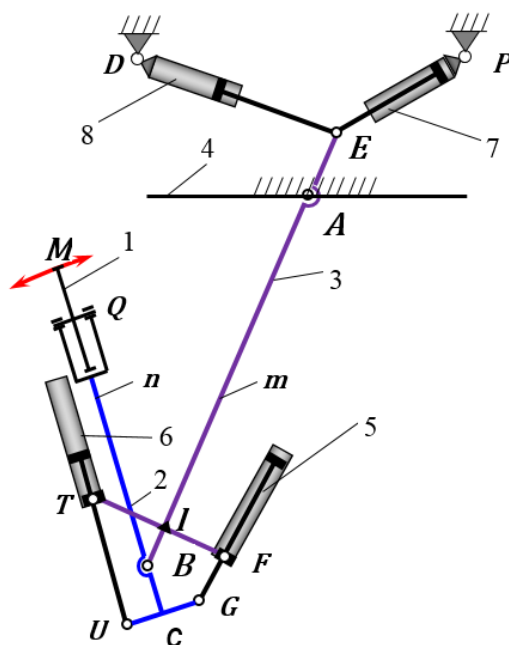


Рисунок 10 – Кінематична схема механізму приводу бічного переміщення РО: 1 – ротор; 2 – рама робочого органу (ланка n); 3 – проміжна рама (ланка m); 4 – навіска робочого органу на кормі базового шасі; 5, 6 – гідроциліндри коливання рами робочого органу; 7, 8 – гідроциліндри коливання проміжної рами

Figure 10 – Kinematic scheme of the lateral displacement mechanism of the operating element: 1 – rotor; 2 – operating element frame (link n); 3 – intermediate frame (link m); 4 – attachment of the operating element on the rear of the base chassis; 5, 6 – hydraulic cylinders for swinging the operating element frame; 7, 8 – hydraulic cylinders for swinging the intermediate frame.

Заглиблення робочого органа універсальної землерийної машини в ґрунт під час спорудження в'їзної апарелі котловану має здійснюватися циклічно, синхронно циклам віяльно-поступальної подачі робочого органа на ґрунт забою.

З урахуванням очевидної необхідності забезпечення розробки ґрунту стружками рівномірної товщини як в горизонтальній, так і у вертикальній площинках забою, заглиблення робочого органа має здійснюватися біля бічних стінок котловану в кінці, чи на початку, кожного напівциклу переміщення робочого органа в режимі копання ґрунту.

Тривалість заглиблення робочого органа УЗМ в кінці кожного напівциклу робочого процесу має забезпечити спорудження дна апарелі під необхідним кутом нахилу α до горизонту. Швидкість заглиблення V_3 знаходиться у функціональній залежності від швидкості V_e подачі робочого органа на забій.

Схеми циклічного переміщення робочого органа в забої під час спорудження в'їзної та виїзної апарелей приведено на рис. 11.

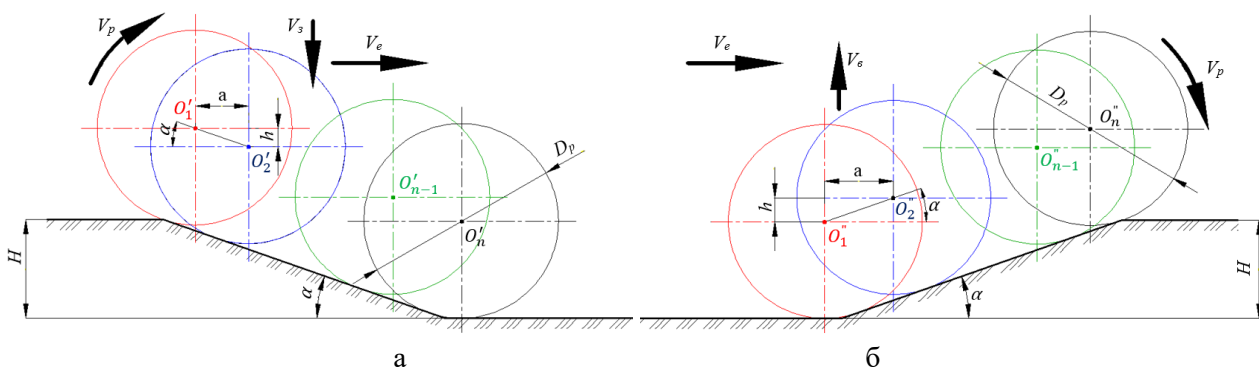


Рисунок 11 – Схеми спорудження апарелей: а – в'їзної; б – виїзної
 Figure 11 – Schemes of construction of ramps: a - entrance; b - outgoing

