

УДК 62-868.8

[0000-0003-1727-3286] С. О. Філімонов, канд. техн. наук, доцент,

e-mail: s.filimonov@chdtu.edu.ua

[0000-0001-7573-9289] С. С. Яценко, аспірант

Черкаський державний технологічний університет  
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

## ВДОСКОНАЛЕНА КОНСТРУКЦІЯ ВІБРОПЛУГА З П'ЄЗОКЕРАМІЧНИМ АКТУАТОРОМ

*Сфера сільського господарства є однією з найголовніших сфер життєдіяльності людини, оскільки завдання сільського господарства – забезпечувати населення продовольством, необхідним для його існування. На сьогоднішній час розвиток сільського господарства є одним із найефективніших способів подолання голоду в усьому світі. Однією з головних проблем сільського господарства є складність та ефективність обробки землі. Головним органом обробки ґрунту в сільському господарстві є плуг.*

*В роботі представлено і розглянуто основні проблеми та відмінності звичайних плугів від вібраційних. Одним із найбільш ефективних методів обробки ґрунту є використання вдосконаленого плуга з віброуючою частиною (віброплуга), використання якого дозволить зменшити силу тертя плужного відвалу з ґрунтом, що дасть можливість зменшити витрати палива та збільшити термін експлуатації сільгосптехніки.*

*Робота полягає в удосконаленні конструкції віброплуга на основі п'єзокерамічного актуатора, а також його комп'ютерної моделі, враховуючи повний набір геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів, що дасть змогу збільшити частоту віброколивань та зменшити тертя з ґрунтом.*

*Запропонована вдосконалена комп'ютерна модель віброплуга на основі п'єзокерамічного актуатора, яка створена за допомогою пакета програм COMSOL Multiphysics, враховуючи повний набір геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів, дає змогу визначити та прогнозувати його основні механічні характеристики. В результаті проведених комп'ютерних моделювань визначено резонансну частоту, при якій забезпечуються максимальні амплітуди коливань віброплуга. Окрім цього, представлено експериментальні результати, в яких ультразвуковий випромінювач використовувався в режимі датчика.*

**Ключові слова:** п'єзоелемент, автоматизація, зменшення тертя, віброплуг, моделювання, відвал, датчик.

**Вступ.** Сільське господарство є однією з найважливіших галузей, що забезпечує населення продовольчими товарами і сировиною для великої кількості галузей промисловості. Сільськогосподарські культури потрібні людині для харчування, годування тварин і одержання волокна (бавовни і сизалю). Тварин вирощують заради вовни, молока, м'яса чи органічних відходів (як палива). Однією з головних проблем сільського господарства є складність та ефективність обробки землі. Поява ресурсозберігаючих технологій змінила ставлення аграріїв до обробки полів: багато хто з них відмовляється від застосування плуга, не бажаючи порушувати природну структуру ґрунту, який утворюється роками. Проте значна частина сільгоспвиробників упевнена, що повністю уникати використання плуга

в жодному разі неможливо, оскільки він розпушує землю, допомагає боротися з бур'янами і покращує якість ґрунту в цілому [1, 2].

Основним знаряддям культивування ґрунту у сільському господарстві є плуг. Плуг має дві основні складові – це леміш та відвал.

Плужний відвал – одна з робочих частин плуга. Основним його завданням є зріз від стінки пласта ґрунту, кришення її і перевертання. Тобто багато в чому від якості відвалу залежить те, наскільки добре буде підготовлений ґрунт.

Леміш – це частина плуга, що підрізає шар землі, і саме по ньому зрізаний шар ґрунту піднімається і потрапляє на відвал.

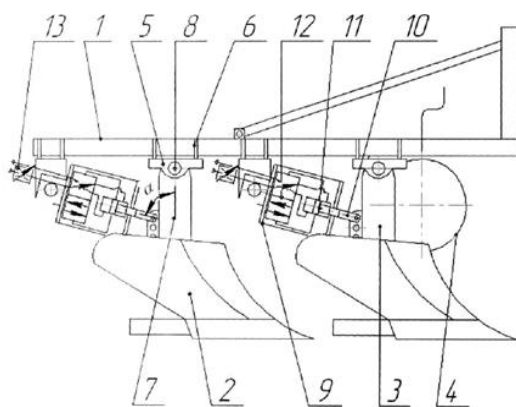
Основними перевагами плуга є його простота у виготовленні та відносно невисока ціна.

Основним недоліком такого плуга є високий спротив (тертя), що виникає при оранці ґрунту, при цьому значно підвищуються енерговитрати.

