

УДК 534.133

[0000-0003-1727-3286] **С. О. Філімонов**, канд. техн. наук, доцент,
[0000-0002-6854-8676] **Д. С. Бачеріков**, аспірант

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

МОДЕЛЬ ГВИНТОВОГО ЛІНІЙНОГО П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА

Тема рідких добрив в Україні – це тренд останніх кількох років. Внесення рідких мінеральних добрив замість гранульованих під час сівби набуває популярності серед українських сільгоспвиробників. Ця технологія особливо актуальна, на думку експертів, у регіонах із дефіцитом вологи, а також у тих господарствах, де практикується ресурсозберігаюче землеробство. Багато виробників сільгосптехніки сьогодні йдуть шляхом модернізації існуючих моделей ґрунтообробних та посівних машин додатковим обладнанням для внесення рідких добрив. Оснащення передбачає встановлення на раму агрегату спеціальних ємностей для робочого розчину. При цьому, до кожного сошника підводяться широкі шланги, які за допомогою насосів подають добрива. Таким чином, внесення рідких добрив відбувається разом з висівом насіння, за рахунок спеціальних дозаторів.

В роботі запропоновано та виготовлено нову конструкцію дозатора з п'єзокерамічним двигуном. У дослідному зразку використовується нове технічне рішення стосовно регулювання норми виліву.

Розроблено еквівалентну електричну модель гвинтового лінійного п'єзоелектричного двигуна на основі методу електромеханічних аналогій, яка дозволить швидше розробити схему керування (драйвера). За допомогою розробленої еквівалентної електричної моделі гвинтового лінійного п'єзоелектричного двигуна отримано амплітудно-частотні характеристики біморфних п'єзоелементів двигуна при збудженні одного біморфного п'єзоелемента. Отримані дані показали, що зменшився вплив коливання одного біморфного п'єзоелемента на інші за рахунок зменшення ребер жорсткості.

Результати досліджень можуть бути використані при проектуванні дозаторів для виліву рідких добрив з п'єзокерамічним двигуном.

Ключові слова: автоматизація, приладобудування, сільгосптехніка, дозатор, рідкі добрива, п'єзоелектричний двигун, біморфний п'єзоелемент.

Вступ. Переважна більшість господарств України використовує сухі добрива в своїх технологіях вирощування рослин, однак, попри це, популярність рідких добрив зростає.

Тема рідких добрив в Україні – це тренд останніх кількох років. Внесення рідких мінеральних добрив замість гранульованих під час сівби набуває популярності серед українських сільгоспвиробників (рисунок 1) [1]. Ця технологія особливо актуальна, на думку експертів, у регіонах із дефіцитом вологи, а також у тих господарствах, де практикується ресурсозберігаюче землеробство.

Інтерес сільгоспвиробників до використання рідких мінеральних добрив зростає з кожним роком [2, 3]. Це пов'язано з тим, що їх виробництво обходиться дешевше й вони краще розподіляються при підґрунтовому внесенні.

Крім того, в рідких добривах менше токсичних для рослини речовин. Наприклад, при гранулюванні сечовини утворюється біурет, кількість якого визначається прямою залежністю від температури й часу нагрівання.

Саме рідкі добрива найбільш ефективно засвоюються з погляду біології: рідка форма є найбільш доступною для рослин, особливо в посуху.

Безумовно, внесені традиційно у вигляді гранул добрива мають спочатку розчинитися у воді, і тільки після цього вони зможуть поглинатися й успішно працювати на ріст і розвиток рослини [4]. Особливо добре рідка форма працює на старті росту, до того ж, у ній вища концентрація діючої речовини, в той час як вартість таких добрив трохи нижча, ніж гранульованих (виключаються витрати на сушіння й т. ін.).

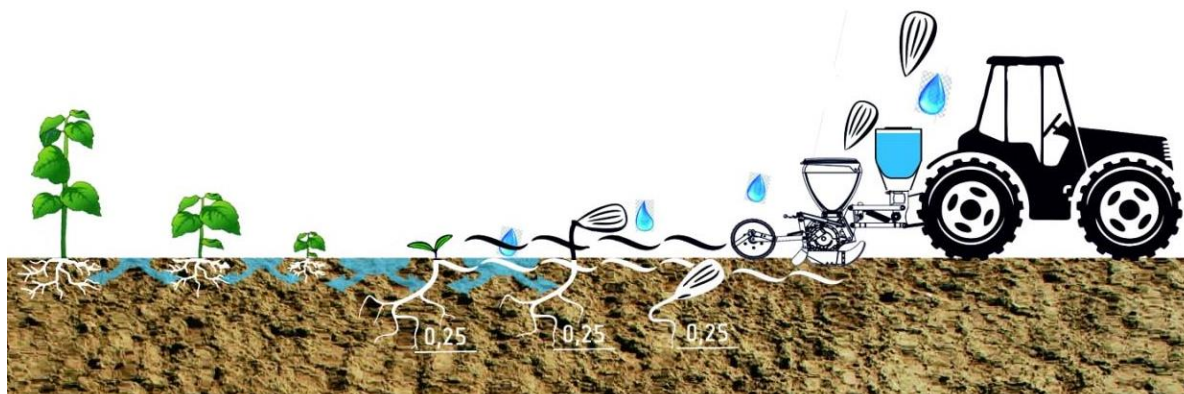


Рисунок 1. Внесення рідких добрив під час посіву [1]

Більше того, якщо гранула розкладається й стає корисною впродовж приблизно п'яти днів, то внесена в рідкому вигляді та сама речовина, наприклад азот, починає працювати вже на другий день. Відповідно, рослина раніше отримує живлення.

