



Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2306-8744

DOI: 10.37128/2306-8744-2021-3

# Вібрації в техніці та технологіях



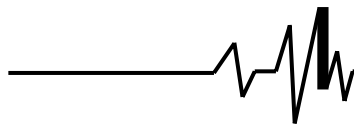
**Всеукраїнський науково-технічний журнал**

**Ukrainian Scientific & Technical Journal**

# **Вібрації в техніці та технологіях**

**№ 3 (102)**

**Вінниця 2021**

**ВІБРАЦІЇ В  
ТЕХНІЦІ ТА  
ТЕХНОЛОГІЯХ**

Журнал науково-виробничого та навчального  
спрямування Видавець: Вінницький національний  
аграрний університет

Заснований у 1994 році під назвою “Вібрації в техніці та  
технологіях”

Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової  
інформації

КВ № 16643-5115 ПР від 30.04.2010 р.

*Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та технологіях” / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. – Вінниця, 2021. – 3 (102) – 108 с.*

*Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного університету (протокол №2 від 28.09.2021 р.)*

*Періодичне видання включено до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук (Категорія «Б» Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 р. № 886)*

**Головний редактор**

**Калетнік Г.М.** – д.е.н., професор,  
академік НААН, Вінницький національний  
аграрний університет

**Заступник головного  
редактора**

**Адамчук В.В.** – д.т.н., проф., акад. НААН,  
Національний науковий центр “Інститут  
механізації та електрифікації сільського  
господарства”

**Відповідальний секретар**

**Солона О.В.** – к.т.н., доц., Вінницький  
національний аграрний університет

**Члени редакційної колегії**

**Булгаков В.М.** – д.т.н., професор, академік  
НААН, Національний університет  
біоресурсів і природокористування України

**Граняк В.Ф.** – к.т.н., доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

**Деревенько І.А.** – к.т.н., доцент,  
Національний університет «Львівська  
політехніка»

**Зіньковський А.П.** – д.т.н., професор,  
Інститут проблем міцності імені Г. С.  
Писаренка НАН України

**Купчук І.М.** – к.т.н., доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

**Матвєєв В.В.** – д.ф.-м.н., професор,  
академік НАН, Інститут проблем міцності  
імені Г.С. Писаренка НАН України

**Надуть В.П.** – д.т.н., професор, Інститут  
геотехнічної механіки імені М.С. Полякова  
НАН України

**Ольшанський В.П.** – д.ф.-м.н., професор,  
Харківський національний технічний  
університет сільського господарства імені  
Петра Василенка

**Полєвода Ю.А.** – к.т.н., доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

**Севостьянов І.В.** – д.т.н., професор,  
Вінницький національний аграрний  
університет

**Твердохліб І.В.** – к.т.н., доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

**Токарчук О.А.** – к.т.н., доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

**Цуркан О.В.** – д.т.н. доцент, Вінницький  
національний аграрний університет

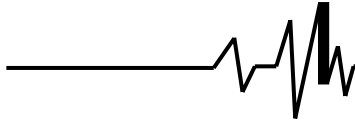
**Зарубіжні члени редакційної колегії**

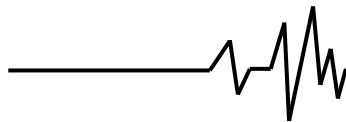
**Максимов Джордан Тодоров** – д.т.н., проф., Технічний Університет Габрово (Болгарія)

Технічний редактор **Замрій М.А.**

Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний  
університет, тел. 46 – 00– 03

Сайт журналу: <http://vibrojournal.vsau.org/> Електронна адреса: [vibration.vin@ukr.net](mailto:vibration.vin@ukr.net)

**З М І С Т****1. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН***Бовсуновський А.П.***ВІБРАЦІЙНА ДІАГНОСТИКА ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ У КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ  
ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ НА СТАДІЇ РЕМОНТУ.....5***Цуркан О.В., Полевода Ю.А., Присяжнюк Д.В.***РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОПРОДУКТИВНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ  
ДЛЯ СИНТЕЗУ ОЗОНУ У ВІБРАЦІЙНІЙ СУШАРЦІ.....15***Булгаков В. М., Кувачов В.П., Солоня О. В., Борис М.М.***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ КОЛИВАНЬ  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИНО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ.....24***Ольшанський В. П., Сліпченко М.В., Солоня О.В, Купчук І.М.***ПРО АНАЛІТИЧНИЙ РОЗВ'ЯЗОК РІВНЯННЯ СИЛИ УДАРУ ДВОХ ПРУЖНИХ ТІЛ.....34***Іскович-Лотоцький Р.Д., Веселовська Н.Р, Гнатюк О.Ф.***ПЕРСПЕКТИВНИЙ ВІБРОУДАРНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ РОЗВАНТАЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ  
ЗАСОБІВ.....43***Ярошенко Л.В., Чубик Р.В., Деревенько І.А.***ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ  
ДЕБАЛАНСНИМ ВІБРОПРИВОДОМ ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН НА ОСНОВІ ШТУЧНОЇ  
НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ .....52***Спірін А.В., Твердохліб І.В., Замрій М.А.***ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВІДЦЕНТРОВО-ГРАВІТАЦІЙНОГО  
СЕПАРАТОРА ТЕРКОВОГО ПРИСТРОЮ.....64****2. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА***Gaidamak O., Matviychuk V.***CREATION OF ELECTRIC CONDUCTIVE COATINGS USING GAS-DYNAMIC SPRAYING.....72***Гулько І.В.***ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ЗМІНИ ТИСКУ ПРИ РОБОТІ ГІДРАВЛІЧНОЇ  
СИСТЕМИ ІЗ ЧОТИРМА ПОСЛІДОВНО СПОЛУЧЕНИМИ ГІДРОМОТОРАМИ.....81***Руткевич В.С., Яропуд В.М., Купчук І.М., Остапчук О.О.***ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ГІДРОПРИВОДА  
ВІДОКРЕМЛЮВАЧА СТЕБЛОВИХ КОРМІВ З ТРАНШЕЙНИХ СХОВИЩ.....88****3. ПЕРЕРОБНІ ТА ХАРЧОВІ ВИРОБНИЦТВА***Цуркан О. В., Спірін А. В., Твердохліб І. В.***ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТІВ ВІБРАЦІЙНОГО СУШІННЯ..100**

**Руткевич В. С.**

к.т.н., доцент

**Яропуд В. М.**

к.т.н., доцент

**Купчук І. М.**

к.т.н., доцент

**Остапчук О. О.**

Магістрант

**Вінницький національний  
аграрний університет****Rutkevych V.**

PhD of Eng., Associate Professor

**Yaropud V.**

PhD of Eng., Associate Professor

**Kupchuk I.**

Ph.D. of Eng., Associate Professor

**Ostapchuk A.**

master's student

**Vinnysia National  
Agrarian University****УДК 631.363:621.86.068:62–82****DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-10****ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА  
ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ  
ГІДРОПРИВОДА  
ВІДОКРЕМЛЮВАЧА  
СТЕБЛОВИХ КОРМІВ З  
ТРАНШЕЙНИХ СХОВИЩ**

*Розглянуто питання прискореного створення ефективного та енергоощадного гідравлічного привода відокремлювача стеблових кормів з траншейних сховищ, шляхом імітаційного моделювання технічної системи. Зазначено, що використання імітаційного моделювання дозволяє уникнути значних капіталовкладень, необхідних для виготовлення дослідного зразка сільськогосподарської машини, при умові детального дослідження фізичної моделі гідравлічного привода відокремлювача стеблових кормів, а також дозволяє перевірити адекватність результатів, отриманих в процесі математичного моделювання, та визначити необхідні удосконалення запропонованого гідравлічного привода.*