На сьогоднішній день звичайним плугам існують такі альтернативи, як віброплуг. В роботі [3] експериментально встановлено, що при використанні вібрацій у плузі значно зменшується тертя ковзання з ґрунтом, що є основною складовою в загальній величині тягового опору. Зменшується також і залипання робочих органів. Ретельно представлено й експериментально доведено в роботі [4], що зменшується тертя між двома поверхнями тіл при впливі на них ультразвукових коливань.

У зв'язку з цим останнім часом з'явилося багато конструкцій плугів з віброючими робочими органами.

На рисунку 1 зображено функціональну схему віброплуга.



**Рисунок 1. Функціональна схема віброплуга [5]**

Віброплуг складається з рами 1, корпусу 2, стійки корпусу 3, опорного колеса 4. Стійка кожного корпусу розрізана на дві частини, які шарнірно з'єднані між собою. Верхня частина стійки 5 приєднана хомутом 6 до рами плуга 1, нижня 7 з'єднана з нею шарніром 8. На рамі плуга 1 під змінним кутом закріплений вібратор 9, який штоком 10 з'єднаний з нижньою частиною стійки корпусу 7. Зміна амплітуди вібрації досягається зміною кута, який регулюється отворами в нижній частині стійки. Вібратор 9 складається з поршня 11, що виготовлений разом зі штоком 10, і золотника 12. Порожнина вібратора 9 під'єднана до гідросистеми трактора. Дроселем 13 забезпечується регулювання частоти коливань вібратора 9 [5].

Віброплуг працює наступним чином. Перед початком роботи дроселем 13 встановлюється частота коливань вібратора 9. Перестановкою штока вібратора 10 в змінні отвори нижньої частини стійки корпусу 7 встановлюються кут та амплітуда вібрації залежно від типу та стану ґрунту [5].

При оранці олива від гідросистеми трактора під тиском подається у нижню порожнину корпусу вібратора 9. В цей час верхня порожнина корпусу вібратора 9 сполучена зі зливом. Поршень 11 разом із золотником 12 переміститься вгору. Олива під тиском подається під золотник 12. Золотник 12 переміщується вгору відносно поршня 11, сполучає верхню порожнину корпусу вібратора 9 з напірною лінією, а нижню порожнину корпусу вібратора 9 зі зливом. Поршень 11 переміщується вниз. Верхня порожнина корпусу вібратора 9 сполучається зі зливом. Золотник 12 переміщується вниз і процес зворотно-поступального руху поршня 11 повторюється [5].

Вимушені коливання передаються нижній частині стійки 7 корпусу плуга 2 штоком 10, виготовленим разом із поршнем вібратора 11, відповідно до фаз деформації і руйнування ґрунту. Нижня частина стійки 7 повертається навколо шарніра 8, таким чином верхня частина стійки 5, а отже, і рама плуга 1 ізолювані від коливань [5].

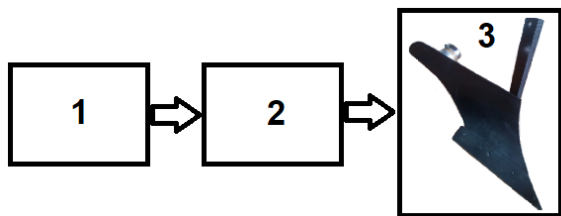
Віброплуг дозволяє використати періодичні зміни сили опору ґрунту, що збільшує інтенсивність кришення ґрунту, а отже, поліпшується якість обробки, і зменшується тяговий опір плуга – знижується енергомісткість процесу оранки ґрунту [5].

Ці вдосконалення також мають низку недоліків: збільшення ваги робочого органу, зменшення часу експлуатації вібраційного вузла, підвищення складності обслуговування та виготовлення виробу тощо.

В роботі [6] представлено розроблений віброплуг з застосуванням п'єзокерамічного актуатора (ПА). На відміну від інших віброплугів, його різновид з ПА має набагато менші розміри та вагу, високий коефіцієнт корисної дії, характеризується широким діапазоном керуючих частот збудження та створенням значних зусиль при вібраціях. Також у роботі [7] наводяться результати досліджень, які обґрунтовують наближене до оптимального розташування ПА на штатному плужному відвалі зняття ку-

льтивації на основі мультифізичного моделювання.

Модель віброплуга з використанням п'єзокерамічного актуатора наведено також в роботі [8]. Структурну схему віброплуга з п'єзокерамічним актуатором зображено на рисунку 2.