Величина заглиблення h за кожен напівцикл переміщення робочого органа повинна забезпечити необхідну величину кута нахилу α площини дна апарелі. Кут нахилу площини дна апарелі визначається згідно залежності (див. рис. 8а):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{a}, \quad (6)$$

де a – подача робочого органа УЗМ на забій в напрямку переміщення машини за кожен напівцикл копання ґрунту.

$$a = V_e \cdot t_{\text{н.ц.}}, \quad (7)$$

де $t_{\text{н.ц.}}$ – тривалість напівциклу.

В такому випадку, величина заглиблення робочого органа h за кожен напівцикл визначається згідно:

$$h = a \operatorname{tg} \alpha = V_e t_{\text{н.ц.}} \operatorname{tg} \alpha. \quad (8)$$

Заглиблення має бути здійснено біля бічної стінки котловану за час довороту t_3 проміжної рами робочого органа.

Швидкість заглиблення V_3 в такому випадку визначається:

$$V_3 = V_e \frac{t_{\text{н.ц.}} \operatorname{tg} \alpha}{t_3}. \quad (9)$$

Висновки та рекомендації.

1. Доведена можливість та доцільність створення універсальних землерийних машин безперервної дії здатних без переналаштування робочого обладнання відкопувати в ґрунті траншеї заданих лінійних розмірів, котловани змінних геометричних розмірів, в'їзні та виїзні апарелі котлованів.

2. Аналітичним шляхом визначено необхідну траєкторію переміщення робочого органа УЗМ в забої під час копання котлованів, що являє собою лемніскату Бернуллі.

3. Переміщення по вказаній траєкторії робочого обладнання, забезпечує вирівнювання зовнішніх навантажень на робочому обладнанні машини та підвищення її продуктивності роботи майже в два рази.

4. Розроблено алгоритм та отримано функціональні залежності, що регламентують роботу УЗМ безперервної дії в процесі спорудження в'їзної та виїзної апарелей котлованів.

5. Розроблено технічну пропозицію по створенню конструкції механізму навішування на базове шасі роторного робочого обладнанням УЗМ, здатного в процесі копання котловану переміщувати робочий орган в забої по траєкторії, що забезпечує вирівнювання товщини стружки в плані, та споруджувати в'їзну і виїзну апарелі котловану з необхідним нахилом дна апарелі до горизонту.

Перелік посилань

1. Быков А.В. Исследование конструктивно-кинематических параметров цепнобалочного рабочего органа универсальной землеройной машины: дис. канд. тех. наук : 05.05.04. К., 1986. 205 с.

2. А.с. 488036 СССР : F 16g 13/12. Цепь одностороннего перегиба / А. А. Кавалеров, А. В. Быков. № 1897267/25-27; заявл. 09.03.1973; опубл. 15.10.1975, Бюл. № 38.

3. А.с. СССР, E02 F 5/06. Рабочий орган землеройной машины / А. В. Быков, А. А. Кавалеров, Ю.Г. Коцюба, Б.М. Глазман : № 2367494/29-03; заявл. 04.07.1976; опубл. 30.06.1978, Бюл. № 24 – 3 с.

4. Кудра С.Е., Быков А.В. Цепно-балочный рабочий орган универсальной землеройной машины : Строительные и дорожные машины. № 12. М., 1979. – С. 6–7.

5. Проведення тензометричних випробувань машини ПЗМ-3-01: Звіт про НДР / НТУ; кер. Мусійко В.Д.; вик.: Коваль А.Б., Лазарук Ю.В., Ніколаєнко В.А. - № д.р. 0117U001719. - Київ, 2017. 61 с.

