

АНОТАЦІЯ

Лазарук Ю.В. Підвищення ефективності універсальних землерийних машин удосконаленням конструктивних та кінематичних параметрів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування». – Національний транспортний університет, Київ, 2023.

Транспортне, цивільне та промислове будівництво, фортифікаційне обладнання позицій, рубежів, районів та пунктів управління під час підготовки і ведення війн і збройних конфліктів, як в Україні, так і за її межами, пов'язано з розробкою та переміщенням сотень тисяч кубічних метрів ґрунту. Виконання таких об'ємів робіт можливе виключно з використанням високопродуктивних землерийних машин, в першу чергу екскаваторів безперервної дії продуктивність яких в чотири – шість разів більша продуктивності одноківшевих екскаваторів. Такими землерийними машинами швидко та ефективно можуть бути розроблені траншеї різного цільового призначення, канали, котловани, дренажні системи. Використання з цією метою екскаваторів безперервної дії дозволяє підвищити в декілька разів продуктивність праці і тим самим прискорити темпи будівництва наприклад трубопроводів різного призначення, електро- та телекомунікаційних мереж, обладнання фортифікаційних споруд.

Конструкції та технічні рішення землерийних машин (ЗМ) безперервної дії, відомі на цей час, мають принциповий недолік – малу універсальність, а опубліковані результати наукових досліджень, у напрямку створення універсальних землерийних машин безперервної дії (УЗМ), носять несистемний характер та не враховують в повній мірі особливості, що характерні саме для цього класу машин. Традиційні конструкції машин мають, як правило, високу енергоємність розробки ґрунту, більшу металоємність, меншу надійність. Без врахування необхідності усунення вказаних недоліків

неможливе створення ефективних конструкцій робочого обладнання землерийних машин безперервної дії, оптимального його завантаження у процесі розробки ґрунту і, як результат, – забезпечення високої продуктивності під час розроблення ґрунтів різних категорій складності.

Саме тому, створення принципово нових конструкцій землерийних машин безперервної дії здатних одним і тим самим робочим органом (РО), без його конструктивних змін, здійснювати відкопування протяжних виїмок різних лінійних розмірів (УЗМ) у різних ґрунтових умовах є актуальним завданням. Вирішення цього завдання значною мірою розширить сферу використання високоефективних землерийних машин під час будівництва капітальних об'єктів різного технологічного призначення, при виконанні робіт по рекультивації ґрунтів на забруднених територіях, фортифікаційному обладнанні місцевості та об'єктів, збільшить ефективність виробництва машин завдяки підвищенню обсягів серійного виготовлення однотипових машин подвійного використання.

За результатами дисертаційної роботи встановлено наступне.

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій теоретично узагальнено та практично вирішено важливу науково-технічну задачу підвищення ефективності універсальних землерийних машин (УЗМ) безперервної дії, здатних відкопувати в ґрунтах протяжні виїмки різних лінійних розмірів та технологічного призначення шляхом удосконалення конструктивних параметрів та кінематики переміщення робочого органу (РО) в забої без переналагодження робочого обладнання. Це дає можливість розширення сфери застосування землерийних машин безперервної дії поздовжнього копання, підвищення ефективності виробництва завдяки збільшенню обсягів серійного виготовлення однотипових машин та їх подвійного використання.

1. Аналіз існуючих конструкцій УЗМ безперервної дії, їх робочого обладнання та процесів копання широких виїмок в ґрунті свідчить, про відсутність системного наукового підходу до вибору конструкцій робочого

обладнання та машини в цілому. Технічні можливості відомих конструкцій робочого обладнання УЗМ досягли своєї досконалості, а резерви підвищення їх продуктивності практично вичерпано.

2. Встановлено, що реалізація дволанкової, двовісної схеми навіски РО на базове шасі з індивідуальним приводом бічного переміщення кожної з ланок забезпечує розробку ґрунту стружками рівномірної товщини в режимі віяльно-поступальної подачі на забій під час копання широких виїмок.