**Рисунок 2. Структурна схема віброплуга з п'єзокерамічним актуатором:**

- 1 – генератор змінної напруги;
- 2 – високовольтний підсилювач;
- 3 – плуг з п'єзокерамічним актуатором

Недоліком цього віброплуга є низька частота коливань, а також при використанні ультразвукової системи на низьких частотах потрібно суттєво збільшувати габаритні розміри п'єзокерамічного актуатора.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є вдосконалення віброплуга за рахунок

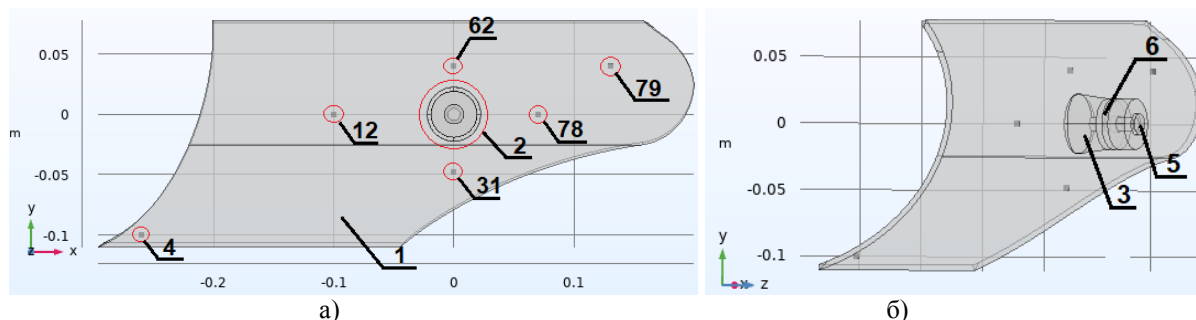
використання ультразвукового п'єзокерамічного актуатора.

Моделювання плужного відвалу з ультразвуковим випромінювачем, а також перевірка теоретичних задач виконувались за допомогою програми COMSOL Multiphysics.

Для вдосконалення віброплуга з п'єзокерамічним актуатором необхідно виконати такі задачі: застосувати ультразвуковий п'єзокерамічний актуатор; створити віртуальну фізичну модель за допомогою програми COMSOL Multiphysics; визначити резонансні частоти ультразвукової системи; визначити максимальні коливання віброплуга на отриманих резонансних частотах.

Для отримання максимальних вібрацій на різних типах ґрунту запропоновано використовувати віброплуг у режимі віброколивань та у режимі датчика. Для цього необхідно виконати перевірку віброплуга в режимі датчика за рахунок використання прямого п'єзо ефекту.

**Виклад основного матеріалу.** На рисунку 3 зображено досліджувану модель відвалу з ультразвуковим випромінювачем.



**Рисунок 3. Модель віброплуга з ультразвуковим випромінювачем в COMSOL Multiphysics:**

- а) вигляд збоку: 1 – плужний відвал; 2 – ультразвуковий випромінювач; 4, 12, 31, 62, 78, 79 – контрольні вимірювальні точки (нумерація точок відповідає нумерації у моделі COMSOL Multiphysics);
- б) загальний вигляд: 3 – випромінююча частина актуатора; 5 – стягуючий болт; 6 – п'єзокерамічні диски

Враховуючи технічні особливості п'єзоелектричних ультразвукових випромінювальних систем і всі складнощі, що виникають при їх виготовленні, оптимальним рішенням є використання чисельних методів розрахунку, що реалізуються спеціальними САПР [9]. Ультразвукова випромінювальна система (актуатор) за рахунок використання п'єзокераміки має змогу працювати в двох режимах, а саме: віброколивань та датчика [10, 11].

Для дослідження взаємодії випромінювача з плужним відвалом і впливу ультразвукових частот на відвал плуга було проведено чисельне моделювання процесу роботи з використанням пакета програм COMSOL Multiphysics. Інтерфейс програми COMSOL об'єднує функції моделювання модулів механіки твердого тіла COMSOL's Solid Mechanics і електростатики Electrostatics в один обчислювальний інструмент для моделювання п'єзоелектричних матеріалів.

Моделювання п'єзоелектричних пристроїв у COMSOL Multiphysics здійснюється за допомогою модуля Piezoelectric Effects. Оскільки функціонування п'єзокерамічного актуатора базується на зворотному п'єзоєфекті, в модулі Piezoelectric Effects вибирався режим Stress Charge Form [12, 13]. Для п'єзоелектричного елемента характерним є зв'язок між механічними деформаціями і електричним полем, який визначається матеріальними та конститутивними співвідношеннями [14-15]:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot D &= \rho, \\ \nabla \cdot T &= 0, \\ T &= c_E S - e^T E, \\ D &= e S - \varepsilon_S E, \\ c_E &= S_E^{-1}, \\ e &= d S_E^{-1}, \\ \varepsilon_S &= \varepsilon_T - d S_E^{-1} d^T, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $T$  – механічне напруження;  $S$  – деформація;  $E$  – напруженість електричного поля;  $D$  – зміщення електричного поля;  $c_E$  – матриця пружності (тензор 4-го рангу  $c_{ijkl}$ );  $e$  – матриця зв'язку (тензор 3-го рангу  $e_{ijk}$ );  $d$  – матриця п'єзомодулів (тензор 3-го рангу  $d_{imn}$ );  $\varepsilon_S$  – матриця діелектричних проникностей (тензор 2-го рангу  $\varepsilon_{ij}$ );  $\rho$  – густина вільного заряду;  $\varepsilon_T$  – діелектрична проникність п'єзоелектричного матеріалу.

