УДК 62-82:631.659
DOI: 10.37128/2520-6168-2022-1-7

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ГІДРОСТАТИЧНОЇ ТРАНСМІСІЇ ТИПУ ГСТ-90

Веселовська Наталія Ростиславівна, д.т.н., професор
Шаргородсткий Сергій Анатолійович, к.т.н., доцент
Ящук Євгеній Валерійович, аспірант
Вінницький національний аграрний університет
Гречко Роман Олкесандрович, інженер ТОВ "АгроКалина"

Natalia Veselovska, Doctor of Technical Sciences, Full Professor
Serhiy Shargorodskiy, Ph.D., Associate Professor
Yevhen Yashchuk, postgraduate
Vinnytsia National Agrarian University
Roman Grechko, engineer "AgroKalina" Ltd

Як відомо, одним із напрямів розвитку сучасних сільськогосподарських машин є розширення їх функціональних можливостей, збільшення потужності та продуктивності. Вирішення даної задачі можливе за рахунок застосування потужних малогабаритних приводів – а саме гідравлічних приводів. Самі ці властивості приводу даного типу стали вирішальними для його широкого застосування у сільськогосподарських машинах. На сьогодні гідравлічний привод застосовується для приведення у дію робочих органів машин, та як привод головного руху самохідних сільськогосподарських машин. Основним гідравлічним агрегатом, що приводить у рух самохідну сільськогосподарську машину є гідростатична трансмісія. Значна конкуренція на ринку самохідних сільськогосподарських машин призвела до підвищення рівня технічних вимог як до сільськогосподарських машин в цілому так і до гідростатичних трансмісій які працюють у їх складі. Разом з тим особливої актуальності набуває подальше підвищення енергоощадності та економічної ефективності. Вирішенню поставлених задач в значній степені сприяє подальша гідрофіксація приводів ходу та робочих органів сільськогосподарських машин. Найбільш успішно дана проблема розв'язується шляхом застосування гідрооб'ємного привода, типовим представником якого є гідростатичні трансмісії типу ГСТ-90.

Проведено аналіз теоретичних досліджень, запропоновано конструкцію стенда для проведення експериментальних досліджень з метою підтвердження результатів математичного моделювання. Описано вимірювально-реєструючу апаратуру для проведення фізичного експерименту. Збіг результатів експериментальних досліджень роботи гідростатичних трансмісій з результатами комп'ютерної симуляції на основі розробленої математичної моделі підтверджує її адекватність та коректність прийнятих припущень. Завдяки цьому можна рекомендувати використовувати результати математичного моделювання в ході проектування нових конструкцій гідростатичних трансмісій.

Ключові слова: *гідравлічний привод, гідростатична трансмісія, випробувальний стенд, давач тиску, комп'ютерна вимірювальна система.*

Рис. 9. Табл. 1. Літ. 11.

1. Вступ

На сьогодні питання забезпечення сільськогосподарських машин якісними гідравлічними приводами є досить актуальним. У зв'язку із стрімким розвитком технологій посадки, збирання та переробки сільськогосподарських культур, підвищуються технічні вимоги до сільськогосподарських машин, що у свою чергу впливає на вимоги до гідравлічних систем даних машин. Тому досить значна увага приділяється математичному та фізичному моделюванню, з метою дослідження даних систем, виявлення факторів впливу та пошуку інженерних рішень для забезпечення сучасних технічних вимог.

Гідростатичні трансмісії набули значного поширення у самохідних сільськогосподарських машинах завдяки значній потужності, можливості плавного регулювання швидкості, компактності та надійності. Але як відзначається у [1], крім наведених вище переваг, системи даного типу мають ряд недоліків. Одним із цих недоліків є низька вібраційна стійкість гідростатичної трансмісії типу ГСТ – 90 [2]. Як відомо виникнення небажаного

вібраційного навантаження негативно впливає не тільки на якість роботи гідравлічної системи та машини в цілому, а також становить небезпеку для здоров'я людини яка обслуговую даний технічний засіб, отже дослідження даних процесів з метою запобігання їх виникненню є актуальною задачею.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питання дослідження, проектування та впровадження гідравлічного приводу є актуальним на протязі досить довгого періоду часу, тому у розвиток гідравлічних систем внесли свій внесок досить багато відомих вчених. Слід відзначити, що у роботі [3] розглядаються питання покращення динамічних характеристик об'ємного гідропривода з замкненим ланцюгом циркуляції робочої рідини у процесі його запуску. Розглянута нелінійна математична модель об'ємного гідропривода з замкненим ланцюгом циркуляції робочої рідини між гідромашинами (насосом і гідромотором). До складу математичної моделі входить імітаційний модуль пристрою керування поворотом похилого диска аксіально-поршневого насоса, блок розподілу об'ємних втрат при перехідних процесах і розрахунковий блок двофазної робочої рідини. Запропонована математична модель дозволяє виконувати розрахунок перехідних процесів, що виникають у навантаженому гідроприводі під час його запуску.