6. Juraj Gerlici, Volodymyr Musiiko, Andrii Koval, Volodymyr Nikolaenko, Jurii Lazaruk, Tomas Lack, Kateryna Kravchenko. Experimental analysis of the universal continuous digging machine working processes // Manufacturing technology. Vol. 20, issue 4, 2020. - Pp. 429-435. <https://doi.org/10.21062/mft.2020.066>.

7. Экспериментальные исследования рабочих процессов перспективных землеройных машин с целью определения их основных параметров. Отчет о НИР / Киев. Автом.-дор. ин-т. ; рук. Маевский А.Г. ; исполн.: Мусийко В.Д. [и др.]. – К., 1983. – 146 с. – Библиогр.: с. 144–146. – № ГР 01.84.0000355 – Инв. № 0283.0086514.

8. Определение оптимальных кинематических параметров рабочего процесса и компоновочного решения универсальной роторной землеройной машины. Отчет о НИР / Киев. автом.-дор. ин-т. ; рук. Мусийко В.Д. ; исполн.: Коваль А.Б., Лейченко Ю.Б., Маслов В.Ф., Варфоломеев Ю.М., Юрчиков Б.В., Федорков В.И., Бережнюк В.И. – К., 1987. – 196 с. – № ГР 01.86.0017418; Инв. № 02880051223.

9. Ніколаєнко В.А. Створення мобільної землерийної машини безперервної дії за критерієм динамічної навантаженості. : дис. ... канд. техн. наук 05.05.04. Київ, 2020. – 259 с.
10. Хмара Л.А. Интенсификация рабочих процессов машин для земляных работ. – Днепропетровск: ДИСИ, 1989. – 329 с.
11. S. Kravets, V. Suponyev, A. Goronov, S. Kovalevskiy, A. Koval Determination efficient operating modes and sizes of blades for multi-scraper trench excavators. Eastern-European journal of enterprise technologies. 2020. № 4/1(16). С. 23–28. DOI:10.15587/1729-4061.2020.208957.
12. Мусійко В.Д. Екскаратори поздовжнього копання: навч. посібник. – К.: НТУ, ЗАТ “Віпол”, 2008. 240 с.
13. Мусійко В.Д., Коваль А.Б., Лазарук Ю.В. Проблеми, напрямки та перспективи створення і модернізації землерийних машин безперервної дії спеціального призначення : Вісник Національного транспортного університету. Серія “Технічні науки”. 2021. Вип. № 1 (48). С. 223-232. DOI:10.33744/2308-6645-2021-1-48-223-232.
14. Фізика для бакалаврів. Механіка. URL: <http://physics.zffit.kpi.ua/mod/book/view.php?id=272&chapterid=692> (Дата звернення: 29.11.2023).
15. Савелов А.А. Плоские кривые. Систематика, свойства, применение. Справочное руководство. Госиздат физ.-мат. литературы, 1960. 296 с.
16. Тютюн Л.А., Тимчишена І.А. Чудові властивості та застосування лемніскати Бернуллі. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/pmovc/pmovc/paper/viewFile/5619/4755>.
17. Mashadi M., Deswita L., Suprika G. Alternative constructs of the lemniscate of bernoulli. Journal of Physics: Conference Series, 2019, Universitas Negeri Padang, Padang City, Indonesia. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1554/1/012071>.
18. Створення траншейно-котлованих універсальних землерийних машин безперервної дії. Звіт про наук. досл. роб. НТУ; кер. Дем'янюк В.А.; вик. Мусійко В.Д. [та ін.]. НТУ, Київ, 2016. № д-р. 0115U002269. 164 с.