Розміри ультразвукового п'єзоелектричного випромінювача: діаметр хвилеводу – максимум 55 мм, діаметр хвилеводу – мінімум 45 мм, довжина хвилеводу – 24 мм, товщина відбивача – 12 мм, діаметр п'єзоелементів – 45 мм, загальна довжина – 46 мм, резонансна частота – близько 40 кГц.

При моделюванні ультразвукової системи відвал-п'єзоактуатор електричний потенціал (Electric potential) 300 В прикладений до зовнішніх сторін п'єзоелементів, а загальний «мінус» (Ground) – до сторін п'єзоелементів, які з'єднані між собою. Поляризація п'єзоелектричних елементів є зустрічною.

Моделювання п'єзокерамічної пластини виконувалося за умови її виготовлення з матеріалу марки PZT-4. Для металевої частини досліджуваної системи, тобто плугового відвалу, для аналогічних цілей використовувався матеріал Structural Steel. Габаритні розміри та геометрія цього органу культивациі проілюстровано на рисунку 3.

Структурну схему роботи віброплуга в режимі вимірювальної системи зображено на рисунку 4.

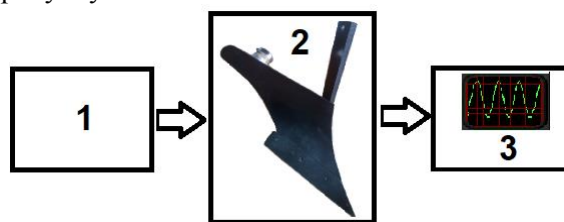


Рисунок 4. Структурна схема роботи віброплуга в режимі датчика:

- 1 – прикладна зовнішня сила;  
2 – ультразвукова система в режимі датчика;  
3 – цифровий осцилограф

**Результати досліджень.** Для мультифізичного кінцево-елементного математичного моделювання процесів, як і в [13], застосовувалися Лагранжові кінцеві елементи з елементарними базисними функціями другого порядку – Lagrange-Quadratic. Розрахункова сітка кінцевих елементів у пункті «Mesh» вибиралася ортогоналізованою з нормальним розміром елементів Finer.

Досліджувана тривимірна модель системи плужний відвал-п'єзоактуатор представлена сукупністю кінцевих елементів, отриманих в результаті побудови сітки з тетрагональним розбиттям. Відповідну CAD-модель системи проілюстровано на рисунку 5.

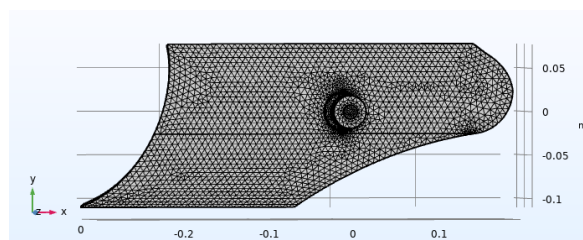
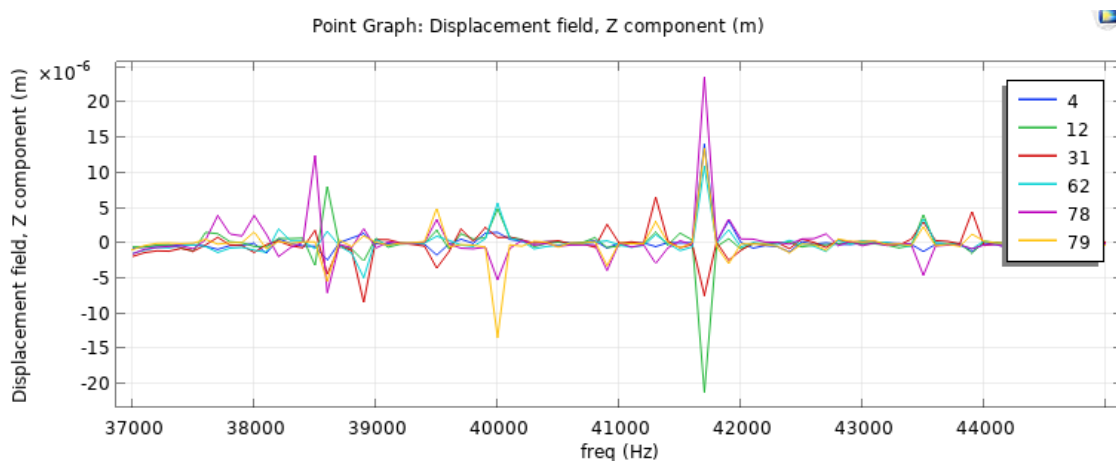