У роботі [4] вченими Triet Hung HO, Kyoung Kwan AHN виконано математичне моделювання динаміки перехідних процесів в гідростатичній трансмісії з метою обґрунтування діагностичних параметрів оцінки технічного стану. Ними встановлено, що найбільший вплив на амплітуду коливання тиску, час затухання перехідного процесу, коливання частоти обертання вихідного валу трансмісії мають витрати робочої рідини на перетікання із зони високого тиску у зону низького тиску та витоки через негерметичність з'єднань.

Вченими Ramë LIKAJ, Ahmet SHALA запропонована конструкція гідростатичної трансмісії із додатковими гідроакумуляторами. Як відзначено у публікації [5] включення до складу гідростатичної трансмісії гідроакумуляторів призведе до покращення енергетичної ефективності системи.

Питанням покращення системи керування трансмісією присвячено роботу [6]. У роботі представлено математичну модель гідростатичної трансмісії яка враховує зворотний зв'язок, що наявний у даній системі. У результаті проведених досліджень було виявлено вплив параметрів системи на якість роботи зворотного зв'язку.

Вирішенню питання довговічності та безвідмовності роботи гідравлічної системи присвячена робота [7]. Авторами розроблено математичну модель даної системи та проведення дослідження впливу даних факторів. У результаті було отримано залежність впливу потужності насоса від зазора у циліндро-поршневій групі.

У роботах [8, 9] досліджено використання запропоновано використати гідростатичну трансмісію у вітрових генераторах для передачі енергії від лопатей турбіни до генератора електричного струму. Запропоновано математичні моделі гідростатичних трансмісій та досліджено вплив основних параметрів приводу на показники роботи вітрового генератора.

У результаті проведеного огляду джерел слід зауважити, що гідростатичні трансмісії не втратили своє' актуальності. Науковцями проведено детальне дослідження гідравлічних приводів у складі досить різнопланових машин та механізмів при різних характеристиках навантаження та різних параметрах систем. Тому проведення досліджень гідростатичних трансмісій сільськогосподарських машин з метою забезпечення необхідного рівня технічних характеристик є актуальною задачею.

3. Мета та завдання дослідження

Метою досліджень є розробка конструкції стенда для проведення досліджень процесів що протікають у гідростатичних трансмісіях типу ГСТ-90 під час їх роботи.

4. Виклад основного матеріалу

Математична модель гідростатичної трансмісії була детально описана у публікації [1]. Дана модель складається із 34 рівнянь. До їх складу входять рівняння нерозривності потоків робочої рідини та рівняння сил і моментів.

Для пошуку розв'язків даної математичної моделі було застосовано оригінальне програмне забезпечення побудоване на основі алгоритму Рунге-Кутти-Фельдберга із автоматичною зміною кроку інтегрування.

Розрахунок перехідних процесів, за допомогою даної математичної моделі дозволяє досить ретельно виконати аналіз роботи гідростатичної трансмісії, визначити яким чином виявляється вплив окремих складових гідравлічної системи на характер її роботи у різних режимах та при різних співвідношеннях параметрів.

Для оцінки адекватності математичної моделі необхідно повести низку експериментальних досліджень. Порівняння результатів математичного моделювання та досліджень фізичної моделі дасть змогу оцінити адекватність математичної моделі гідростатичної трансмісії типу ГСТ-90 та провести уточнення розрахункових залежностей математичної моделі.

Експериментальні дослідження проводилися на базі спеціального стенду у науково-дослідній лабораторії підприємства ПрАТ «Гідросила» (м. Кропивницький). 3D модель стенду представлено на рис. 1, фотографію із його зовнішнім виглядом – на рис.2.

Даний стенд включає пульт керування стендом, електродвигун потужністю 450 кВт для приводу, бак для робочої рідини об'ємом 500 л., вантажі для зміни навантаження на валу гідромотора, гідроапаратуру.