*Представлено принципово нову конструктивно-технологічну схему відокремлювача стеблових кормів з траншейних сховищ, що дозволяє виконувати процес вивантаження стеблових кормів з траншейних сховищ згідно з зоотехнічними вимогами.*

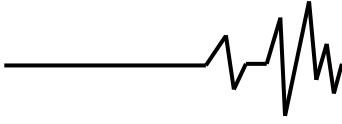
*Запропоновано стенд для імітаційного моделювання перехідних процесів у гідравлічному приводі відокремлювача стеблових кормів з траншейних сховищ. Конструкція експериментального стенда також дозволяє дослідити гідравлічний привод відокремлювача стеблових кормів у динамічному режимі при змінній технологічній навантаженні на робочих органах та змінні параметри адаптивного роздільника потоку рідини та системи в цілому. В результаті проведення досліджень та аналізі перехідних процесів у гідроприводі виявлено достатньо близьке співпадання отриманих результатів математичного та імітаційного моделювання роботи гідравлічного привода відокремлювача стеблових кормів, що дозволяє рекомендувати отримані розрахункові залежності у використанні при розробленні гідравлічних приводів відокремлювачів стеблових кормів.*

**Ключові слова:** відокремлювач стеблових кормів, стенд, гідропривод, імітаційне моделювання, результати експерименту, перехідний процес.

**Вступ.** Гідравлічні приводи є невід'ємним елементом високоефективної сільськогосподарської техніки завдяки великій питомій потужності, високій швидкодії, малим

габаритам, економічності і сполучуваності з мікропроцесорною технікою управління [1].

Успішні вітчизняні підприємства – виробники машинобудівної гідравліки, мають сучасне комп'ютерне оснащення і пов'язують



свій прогрес з використанням в процесі проектування сучасних технологій САПР і нових комп'ютерних програм, що дозволяють виконувати різні види моделювання. Але очевидно, що ефективно використання сучасних технологій САПР для проектування складного гідравлічного привода сільськогосподарської техніки можливо лише при наявності системи комплексного моделювання цієї техніки, яка враховує специфіку машинобудівної гідравліки. Передумовою для виконання роботи в цьому напрямку є формування в різних галузях машинобудування тенденції створення елементів комплексного модельного супроводу життєвого циклу виробів. Разом з тим аналіз стану справ у вітчизняній машинобудівній гідравліці показав, що моделювання елементів гідроприводів в процесі їх проектування не є відпрацьованою типовою процедурою. Відповідно і автоматизація проектування носить обмежений характер.

Причинами такого становища є:

- недостатність розвитку методик, орієнтованих на імітаційне моделювання елементів гідроприводу;
- недостатність розвитку методик, орієнтованих на алгоритмне моделювання елементів гідроприводів;
- відсутність концепції комплексного використання програм САПР для розрахунків елементів гідроприводу;
- складність картини робочих процесів гідропристроїв через багатофакторність цих процесів, недостатня вивченість, в ряді випадків, цих процесів через складність їх експериментального дослідження;
- різноманіття конструкцій елементів, які використовуються в гідроприводі, що ускладнює розробку узагальнених методик;
- відсутність перспективних оригінальних конструктивних розробок, які б забезпечили конкурентоспроможність даної продукції як в Україні, так і за кордоном [2].

В силу цих причин розробники елементів гідроприводів орієнтуються на власні аналітичні методики і розрахунки першого наближення, а використання сучасних програмних продуктів носить одиничний характер. Результатом такого підходу є невисока точність розрахунків і, відповідно, необхідність включення в процес проектування,

a)

в кожному окремому випадку, великого об'єму складних і дорогих експериментів, а також великі терміни проектування. З викладеного випливає, що в даний час існує актуальна науково-технічна проблема розробки орієнтованих на сучасні програмні засоби методів автоматизованого аналізу і синтезу елементів гідроприводу. Таких методів, які узагальнили б застосування до елементів гідроприводу відомі в машинобудівній гідравліці розрахункові методики, але на новій обчислювальній базі, і тим забезпечили б підвищення автоматизації та ефективності проектування. У науковому плані це необхідно для створення єдиної методичної основи – основи для узагальнення відомих методичних розробок в області розрахунку і моделювання елементів гідроприводу, а також для створення нових діагностичних методик.

**Мета дослідження.** Експериментальне підтвердження на імітаційному стенді працездатності розробленого гідравлічного привода відокремлювача стеблових кормів, вивчення робочих процесів та характеристик гідропривода при зміні параметрів його роботи, а також порівняння характеристик гідропривода, аналітично розрахованих, з отриманими експериментально.

Задачею дослідження є перевірка адекватності спрощень і припущень, які були використанні при розробленні математичної моделі, обґрунтування особливості робочих процесів, що відбуваються у гідравлічному приводі відокремлювача стеблових кормів, що зумовлені взаємодією робочої рідини з рухомими елементами гідроагрегатів, коливанням тиску, витратою та відносно малою областю відкриття виконавчого елемента роздільника потоку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасний прогрес в області моделювання різноманітних технічних систем (рис. 1), а також засобів та програмних продуктів комп'ютерного забезпечення математичного моделювання дозволяє забезпечити всебічний аналіз характеристик запропонованих конструкцій сільськогосподарських машин, в тому числі для механізації процесів у тваринництві [1, 3].

b)

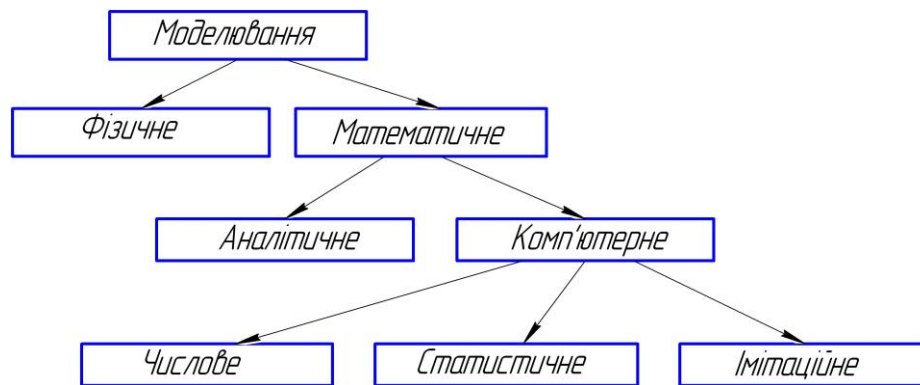
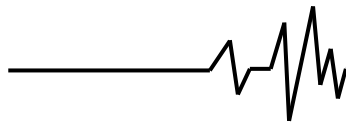


Рис. 1. Класифікація основних видів моделювання

Математична модель являє собою опис у вигляді математичних співвідношень, які встановлюють зв'язок між параметрами, що характеризують розрахункову схему системи. Але щоб вивчити систему, для початку, потрібно побудувати математичну модель [1, 4].

Для кожної стадії проектування (рис.2) сучасної сільськогосподарської техніки характерний свій метод, наприклад, для початкових стадій розробки, найбільш ефективний спосіб математичного

моделювання, так як він дозволяє дізнатися деякі особливості системи в перших циклах моделювання і заздалегідь внести необхідні корективи і навпаки, на заключній стадії проектування проходять напівнатурні і натурні випробування системи. Дані математичні моделі в наступних етапах вивчають з використанням методів обчислювальної математики на основі сучасних потужностей обчислювальної техніки.