Рисунок 5. Відображення Mesh сітки моделі відвалу з п'єзоактуатором для точності моделювання процесу

На рисунку 6 зображено амплітудно-частотну характеристику системи плужний відвал-п'єзоактуатор.

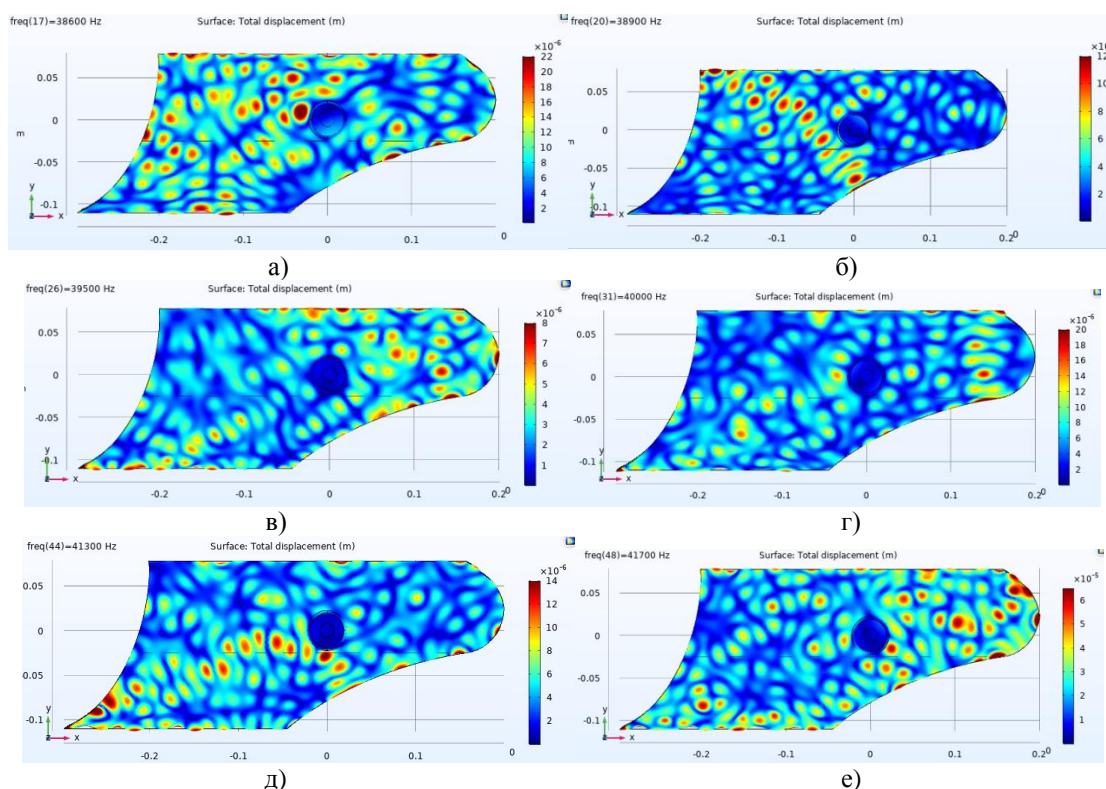
З рисунка 6 видно, що максимальні амплітуди коливань відвалу плуга відповідають частотам 38.6 кГц, 38.9 кГц та 39.5 кГц, 40 кГц, 41.3 кГц, 41.7 кГц. Слід зауважити, що значення амплітуди коливань мають як додатні, так і від'ємні значення, що відповідають коливанням плужного відвалу відносно нульової лінії, яка розташована по відвалу.



**Рисунок 6.** Амплітудно-частотна характеристика системи плужний відвал-п'єзоактуатор: 4, 12, 31, 62, 78, 79 – контрольні вимірювальні точки (нумерація точок відповідає нумерації у моделі COMSOL Multiphysics рисунка 3)

На рисунку 7 на основі отриманого результату амплітудно-частотної характеристики (рисунок 6) зображено наочну деформацію ультразвукової системи плужний відвал-

п'єзоактуатор на частотах, які відповідають максимальним амплітудам коливань плужного відвалу у площині Z.