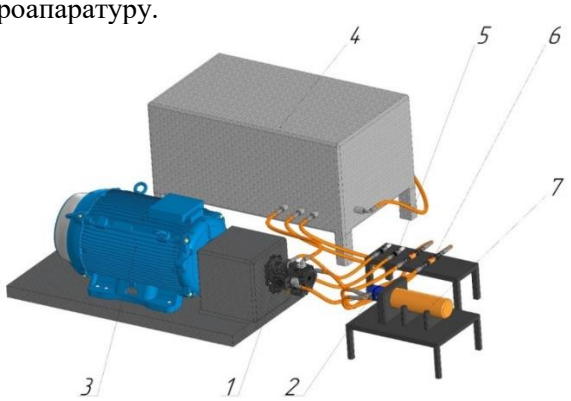

Рис. 1. 3D модель стенду для дослідження роботи гідростатичної трансмісії типу ГСТ-90: 1 – насос; 2 – гідромотор; 3 – електродвигун; 4 – бак; 5 – датчики тиску; 6 – датчики витрати; 7 – інерційне навантаження на валу гідромотора.

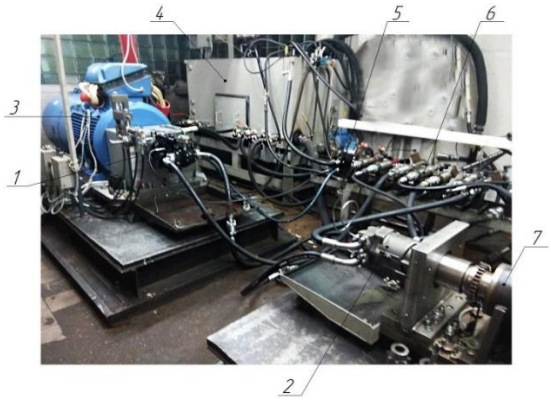

Рис. 2. Фото стенду для дослідження роботи гідростатичної трансмісії типу ГСТ-90: 1 – насос; 2 – гідромотор; 3 – електродвигун; 4 – бак; 5 – датчики тиску; 6 – датчики витрати; 7 – пристрій інерційного навантаження на валу гідромотора.

Вимірювання та запис значень параметрів гідростатичної трансмісії, які досліджувалися, проводилося за допомогою портативного реєстратора даних HYDAC HMG 4000 з набором датчиків (рис. 3) [11]. Вимірювані параметри гідростатичної трансмісії, наведені у таблиці 1:

Таблиця 1.

Перелік параметрів гідростатичної трансмісії, які можуть бути перевірені на експериментальному стенді

Найменування	Одиниця виміру	Значення		Похибка вимірювання параметра, %
		мін.	макс.	
1	2	3	4	5
Швидкість обертання вала насоса	об/хв	5	4000	1
Швидкість обертання вала гідромотора	об/хв	5	4000	1
Вага навантаження на валу гідромотора	кг	0	3000	1,5
Тиск :				
у гідролінії нагнітання;	Бар	6	600	0,3
у гідролінії всмоктування;	Бар	6	600	0,3
у гідролінії насоса підживлення;	Бар	6	600	0,3
у гідролінії дренажу;	Бар	6	600	0,3
Витрат:				
на виході насоса;	л/хв	1,2	600	1,5
на виході насоса підживлення.	л/хв	1,2	600	1,5
на споживання гідромотором;	л/хв	1,2	600	1,5
через шунтувальний розподільник;	л/хв	1,2	600	1,5

Для проведення досліджень використовувалися датчики тисків, температури, витрати робочої рідини.

Датчик тиску HDA 3800 (рис. 4) з тонкою вимірювальною плівкою DMS на мембрані з нержавіючої сталі. Застосовується переважно в лабораторних цілях і на випробувальних стендах. Клас точності: 0.3% макс. діапазон тиску: 6 – 600 бар.

Манометр ОБМ1-100 (рис. 5) призначений для вимірювання надлишкового та вакуумметричного тиску. Клас точності: 2,5. Діапазон показань:0- 60 кгс/см^2.

Датчик витрати рідини EVS 3110 (рис. 6) з нержавіючої сталі для гідравлічних масел. Максимальний тиск - 400 бар. Діапазон вимірювань, л/хв: 1,2 - 20; 6-60; 15-300; 40 – 600.