Сьогодні рідкі мінеральні добрива на ринку представлені у вигляді безводного аміаку (який можна швидше віднести до газоподібної форми), аміачної води, комплексних добрив (РКД) і КАС (карбамідно-аміачної суміші).

КАС переважно використовують як азотне добриво, оскільки воно містить всі три форми азоту: амідну (NH_2), амонійну (NH_4) та нітратну (NO_3) [5]. І, відповідно, таке добриво має пролонговану дію. При внесенні у ґрунт таких рідких добрив створюється поживний запас для рослини приблизно на місяць, відтак вона може витратити його під час вегетації поступово.

Як показали дослідження, втрати азоту при внесенні КАС не перевищують 10 % від його загальної кількості, в той час як при внесенні гранульованих азотних добрив вони досягають 30–40 %. Крім того, науково доведено, що звичайні азотні добрива мають коефіцієнт корисної дії (ККД) усього 65–85 %, а ефективність рідких добрив значно вища. До того ж, цей вид внесення добрив забезпечує гарний розвиток кореневої системи й ідеально підходить для мульчування та прямої сівби, оскільки добрива досягають кореневої зони й не зв'язуються вільними органічними частками [6].

Багато виробників сільгосптехніки сьогодні йдуть шляхом модернізації існуючих моделей ґрунтообробних та посівних машин

додатковим обладнанням для внесення рідких добрив [7]. Оснащення передбачає встановлення на раму агрегату спеціальних ємностей для робочого розчину. При цьому, до кожного сошника підводяться широкі шланги, які за допомогою насосів подають добрива. Таким чином, внесення рідких добрив відбувається разом з висівом насіння. Деякі виробники готові постачати це обладнання в опції до культиваторів і сівалок. Існують також окремі спецкомплекти для самостійного оснащення агрегатів.

Найбільш відомими виробниками спеціального обладнання та техніки для внесення рідких добрив є бренди: Precision Planting, Raven, Hexagon, JohnDeere, Amazone, Jacto, Fast, Fliegl, Vredo, Hi-Spec, Boguslav [8].

На рисунку 2 зображено схему сучасної системи внесення рідких добрив від компанії Precision Planting [9]. Ця система монтується на сівалку та використовується для внесення стартових рідких добрив в момент посіву різних культур для швидкого розвитку рослини.

Механізатор задає необхідну норму внесення (л/га) на панелі оператора та починає рух [10].

Системний насос 4 качає рідину з бака в колектор 12 через головний витратомір 5. У колекторі рідина рівномірно розподіляється між секціями, проходячи через секційні витратоміри 10 (vApplyHD модуль), клапани 6, та дозуючі шайби 18.

Постійна норма внесення добрив і точність дозування досягаються завдяки управлінню продуктивністю системного насоса 4, яким керує контролер. Контролер керує насосом залежно від швидкості агрегату і витрати рідини через головний витратомір 5.

Секційні витратоміри 10 працюють незалежно і служать для контролю рівномірності внесення добрив. Їх чутливість дозволяє контролювати відхилення навіть у кілька відсотків.

Клапан на виході з секційного витратоміра 6 призначений підтримувати залишковий тиск у системі для виключення витікання рідини з бака під власною вагою, після відключення насоса [9].

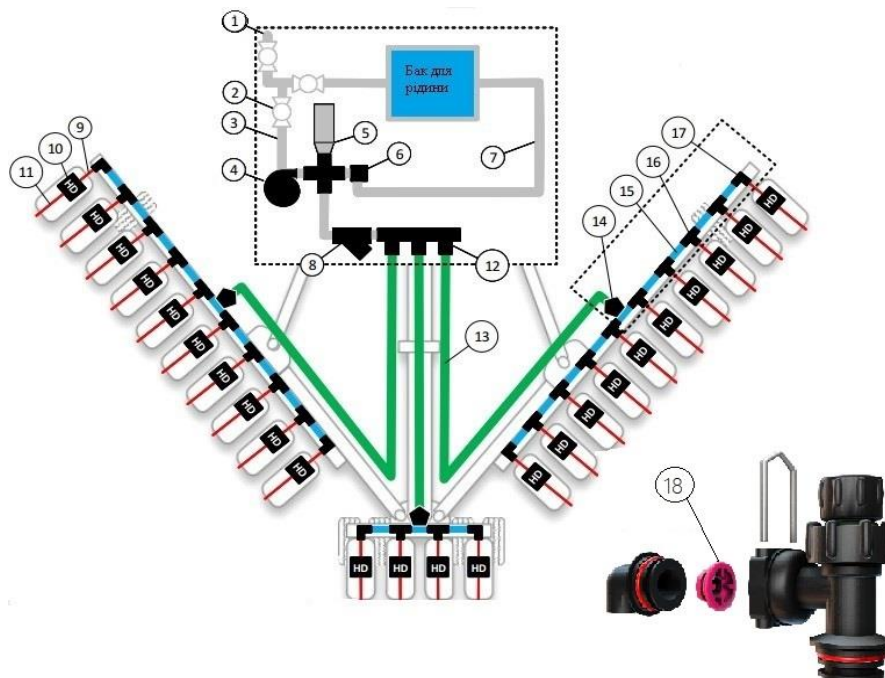


Рисунок 2. Схема сучасної системи внесення рідких добрив від компанії Precision Planting:

- 1 – розподільник; 2 – запірний клапан; 3 – шланг подачі; 4 – системний насос;
 5 – головний витратомір; 6 – клапан скидання тиску; 7 – зворотний шланг; 8 – набір фільтрів;
 9 – трубка ряду; 10 – vApplyHD модуль; 11 – напірна трубка; 12 – секція колектора;
 13 – секційний шланг; 14 – розподільник; 15 – шланг-подовжувач; 16 – розподільник на секцію;
 17 – заглушка секції; 18 – дозуюча шайба [9]

Постановка проблеми. Запропоновано конструкцію дозатора з гвинтовим п'єзокерамічним двигуном, з більш точним

позиціонуванням і нормою вилу. Структурну схему його використання в системі вилу зображено на рисунку 3.

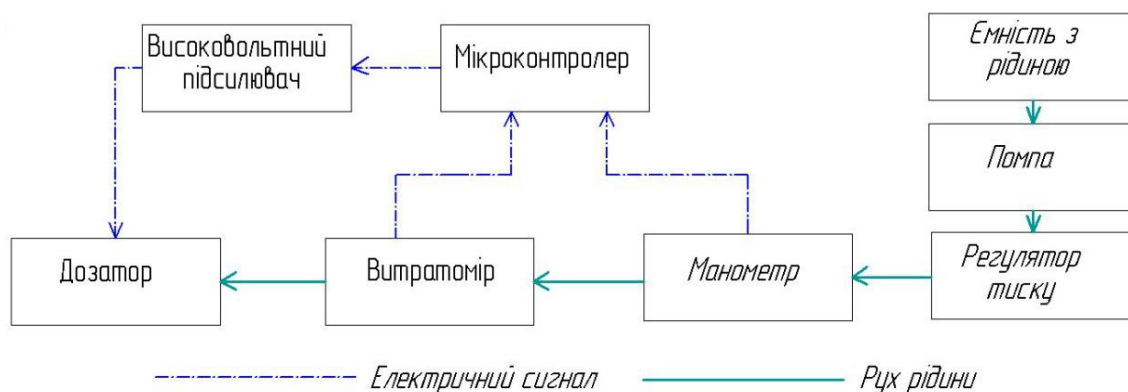


Рисунок 3. Структурна схема системи вилу

Із рисунка 3 видно, що головним елементом системи вилу є дозатор. На рисунку 4 представлено загальний вигляд розробленої

конструкції дозатора, в якій основною складовою є гвинтовий п'єзокерамічний двигун.

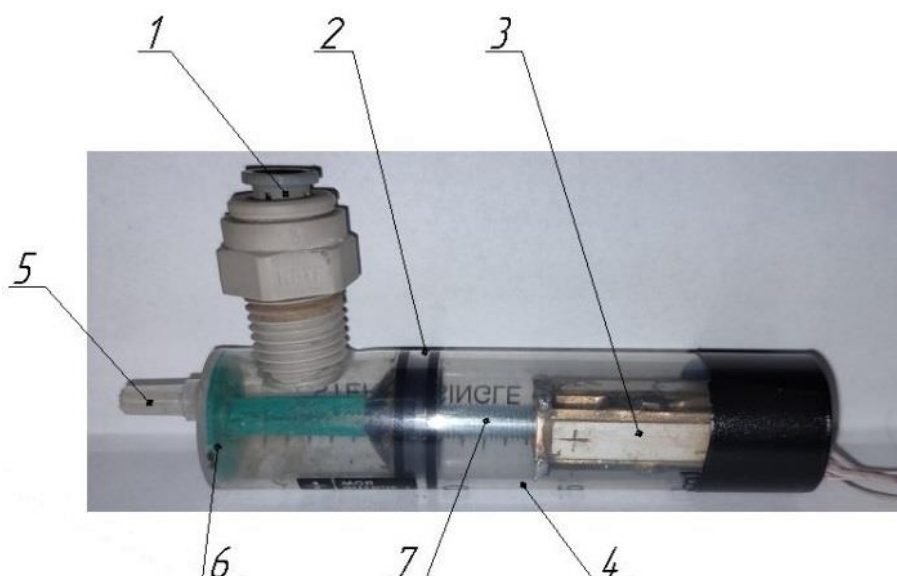


Рисунок 4. Конструкція дозатора з гвинтовим п'єзокерамічним двигуном:

1 – подача рідини; 2 – сальник; 3 – розроблений гвинтовий п'єзокерамічний двигун; 4 – корпус дозатора; 5 – вихід рідини; 6 – змінні шайби дозатора; 7 – вал

За рахунок точного позиціонування гвинтового лінійного п'єзокерамічного двигуна на основі біморфних п'єзоелементів здійснюється точне регулювання та дозування норми виливу, що, в свою чергу, не призводить до перевитрат бюджету та рідких добрив і дає економічний ефект. Дозуюча шайба призначена для створення тиску в магістралі та рівномірного розподілу рідини по секціях.