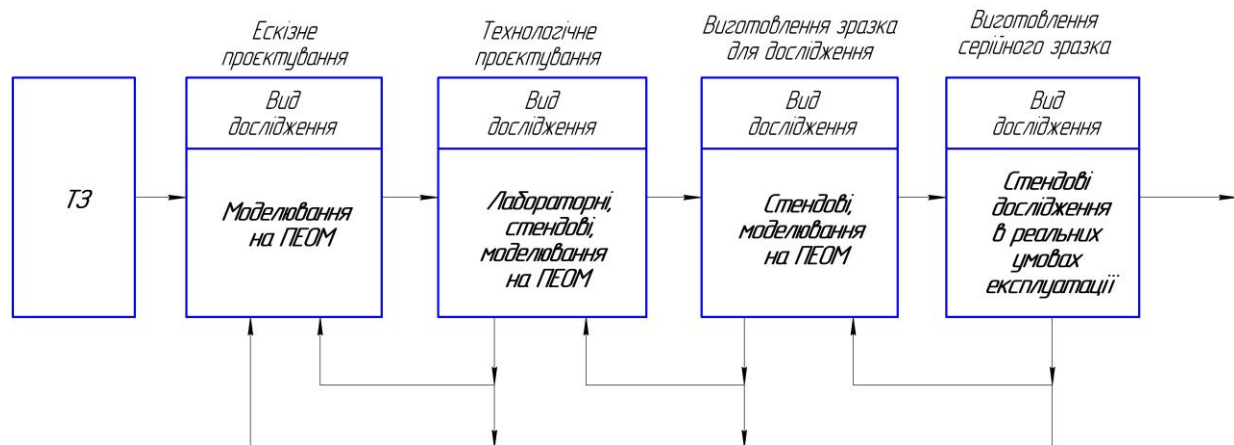


Рис. 2. Схема проектування технічного об'єкта

З наведеної схеми зрозуміло, що в результаті дії зворотних зв'язків відбувається послідовне уточнення параметрів виробу і наближення його характеристик до оптимальних значень. Наведена схема наочно показує взаємозв'язок випробувань з процесом проектування і її значну роль у процесі оптимізації параметрів виробу.

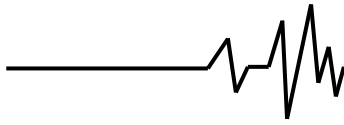
При цьому на всіх етапах створення і випробувань, найважливішу роль відіграє обчислювальна техніка (ЕОМ).

Якщо досліджувана модель є досить простою, то досить отримання точного аналітичного рішення. Але деякі системи є складними (система гідروприводу

відокремлювача стеблових корму), в них немає можливості отримання аналітичного рішення. У таких випадках необхідно застосовувати – імітаційне моделювання [5].

Тобто, багаторазове випробування моделі з різними вхідними параметрами, що показують їх вплив на показники функціональності всієї гідравлічної системи відокремлювача стеблових корму.

Для отримання чисельних результатів, які допомагають провести розрахунок властивостей досліджуваної системи, застосовують електронно-обчислювальні машини (ЕОМ).



Імітаційне моделювання є процесом створення моделі реальної системи, а так само проведення комп'ютерних експериментів цієї системи для вивчення і прогнозування її дій. Так само імітаційне моделювання проводиться з метою поліпшення існуючих характеристик даної системи.

На відміну від математичного (імітаційного моделювання), натурне моделювання являє собою роботу з фізичними об'єктами - моделями, які можуть бути збільшеними або зменшеними копіями оригіналу, але все одно допускають можливість їх вивчення з метою перенесення виявлених знань на оригінал.

Питанням моделювання в зв'язку з автоматизованим проектуванням розглядалися в роботах таких вчених: Башти Т.М., Попова Д.М., Лурье З.Я., Гаминіна М.С., Андренка П.М., Прокоф'єва В.М., Пастушенка С.І., Ісковича-Лотоцького Р.Д., Іванова М.І., Гунько І.В. [1,5-7]. З урахуванням підходів, розроблених у працях цих вчених, прискорити створення сучасних та конкурентоспроможних зразків сільськогосподарської техніки можливо шляхом математичного моделювання. Оскільки саме математичне моделювання дозволяє за короткий час створити модель досліджуваної системи, вивчити її властивості або поведінку в тих чи інших вимогах.

Значні капіталовкладення, необхідні для виготовлення дослідного зразка сільськогосподарської машини, вимагають детального дослідження фізичної моделі гідравлічного привода відокремлювача стеблових кормів. В цих умовах всебічне дослідження фізичної моделі дозволяє перевірити адекватність результатів, отриманих в процесі математичного моделювання, та визначити необхідні удосконалення запропонованого гідравлічного привода.

Особливості технології інженерного дослідження фізичної моделі передбачають використання імітаційного завдання навантаження на вихідних ланках гідродвигунів та визначення витрат робочої рідини, наближених до реальних характеристик робочих процесів.

У методиках проектування самохідних машин, велику увагу приділяється розробці гідропривода керування робочим обладнанням [8]. З метою забезпечення надійності системи на етапі проектування традиційно розглядаються розрахункові положення, які відповідають найбільш несприятливому навантаженню. Серед усіх методик умовно можна виділити дві основні групи [6, 8, 9]:

а) методики, основані на аналізі статичних розрахункових схем;

б) методики, основані на аналізі динамічних моделей руху.

В більшості випадків методики проектування гідроприводів робочого обладнання навантажувачів основані на розгляданні плоских розрахункових схем. В якості зовнішніх навантажень розглядається гранична статична сила, або сила, що відповідає стандартним робочим навантаженням.

Дослідження перехідних процесів, пов'язаних з різким зростанням навантаження на робочому обладнанні при інтенсивному заглибленні робочого обладнання, показує, що динамічні зусилля можуть в 1,2–1,5 рази перевищувати їх статичний рівень [9]. Подібне пікове навантаження призводить до аналогічних перевантажень гідропривода.

Таким чином, процес формування навантажень, діючих на робоче обладнання машин при виконанні технологічних операцій, носить складний характер.

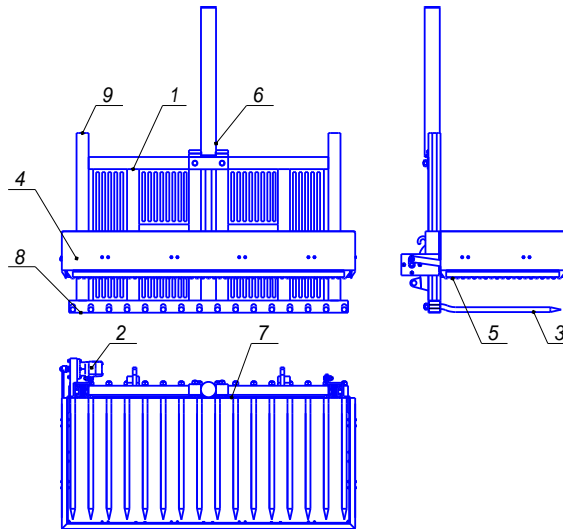
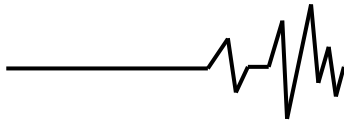
Для проведення експериментальних досліджень була розроблена методика, що включає в себе:

- планування експерименту;
- вибір обладнання і вимірювальних засобів;
- визначення умов постановки дослідів;
- аналіз отриманих результатів.