Рис. 4. Датчик тиску HDA 3800

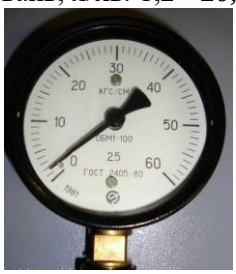

Рис. 5. Манометр ОБМ1-100

Рис. 6. Датчик витрати рідини EVS 3110

Для проведення дослідження роботи гідростатичної трансмісії типу ГСТ- 90 проводилось підключення датчиків тиску та витрат по схемі на рис. 7

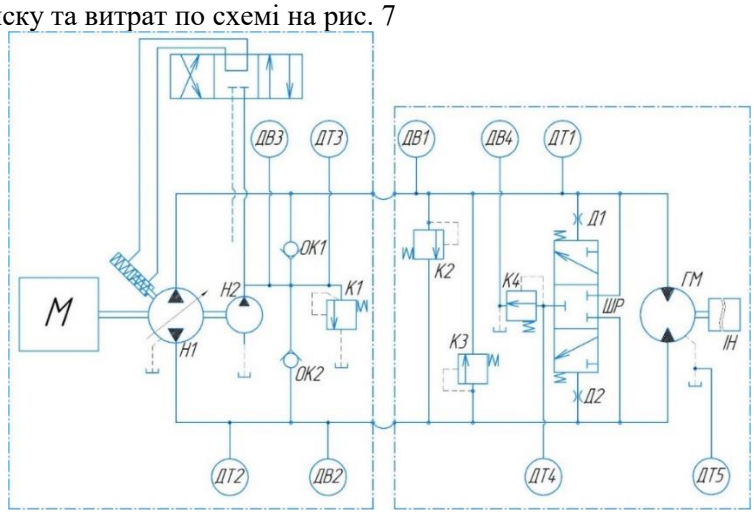

Рис. 7. Схема підключення вимірювальних датчиків для дослідження роботи гідростатичної трансмісії: ДТ1, ДТ2, ДТ3, ДТ4, ДТ5 – датчики тиску; ДВ1, ДВ2, ДВ3, ДВ4 – датчики витрати робочої рідини; М – приводний електродвигун; Н1 – основний насос; Н2 – насос підкачки; ОК1, ОК2 – зворотні клапани; К1, К2, К3, К4 – запобіжні клапани; Д1, Д2 – дроселі; ШР – шунтувальний розподільник; ГМ – гідромотор; ІН – інерційне навантаження.

Регульований насос Н1 з'єднаний гідролініями високого та низького тиску з нерегульованим гідромотором ГМ. У гідролінії високого тиску встановлено датчик тиску ДТ1 та датчик витрати робочої рідини ДВ1. У гідролінії низького тиску встановлено датчик тиску ДТ2 та датчик витрати робочої рідини ДВ2. На корпусі основного насоса Н1 змонтовано шестеренний насос підживлення Н2, який нагнітає робочу рідину в основні гідролінії через зворотні клапани ОК1 та ОК2. Для вимірювання тиску та витрати в гідролінії насоса підживлення встановлено датчик тиску ДТ3 та датчик витрати ДВ3.

Для відведення робочої рідини на охолодження в клапанній кришці гідромотора змонтовано шунтувальний розподільник ШР, через який робоча рідина надходить до переливного клапана К4 і далі на злив. В порожнині переливного клапана встановлено датчик тиску ДТ4, а після клапана встановлено датчик витрати ДВ4, який визначає кількість робочої рідини, яка відводиться на охолодження. Тиск в зливній порожнині визначається датчиком тиску ДТ5.

Перевірка відповідності розв'язків математичних моделей наведених у [1], реальним характеристикам роботи дослідного зразка із ідентичними з математичною моделлю вихідними параметрами. Фізичний експеримент проводився для різних співвідношень параметрів гідросистеми та для різних режимів

роботи гідростатичної трансмісії. Необхідний режим роботи задавався зміною подачі насоса шляхом зміни кута повороту люльки насоса та зміною інерційного навантаження на валу гідромотора.

Далі проводився аналіз характеру роботи гідросистеми, перехідних процесів зміни тисків у порожнинах гідростатичної трансмісії, витрат у гідролініях та через гідроапарати.