Змінні шайби дозатора залежно від культури, яка вирощується, дають змогу підбирати потрібну норму виливу рідких добрив. Потрібна норма рідких добрив дасть змогу забезпечити задовільну вегетацію рослини, що, в свою чергу, покращить врожай. Використання розробленої конструкції дозатора з гвинтовим п'єзокерамічним двигуном є ефективним та економічно вигідним. Однією із важливих проблем використання п'єзокерамічних двигунів є узгодження зі схемою керування (драйвером). Таким чином, узгодження п'єзокерамічного двигуна зі схемою керування є актуальним завданням.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є удосконалення моделі гвинтового лінійного п'єзоелектричного двигуна на основі методу електромеханічних аналогій.

Для побудови моделі гвинтового лінійного п'єзоелектричного двигуна на основі

методу електромеханічних аналогій необхідно виконати такі задачі: розробити еквівалентну електричну схему (модель) для п'єзокерамічного двигуна на основі біморфних п'єзоелементів (БПЕ); провести моделювання еквівалентної схеми, що відповідає параметрам реальних БПЕ та пружних елементів; визначити амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) біморфних п'єзоелементів двигуна при збудженні БПЕ.

Виклад основного матеріалу. На рисунку 5 зображено конструкцію гвинтового п'єзокерамічного двигуна з використанням біморфних п'єзоелементів [11].

Принцип роботи двигуна полягає в наступному. При подачі змінної двофазної електричної напруги одна з них подається на пару протилежних пластин біморфних п'єзоелементів, а інша з фазою, що зсунута на 90° , – на другу пару протилежних аналогічних біморфних п'єзоелементів. Загальний «мінус» сигналів під'єднаний до латунних пластин. Такий спосіб збудження приводить до виникнення механічних коливань, які передаються металевій гайці. В результаті ходовий вал обертається і лінійно переміщується щодо металевої гайки. Змінюючи зсув фаз напруги, можна змінювати напрямок руху гвинта.

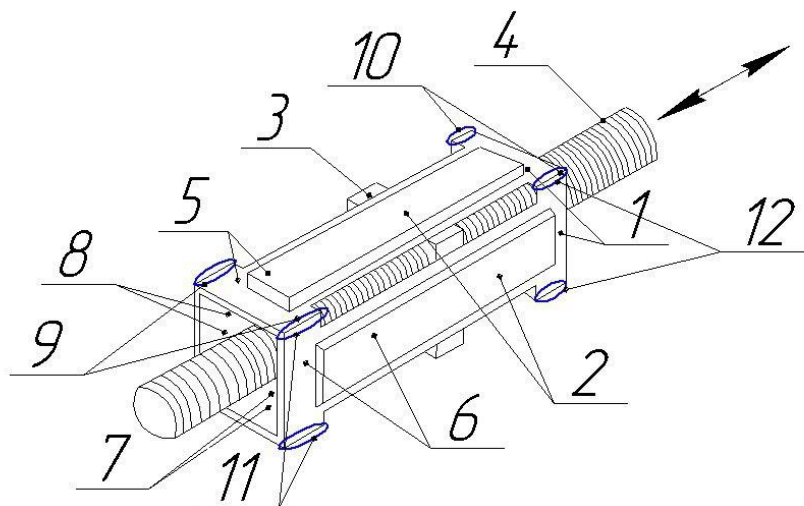


Рисунок 5. Конструкція п'єзоелектричного двигуна з використанням біморфних п'єзоелементів:

1 – латунні пластини; 2 – п'єзоелементи; 3 – чотиригранна металева гайка; 4 – ходовий вал;

5 – біморфний п'єзоелемент 1 (БПЕ 1); 6 – біморфний п'єзоелемент 2 (БПЕ 2);

7 – біморфний п'єзоелемент 3 (БПЕ 3); 8 – біморфний п'єзоелемент 4 (БПЕ 4);

9-10 – згинальні жорсткості пружних пластин; 11-12 – згинальні жорсткості пружних пластин [11]

Для побудови моделі використовують метод електромеханічних аналогій [12-14]. Метод електромеханічних аналогій є зручним засобом дослідження внутрішньої структури механічних систем та елементів. Цей метод дозволяє замінити рівняння руху цієї механічної системи відповідними рівняннями для еквівалентної електричної схеми. Найчастіше

завдання полягає у вивченні деякого еквівалентного коливального контуру.

Еквівалентну електричну схему (модель) п'єзокерамічного двигуна на основі біморфних п'єзоелементів, складену з використанням пакета програм для автоматизованого проектування електронних схем Proteus, зображено на рисунку 6.