#### **Виклад основного матеріалу**

Принципову конструктивно–технологічну схему нового відокремлювача стеблових кормів з траншейних сховищ, представлено на рисунку 3. Відокремлювач стеблових кормів (рис. 3) складається з вертикальної рами 1, в нижній частині якої на брусі 8 закріплено шістнадцять вил 3. Для відрізання блок–порції стеблових кормів від кормового моноліту на рамі розміщено різальну рамку 4, на якій у нижній її частині розміщено ріжучий механізм 5. Переміщення різальної рамки 4 у вертикальній площині здійснюється по напрямних 9 за допомогою поршневого гідроциліндра 6 (Ц63.32.800.01) двосторонньої дії. Відокремлення стеблових кормів від кормового моноліту у вертикальній площині здійснюється різальним механізмом 5 з приводом від аксіально–поршневого нерегульованого гідродвигуна (А10FM 2). Відокремлювач стеблових кормів розміщується на фронтальному навантажувачі на базі трактора тягового класу 1,4 [10].





**Рис. 3.** Відокремлювач стеблового корму від кормового моноліту: 1 – вертикальна рама, 2 – гідродвигун, 3 – вило, 4 – ріжуча рамка, 5 – різальний механізм, 6 – поршневий гідроциліндр, 7 – тяга, 8 – нижній брус, 9 – направляюча

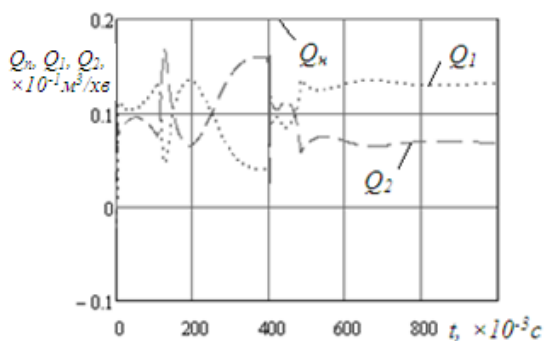
Відокремлювач стеблового корму від кормового моноліту в траншейному сховищі працює таким чином: під час руху енергетичного засобу в траншейному сховищі вила 3 входять в стебловий корм масиву при піднятому положенні ріжучої рамки 4, при цьому фіксуючи її відносно механізму. Після входження вила 3 в стебловий корм масиву включаються в роботу поршневий гідроциліндр 6 двосторонньої дії та аксіально-поршневий нерегульований гідродвигун 2. Поршневий гідроциліндр 6 (Ц63.32.800.01) забезпечує зворотнo-поступальне переміщення різальної рамки у вертикальній площині через поперечну тягу 7 та направляючі 9. Привод рухомих ножів здійснюється за допомогою аксіально-поршневого нерегульованого гідродвигуна 2(A10FM 2). При вертикальному переміщенні різальної рамки по направляючих зверху донизу відрізана порція корму має форму паралелепіпеда. При відділенні наступної порції корму різальна рамка здійснюючи холостий хід повертається у крайнє

верхнє положення, після чого процес повторюється [11].

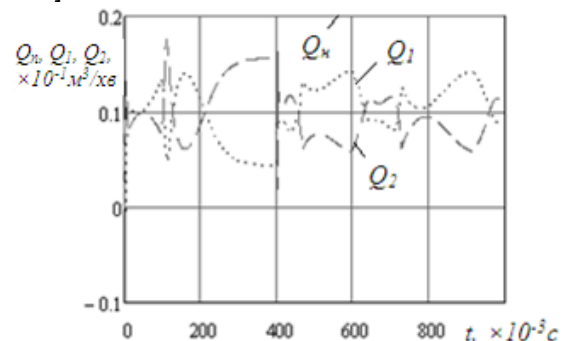
При розробці гідравлічного привода відокремлювача стеблового корму було створено математичну модель, адекватність якої залежить від достовірності прийнятих залежностей [11].

Тому при створенні стенда для імітаційного моделювання та дослідження необхідно передбачити можливість врахування усіх можливих режимів роботи, в тому числі нестационарних, системи гідроприводів (взаємодія робочої рідини з рухомими елементами гідроагрегатів, її течія в каналах з місцевими опорами та щільнах, наявність витоків і перетоків, коливання тиску, витрати гідроагрегатів, коливання системи запірнорегулюючих та пружних елементів) [5,6].

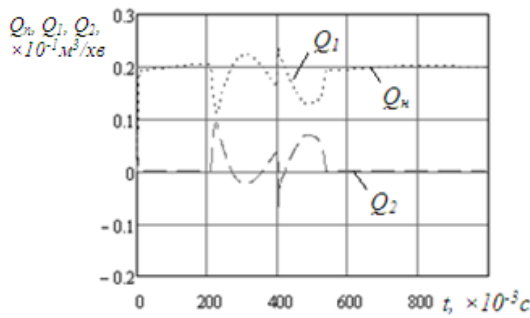
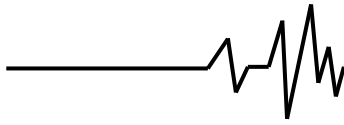
При аналізі перехідних процесів (рис. 4-6) гідропривода відокремлювача стеблових кормів з траншейних сховищ, було виявлено, що при певних комбінаціях параметрів системи виникають нестійкі режими роботи (рис. 5) [12, 13].



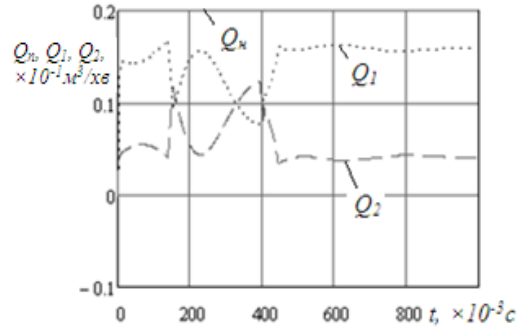
**Рис. 4.** Перехідний процес в гідроприводі відокремлювача при значенні настройки роздільника потоку  $b_2=4$  мм



**Рис. 5.** Перехідний процес в гідроприводі відокремлювача при настройці упора роздільника потоку  $b_2=4$  мм, діаметрі золотника  $d_{зол}=19,5$  мм, жорсткості пружини  $C_{пр}=0,3$  Н/мм



**Рис. 6. Перехідний процес в гідроприводі відокремлювача при настройці упора роздільника потоку  $b_1=3$  мм, діаметрі золотника  $d_{зол}=32$  мм, жорсткості пружини  $C_{пр}=0,5$  Н/мм**



**Рис. 7. Перехідний процес в гідроприводі відокремлювача при настройці упора роздільника потоку  $b_1=1$  мм, діаметрі золотника  $d_{зол}=27$  мм, ширині робочої кромки  $a=0,5$  мм, жорсткості пружини  $C_{пр}=0,5$  Н/мм**

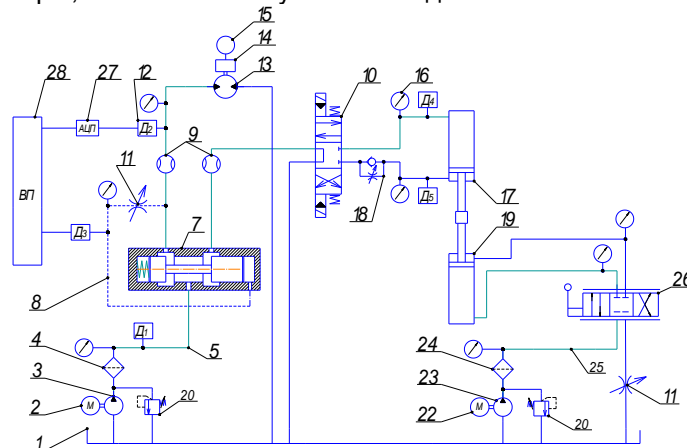
Дані режими роботи відокремлювача характеризуються виникненням коливальних швидкостей, тиску з амплітудою, яка може досягати граничних, з точки зору потужності системи, значень, причому характер зазначених процесів не відповідає заданим керуючим сигналам. Тому такий режим роботи гідропривода відокремлювача є неприйнятним з точки зору працездатності гідралічної системи.