Осцилограми зміни витрат у нагнітальній (від насоса до гідромотора) та всмоктувальній (від гідромотора до насоса) гідролініях та гідролінії насоса підживлення отримані в результаті фізичного експерименту показані на рис. 8

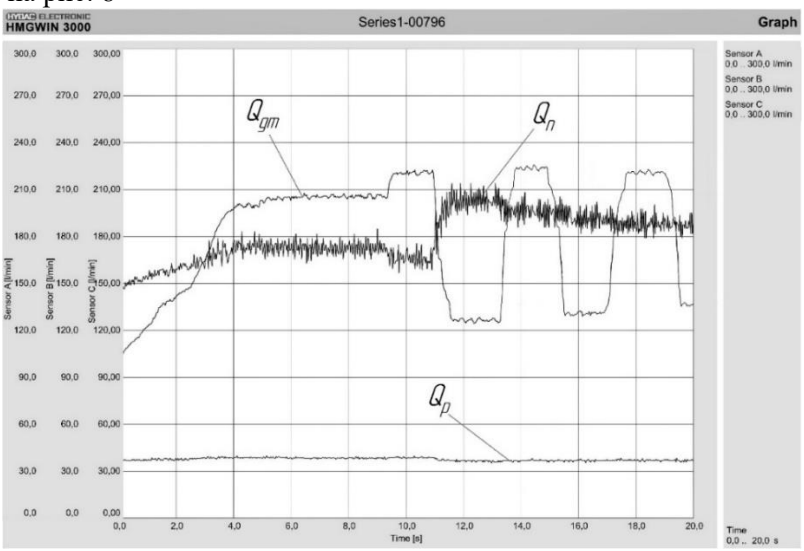

Рис. 8. Осцилограми роботи гідростатичної трансмісії типу ГСТ-90 з клапанною коробкою гідромотора без встановлених дроселів, та при наступних параметрах: частота обертання вала насоса – 1500 об/хв, інерційне навантаження на валу гідромотора – 1000 кг*см^2, отримані експериментально: Q_n – подача насоса; Q_p – подача насоса підживлення; Qгм – витрата, яку споживає гідромотор.

Осцилограми перехідних процесів роботи гідростатичної трансмісії типу ГСТ-90 отримані шляхом математичного моделювання при аналогічних параметрах, показано на рис. 9.

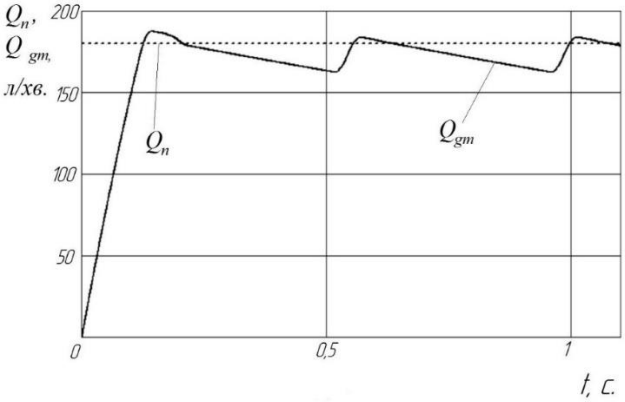

Рис. 9. Перехідні процеси, отримані в результаті розрахунку математичної моделі роботи гідростатичної трансмісії типу ГСТ-90 з клапанною коробкою гідромотора без встановлених дроселів, та при наступних параметрах: частота обертання вала насоса – 1500 об/хв, інерційне навантаження на валу гідромотора – 1000 кг*см^2, отримані шляхом комп'ютерної симуляції: Q_n – подача насоса; Qгм – витрата, яку споживає гідромотор.

Порівнюючи отримані осцилограми, можна зробити висновок про збіг режиму роботи гідростатичної трансмісії при фізичному та чисельному експерименті. В обох випадках при даному інерційному навантаженні на валу гідромотора та клапанній коробці гідромотора не удосконаленої конструкції режим роботи гідростатичної трансмісії відповідає автоколивальному. Як видно з осцилограм рис. 9. при запуску гідростатичної трансмісії гідромотор з більшим прискоренням набирає швидкість і виходить на значення коли витрата рідини в гідролінії від гідромотора до насоса стають більшими за подачу насоса. Значне

прискорення інерційної маси призводить до того, що процес розгону гідромотора відбувається з перерегулюванням, та в результаті викликає автоколивальний режим роботи всієї системи.