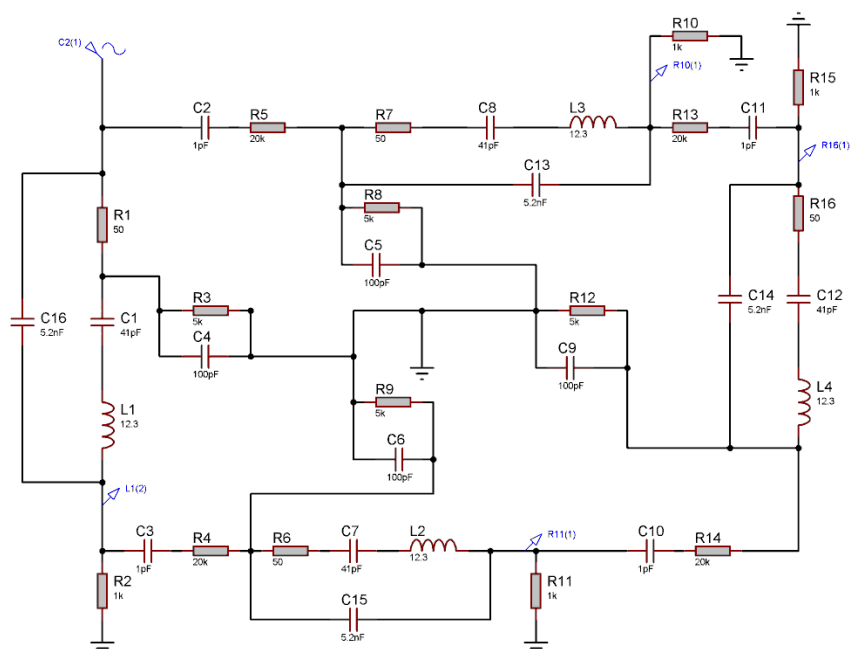


Рисунок 6. Еквівалентна електрична схема гвинтового лінійного п'єзоелектричного двигуна побудована на основі методу електромеханічних аналогій

Конструкцію двигуна можна представити як суму послідовних коливальних контурів. Коливальні контури R1-C1-L1-C16, R6-C7-L2-C15, R16-C12-L4-C14, R7-C8-L3-C13 відповідають біморфним п'єзоелементам 1-4 на рисунку 5. Біморфні п'єзоелементи 1-4 пов'язані один з одним пружним зв'язком (латунні пластини 1) із втратами, які представлені елементами R5-C2, R13-C11, R14-C10, R4-C3 та які частково характеризують металеві пластини біморфних п'єзоелементів 1-4. Елементи, які на еквівалентній електричній схемі показані як R3-C4, R8-C5, R12-C9, R9-C6, характеризують пружне з'єднання біморфних п'єзоелементів з гайкою 3, по якій рухається вал 4.

Результати досліджень. Ступінь загасань коливань пари протилежних біморфних п'єзоелементів визначається за допомогою наведених нижче формул:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + (k_1 + k_2 + k_3 + k_4)x = A \sin(\omega t), \quad (1)$$

де m – маса двигуна; γ – коефіцієнт дисипації; k_1, k_3 – згинальні жорсткості БПЕ 1 і БПЕ 3 відповідно; k_2, k_4 – згинальні жорсткості пружних пластин 9 та 10; A – сила, прикладена до біморфного п'єзоелемента:

$$A = \frac{U \cdot C}{d_{31}}, \quad (2)$$

(U – прикладена напруга, C – ємність між електродами п'єзоелемента, d_{31} – п'єзомодуль); ω – частота коливання біморфного п'єзоелемента.

$$k_{1,3} = 3 \left[\lambda_B L^3 + (L-l)\Delta \right]^{-1};$$

$$\Delta = \lambda_M - \lambda_B;$$

$$\lambda_M = (E_M J_M)^{-1};$$

$$J_M = \frac{bh_M^3}{12}; \quad (3)$$

$$\lambda_B = \frac{12}{b \left(E_M h_M^3 + E_{II} h_{II}^3 \left(1 + 3 \left(1 + \frac{h_M}{h_{II}} \right)^2 \right) \right)}, \quad (4)$$

де E_M і E_{II} – модулі пружності пластини та п'єзоелемента; h_M і h_{II} – товщини металеві пластини та п'єзоелемента; b – ширина металеві пластини та п'єзоелемента; L, l – довжина металеві пластини та п'єзоелемента.

$$k_{2,4} = \frac{E_{M1} t^3 \cdot h}{4L^3}, \quad (5)$$

де E_{M1} – модуль пружності металеві пластини; t – товщина пластини; h – ширина пластини; L – довжина пластини.

На рисунку 7 зображено амплітудно-частотні характеристики біморфних п'єзоелементів при збудженні одного з БПЕ, отримані за допомогою еквівалентної електричної схеми в пакеті програми Proteus.

Моделювання проводилося при параметрах еквівалентної схеми, які відповідають параметрам реальних БПЕ та пружних елементів.