У зв'язку з цим важливим моментом дослідження гідропривода відокремлювача є визначення області значень параметрів, при яких даний привод буде працювати стійко, що дозволить подальші дослідження по виявленню раціональних параметрів, які забезпечують

високу ефективність запропонованого гідралічного привода відокремлювача стеблових кормів з траншейних сховищ.

На рис. 8,9 представлено гідралічну схему та стенд для імітаційного дослідження гідралічного привода відокремлювача стеблових кормів. Схема імітаційного стенда включає такі основні складові: систему живлення, систему навантаження, систему реєстрації та розроблений золотниковий роздільник потоку.

Стенд для імітаційного моделювання представляє собою досліджувану систему гідралічного привода відокремлювача стеблових кормів з дросельним регулюванням швидкості.

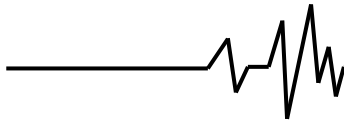


**Рис. 8. Гідралічна схема стенда для імітаційного моделювання та дослідження роботи гідралічного привода відокремлювача стеблових кормів з траншейних сховищ**

Для управління швидкістю руху вихідної ланки виконавчого двигуна гідропривода відокремлювача застосовано регульовані дроселі.

Роздільне регулювання швидкості руху вихідної ланки на зворотному ході поршня забезпечується установкою регульованих дроселів із зворотними клапанами в штоковій лінії гідроциліндра.

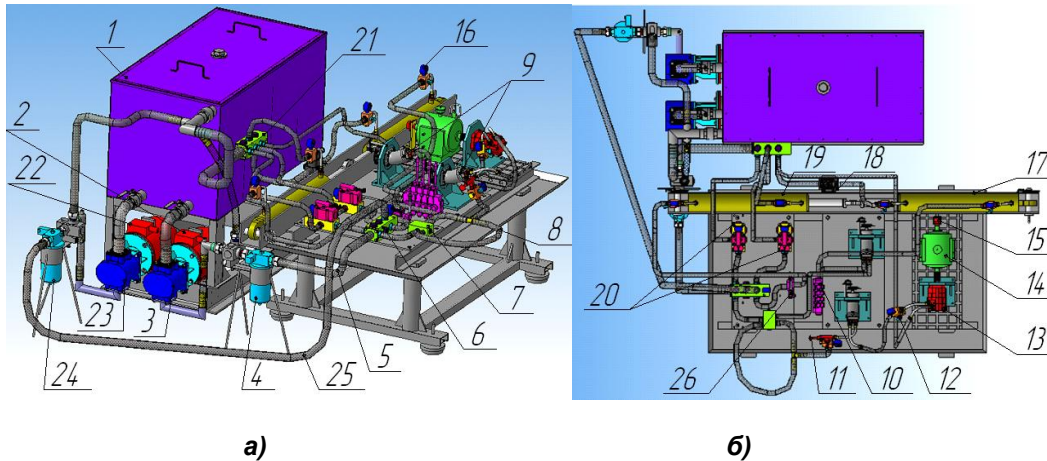
Система живлення гідропривода складається з насосної станції, що включає в себе електродвигун 2, насос 3 постійного робочого об'єму  $q=10 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ , напірний фільтр 4 (номінальна точність фільтрації до 25 мкм), запобіжний клапан 20, що обмежує значення максимального тиску в гідроприводі в аварійних режимах, гідробак 1. До складу привода входить також роздільник потоку 7 з лінією



керування 8, гідромотор 13, напірні гідролінії привода (різального механізму), чотирьохлінійний трипозиційний розподільник з електро-гідралічним керуванням 10, гідроциліндр 17, гідролінії зливу, зворотний клапан 18, дросель 11.

Для імітації робочого процесу досліджувана система гідралічного привода

відокремлювача стеблових кормів з траншейних сховищ піддавалась навантаженню. Безпосередньо навантажувався привод ножового механізму (гідродвигун) та силовий гідроциліндр подачі різальної рамки



**Рис. 9. Стенд для імітаційного моделювання та дослідження роботи гідралічного привода відокремлювача стеблових кормів: 1–гідралічний бак, 2–електродвигун, 3–шестеренний насос, 4–фільтр, 5–напірна гідролінія, 6 – напірна колодка, 7– роздільник потоку, 8– лінія керування, 9– витратоміри, 10–гідралічний розподільник, 11–гідро дросель, 12–датчик тиску, 13– гідралічний двигун, 14– порошковий гідродвигун, 15– датчик швидкості, 16–манометр, 17–напірний поршневий гідроциліндр, 18– зворотний клапан, 19–поршневий гідроциліндр, 20–запобіжні клапани, 21– зливна колодка, 22– електродвигун, 23–шестеренний насос, 24–фільтр, 25–нагнітальна лінія, 26–позиційний розподільник, 27– аналогово цифровий перетворювач, 28–вимірювальний пристрій; а) стенд 3-D модель; б) вид в плані**

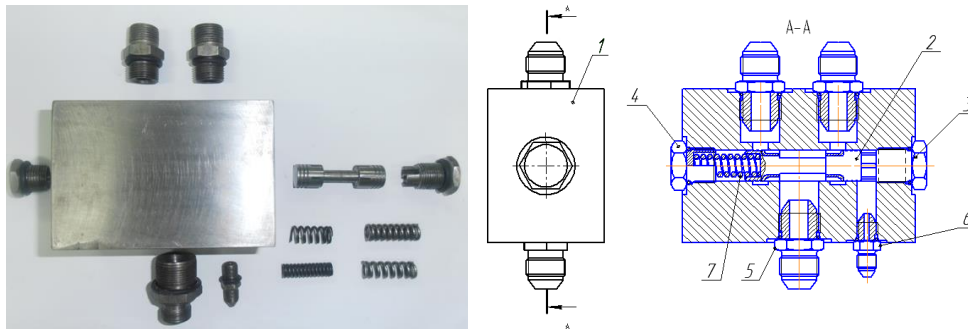
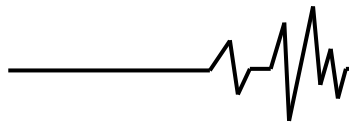
Навантаження вала гідромотора 13 здійснювалось за допомогою порошкового гальма ПТ–2,5М1 14 з максимальним гальмівним моментом 25 Нм. Необхідне значення  $M_m$  встановлюється за допомогою регульованого джерела постійного струму. Як робоча рідина використовується масло індустріальне М–10В (густина 905 кг/м<sup>3</sup>, кінематична в'язкість при температурі 100°С – 11±0.5 мм<sup>2</sup>/с по ГОСТ 8581–78).