Однак має місце відмінність отриманих результатів фізичного дослідження та комп'ютерної симуляції роботи гідростатичної трансмісії типу ГСТ-90. Спостерігається більша коливальність значень подачі насоса на осцилограмах фізичного експерименту, так як при математичному моделюванні не було враховано пульсації спричинені періодичною зміною моменту сил, створюваного тиском поршнів блоку циліндрів на похилий диск насоса.

5. Висновки

Збіг результатів експериментальних досліджень роботи гідростатичних трансмісій з результатами комп'ютерної симуляції на основі розробленої математичної моделі підтверджує її адекватність та коректність прийнятих припущень. Завдяки цьому можна рекомендувати використовувати результати математичного моделювання в ході проектування нових конструкцій гідростатичних трансмісій.

Список використаних джерел

1. Гречко Р.О. Математична модель гідростатичної трансмісії типу ГСТ-90. *The scientific heritage*. 2020. Vol. 1, No 56. С. 16-24. DOI: 10.24412/9215-0365-2020-56-1-16-24.
2. M. Ivanov, O. Pereyaslavskyy, S. Shargorodskiy, R. Hrechko, V. Mazurenko, S Holovko. Vibration resistance of HST 90 hydrostatic transmission. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1741. DOI: 10.1088/1742-6596/1741/1/012051.
3. Лур'є З. Я., Самородов В. Б., Аврунін Г. А., Цента Є. М. Метод поліпшення динамічних характеристик процесу пуску об'ємного гідропривода з замкненим ланцюгом циркуляції робочої рідини. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. 2019. №2. С. 68–76.
4. Triet Hung HO, Kyoung Kwan AHN. Modeling and simulation of hydrostatic transmission system with energy regeneration using hydraulic accumulator / Journal of Mechanical Science and Technology. 2010. № 24 (5). P. 1163–1175.
5. Ramë LIKAJ, Ahmet SHALA. Design of automatic system with hydrostatic transmission / ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering. 2017. Tome XV(2). P. 159–162.
6. Šulc B., Jan J. A. Non Linear Modelling and Control of Hydraulic Actuators. *Acta Polytechnica*. 2002. Vol. 42, no. 3. P. 41–47.
7. Kumar N., Kumar R., Kumar B., Maity S. Condition monitoring of hydraulic transmission system with variable displacement axial piston pump and fixed displacement motor. *Materials Today: Proceedings*. 2020. P. 1–8. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.327
8. Biswaranjan Mohanty, Kim A Stelson. High fidelity dynamic modeling and control of power regenerative hydrostatic wind turbine test platform. *Fluid Power and Motion Control*. Proceedings of 2018 ASME/Bath Symposium, Bath, United Kingdom, Septemebr 12-14. 2018. P. 1–7.
9. Majid Deldar, Afshin Izadian, Sohel Anwar. Analysis of a hydrostatic drive wind turbine for improved annual energy production. *AIMS Energy*. 2018. Volume 6. Issue 6. P. 908–925.
10. Іванов М.І., Гречко Р.О. Дослідження впливу об`ємів гідроліній на роботу гідростатичної трансмісії типу ГСТ90. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції, 14-16 травня 2019 року. Том 1. Чернігів, 2019. С. 232-233.
11. HMG 4000 https://www.hydac.com/shop/en/GP_1000189407 (дата звернення: 11.11.2021).

References

[1] Hrechko, R.O. (2020). Matematychna model hidrostatychnoi transmisii typu HST-90. *The scientific heritage* 1 (56). 16–24. [in Ukrainian]
[2] M. Ivanov, O. Pereyaslavskyy, S. Shargorodskiy, R. Hrechko, V. Mazurenko, S Holovko. (2021). Vibration resistance of HST 90 hydrostatic transmission. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol.1741. [in English].
[3] Lurie, Z. Ya., Samorodov, V. B., Avrunin, H. A., Tsenta, Ye. M. (2019). Metod polipshennia dynamichnykh kharakterystyk protsesu pusku obiemnoho hidropryvoda z zamknenym lantsiuhom tsyrkuliatsii robochoi ridyny. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"* 2. 68–76. [in Ukrainian].
[4] Triet Hung, HO, Kyoung Kwan, AHN. (2010). Modeling and simulation of hydrostatic transmission system with energy regeneration using hydraulic accumulator. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 24 (5). 1163–1175. [in English].
[5] Ramë LIKAJ, Ahmet SHALA. (2017). Design of automatic system with hydrostatic transmissio. *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*. Tome XV(2). 159–162. [in English].
[6] Šulc, B., Jan, J. A. (2002). Non Linear Modelling and Control of Hydraulic Actuators. *Acta Polytechnica*.