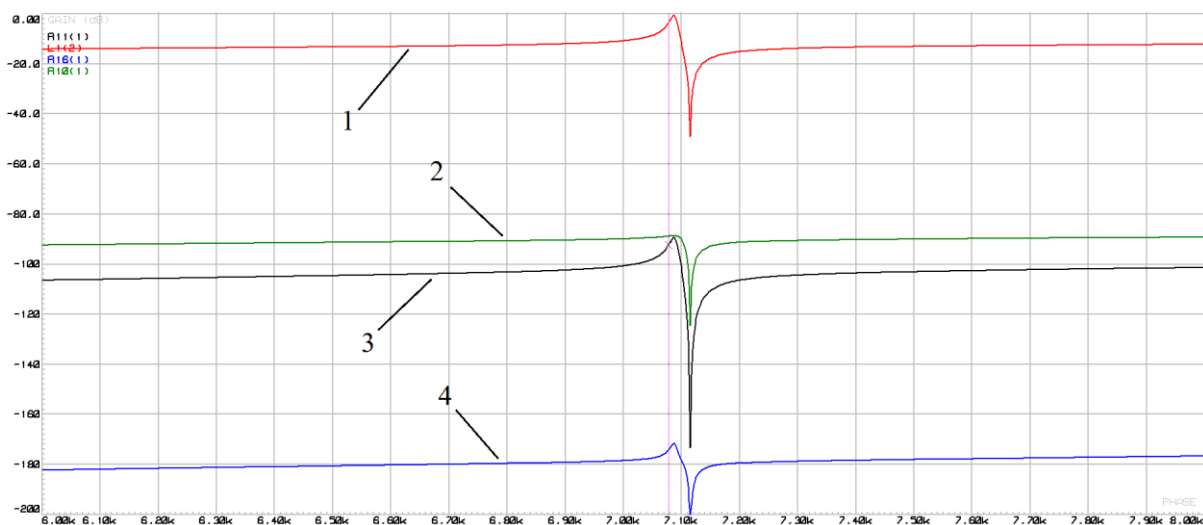


Рисунок 7. Амплітудно-частотні характеристики біморфних п'єзоелементів двигуна при збудженні БПЕ 1: 1) АЧХ БПЕ 4; 2) АЧХ БПЕ 1; 3) АЧХ БПЕ 3; 4) АЧХ БПЕ 2

Обговорення результатів. Як видно з рисунка 7, коливання БПЕ 1 не істотно впливають на інші біморфні п'єзоелементи двигуна (рисунок 5). Також зменшився вплив коливання одного біморфного п'єзоелемента на інші за рахунок зменшення ребер жорсткості [15], що дає змогу всім біморфним п'єзоелементам коливатись одночасно. Отримана резонансна частота з графіка АЧХ (рисунок 7) становить 7110 Гц. Вони практично збігаються з отриманими даними обчислень за допомогою модуля Piezoelectric Effects COMSOL та інструментів Solid Mechanics and Electrostatics [16-18] і становлять 7180 Гц, які наведені в роботі [19]. Отже, експериментальні дослідження підтверджують працездатність еквівалентної схеми заміщення, яка побудована на основі методу електромеханічних аналогій.

За результатами проведеного комп'ютерного моделювання отримано амплітудно-частотні характеристики біморфних п'єзоелементів двигуна при збудженні БПЕ 1, отримана основна резонансна частота становить 7110 Гц.

Окрім цього, з графіка АЧХ також видно, що зменшився вплив коливання одного біморфного п'єзоелемента на інші за рахунок зменшення ребер жорсткості, що дає змогу всім біморфним п'єзоелементам коливатись більш незалежно один від одного.

Отримані дані дозволяють швидше розробити схему керування (драйвера) для гвинтового лінійного п'єзоелектричного двигуна.

Висновки. Проаналізовано альтернативний напрям використання гвинтового п'єзокерамічного двигуна. Виявлено його переваги та недоліки.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні моделі гвинтового п'єзокерамічного двигуна на основі методу електромеханічних аналогій.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

– побудована модель за допомогою методу електромеханічних аналогій дозволяє прискорити узгодження п'єзокерамічного двигуна зі схемою керування, що підвищить ефективність роботи гвинтового п'єзокерамічного двигуна;

– результати досліджень можуть бути використані при проектуванні гвинтових п'єзокерамічних двигунів.

Подальші дослідження авторів можуть бути спрямовані на розробку схеми керування п'єзокерамічного двигуна та створення моделей біморфних п'єзоелементів п'єзокерамічного двигуна для отримання більшого обертового моменту.

Список використаних джерел

- [1] "Внесення рідких добрив із посівом". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.agronom.com.ua/vnesennya-ridkyh-dobryv-iz-posivom/>. Дата звернення: Листоп. 04, 2022.
- [2] Б. С. Носко, В. В. Медведєв, та О. П. Непочатов, "Роль добрив у підвищенні ефективності землеробства в посушливих умовах", *Вісник аграрної науки*, № 5, с. 11-15, 2000.
- [3] Г. М. Господаренко, *Розробка та обґрунтування інтегрованої системи удобрення в польовій сівозміні на чорноземі опідзоленому Правобережного Лісостепу України*. Київ, Україна: НАУ, 2001.
- [4] В. В. Гамаюнова, *Ефективність зрошення та вплив добрив на використання вологи рослинами і підвищення стійкості землеробства зони степу*. Харків, Україна: Стильна типографія, 2018, с. 108-126.
- [5] Є. Дудкіна, "Карбамідно-аміачна суміш (КАС)", *Агроном*, № 1 (лютий), с. 20-22, 2013.
- [6] Н. А. Пасічник, та Н. А. Марчук, "Застосування КАС для підживлення пшениці озимої на лучно-чорноземному карбонатному ґрунті", *Вісник ХНАУ*, № 1, с. 140-143, 2013.
- [7] В. О. Кудря, та І. П. Прокоп'єв, "Технічні засоби для внесення рідких добрив та перспективи їх розвитку", *Механізація та електрифікація сільського господарства: міжвідомч. темат. наук. зб. НААН ННЦ «ІМЕСГ»*, Глеваха, вип. 96, с. 201-208, 2012.
- [8] "Техніка для внесення рідких добрив. Що, як і чим?" [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://traktorist.ua/articles/tehnika-dlya-vnesennya-ridkih-dobryv-shcho-yak-i-chim>. Дата звернення: Листоп. 08, 2022.
- [9] "vApplyHD Plumbing Overview and Recommendations". [Online]. Available: <https://docplayer.net/51852206-Plumbing->