Експериментальне дослідження силового гідроциліндра проводилось для вивчення особливостей його роботи, перевірки розроблених методів розрахунку і виявлення впливу на результати розрахунку припущень, прийнятих при їх складанні, а також для визначення типових динамічних характеристик.

Для дослідження силового гідроциліндра 17 розроблено схему, що складається з насосної станції (електродвигун 22, шестеренний насос 23, фільтр 24, лінія нагнітання 25), вимірювача витрат 9,

манометра, гідроциліндра 19, навантаження якого може змінюватися через гідророзподільник дискретної дії 26 та регульований дросель, що служить для імітації навантаження. Зменшення провідності регульованого дроселя забезпечує збільшення тиску в штоковій порожнині гідроциліндра 19. Таким чином, при вмиканні позиційного гідророзподільника 26 задається ступінчасте збільшення або зменшення навантаження на штоці гідроциліндра 19.

Під час дослідження гідралічного привода відокремлювача стеблових кормів використовувався дослідний зразок роздільника потоку (рис. 10) з лінією керування 8 (див. рис. 9), що дозволяє підтвердити дієздатність розробленої конструкції, визначення досліджуваних характеристик, а також підтвердження адекватності розробленої математичної моделі.



**Рис. 10. Дослідний зразок золотникового роздільника потоку:**  
1–корпус, 2–золотник, 3–упор, 4–кришка пружини, 5,6–штуцер прохідний, 7–пружина

До системи реєстрації входять: манометри, датчики тиску ( $ДТ_1$ – $ДТ_5$ ), тахогенератор ( $ДШ$ ), аналогово–цифровий перетворювач ( $АЦП$ ) та персональний комп'ютер ПК. Підключення датчиків тиску, витрати та швидкості показано рис. 11. Для

прийому, обробки та передачі аналогово–цифрових сигналів експериментальний стенд оснащений аналогово–цифровим перетворювачем m-DAQ 12 ( $АЦП$ ) з USB – інтерфейсом.



**Рис. 11. Стенд для імітаційного моделювання та дослідження роботи відокремлювача стеблових кормів**

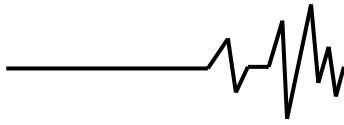
До мікросистеми збору даних підключено п'ять датчиків тиску Danfoss MBS 3050 ( $ДТ_1$ ,  $ДТ_2$ ,  $ДТ_3$ ,  $ДТ_4$ ,  $ДТ_5$ ) і один тахогенератора ТГП – 1А ( $ДШ$ ). Інформація, отримана від датчиків перетворюється з аналогового вигляду в цифровий і за допомогою USB інтерфейсу передається на ПК, де за допомогою драйвера  $АЦП$  зберігається в базі даних для подальшого аналізу та оформлення.

Принцип виміру зводиться до наступного: тиск робочої рідини на вході гідродвигуна за допомогою датчика тиску та частоти обертання вала гідродвигуна за допомогою тахогенератора перетворюються на аналогові електричні сигнали (струм, напруга). Кожен з сигналів підсилюється та масштабується, поступає на вхід мультимплексора, де кожному сигналу присвоюється персональний аналоговий ключ, згідно цього ключа сигнали по чергові зчитуються мікросистемою збирання даних m-DAQ 12.

Результат перетворення записується у вбудований оперативний запам'ятовуючий пристрій обсягом 4-х одинбайтних символів. Так завдяки програмному забезпеченню отримана інформація масштабується, формується в масиви даних, суміщається за часом і підготовляється до виведення на екран персонального комп'ютера.

Стенд дозволяє проводити фізичне моделювання робочих процесів у гідроприводі відокремлювача стеблових кормів, а також візуально спостерігати та фіксувати отримані результати за допомогою осцилографування.

Дослідження проводились із застосуванням методу математичного планування багатофакторного експерименту, який дозволяє визначити математичні моделі процесів у вигляді рівнянь регресії. Згідно поставлених задач було обрано  $D$ -оптимальний план Бокса–Бенкіна другого порядку для 4 факторів. Факторами експерименту були обрані



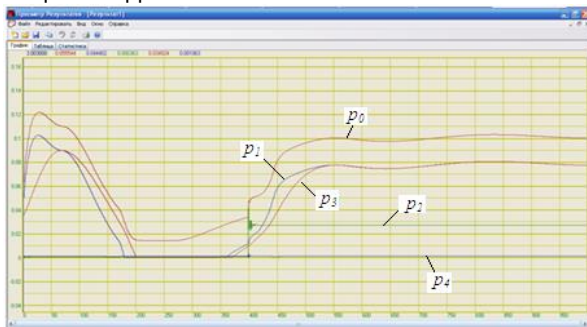
діаметр золотника роздільника потоку ( $x_1$ ), жорсткість пружини золотника роздільника потоку ( $x_2$ ), величина початкового відкриття першого робочого вікна золотникового роздільника потоку ( $x_3$ ) та момент навантаження на валу гідромотора ( $x_4$ ). Критерієм оптимізації є час виходу системи на стійкий режим роботи  $u$ .

Згідно результатів досліджень було створено математичну модель впливу досліджуваних факторів на час виходу системи гідроприводу відокремлювача стеблових кормів на стійкий режим роботи [13].

Отримана математична модель впливу досліджуваних факторів на час виходу системи на стійкий режим роботи мала вигляд

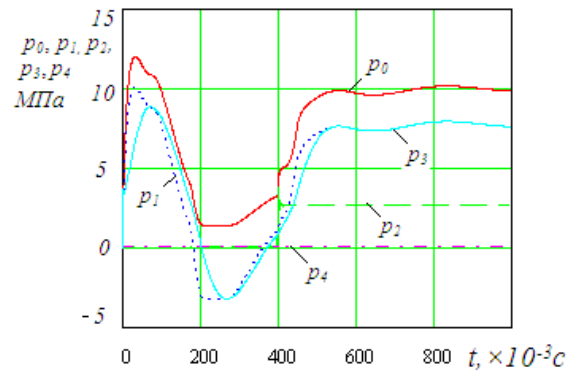
$$y = 0,701 - 0,068 x_1 + 1,43 x_2 - 0,107 x_3 + 0,028 x_4 + 0,068 x_1 x_2 + 0,03 x_1 x_3 + 0,03 x_1 x_4 + 0,1025 x_2 x_3 + 0,03 x_2 x_4 + 0 x_3 x_4 + 0,443 x_1^2 + 0,940 x_2^2 + 0,888 x_3^2 + 1,005 x_4^2 \quad (1)$$

Осцилограми процесу зміни тисків ( $p_0, \dots, p_4$ ), які отримані в результаті стендових випробувань, представлені на рис. 12, що реєструвалися за допомогою ПЕОМ за описаною вище методикою.



**Рис. 12. Осцилограма перехідних процесів зміни тисків у системі гідропривода відокремлювача за такого співвідношення параметрів  $d_{зол}=25$  мм,  $a=1$  мм,  $l_1=6$  мм,  $l_2=2$  мм,  $b_1=1$  мм,  $b_2=2$  мм,  $W_3=25$  см<sup>3</sup>,  $M_{зм}=100$  Н·м, отримана у результаті фізичного моделювання**

На рис. 13 представлено перехідний процес зміни тиску, отриманий в результаті математичного моделювання при аналогічних параметрах гідралічного привода відокремлювача стеблових кормів.