3. Вперше синтезовано механізм та алгоритм приводу переміщення в забої дволанкового, двовісного ґрунторозробного роторного робочого обладнання УЗМ безперервної дії, що забезпечує розроблення ґрунту стружками рівномірної товщини не залежно від ширини виїмки. Вирівнювання товщини стружки в плані забезпечується шляхом довороту проміжної рами робочого органу в кінці кожного напівциклу робочого процесу.

Експериментально підтверджено адекватність розробленої математичної моделі функціонування робочого обладнання УЗМ при розробленні виїмок шириною 3 – 4,5 м в режимі максимальної продуктивності машини. Відхилення величини товщини розроблюваної стружки від розрахункової не перевищує 3,7 %.

5. Експериментально підтверджено можливість розробки ґрунту стружками рівномірної товщини в плані роторним робочим органом УЗМ за умови його віяльно-поступального переміщення в забої по траєкторії, що подібна до лемніскати Бернуллі, завдяки довороту проміжної рами робочого органу в кінці кожного напівциклу робочого процесу, при стабільній роботі гідроприводів РО.

Силві навантаження на робочому обладнанні змінюється від нуля до певного максимуму за кожен напівцикл. Максимальні значення силового навантаження в кінці кожного напівциклу, без довертання проміжної рами робочого органу, становлять: крутний момент на роторі – $67 \div 74$ кНм; сила тяги на робочому органі – $19 \div 21$ кН; бічна сила на РО – $70 \div 80$ кН.

За тих самих умов, при довертанні проміжної рами в кінці кожного напівциклу робочого процесу, силві навантаження на робочому обладнанні УЗМ знижуються і стабілізуються, а їх максимальні значення становлять:

крутний момент на роторі – $45 \div 48$ кНм; сила тяги на робочому органі – $15 \div 17$ кН; бічна сила на РО – $35 \div 45$ кН.

Результати експериментальних досліджень отримано з величиною відносної похибки вимірювань 10 % за довірчої вірогідності 0,95 і повторюваністю дослідів 5.

Застосування створеного механізму переміщення РО в забої з адаптивним до швидкості руху машини керуванням дозволяє зменшити: крутний момент на роторі – на 34 %; силу тяги на робочому обладнанні – на 20 %; бічну силу на робочому органі – на 47 %.

6. Експериментально визначено закономірність зміни тривалості довертання проміжної рами РО, що забезпечує розроблення ґрунту стружками незмінної товщини в залежності від швидкості подачі машини, що покладено в основу алгоритму керування переміщенням робочого органу в забої. Оптимальна тривалість довертання проміжної рами у режимі максимальної продуктивності складає 1,1 с, що дозволяє зменшити максимальні навантаження на робочому обладнанні до 80 %.

Технічна пропозиція по створенню конструкції робочого обладнання УЗМ полягає в оригінальності механізму навішування ґрунторозробного ротора на базовому шасі та алгоритму його переміщення в забої в процесі копання ґрунту, захищена патентом України на винахід № 114779, а її реалізація забезпечує збільшення технічної продуктивності робочого обладнання машини в 1,9 – 2 рази порівняно з відомими аналогами УЗМ безперервної дії.

8. Підтверджена робоча гіпотеза дослідження, що підвищення продуктивності роботи машини, мінімізація та вирівнювання зовнішніх навантажень на робочому органі УЗМ в процесі копання широких виїмок в ґрунті забезпечується шляхом вирівнювання товщини стружки ґрунту, що зрізується робочим органом впродовж робочого циклу в режимі віяльно-поступального переміщення в забої.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у вирішенні важливої науково-технічної задачі – створення нового типу роторного робочого

обладнання універсальної землерийної машини безперервної дії підвищеної продуктивності, що досягається завдяки переміщенню робочого органу в забої по траєкторії, яка описується рівнянням лемніскати Бернуллі та обумовлює вирівнювання і зниження зовнішніх навантажень на робочому органі завдяки розробленню ґрунту стружками рівномірної товщини.

Вперше: – розроблено алгоритм та механізм переміщення дволанкового, двошарнірного ґрунторозробного робочого органу УЗМ в забої, що забезпечує розроблення ґрунту стружками рівномірної товщини не залежно від ширини виїмки;

– створено математичну модель функціонування УЗМ безперервної дії відповідно до розробленого алгоритму переміщення робочого органу в процесі віяльно-поступальної подачі робочого обладнання на забій;

– встановлено функціональну залежність тривалості довертання проміжної рами ґрунторозробного роторного робочого органу в кінці кожного напівциклу копання широких виїмок в ґрунті, залежно від швидкості подачі РО.