**Рисунок 7.** Результати чисельного моделювання для визначення максимальної амплітуди коливань системи плужний відвал-п'єзоактуатор на частотах: а) 38.6 кГц; б) 38.9 кГц; в) 39.5 кГц; г) 40 кГц; д) 41.3 кГц; е) 41.7 кГц

З отриманих результатів видно, що найбільша амплітуда коливань системи плужний відвал-п'єзоактуатор відповідає частоті 41,7 кГц і становить 60 мкм.

Вібропруг на основі п'єзоелектричного актуатора розширює діапазон можливостей використання вібропруга, а саме: отримувати дані при обробці ґрунту і визначати за-

лежності амплітуди коливань відвалу вібропруга від сили тертя  $F$ , яка утворюється ґрунтом.

Перевірку використання вібропруга на основі ПА в режимі датчика за рахунок використання прямого п'єзоефекту представлено



а)



б)

**Рисунок 8. Перевірка використання вібропруга в режимі датчика:**

- а) вібропруг з ультразвуковою системою на відвалі як датчик,  $F$  – сила, прикладена до вібропруга;  
б) осцилограма електричного сигналу з вібропруга

**Обговорення результатів.** Перевагою п'єзоелектричних ультразвукових випромінювальних систем є можливість використовувати прямий п'єзоефект, завдяки якому п'єзоелектрична ультразвукова випромінювальна система плужний відвал-п'єзоактуатор може використовуватися в режимі датчика. Представлена осцилограма (рисунок 8, б) чітко вказує, що система плужний відвал-п'єзоактуатор (вібропруг) в режимі датчика забезпечує потрібний рівень вихідного сигналу для його обробки контролером. Це дозволить розширити діапазон використання вібропруга, а саме, можливості отримувати певні дані (інтенсивність коливань, характеристики ґрунту) при обробці ґрунту.

За рахунок збільшення частоти актуатора стає можливим зменшити його розміри.

Створена 3D-вимірна комп'ютерна модель вібропруга на основі ультразвукового п'єзоелектричного актуатора дозволяє створювати та прогнозувати характеристики майбутнього зразка.

**Висновки.** Розглянуто конструкції вібропругів, які використовуються у сільському господарстві. Використання вібропруга дозволить зменшити силу тертя плужного відвалу з ґрунтом, що дає можливість зменшити витрати палива та збільшити термін експлуатації сільгосптехніки.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні конструкції вібропруга на основі

на рисунку 8. Прикладена сила до системи плужний відвал-п'єзоактуатор становить близько 1 Н.

З рисунка 8 видно, що при прикладеній силі близько 1 Н вихідна напруга становить 0,5 В.

п'єзокерамічного актуатора, а також його комп'ютерної моделі, враховуючи повний набір геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів, що дає змогу збільшити частоту віброколивань та зменшити тертя з ґрунтом.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

- визначено частоту (41,7 кГц), при якій забезпечуються максимальні амплітуди коливань (60 мкм) відвалу вібропруга на основі п'єзокерамічного актуатора;

- експериментально доведено доцільність використання ультразвукового п'єзоелектричного актуатора вібропруга в режимі датчика;

- розширено можливості використання вібропруга, а саме, отримувати певні характеристики при обробці ґрунту за допомогою використання ультразвукового п'єзоелектричного актуатора у режимі датчика;

- отримані дані можна використовувати при проектуванні вібропруга, в якому вібрація створюється за рахунок п'єзокерамічного актуатора.

Подальші дослідження авторів можуть бути спрямовані на розробку схеми керування актуатором, визначення коефіцієнта корисної дії вібропруга з ПА та отримання залежностей впливу ґрунту на п'єзокерамічний актуатор у режимі датчика.