**Рис. 13. Перехідний процес зміни тисків у системі гідропривода відокремлювача за такого співвідношення параметрів  $d_{зол}=25$  мм,  $a=1$  мм,  $l_1=6$  мм,  $l_2=2$  мм,  $b_1=1$  мм,  $b_2=0,2$  мм,  $W_3=25$  см<sup>3</sup>,  $M_{зм}=100$  Н·м, що отримано в результаті числового моделювання**

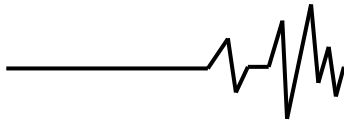
Порівнюючи отримані залежності, можна зробити висновок про достатній збіг характеру перехідних процесів при усталеному режимі роботи системи. В обох випадках спостерігається стійка робота адаптивної системи гідралічних приводів відокремлювача, проте має місце відмінність процесів, отриманих експериментально, від процесів, отриманих шляхом числового експерименту. Так при незначній неузгодженості власної частоти коливальності процесів коливальності математичної моделі вища. Час регулювання практично не змінився. Причинами таких розбіжностей можуть бути занижені значення коефіцієнтів рідинного тертя, прийняті при математичному моделюванні.

**Висновки:**

1. Проведені дослідження дослідиного зразка системи гідралічних приводів відокремлювача стеблових кормів на експериментальному стенді підтвердили адекватність розробленої математичної моделі даного привода, що свідчить про можливість подальшого використання результатів цієї моделі при проведенні досліджень.

2. Розроблення адекватних нелінійних динамічних моделей гідромеханічних пристроїв з спільним використанням обчислювальної техніки при їх реалізації дозволяє значно розширити коло інженерних досліджень при проектуванні, а також сприяє суттєвому скороченню об'єму експериментальних робіт з доведенням пристроїв на випробувальному стенді, що в свою чергу призводить до зниження матеріальних витрат на розроблення нових.

3. Проведені дослідження дозволяють рекомендувати розроблений стенд для імітаційного моделювання та дослідження перехідних процесів в гідроприводі мобільних сільськогосподарських машин. Система збору та



реєстрація даних може бути використана для дослідження гідросистем різного призначення.

4. В результаті експериментального дослідження адаптивної системи гідравлічних приводів відокремлювача обґрунтовано його параметри: діаметр золотника роздільника потоку  $d_{зол} = 22$  мм, жорсткість пружини золотника роздільника потоку  $C_{пр} = 0,2-0,3$  Н/мм, величина початкового відкриття першого робочого вікна золотника  $l_1 = 6$  мм, момент на валу гідромотора в межах до величини  $M_{зм} = 150$  Н·м.

#### Список використаних джерел

1. Андренко П.М. Побудова математичних моделей гідроапаратів із гідравлічним вібраційним контуром. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2004. №2 (8). С. 15 – 20.

2. Шмат С. І., Лузан П. Г., Колісник С. В. Тенденції сталого розвитку сучасного сільськогосподарського машинобудування в Україні і за рубежом КНТУ. 2010.: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/4971> (дата звернення: 1.09.2021).

3. Чубик Р.В., Зелінський І.Д. Ідентифікація критеріїв для енергозберігаючого керування віброприводами адаптивних вібромашин. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2015. Вип. 49. С.107–111.

4. Shargorodskiy S., RutkevychV. Influence of physical and mechanical properties of stem feed and design of the working body on the drive power of the cutting mechanism *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. №2(113). С. 38–49.

5. Пастушенко, С.І. Питання оптимізації технічних систем. *Збірник наукових праць НАУ "Механізація сільськогосподарського виробництва"*. – Київ: Видавництво НАУ. – 2002. – Т.ХІ. – С. 266-271.

6. Гулько А.С., Іванов М.І., Шаргородський С.А. Моделювання роботи КШМ привода рамки гичкозрізальної машини. *Збірник наукових праць ВНАУ Вінниця*. 2012. Вип. 10, т. 2(59) С. 54 – 58.

7. Ivanov M.I., Rutkevych V.S., Kolisnyk O.M., Lisovoy I.O. Research of the influence of the parameters of the block-portion separator on the adjustment range of speed of operating elements. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 57/1. P. 37–44.

8. Ratushna N., Mahmudov I., Kokhno A. Методичні підходи до створення нової сільськогосподарської техніки у відповідності з вимогами ринку наукоємної продукції. *MOTROL*. 2007. № 9А. С. 119–123.

9. Коваленко А.О., Роговий А.С., Сьомін Д.О. Основи наукових досліджень (планування експериментів): підручник. Луганськ: СНУ ім.

В.Даля, 2011. 216 с.

10. Гідравлічний привод блочно-порційного відокремлювача консервованих кормів: пат. № 80958 Україна: E02F 9/22. № у 2013 00965; заявл. 28.01.2013; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 11.

11. Іванов Н., Шаргородський С., Руткевич В. Математическая модель гидропривода блочно-порционного отделителя консервированных кормов. *MOTROL*. 2013. №5. С. 83–91.

12. RutkevychV. Investigation of transitional processes in the adaptive system of hydraulic drives of the mechanism for cutting and unloading stalk fodder *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. №2(101). С. 107–114.

13. Shargorodskiy S., RutkevychV. Investigation of drive power of the mechanism for separation of stem feed from feed monolith. *Slovak international scientific journal*. 2021. № 54. С. 10-20.

#### References

1. Andrenko, P.M. (2004). Pobudova matematichnykh modelei hidroaparativ iz gidravlichnym vibratsiynym konturom [Construction of mathematical models of hydraulic devices with hydraulic vibration circuit] *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnologii*. №2 (8). 15-20. [in Ukrainian].

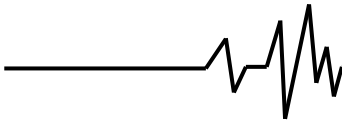
2. Shmat, S.I., & Luzan, S.V., & Kolisnyk, S.V. (2010) *Tendentsii stalogo rozvytku suchasnogo silskogospodarckogo mashyno-buduvannia v Ukraini i za rubiezem [Product innovative policy]. [Trends in Sustainable Development of Modern Agricultural Machinery in Ukraine and Abroad]*. Retrieved from [http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/1456789/4971./KNTU.-2010.\[in Ukrainian\]](http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/1456789/4971./KNTU.-2010.[in Ukrainian]).

3. Chubyk, R.V. & Zelinskyi, I.D. (2015). Identyfikatsiia kryteriiv dla enerhozberihaiuchoho keruvannia vibropy-vodamy adaptyvnykh vibromashyn [Identification of criteria for energy saving control of vibration drives of adaptive vibrating machines]. *Avtomatyzatsiia vyrobnychkykh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni – Automation of production processes in machine building and instrument making*, 49, 107-111 [in Ukrainian].

4. Shargorodskiy S., RutkevychV. Influence of physical and mechanical properties of stem feed and design of the working body on the drive power of the cutting mechanism *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. №2(113). С. 38–49.

5. Pastyushenko, S.I. (2002). Pytannia optymizatsii tekhnichnykh system [The questions of optimization of technical systems]. *Zbirnyk naukovykh prats NAU "Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva"*. – Kyiv: Vydavnytstvo NAU., Т.ХІ. 266-271 [in Ukraine].

6. Hunko, A.S., & Ivanov, M.I., & Shargorodskii, S.A.(2012). Modeliuvannya roboty



KShM pryvoda ramky hychkozrizalnoi mashyny [Modeling of work of KShM of a drive of a frame of the hook-cutting machine] *Zbirnyk naukovykh prats VNAU Vinnytsia*. Vyp. 10, t. 2(59). 54-58. [in Ukrainian]

7. Ivanov, M.I., & Rutkevych, V.S., & Kolisnyk, O.M., & Lisovoy, I.O. (2019). Research of the influence of the parameters of the block-portion separator on the adjustment range of speed of operating elements. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Vol. 37-44 [in Romania].