INCREASING THE EFFICIENCY AND EXPANDING THE TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF THE UNIVERSAL EARTH-MOVING MACHINERY BY IMPROVING THE KINEMATICS OF THE MOVEMENT OF THEIR OPERATING ELEMENT IN THE SOIL

Volodymyr Musiiko, Doctor of Technical Science, National Transport University, Head of the Department of engineering of transport construction machines, e-mail: musvd48@gmail.com, +380501040262, <https://orcid.org/0000-0001-9983-3296>, SCOPUS id 57221283646

Andrii Koval, PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor, Associate Professor of Department of engineering of transport construction machines, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: kandr6104@gmail.com, +3805002408947, <https://orcid.org/0000-0003-1295-8200>, SCOPUS id 57220055768

Yuri Lazaruk, Doctor of Philosophy, Deputy Head of Department, Military Unit A4629, e-mail: layuvo@ukr.net, tel. +380975761709, <https://orcid.org/0000-0002-2019-0687>, SCOPUS id 57221291717

Yuri Pasenko, master of Science, graduate student of Department of engineering of transport construction machines, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: 280bar@gmail.com, tel. +380675022751, <https://orcid.org/0000-0002-2986-8781>

Summary. This article addresses the creation and optimization of designs for Universal Continuous-Action Earthmoving Machines (UCAEM) capable of excavating extensive trenches of various widths, depths, and shapes without structural changes to the operating equipment. The paper provides a detailed rationale for the relevance and practical feasibility of developing continuous-action universal earthmoving machines.

Analytically, the required trajectory of movement for the soil excavation operating element of UCAEM in the process of constructing wide trenches (excavations) in the soil is determined. This trajectory resembles a Bernoulli lemniscate, along which the operating element of UCAEM moves to excavate the soil in evenly thick planar chips. This enables the construction of trenches in the soil with maximum work productivity, minimizing external loads on the earthmoving machine's operating element.

To implement the above, a physical model of the rotary operating equipment of UCAEM was created, and experimental studies were conducted. The design of the UCAEM operating element movement drive is based on a two-circuit lever mechanism with fifth-class rotary pairs, providing the delivery of the soil-excavating operating element to the soil face. Soil excavation is carried out in the mode of fan-linear feed of the operating element to the face. The movement of the operating element in the face is performed by a lever mechanism with three degrees of freedom, each link of the mechanism is provided with an individual turning drive using a pair of hydraulic cylinders relative to the hinge of its attachment.

An algorithm for the operation of the drive for the movement to the face of the two-circuit soil-excavating rotary operating equipment of continuous-action UCAEM has been synthesized, providing soil excavation with chips of uniform thickness in plan, regardless of the width of the trench, and consequently, increasing the productivity of the machine's operation.

Equalization of the chip thickness in plan is achieved by turning the intermediate frame of the operating element at the end of each half-cycle of the working process.

An algorithm for the movement of the operating element during the construction of entry and exit ramps during the construction of trenches in the soil over several passes of the operating element has been justified.

Keywords: universal continuous-action earthmoving machine, operating element, hydraulic drive, soil, trench, algorithm, ramp

References

1. Bykov, A.V. Issledovanye konstruktivno-kinematycheskikh parametrov tsepnobalochnoho rabocheho organa unyversalnoy zemleroynoy mashyny (Investigation of the structural-kinematic parameters of the chain-working apparatus of a universal earthmoving machine. Doct. Diss.) Kyiv, 1986, 205 p. [in Russian].
2. A.s. SSSR, E02 F 5/06. Tsep odnostoronnego szgiba (One-way bend chain) A.A. Kavalero, A.V. Bykov. No. 488036; zajavl. 09.03.1973; opubl. 15.10.1975, Bjul. No. 38. [in Russian].
3. A.s. SSSR, E02 F 5/06. Robochiy organ zemleroynoi mashiny (Operating element of earthmoving machines) A.V. Bykov, A.A. Kavalero, Yu.G. Kotsyuba, B.V. Glazman. No. 613026, zajavl. 04.07.1976; opubl. 30.06.1978, Bjul. № 25 [in Russian].
4. Kudra S.E., Bykov A.V. Tsepno-balochnyy rabochiy organ unyversalnoy zemleroynoy mashyny (Chain-working apparatus of a universal earthmoving machine) Stroitelnye i dorozhnye mashyny ([Building and road machines) Moscow, 1979, No 12, S. 6-7 [in Russian].
5. Musiiko V.D., Koval A.B., Lazaruk Y.V., Nikolaenko V.A. Provedennia tenzometrychnykh vyprobuvan mashyny PZM-3-01 (Conducting of PZM-3-01 mashine strain testing). Kyiv, National Transport University, 2017. 61 p. 7 [in Ukrainian].