- overview-and-recommendations.html. Accessed on: Nov. 09, 2022.
- [10] "vApplyHD Operator's Guide Gen2 2020 SeedSense Displays". [Online]. Available: https://support.surefireag.com/media/documents/vApply_Operators_Guide_955656_F8hyg_up.pdf. Accessed on: Nov. 03, 2022.
- [11] С. О. Філімонов, Н. В. Філімонова, та Д. С. Бачеріков, "Використання п'єзоелектричного двигуна в агросфері", на *Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конф. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку*, 2020, с. 15-17.
- [12] Л. А. Островский, *Основы общей теории электроизмерительных устройств*. Ленинград: Энергия, 1971.
- [13] V. M. Sharapov, S. A. Filimonov, Z. V. Sotula, L. G. Kunitskaya, and V. M. Zaika, "Improvement of piezoceramic scanners", in *2013 IEEE 33rd Int. Sci. Conf. Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2013: Conf. Proc.*, 2013, 6552063, pp. 144-146.
- [14] В. М. Шарапов, О. М. Гуржій, та С. А. Філімонов, "Трикоординатний п'єзокерамічний сканер на біморфних п'єзоелементах для зондового наномікроскопа", *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, № 4 (70), с. 13-15, 2007.
- [15] C. Bazilo, S. Filimonov, N. Filimonova, and D. Bacherikov, "Determination of geometric parameters of piezoceramic plates of bimorph screw linear piezo motor for liquid fertilizer dispenser", in *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, Z. Hu, S. Petoukhov, M. Yanovsky and F. He, Eds., vol. 463. Springer, Cham, pp. 84-94, 2022. doi: 10.1007/978-3-031-03877-8_8.
- [16] L. Wang et al., "High accuracy Comsol simulation method of bimorph cantilever for piezoelectric vibration energy harvesting", *AIP Advances*, vol. 9, 095067, pp. 1-9, 2019. doi: 10.1063/1.5119328.
- [17] 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. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.03.
- [18] V. Ya. Halchenko, S. A. Filimonov, A. V. Batrachenko, and N. V. Filimonova, "Increase the efficiency of the linear piezoelectric motor", *Nano-Electron. Phys.*, vol. 10, no. 4, 04025, 2018. doi: 10.21272/jnep.10(4).04025.
- [19] V. Halchenko, D. Bacherikov, S. Filimonov, and N. Filimonova, "Improvement of a linear screw piezo motor design for use in accurate liquid dosing assembly", in *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, O. Arsenyeva, T. Romanova, M. Sukhonos and Y. Tsegelnyk, Eds., vol. 536. Springer, Cham. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_22.

References

- [1] "Application of liquid fertilizers with sowing". [Online]. Available: <https://www.agronom.com.ua/vnesennya-ridkyh-dobryv-iz-posivom/>. Accessed on: Nov.04, 2022 [in Ukrainian].
- [2] B. S. Nosko, V. V. Medvedev, and O. P. Nepochatov, "The role of fertilizers in increasing the efficiency of agriculture in arid conditions", *Visnyk ahrarnoi nauky*, no. 5, pp. 11-15, 2000 [in Ukrainian].
- [3] H. M. Gospodarenko, *Development and substantiation of an integrated system of fertilization in field crop rotation on chernozem asolized in the Right Bank Forest Steppe of Ukraine*. Kyiv, Ukraine: NAU, 2001 [in Ukrainian].
- [4] V. V. Gamayunova, *Irrigation efficiency and the effect of fertilizers on the use of moisture by plants and increasing the sustainability of agriculture in the steppe zone*. Kharkiv, Ukraine: Stylna typohrafiia, 2018, pp. 108-126 [in Ukrainian].
- [5] Ye. Dudkina, "Urea-ammonia mixture (KAS)", *Ahronom*, no. 1 (February), pp. 20-22, 2013 [in Ukrainian].
- [6] N. A. Pasichnik, and N. A. Marchuk, "Application of KAS for fertilizing winter wheat on meadow-chernozem carbonate