## Список використаних джерел

- [1] S. Kalogiannidis, D. Kalfas, F. Chatzitheodoridis, and O. Papaevangelou, "Role of crop-protection technologies in sustainable agricultural productivity and management", *Land*, vol. 11 (10), 2022. Available: <https://doi.org/10.3390/land11101680>. Accessed on: Nov. 22, 2022.
- [2] M. Rosegrant et al., *Food Security in a World of Growing Natural Resource Scarcity: The Role of Agricultural Technologies*. Washington, D.C., USA: International Food Policy Research Institute, 2014. Available: <http://dx.doi.org/10.2499/9780896298477>. Accessed on: Nov. 22, 2022.
- [3] V. M. Bulgakov, M. O. Sviren, I. P. Palamarchuk, V. V. Dryga, O. M. Chernysh, and V. V. Yaremenko, *Vibration Machines for Agricultural Production*. Kirovohrad, Ukraine, 2012.
- [4] S. Dong, M. Dapino, and J. Vis, "Experiments on ultrasonic lubrication using a piezoelectrically-assisted tribometer and optical profilometer", *J. Vis. Exp.*, vol. 103, p. 52931, 2015.
- [5] В. С. Ловейкін, Ю. В. Човнюк, та Л. А. Дяченко, "Вібраційний плуг", Національний університет біоресурсів і природокористування України, МПК 2009.01 A01B 63/111.
- [6] S. S. Yashchenko, S. A. Filimonov, A. V. Batrachenko, and N. V. Filimonova, "The use of smart piezoceramics for tillage in agriculture", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu*, no. 2, 2019.
- [7] V. Ya. Halchenko, S. S. Yashchenko, S. A. Filimonov, and N. V. Filimonova, "Mathematical modeling of features of electrophysical processes in a vibration plow with piezoelectric actuator", *Agricultural machinery*, Bulgaria, pp. 36-39, 2022.
- [8] S. A. Filimonov, C. V. Bazilo, S. S. Yashchenko, and N. V. Filimonova, "Method of reducing friction in the plow moldboard with soil during cultivation due to the implementation of ultrasonic vibrations", *Springer Nature Switzerland AG*, pp. 281-289, 2022. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8>. Accessed on: Nov. 22, 2022.
- [9] L. Wang, L. Zhao, Z. Jiang et al., "High accuracy Comsol simulation method of bimorph cantilever for piezoelectric vibration energy harvesting", *AIP Advances*, vol. 9, 095067, pp. 1-9, 2019.
- [10] V. Sharapov, *Piezoceramic Sensors*. New York, USA: Springer Verlag, 2011. Available: [https://www.researchgate.net/publication/260733733\\_Sharapov\\_V\\_Piezoceramic\\_sensors\\_-\\_Springer\\_Verlag\\_Heidelberg\\_Dordrecht\\_London\\_New\\_York\\_2011\\_-\\_498\\_p](https://www.researchgate.net/publication/260733733_Sharapov_V_Piezoceramic_sensors_-_Springer_Verlag_Heidelberg_Dordrecht_London_New_York_2011_-_498_p). Accessed on: Nov. 22, 2022.
- [11] G Akhras, "Smart materials and smart systems for the future", *Canadian Military Journal*, no. 3, pp. 25-32, 2000.
- [12] V. Ya. Halchenko, S. A. Filimonov, A. V. Batrachenko, and N. V. Filimonova, "Increase the efficiency of the linear piezoelectric motor", *Phys.*, vol. 10, no. 4, 04025, 2018.
- [13] V. Ya. Halchenko, Yu. Yu. Bondarenko, S. A. Filimonov, and N. V. Filimonova, "Determination of influence of geometric parameters of piezoceramic plate on amplitude characteristics of linear piezomotor", *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, pp. 17-22, 2019.
- [14] L. Spicci, and M. Cati, "Ultrasound piezodisk transducer model for material parameter optimization", *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference*, Paris, 2010, pp. 1-7.
- [15] V. Sharapov, *Piezoceramic Sensors*. Heidelberg, Dordrecht, London: Springer Verlag, 2011.

## References

- [1] S. Kalogiannidis, D. Kalfas, F. Chatzitheodoridis, and O. Papaevangelou, "Role of crop-protection technologies in sustainable agricultural productivity and management", *Land*, vol. 11 (10), 2022. Available: <https://doi.org/10.3390/land11101680>. Accessed on: Nov. 22, 2022.
- [2] M. Rosegrant et al., *Food Security in a World of Growing Natural Resource Scarcity: The Role of Agricultural Technologies*. Washington, D.C., USA: International Food Policy Research Institute, 2014. Available: <http://dx.doi.org/10.2499/9780896298477>. Accessed on: Nov. 22, 2022.
- [3] V. M. Bulgakov, M. O. Sviren, I. P. Palamarchuk, V. V. Dryga, O. M. Chernysh, and V. V. Yaremenko, *Vibration Machines*