6. Juraj Gerlici, Volodymyr Musiiko, Andrii Koval, Volodymyr Nikolaenko, Jurii Lazaruk, Tomas Lack, Kateryna Kravchenko. Experimental analysis of the universal continuous digging machine working processes // Manufacturing technology. Vol. 20, issue 4, 2020. - Pp. 429-435. <https://doi.org/10.21062/mft.2020.066>.
7. Maevskiy A.G., Musiyko V.D. Eksperimentalnye issledovaniya rabochikh protsesov zemleroynykh mashyn s tselyu opredeleyiya ikh osnovnykh parametrov (Experimental research of working processes perspective earthmoving machines to determine their basic parameters). Kiev, Kiev Automobile and Highway Institute, 1983. 146 p. [in Russian].
8. Musiyko V.D., Koval A.B., Leychenko Yu.B., Maslov V.F., Varfolomeev Yu.M., Yurchikov B.V., Fedorkov V.I., Berezhenyuk V.I. Opredelenie optimalnykh kinematicheskikh parametrov rabocheho protsessa i komponovochnogo resheniya universalnoy rotnoy zemleroynoy mashyny (Determination of optimal kinematic parameters of the working process and the layout decision of the multipurpose earth-moving machine). Kiev, Kiev Automobile and Highway Institute, 1987. 196 p. [in Russian].
9. Nikolaenko, V.A. Stvorennia mobilnoi zemleryinoi mashyny bezperervnoi dii za kryteriem dynamichnosyi navantazhenosti. (The mobile continuous action earth-moving machine creation on the dynamic load. Doct. Diss.) Kyiv, 2020. – 259 p. [in Ukrainian].
10. Khmara L.A. Intensifikatsiya rabochikh protsesov mashyn dlya zemlyanykh robot. (Intensification of work processes of earthmoving machines) – Dnepropetrovsk: DISI, 1989. – 329 p. [in Russian].
11. S. Kravets, V. Suponyev, A. Goponov, S. Kovalevskiy, A. Koval Determination efficient operating modes and sizes of blades for multi-scraper trench excavators. Eastern-European journal of enterprise technologies. 2020. № 4/1(16). С. 23–28. DOI:10.15587/1729-4061.2020.208957.
12. Musiiko V. D. Ekskavatory pozdovzhnoho kopannia (Continuous action excavators). Kyiv, “Vipol”, 2008. – 240 p. [in Ukrainian].
13. Musiyko V.D., Koval A.B., Lazaruk Y.V. Problems, directions, and horizons in the creation and modernization of specialized continuously operating earthmoving machines. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2021. – Issue 1 (48). p.p. 223-232 DOI:10.33744/2308-6645-2021-1-48-223-232 [in Ukrainian].
14. Fizyka dlia bakalavriv. Mekhanika. (Physics for bachelors. Mechanics) URL: <http://physics.zffft.kpi.ua/mod/book/view.php?id=272&chapterid=692> [in Ukrainian].
15. Savelov A.A. Ploskie krivye. Sistematika, svoystva, primenenie. Spravochnoe rukovodstvo. (Flat curves. Systematics, properties, application. Help Guide) Госиздат физ.-мат. литературы. 1960. 296 p. [in Russian].
16. Tiutin L.A., Tymchyshena I.A. Chudovi vlastyvoli ta zastosuvannia lemniskaty Bernylli (Wonderful properties and applications of Bernoulli's lemniscate) URL: <http://physics.zffft.kpi.ua/mod/book/view.php?id=272&chapterid=692> [in Ukrainian].
17. Mashadi M., Deswita L., Suprika G. Alternative constructs of the lemniscate of bernoulli. Journal of Physics: Conference Series, 2019, Universitas Negeri Padang, Padang City, Indonesia. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1554/1/012071>.
18. Demianiuk V., Musiyko V., Koval A., Vysokovych E., Makii Yu. Stvorennia transheynekotlovannykh universalnykh zemleryinykh mashyn bezperervnoi dii. (Design of the continuously operating trench- and pit digging machines), Kyiv, National Transport University, 2016. 164 p.