Удосконалено схему та механізм реалізації адаптивного переміщення роторного робочого органу УЗМ в забої залежно від швидкості подачі машини.

Отримали подальшого розвитку методологія фізичного і фізико-математичного моделювання в процесі проведення тензометричних випробувань моделі робочого органу УЗМ з використанням стенда фізико-математичного моделювання та універсальної тензометричної підвіски для визначення просторового навантаження робочого обладнання УЗМ під час копання ґрунту.

Практичне значення отриманих результатів полягає у:

- розробленні технічної пропозиції по створенню конструкції робочого обладнання УЗМ, що працює у режимі віяльно-поступальної подачі на забій зі спроможністю копання в ґрунті широких протяжних виїмок різних лінійних розмірів без конструктивного переналаштування;

- підвищенні ефективності робочого обладнання УЗМ удосконаленням кінематики приводу переміщення дволанкового, двошарнірного робочого органу в забої, що забезпечує копання широких протяжних виїмок в ґрунті

стружками рівномірної товщини та мінімізацію зовнішнього силового навантаження машини;

- розробленні механізму переміщення дволанкового, двошарнірного ґрунторозробного роторного робочого органу УЗМ з адаптивним керуванням в процесі копання широких виїмок у ґрунті.

Реалізація результатів досліджень, дозволила розробити технічну пропозицію для створення високоефективної УЗМ, що захищена патентом України на винахід № 114779, технічна продуктивність якої у 1,9 – 2 рази вища існуючих аналогів.

Теоретичні та практичні результати роботи, що отримані при проведенні дисертаційних досліджень використовують у навчальному процесі Національного транспортного університету (м. Київ) на кафедрі інженерії машин транспортного будівництва при підготовці фахівців спеціальності 133 – “Галузеве машинобудування”, а також використовуються в діяльності ПрАТ Промислово-виробничий інститут зварювально-ізоляційних технологій при будівництві трубопроводів “Нафтогазбудізоляція”.

Ключові слова: універсальна землерийна машина, землерийні машини безперервної дії, роторний робочий орган, універсальна землерийна техніка, машини для земляних робіт, ґрунт, копання ґрунту, планування траєкторії, керування рухом, модель, математична модель, фізична модель, масштаб, експеримент, переміщення, швидкість, швидкість руху, поперечна площа, сила, навантаження, крутний момент, ефективність, конструктивні параметри, кінематичні параметри, алгоритм, процес, ротор, навіска.

Список публікацій здобувача

Публікації у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Lazaruk J., Musiiko V., Koval A. Experimental analysis of the universal continuous digging machine working processes. 2020. Vol. 4. – P. 429-435. DOI: <https://doi.org/10.21062/mft.2020.066>.

URL: http://journalmt.com/artkey/mft-202004-0006_experimental-analysis-of-the-universal-continuous-digging-machine-working-processes.php. (SCOPUS).

2. Lazaruk J., Musiiko V., Honchar M., Nikolaienko V., Korpach A. Optimization of the motion algorithm and reduction of the external dynamic load of the machinery actuator in translational and rotational modes. Symmetry 2022, 14, 51. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14010051>.

URL: <https://www.mdpi.com/2073-8994/14/1/51> (ORCID).

Публікації у наукових фахових виданнях України:

3. Лазарук Ю.В., Мусійко В.Д., Коваль А.Б. Проблеми модернізації землерийних машин безперервної дії : *Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних сил України*, 2017., № 3т (70). С. 181-190.

4. Лазарук Ю.В., Мусійко В.Д., Коваль А.Б. Проблеми, напрямки та перспективи створення і модернізації землерийних машин безперервної дії спеціального призначення : *Вісник Національного транспортного університету. Серія “Технічні науки”. Науково-технічний збірник*. К.: НТУ, Вип. № 1 (48). 2021. С. 223-232. DOI: 10.33744/2308-6645-2021-1-48-223-232.

URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/48/223-232.pdf>.

Публікації апробаційного характеру:

5. Лазарук Ю.В., Холодний Ю.Ф., Довбня В.В. Модернізація полкової землерийної машини ПЗМ-3 з метою придання об’єкту нових тактико-технічних властивостей : тези доп. *Міжн. наук.-техн. конф. “Перспективи розвитку озброєння та військової техніки СВ”*. (Львів, 18 – 20 трав. 2016) / Львів, нац. акад. сух. Військ - Львів, 2016. С. 281 – 282.

URL: https://www.asv.mil.gov.ua/content/nauka/2016/18-20-05-2016_conf.pdf.

6. Лазарук Ю.В., Мусійко В.Д., Коваль А.Б., Холодний Ю.Ф. Напрямки створення та модернізації землерийних машин інженерного озброєння. *Збірн. тез доп. IV Всеукр. наук.-практ. конф.* (Одеса, 07 – 08 вер. 2017). Воєн. акад. - Одеса, 2017.: С. 116 – 117. URL: <https://vaodesa.mil.gov.ua/>.

7. Лазарук Ю.В., Мусійко В.Д. Модернізація землерийних машин для фортифікаційного обладнання позицій військ. *Матеріали LXXIII наук. конф. професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структур. підрозд.* - К.: НТУ, 2017. С. 21.

URL: <https://drive.google.com/file/d/1GyK8BsnakngvopAADyWv3l4kEA22yhEs/view>.

8. Лазарук Ю.В., Коваль А.Б., Гончар М.О. Проблеми модернізації землерийних машин безперервної дії. *Тези доп. V Міжн. наук.-практ. конф. XIV Міжн. спец. вист. “Зброя і безпека-2017”.* (Київ, 11-12 жов. 2017). - К.: 2017. С. 345-346.

9. Лазарук Ю.В., Мусійко В.Д. Підвищення продуктивності універсальних траншейно-котлованих землерийних машин. *Тези доп. LXXIV наук. конф. професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів НТУ.* - К.: НТУ, 2018. С. 18-19.

URL: https://drive.google.com/file/d/1_uA1WGugEVOGtLukG_ZMX71VgXPIq98l/view.

10. Лазарук Ю.В., Коваль А.Б., Горковенко О.В. Перспективи створення військово-інженерних землерийних машин безперервної дії. *Тези доп. VI Міжн. наук.-практ. конф. XV Міжн. спец. вист. “Зброя і безпека – 2018”.* (Київ, 11-12 жов. 2018) - К.: 2018, С. 281-283.

11. Лазарук Ю.В., Мусійко В.Д. Досвід модернізації машин подвійного призначення. *Матеріали LXXV наук. конф. професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів НТУ.* - К.: НТУ, 2019. С. 21.

URL: <https://drive.google.com/file/d/16Vrd9t8qiaZrTaTmPzz5lqtihzjtrjsf/view>.

12. Лазарук Ю.В., Мусійко В.Д., Коваль А.Б. Експериментальні дослідження універсальних землерийних машин на стенді фізичного

моделювання. *Тези доп. LXXVI наук. конф. професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів НТУ.* - К.: НТУ, 2020. С. 20-21.

URL: <https://drive.google.com/file/d/16Vrd9t8qiaZrTaTmPzz5lqtihzjtrjsf/view>.

13. Лазарук Ю.В., Мусійко В.Д., Варфоломеєв Ю.М. Теоретичні передумови оптимізації конструктивних і кінематичних параметрів робочого обладнання універсальних землерийних машин. *Тези доп. LXXVII наук. конф. професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів НТУ.* - К.: НТУ, 2021. С. 20.

URL: https://drive.google.com/file/d/1ueDfCu-mBO1oTk1-nKHgyDCsnBy_sab5/view.

14. Лазарук Ю.В., Мусійко В.Д., Коваль А.Б. Синтез алгоритму функціонування робочого органу універсальної землерийної машини та комп'ютерне моделювання його переміщення. *Тези доп. LXXVIII наук. конф. професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів НТУ.* - К.: НТУ, 2022. - С. 15.