- for *Agricultural Production*. Kirovohrad, Ukraine, 2012.
- [4] S. Dong, M. Dapino, and J. Vis, "Experiments on ultrasonic lubrication using a piezoelectrically-assisted tribometer and optical profilometer", *J. Vis. Exp.*, vol. 103, p. 52931, 2015.
- [5] V. S. Loveykin, Y. V. Chovnyuk, and L. A. Dyachenko, "Vibrating plow", National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine, IPC 2009.01 A01B 63/111 [in Ukrainian].
- [6] S. S. Yashchenko, S. A. Filimonov, A. V. Batrachenko, and N. V. Filimonova, "The use of smart piezoceramics for tillage in agriculture", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu*, no. 2, 2019.
- [7] V. Ya. Halchenko, S. S. Yashchenko, S. A. Filimonov, and N. V. Filimonova, "Mathematical modeling of features of electrophysical processes in a vibration plow with piezoelectric actuator", *Agricultural machinery*, Bulgaria, pp. 36-39, 2022.
- [8] S. A. Filimonov, C. V. Bazilo, S. S. Yashchenko, and N. V. Filimonova, "Method of reducing friction in the plow moldboard with soil during cultivation due to the implementation of ultrasonic vibrations", *Springer Nature Switzerland AG*, pp. 281-289, 2022. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8>. Accessed on: Nov. 22, 2022.
- [9] L. Wang, L. Zhao, Z. Jiang et al., "High accuracy Comsol simulation method of bimorph cantilever for piezoelectric vibration energy harvesting", *AIP Advances*, vol. 9, 095067, pp. 1-9, 2019.
- [10] V. Sharapov, *Piezoceramic Sensors*. New York, USA: Springer Verlag, 2011. Available: [https://www.researchgate.net/publication/260733733\\_Sharapov\\_V\\_Piezoceramic\\_sensors\\_-\\_Springer\\_Verlag\\_Heidelberg\\_Dordrecht\\_London\\_New\\_York\\_2011\\_-\\_498\\_p](https://www.researchgate.net/publication/260733733_Sharapov_V_Piezoceramic_sensors_-_Springer_Verlag_Heidelberg_Dordrecht_London_New_York_2011_-_498_p). Accessed on: Nov. 22, 2022.
- [11] G Akhras, "Smart materials and smart systems for the future", *Canadian Military Journal*, no. 3, pp. 25-32, 2000.
- [12] V. Ya. Halchenko, S. A. Filimonov, A. V. Batrachenko, and N. V. Filimonova, "Increase the efficiency of the linear piezoelectric motor", *Phys.*, vol. 10, no. 4, 04025, 2018.
- [13] V. Ya. Halchenko, Yu. Yu. Bondarenko, S. A. Filimonov, and N. V. Filimonova, "Determination of influence of geometric parameters of piezoceramic plate on amplitude characteristics of linear piezomotor", *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, pp. 17-22, 2019.
- [14] L. Spicci, and M. Cati, "Ultrasound piezodisk transducer model for material parameter optimization", *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference*, Paris, 2010, pp. 1-7.
- [15] V. Sharapov, *Piezoceramic Sensors*. Heidelberg, Dordrecht, London: Springer Verlag, 2011.

**S. O. Filimonov**, Ph. D., Associate Professor,  
e-mail: s.filimonov@chdtu.edu.ua

**S. S. Yashchenko**, Postgraduate  
Cherkasy State Technological University  
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

## IMPROVED DESIGN OF VIBRATORY PLOW WITH PIEZOCERAMIC ACTUATOR

*The sphere of agriculture is one of the most important spheres of human activity, since the task of agriculture is to provide the population with food necessary for its existence. Today, rural development is one of the most effective ways to overcome the hunger around the world. One of the main problems of agriculture consists in the complexity and efficiency of land cultivation. The main body of soil cultivation in agriculture is the plow.*

*One of the most effective methods of soil cultivation is the use of an improved plow with a vibrating part, the use of which will reduce the force of friction between the plow mouldboard and the soil, which will make it possible to reduce fuel consumption and increase the service life of agricultural machinery.*



*The work consists in improving the design of a vibrating plow based on a piezoceramic actuator, as well as its computer model, taking into account a full set of geometric, physical-mechanical and electrical parameters, which will make it possible to increase the frequency of vibration and reduce friction with the soil.*

*The advantage of piezoelectric ultrasonic radiating systems is the ability to use a direct piezo effect, thanks to which the piezoelectric ultrasonic radiating system – plow mouldboard-piezoactuator – can be used in sensor mode. This will make it possible to expand the range of possibilities of using the vibroplow, namely the possibility of recording data (intensity of oscillations, soil characteristics) during soil cultivation.*

*By increasing the frequency of the piezoelectric actuator, it becomes possible to reduce its size.*

*The paper presents and discusses the main problems and differences between conventional plows and vibrating plows. Improved design of the vibrating plow based on a piezoceramic actuator, as well as its computer model using the COMSOL Multiphysics program package, taking into account a full set of geometric, physical-mechanical and electrical parameters, allows to increase the frequency of vibration and reduce friction with the soil. As a result, the resonant frequency, at which the maximum amplitudes of vibrations of the vibrating plow are ensured, is determined. Experimental results in which the ultrasonic emitter is used in sensor mode are also presented.*

**Keywords:** piezoelement, automation, friction reduction, vibrating plow, modeling, mouldboard, sensor.

*Стаття надійшла 06.12.2022*

*Прийнято 04.01.2023*