8. Ratushna, N., & Mahmudov, I., & Kokhno, A. (2007). Metodichni pidkhody do stvorennia novoi silskokhospodarskoi tekhniki u vidpovidnosti z vymohamy rynku naukoemnoi produktsii [Methodical approaches to the creation of new agricultural machinery in accordance with the demands of the market of science-intensive products]. *MOTROL*, № 9. 119-123 [in Polish].

9. Kovalenko, A.O. & Rohovyi, A.S. & Somin, D.O. (2011) *Osnovy naukovykh doslidzhen (planuvannia eksperymen-tiv)*. [Product innovative policy]. [Fundamentals of scientific research (experiment planning)] – *Lyhansk: SNU im. V. Dalia*. – 216 p. [in Ukraine].

10. Pat. KM 80958 Ukraina. (2013). Hidravlichnyi pryvod blochno-porziinogo vidokremlivacha konserovanykh kormiv [The hydraulic drive of the block-portion separator of canned forages]. *Publ.* 10.06.2013 [in Ukrainian].

11. Ivanov, N., & Sharhorodskiy, S., & Rutkevych, V. (2013). Matema-ticheskaia model hidropivoda blochno-portsionoho otdelitelia konservirovanykh kormov [The mathematical model of the hydraulic drive of the block-portion separator of canned feed]. *MOTROL*, № 5, 83-91 [in Polish].

12. Rutkevych V. Investigation of transitional processes in the adaptive system of hydraulic drives of the mechanism for cutting and unloading stalk fodder *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. №2(101). С. 107–114.

13. Shargorodskiy S., Rutkevych V. Investigation of drive power of the mechanism for separation of stem feed from feed monolith. *Slovak international scientific journal*. 2021. № 54. С. 10-20.

#### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ГИДРОПРИВОДА ОТДЕЛИТЕЛЯ СТЕБЛЕВЫХ КОРМОВ С ТРАНШЕЙНЫХ ХРАНИЛИЩ

Рассмотрены вопросы ускоренного создания эффективного и энергосберегающего гидравлического привода отделителя стеблевых кормов с траншейных хранилищ путем имитационного моделирования технической системы. Отмечено, что использование имитационного моделирования

позволяет избежать значительных капиталовложений, необходимых для изготовления опытного образца сельскохозяйственной машины, при условии детального исследования физической модели гидравлического привода отделителя стеблевого корма, также позволяет проверить адекватность результатов, полученных в процессе математического моделирования, и определить необходимые совершенствование предложенного гидравлического привода.

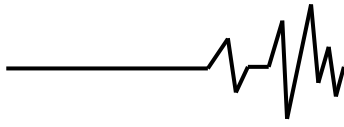
Представлено принципиально новую конструктивно-технологическую схему отделителя стеблевых кормов с траншейных хранилищ, что позволяет выполнять процесс выгрузки стеблевого корма с траншейных хранилищ согласно зоотехническим требованиям.

Предложено стенд для имитационного моделирования переходных процессов в гидравлическом приводе отделителя стеблевых кормов с траншейных хранилищ. Конструкция экспериментального стенда также позволяет исследовать гидравлический привод отделителя стеблевого корма в динамическом режиме, при переменные технологической нагрузки на рабочих органах и изменении параметров адаптивного разделителя потока жидкости и системы в целом. В результате проведения исследований и анализе переходных процессов в гидроприводе, выявлено достаточно близкое совпадение полученных результатов математического и имитационного моделирования работы гидравлического привода отделителя стеблевого корма, что позволяет рекомендовать получения расчетные зависимости в использование при разработке гидравлических приводов отделителей стеблевых кормов.

**Ключевые слова:** отделитель стеблевых кормов, стенд, гидропривод, имитационное моделирование, результаты эксперимента, переходный процесс.

#### SIMULATION MODELING AND RESEARCH WORKS OF THE HYDRAULIC DRIVE OF THE STEM SEPARATOR FEED FROM TRENCH STORAGE

The issue of accelerated creation of efficient and energy-saving hydraulic drive of stem forage separator from trench storages by simulation modeling of technical systems. It is noted that the use of simulation allows to avoid significant investments required for the manufacture of a prototype of an agricultural machine, provided a detailed study physical model of the hydraulic drive of the stem feed separator. And also allows you to check the adequacy of the results obtained in



process of mathematical modeling, and determine the necessary improvement of the proposed hydraulic drive.

A fundamentally new constructive-technological scheme is presented stem feed separator from trench storage that allows to carry out process of unloading of a stalk forage from trench storages according to zotechnical requirements.

The stand for simulation modeling of transients in the hydraulic drive of the stem forage separator from trench storages is offered. The design of the experimental stand also allows to investigate the hydraulic drive of the stem feed separator in the dynamic mode, when changing the technological

load on the working bodies and changing the parameters of the adaptive fluid flow separator and the system in general. As a result of research and analysis of transients in the hydraulic drive, a fairly close coincidence of the results of mathematical and simulation modeling of the hydraulic drive of the stem feed separator, which allows us to recommend obtaining the calculated dependencies for use in the development hydraulic drives of stem feed separators.

**Key words:** stem forage separator, stand, hydraulic drive, simulation modeling, experimental results, transient process.

### Відомості про авторів

**Руткевич Володимир Степанович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: [v\\_rut@ukr.net](mailto:v_rut@ukr.net)).

**Яропуд Віталій Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: [yaropud77@gmail.com](mailto:yaropud77@gmail.com)).

**Купчук Ігор Миколайович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна 3, м. Вінниця, Україна, +380978173992, [kupchuk.igor@i.ua](mailto:kupchuk.igor@i.ua)).

**Остапчук Олександр Олександрович** – студент магістратури за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: [ostapchuk45@ukr.net](mailto:ostapchuk45@ukr.net)).

**Руткевич Владимир Степанович** – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования сельскохозяйственного производства Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: [v\\_rut@ukr.net](mailto:v_rut@ukr.net)).

**Яропуд Виталий Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования сельскохозяйственного производства Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: [yaropud77@gmail.com](mailto:yaropud77@gmail.com)).

**Купчук Игорь Николаевич** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: [kupchuk.igor@i.ua](mailto:kupchuk.igor@i.ua)).

**Остапчук Александр Олександрович** – студент магистратуры по специальности 133 «Отраслевое машиностроение» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная 3, Винница, Украина, 21008, e-mail: [ostapchuk45@ukr.net](mailto:ostapchuk45@ukr.net)).

**Rutkevych Volodymyr** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machinery and equipment for agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (Soniachna St. 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: [v\\_rut@ukr.net](mailto:v_rut@ukr.net)).

**Yaropud Vitalii** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machinery and equipment for agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (Soniachna St. 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: [yaropud77@gmail.com](mailto:yaropud77@gmail.com)).

**Kupchuk Igor** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D in Engineering), Associate Professor of the Department of General Technical Disciplines and Labor Protection, Vinnytsia National Agrarian University (Soniachna St. 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: [kupchuk.igor@i.ua](mailto:kupchuk.igor@i.ua)).

**Ostapchuk Oleksandr** – a master's student majoring in 133 "Industrial Engineering" of Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna Str., 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: [ostapchuk45@ukr.net](mailto:ostapchuk45@ukr.net)).