DOI:10.33744/2786-6459-2022-78. URL: <https://drive.google.com/file/d/1yhVlySer3EHbJt98UoRZEW94NhxOzk7/view>.

15. Лазарук Ю.В., Мусійко В.Д., Коваль А.Б. Розвиток засобів механізації дорожніх та земляних робіт в сучасних умовах : *Тези доп. Наук.-практ. семінар.* (Київ, 28 жов. 2021) / Центр. наук.-досл. інст. озбр. та військ. техн. Збр. Сил Укр. – К.: 2021. С. 24 – 30.

Патенти на винахід:

16. Універсальна землерийна машина : пат. № 114779 Україна : E02F 3/00; № а 2012 09065 ; заявл. 10.02.2017 Бюл. №3; опубл. 25.07.2017, Бюл. №14.

ABSTRACT

Lazaruk Yu.V. Improving the efficiency of universal earthmoving machinery by perfecting structural and kinematic parameters. – Research paper printed as manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 133 – Industrial Engineering. – National Transport University, Kyiv, 2023.

When preparing and conducting wars and armed conflicts both in Ukraine and abroad, transport, civil and industrial construction, fortification of positions, boundaries, districts and control points is associated with the development and movement of hundreds of thousands of cubic meters of soil. Such work is possible due to high-performance earthmoving machinery, primarily continuous excavators, the productivity of which is four to six times more than the productivity of single-bucket excavators. Such earthmoving machinery can quickly and efficiently develop trenches for various purposes, such as canals, pits, drainage systems. The use of continuous excavators for this purpose enables to improve labor productivity several times. Therefore, the construction pace of pipelines of various purposes, electrical and telecommunication networks, fortification structures, for example, is accelerated.

Currently known designs and technical solutions of continuous earthmoving machinery (EM) have a fundamental drawback - low universality. Moreover, the research results, published in regard to creating universal continuous earthmoving machinery (UEM), are non-systematic and do not fully take into account the peculiarities typical for this type of machinery. As a rule, compared to single-bucket universal excavators, traditional machinery designs have high energy consumption of soil development, higher metal capacity, lower reliability. Unless the specified disadvantages are eliminated, it is impossible to create effective designs of the continuous earthmoving machinery operating equipment and to optimally load it when developing the soil. As a result, it makes it impossible to ensure high productivity of soil development of different complexity.

Thus, the creation of fundamentally new designs of continuous earthmoving

machinery capable with the same activator, without its structural changes, to excavate long trenches of different linear sizes (by UEM) in different soil conditions is an urgent problem. Solving this problem will greatly expand the scope of the use of highly efficient earthmoving machinery when constructing the facilities of various technological purposes, when reclaiming the soils on contaminated territories, fortifying the area and facilities. It will also improve the efficiency of machinery manufacture due to the increase in serial production of the same type machinery for dual use.

According to the results of the thesis, the following findings were established.

The thesis is a completed research paper which theoretically summarizes and practically solves the important scientific and technical problem of improving the efficiency of continuous universal earthmoving machinery (UEM). It is capable to excavate long trenches of various linear sizes and technological purposes in the soil without readjusting the operating equipment by improving structural parameters and the kinematics of the actuator movement in the face. It makes it possible to expand the scope of application for continuous earthmoving machinery of longitudinal digging, to improve the efficiency of production due to the increase in serial production of machinery of the same type and its dual use.

1. The analysis of the existing continuous UEM designs, its operating equipment and the processes of digging wide trenches in the soil shows the lack of a systems scientific approach to selecting the operating equipment designs and the machinery as a whole. The technical capabilities of the known UEM operating equipment designs have reached their perfection

2. It has been established that the implementation of a two-link, double-axis scheme of the actuator mounting on the base chassis with an individual drive for lateral movement of each of the links ensures soil development with shavings of uniform thickness in the mode of translational and rotational supply to the face when digging wide trenches.

3. The drive mechanism and algorithm for moving the two-link, double-axis soil development rotor operating equipment of continuous UEM in the face have been

synthesized for the first time. It provides soil development with shavings of uniform thickness regardless of the trench width. The shaving thickness is aligned in the plan by additional rotation of the actuator intermediate frame at the end of each half cycle of the operating process.