3(42). 41–47. [in English].
[7] Kumar, N., Kumar, R., Kumar, B., Maity, S. (2020). Condition monitoring of hydraulic transmission system with variable displacement axial piston pump and fixed displacement motor. *Materials Today: Proceedings.* 1–8. [in English].
[8] Biswaranjan Mohanty, Kim A Stelson. (2018). High fidelity dynamic modeling and control of power regenerative hydrostatic wind turbine test platform. *Fluid Power and Motion Control.* Proceedings of 2018 ASME/Bath Symposium, Bath, United Kingdom – Septemebr 12-14. 1–7. [in English].
[9] Majid Deldar, Afshin Izadian, Sohel Anwar. (2018) Analysis of a hydrostatic drive wind turbine for improved annual energy production. *AIMS Energy.* 6. (6). 908–925. [in English].
[10] Ivanov, M.I., Hrechko, R.O. (2019). Doslidzhennia vplyvu ob`iemiv hidrolinii na robotu hidrostatychnoi transmisii typu HST90. *Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system*: materialy IX Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 14-16 travnia 2019 roku. Chernihiv 1. 232–233. [in Ukrainian].
[11] HMG 4000 https://www.hydac.com/shop/en/GP_1000189407. [in English].

EXPERIMENTAL STUDY OF HYDROSTATIC TRANSMISSION TYPE GST-90

As you know, one of the areas of development of modern agricultural machinery is to expand their functionality, increase capacity and productivity. The solution to this problem is possible through the use of powerful small-sized drives - namely hydraulic drives. These properties of the drive of this type have become crucial for its widespread use in agricultural machinery. Today, the hydraulic drive is used to drive the working bodies of machines, and as the drive of the main movement of self-propelled agricultural machines. The main hydraulic unit that drives a self-propelled agricultural machine is a hydrostatic transmission. Significant competition in the market of self-propelled agricultural machinery has led to an increase in the level of technical requirements for both agricultural machinery in general and hydrostatic transmissions operating in their composition. At the same time, further increase of energy saving and economic efficiency becomes especially important. The solution of the set tasks is greatly facilitated by further hydrofication of the drives and working bodies of agricultural machines. The most successful solution to this problem is the use of a hydrostatic drive, a typical representative of which are hydrostatic transmissions such as GST-90.

The analysis of theoretical researches is carried out, the design of the stand for carrying out experimental researches for the purpose of confirmation of results of mathematical modeling is offered. Measuring and recording equipment for conducting a physical experiment is described. The coincidence of the results of experimental studies of hydrostatic transmissions with the results of computer simulation based on the developed mathematical model confirms its adequacy and correctness of the assumptions. Due to this, it is possible to recommend using the results of mathematical modeling in the design of new designs of hydrostatic transmissions.

Key words: hydraulic drive, hydrostatic transmission, test bench, pressure sensor, computer measuring system.
Fig. 9. Table. 1. Ref. 11.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Веселовська Наталія Ростиславівна – доктор технічних наук, професор кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна e-mail: wnatalia@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-9399-6721).
Шаргородський Сергій Анатолоійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: sergey20@vsau.vin.ua, https://orcid.org/0000-0003-2125-773X).
Ящук Євген Валерійович – аспірант кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: zenaasuk@gmail.com).
Гречко Роман Олександрович – інженер конструктор ТОВ «АгроКалина» вул. Незалежності, 46, м. Калинівка, Вінницька обл., Україна, 22400, E-mail: grechkoro@gmail.com ORCID: 0000-0002-8409-5793).

Nataliia Veselovska – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Machines and Equipment of Agricultural Production of Vinnitsa National Agrarian University (3 Soniachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: wnatalia@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-9399-6721).
Serhiy Shargorodskiy – PhD, Associate Professor of the Department of Machines and Equipment of Agricultural Production of the Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnychna str., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: sergey20@vsau.vin.ua, https://orcid.org/0000-0003-2125-773X).
Evgen Yashchuk – post-graduate student of the Department of Machines and Equipment of Agricultural Production of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna Street, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: zenaasuk@gmail.com).
Roman Hrechko – engineer designer, «AgroKalina» Ltd, Nezalegnosti str., 46, Kalinivka, Vinnitsa region, Ukraine, 22400, E-mail: grechkoro@gmail.com ORCID**:** 0000-0002-8409-5793).