- soil", *Visnyk KhNAU*, no. 1, pp. 140-143, 2013 [in Ukrainian].
- [7] V. O. Kudrya, and I. P. Prokopiev, "Technical means for applying liquid fertilizers and prospects for their development", *Mechanization and electrification of agriculture: interdepartmental thematic sci. coll. of NAAS NSC "IMESG"*, Glevakha, iss. 96, pp. 201-208, 2012 [in Ukrainian].
- [8] "Equipment for applying liquid fertilizers. What, how and with what?" [Online]. Available: <https://traktorist.ua/articles/tehnika-dlya-vnesennya-ridkih-dobriv-shcho-yak-i-chim>. Accessed on: Nov. 08, 2022 [in Ukrainian].
- [9] "vApplyHD Plumbing Overview and Recommendations". [Online]. Available: <https://docplayer.net/51852206-Plumbing-overview-and-recommendations.html>. Accessed on: Nov. 09, 2022.
- [10] "vApplyHD Operator's Guide Gen2 2020 SeedSense Displays". [Online]. Available: https://support.surefireag.com/media/documents/vApply_Operators_Guide_955656_F8hygup.pdf. Accessed on: Nov. 30, 2022.
- [11] S. O. Filimonov, N. V. Filimonova, and D. S. Bacherikov, "Using a piezoelectric motor in agriculture", in *All-Ukr. Sci. and Pract. Internet Conf. Automation and Computer-Integrated Technologies in Production and Education: State, Achievements, Development Prospects*, 2020, pp. 15-17 [in Ukrainian]
- [12] L. A. Ostrovsky, *Fundamentals of the general theory of electrical measuring devices*. Leningrad, Russia: Energiya, 1971 [in Russian].
- [13] V. M. Sharapov, S. A. Filimonov, Z. V. Sotula, L. G. Kunitskaya, and V. M. Zaika, "Improvement of piezoceramic scanners", in *2013 IEEE 33rd Int. Sci. Conf. Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2013: Conf. Proc.*, 2013, 6552063, pp. 144-146.
- [14] V. M. Sharapov, O. M. Gurzhii, and S. A. Filimonov, "Three-coordinate piezoceramic scanner on bimorphic piezo elements for a probe nanomicroscope", *Tekhnolohiia ta konstruiuvannia v elektronii aparaturi*, no. 4 (70), pp. 13-15, 2007 [in Ukrainian]
- [15] C. Bazilo, S. Filimonov, N. Filimonova, and D. Bacherikov, "Determination of geometric parameters of piezoceramic plates of bimorph screw linear piezo motor for liquid fertilizer dispenser", in *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, Z. Hu, S. Petoukhov, M. Yanovsky and F. He, Eds., vol. 463. Springer, Cham, pp. 84-94, 2022. doi: 10.1007/978-3-031-03877-8_8.
- [16] L. Wang et al., "High accuracy Comsol simulation method of bimorph cantilever for piezoelectric vibration energy harvesting", *AIP Advances*, vol. 9, 095067, pp. 1-9, 2019. doi: 10.1063/1.5119328.
- [17] 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. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.03.
- [18] V. Ya. Halchenko, S. A. Filimonov, A. V. Batrachenko, and N. V. Filimonova, "Increase the efficiency of the linear piezoelectric motor", *Nano-Electron. Phys.*, vol. 10, no. 4, 04025, 2018. doi: 10.21272/jnep.10(4).04025.
- [19] V. Halchenko, D. Bacherikov, S. Filimonov, and N. Filimonova, "Improvement of a linear screw piezo motor design for use in accurate liquid dosing assembly", in *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, O. Arsenyeva, T. Romanova, M. Sukhonos and Y. Tsegelnyk, Eds., vol. 536. Springer, Cham. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_22.

S. O. Filimonov, *Ph. D., Associate Professor*,
D. S. Bacherikov, *Postgraduate*
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

MODEL OF SCREW LINEAR PIEZOELECTRIC MOTOR

The topic of liquid fertilizers in Ukraine is a trend of the last few years. The application of liquid mineral fertilizers instead of granular ones during sowing is gaining popularity among Ukrainian agricultural producers. This technology is especially relevant, according to experts, in regions with moisture deficiency, and also in those farms where resource-saving agriculture is practiced. Many manufacturers of agricultural machinery today go the way of modernizing existing models of tillage and sowing machines with additional equipment for applying liquid fertilizers. The equipment provides for the installation of special containers for the working solution on the frame of the unit. At the same time, wide hoses, which are supplied with fertilizers using pumps, are connected to each opener. Thus, the application of liquid fertilizers occurs together with the sowing of seeds, at the expense of special dispensers.

In the work, a new design of a dispenser with a piezoceramic motor is proposed and manufactured. In the experimental model, a new technical solution is used to regulate the flow rate.

An equivalent electrical model of a helical linear piezoelectric motor based on the method of electromechanical analogies, which will allow to develop a control scheme (driver) more quickly, has been developed.

Using the developed equivalent electrical model of the helical linear piezoelectric motor, the amplitude-frequency characteristics of bimorphic piezoelements of the motor upon excitation of one bimorphic piezo element have been obtained. The obtained data show that the influence of the oscillation of one bimorphic piezo element on others has decreased due to the reduction of stiffening ribs.

The results of the research can be used in the design of liquid fertilizer dispensers with a piezoceramic motor.

Keywords: *automation, instrumentation, agricultural machinery, dispenser, liquid fertilizers, piezoelectric motor, bimorph piezoelement.*

Стаття надійшла 11.11.2022

Прийнято 06.12.2022