4. The adequacy of the developed mathematical model of the UEM operating equipment operation has been confirmed experimentally when developing 3-4.5 m wide excavations in the mode of maximum machinery performance. The deviation of the developed shaving thickness from the calculated value does not exceed 3.7%.

5. It has been experimentally confirmed the possibility to develop the soil with shavings of uniform thickness in the plan by the UEM rotor actuator under the condition of its translational and rotational movement in the face along a trajectory similar to Bernoulli's lemniscate. It is possible due to the additional rotation of the rotor intermediate frame at the end of each half-cycle of the operating process and with stable operation of the actuator hydraulic drives.

The loads on the operating equipment vary from zero to a certain maximum for each half cycle. The maximum values of the load at the end of each half-cycle without the additional rotation of the intermediate frame are: torque on the rotor – $67 \div 74$ kNm; traction force on the operating equipment – $19 \div 21$ kN; lateral force on the operating equipment – $70 \div 80$ kN.

Under the same conditions, when the intermediate frame is additionally rotated at the end of each half-cycle of the operating process, the loads on the UEM operating equipment decrease and stabilize. Their maximum values are: torque on the rotor – $45 \div 48$ kNm; traction force on the operating equipment – $15 \div 17$ kN; lateral force on the operating equipment – $35 \div 45$ kN.

The results of experimental studies were obtained with a relative error of 10% at a confidence level of 0.95 and a repeatability of experiments of 5.

The use of the developed mechanism for the actuator movement in the face with the control adaptive to the speed of the machinery enables to reduce torque on the rotor by 34%; traction force on the operating equipment by 20%; lateral force on the actuator by 47%.

6. The regularity of the change in the duration of the actuator intermediate

frame additional rotation has been determined experimentally. It ensures the soil development with shavings of constant thickness depending on the speed of the machinery supply. It has been the basis of the algorithm for controlling the actuator movement in the face.

The optimal duration of the intermediate frame additional rotation in the mode of maximum productivity is 1.1 s. It enables to reduce the maximum loads on the operating equipment by up to 80%.

7. A technical proposal has been developed regarding the creation of the UEM operating equipment design. The proposal implies the originality of the mechanism for hanging the soil development rotor on the base chassis and the algorithm of its movement in the face when digging the soil. The suggested technical proposal was protected by a patent for the invention of Ukraine No. 114779. Its implementation ensures the increase of operational productivity of the machinery operating equipment by 1.9-2 times compared to the known similar continuous UEM.

8. The working hypothesis has been confirmed that machinery productivity improvement, minimization and equalization of external loads on the actuator of the continuous UEM when digging wide excavations in the soil is due to the alignment of the thickness of the soil shavings cut by the actuator in translational and rotational movement in the face during the operating cycle.

The scientific novelty of the obtained results lies in the solution of an important scientific and technical problem – the creation of a new type of rotor operating equipment for a continuous universal earthmoving machinery with improved productivity. It is achieved due to the movement of the actuator in the face along a trajectory described by the Bernoulli lemniscate equation and causes the equalization and reduction of external loads on the actuator due to the soil development with shavings of uniform thickness.

A mechanism and algorithm for moving the two-link, two-swivel soil development actuator of the UEM in the face have been developed for the first time, ensuring soil development with shavings of uniform thickness regardless of the width of the excavation.

A mathematical model for the continuous UEM operation has been created for the first time in accordance with the developed algorithm for the actuator movement in translational and rotational supply of the operating equipment to the face.

The functional dependence of the duration of the intermediate frame additional rotation of the soil development rotor actuator at the end of each half-cycle when digging wide trenches in the soil on the speed of the operating equipment supply has been established for the first time.

The scheme and the mechanism for adaptive movement of the UEM rotor actuator in the face have been improved depending on the speed of the machinery supply.

When determining the spatial load of the UEM operating equipment during soil digging, the methods of physical and physical and mathematical modeling have been further developed based on tensometric testing of the UEM actuator model with the use of a physical and mathematical modeling testbed and a universal tensometric mounting.

The practical significance of the obtained results implies the following:

- the development of a technical proposal for creating a design of the UEM operating equipment which operates in the mode of translational and rotational supply to the face with the ability to dig wide, long excavations of various linear sizes without constructive reconfiguration;

- improving the efficiency of the UEM operating equipment by perfecting the movement drive kinematics of the two-link, double-swivel actuator in the face, which ensures the digging of wide, long excavations in the soil with soil shavings of uniform thickness and the minimization of the machinery external load;

- the development of a mechanism for moving the UEM two-link double-swivel soil development rotor actuator in the face with adaptive control when digging wide excavations in the soil.

The implementation of the research results enabled to develop the technical proposal for the creation of a highly efficient UEM protected by a patent for the invention of Ukraine No. 114779, operational productivity of which is 1.9-2 times

higher than of existing similar machinery.

The theoretical and practical results obtained in the dissertation research are used in the educational process of National Transport University (Kyiv) at the Department of transport construction machinery engineering when training students majoring in “Industrial engineering” (133), and are also used in the activities of PJSC Industrial and Production Institute of Welding and Insulation Technologies in the construction of pipelines by “Naftogazbudizolyatsiya”.

Key words: universal earthmoving machinery, continuous earthmoving machinery, rotor actuator, universal earthmoving equipment, earthmoving machinery, soil, soil digging, trajectory planning, motion control, model, mathematical model, physical model, scale, experiment, displacement, speed, movement speed, transverse plane, force, load, torque, efficiency, design parameters, kinematic parameters, algorithm, process, rotor, hitch.

List of publications of the applicant

Articles in publications of foreign countries or in publications of Ukraine, which are included in international scientometric bases:

1. Lazaruk J., Musiiko V., Koval A. Experimental analysis of the universal continuous digging machine working processes. Vol. 4, 2020. – Pp. 429-435. DOI: <https://doi.org/10.21062/mft.2020.066>.

URL: http://journalmt.com/artkey/mft-202004-0006_experimental-analysis-of-the-universal-continuous-digging-machine-working-processes.php. (SCOPUS).

2. Lazaruk J., Musiiko V., Honchar M., Nikolaienko V., Korpach A. Optimization of the motion algorithm and reduction of the external dynamic load of the machinery actuator in translational and rotational modes. Symmetry 2022, 14, 51. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14010051>.

URL: <https://www.mdpi.com/2073-8994/14/1/51> (ORCID).

Articles in scientific and professional publications of Ukraine:

3. Lazaruk Yu.V., Musiiko V.D., Koval A.B., Nikolaenko V.A. Problems of modernization of continuous earthmoving machinery: / Collection of scientific papers. Central Research Institute of Armaments and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, № 3 (70). Kyiv, 2018. P. 181-190.

4. Lazaruk Yu.V., Musiiko V.D., Koval A.B. Problems, directions, and prospects in the creation and modernization of specialized continuous earthmoving machinery. / The Herald of National Transport University. Series “Technical sciences”. Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2021. – Issue 1 (48). P. 223-232. DOI: 10.33744/2308-6645-2021-1-48-223-232. URL: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/48/223-232.pdf>

Published approbation papers:

5. Lazaruk Yu.V., Kholodnyi Yu.F., Dovbnya V.V. The modernization of the PZM-3 regimental earthmoving machinery in order to give the object new tactical and technical properties.: abstracts at the *International scientific and technical conference. “Prospects for the development of weapons and military equipment of the ground forces”*. (Lviv, May 18-20, 2016). - Lviv, 2016. P. 281 – 282.

URL: https://www.asv.mil.gov.ua/content/nauka/2016/18-20-05-2016_conf.pdf.

6. Lazaruk Yu.V., Musiiko V.D., Koval A.B., Kholodnyi Yu.F., Directions of creation and modernization of earthmoving machinery for engineering weapons: abstracts at the *IV All-Ukrainian Scientific and Practical Conference. “Common problems of military formations and state law enforcement agencies: problems and prospects”*. (Odesa, September 07-08, 2017). Odesa, 2017. P. 116 – 117.

URL: <https://vaodesa.mil.gov.ua/>.

7. Lazaruk Yu.V., Musiiko V.D. Modernization of earthmoving machinery for fortification of army positions: abstracts at the *LXXIII Scientific conference of teaching staff, post-graduates, students and staff of separate departments of NTU*. Kyiv: NTU – 2017. P. 21.

URL: <https://drive.google.com/file/d/1GyK8BsnakngvopAADyWv3l4kEA22yhEs/view>.

8. Lazaruk Yu.V., Koval A.B., Gonchar M.O., Nikolayenko V.A. Problems of modernization of continuous earthmoving machinery: abstracts at the *V International Scientific and Practical Conference. “Problems of coordination of military and technical and defense and industrial policy in Ukraine. Prospects for the development of weapons and military equipment” within the framework of the 14th International Specialized Exhibition “Arms and Security - 2017”*. (Kyiv,

October 11 – 12, 2017). – Kyiv, 2017, P. 345 – 346.

9. Lazaruk Yu.V., Musiiko V.D. Improving the productivity of universal trench and pit earthmoving machinery: abstracts at the *LXXIV Scientific conference of teaching staff, post-graduates, students and staff of separate departments of NTU*. Kyiv: NTU – 2018. P. 18 – 19.

URL:https://drive.google.com/file/d/1_uA1WGugEVOGtLukG_ZMX71VgXPIq98l/view.

10. Lazaruk Yu.V., Koval A.B., Horkovenko O.V. Prospects for the creation of military and engineering continuous earthmoving machinery: abstracts at the *VI international scientific and practical conference “Problems of coordination of military and technical and defense and industrial policy in Ukraine. Prospects for the development of weapons and military equipment” within the framework of the 15th International Specialized Exhibition “Arms and Security - 2018”*. (Kyiv, October 11 – 12, 2018). – Kyiv, 2018, P. 281 – 283.

11. Lazaruk Yu.V., Musiiko V.D. Experience in modernizing dual-purpose machines: abstracts at the *LXXIV Scientific conference of teaching staff, post-graduates, students and staff of separate departments of NTU*. Kyiv: NTU – 2018. P. 18 – 19.

URL: <https://drive.google.com/file/d/16Vrd9t8qiaZrTaTmPzz5lqtihzjtrjsf/view>.

12. Lazaruk Yu.V., Musiiko V.D., Koval A.B. Experimental studies of universal earthmoving machines on a physical modeling stand: abstracts at the *LXXVI Scientific conference of teaching staff, post-graduates, students and staff of separate departments of NTU*. Kyiv: NTU – 2020. P. 20 – 21.

URL: <https://drive.google.com/file/d/16Vrd9t8qiaZrTaTmPzz5lqtihzjtrjsf/view>.

13. Lazaruk Yu.V., Musiiko V.D., Varfolomeev Yu.M. Theoretical prerequisites for optimizing the structural and kinematic parameters of the working equipment of universal earthmoving machines: abstracts at the *LXXVII Scientific conference of teaching staff, post-graduates, students and staff of separate departments of NTU*. Kyiv: NTU – 2021. P. 20.

URL:https://drive.google.com/file/d/1ueDfCu-mBO1oTk1-nKHgyDCsnBy_sab5/view.

14. Lazaruk Yu.V., Musiiko V.D., Koval A.B. Synthesis of the algorithm for

the functioning of the working body of a universal earthmoving machine and computer modeling of its movement: abstracts at the *LXXVIII Scientific conference of teaching staff, post-graduates, students and staff of separate departments of NTU*. Kyiv: NTU – 2022. P. 15.

DOI:10.33744/2786-6459-2022-78. URL: <https://drive.google.com/file/d/1yhVlySer3EHbJt98UoRZEW94NhxOzk7/view>.

15. Lazaruk Yu.V., Musiiko V.D., Koval A.B. The development of means of mechanization of road and earthworks under current conditions. / *Scientific and practical seminar* / Central Research Institute of Armaments and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine. - Kyiv, 2021, P. 24 – 30.

Invention patents:

16. Patent for the invention of Ukraine № 114779, Ukraine, MPK(2017.01) E02F 3/00. Universal earthmoving machinery. / Applicant and patent holder: National Transport University, State number: a 2016 09428; application: 12.09.2016, Vol. № 3; published: 25.07.2017, Vol. № 14.