

# Механізація, електрифікація

УДК 631.37

© 2020

## ДОСЛІДЖЕННЯ КЕРОВАНOSTІ РУХУ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТУ МОДУЛЬНОГО ТИПУ

В.В. Адамчук<sup>1</sup>, В.М. Булгаков<sup>2</sup>, В.Т. Надикто<sup>3</sup>, І.В. Головач<sup>4</sup>,  
Д.В. Присяжнюк<sup>5</sup>, О.О. Парахін<sup>6</sup>

<sup>1,2</sup>доктори технічних наук, академіки НААН

<sup>3</sup>доктор технічних наук, член-кореспондент НААН

<sup>4</sup>доктор технічних наук

<sup>5</sup>кандидат технічних наук

<sup>1</sup>Національний науковий центр «Інститут механізації та  
електрифікації сільського господарства»

вул. Вокзальна, 11, смт Глеваха Васильківського р-ну Київської обл., 08631, Україна

<sup>2,4</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України

вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна

<sup>3,6</sup>Таврійський державний агротехнологічний університет ім. Дмитра Моторного  
пр. Б. Хмельницького, 18, м. Мелітополь Запорізької обл., 72312, Україна

<sup>5</sup>Ладизинський коледж Вінницького національного аграрного університету

вул. Петра Кравчика, 5, м. Ладизин Вінницької обл., 24321, Україна

e-mail: <sup>1</sup>vvadamchuk@gmail.com, <sup>2</sup>vbulgakov@meta.ua, <sup>3</sup>volodymyr.nadykto@tsatu.edu.ua,

<sup>4</sup>holovach.iv@gmail.com, <sup>5</sup>m09049@meta.ua, <sup>6</sup>oleksandr.parakhin@tsatu.edu.ua

ORCID: <sup>1</sup>0000-0003-0358-7946, <sup>2</sup>0000-0003-3445-3721, <sup>3</sup>0000-0002-1770-8297,

<sup>4</sup>0000-0003-1387-4789, <sup>5</sup>0000-0002-6369-5781, <sup>6</sup>0000-0003-1972-3762

Надійшла 15.04.2020

**Мета.** Підвищення рівня керованості руху машинно-тракторного агрегату (МТА) модульного типу із начіпним плугом шляхом оснащення одного із гідроциліндрів, що з'єднують енергетичний і технологічний модулі, спеціальним дроселем. **Методи.** Для обробки та аналізу результатів експериментальних досліджень застосовано методи кореляційного і спектрального аналізів вихідних параметрів динамічної системи. **Результати.** При русі МТА модульного типу із начіпним плугом на агротехнічному фоні керуючий вплив у вигляді кута  $\alpha$  повороту керованих коліс агрегату змінювався у дуже вузькому діапазоні частот:  $0 \dots 2,0 \text{ с}^{-1}$ , або  $0 \dots 0,32 \text{ Гц}$ . Без дроселювання гідроциліндра технологічного модуля між параметрами  $\alpha$  і  $\varphi$  (курсний кут енергетичного модуля) виявлено хоча і позитивний, але досить слабкий кореляційний зв'язок. Максимальне значення взаємної кореляційної функції зв'язку між параметрами  $\alpha$  і  $\varphi$  зміщене вліво від нульової ординати приблизно на 1 с. З огляду на це входом динамічної системи є не кут  $\alpha$ , а його курсовий кут  $\varphi$ , що небажано для керованості. За дроселювання гідроциліндра максимум

оцінюваної взаємної кореляційної функції зміщений вправо від нульової ординати. Це означає, що керуючий вплив (кут  $\alpha$ ) є входом, а курсовий кут  $\varphi$  — виходом розглянутої динамічної системи. У цьому разі запізнення реакції курсового кута  $\varphi$  на зміну керуючого впливу  $\alpha$  приблизно дорівнює лише 0,51 с, що є бажаним для покращення керованості МТА. **Висновки.** Оснащення гідроциліндра модульного енергетичного засобу дроселем з коефіцієнтом опору на рівні  $1,03 \times 10^6 \cdot \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{рад}^{-1}$  дає можливість: довести максимальне значення взаємної кореляційної функції між керуючим впливом, тобто кутом  $\alpha$  повороту керованих коліс енергетичного модуля, і його курсовим кутом  $\varphi$  до рівня 0,89; змістити максимальне значення цієї функції вправо від нульової ординати, забезпечивши куту повороту керованих коліс енергетичного модуля  $\alpha$  роль вхідного (а не вихідного) впливу; майже вдвічі зменшити запізнення реакції курсового кута  $\varphi$  енергетичного модуля на зміну кута  $\alpha$  повороту його керованих коліс.

**Ключові слова:** модульний енергетичний засіб, спектральна щільність, нормована кореляційна функція, дроселювання гідроциліндра, спектральні щільності.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202006-06>

Одним із перспективних напрямів розвитку тракторобудування та ефективного використання машинно-тракторних агрегатів (МТА) є їх модульне конструювання. У цьому варіанті тяговий агрегат складається із енергетичного засобу (трактора) і технологічного модуля. Їхнє сполучення в одній конструкції — це машинно-тракторний агрегат модульного типу (фактично модульний енергетичний засіб). Загальний вигляд такого агрегату з начепленим позаду на технологічний модуль 5-корпусним плугом представлено на рис. 1.

Енергетичний модуль машинно-тракторного агрегату — це трактор, енергонасиченість якого повинна бути більшою за  $14 \text{ кВт} \cdot \text{т}^{-1}$ . Але, як показує досвід, у реальних умовах ефективність використання модульного енергетичного засобу може бути задовільною і при меншій енергонасиченості трактора.

Технологічний модуль машинно-тракторного агрегату — це окремий міст, привод коліс якого здійснюється від синхронного вала відбору потужності енергетичного модуля (трактора). У передній частині технологічний модуль має зчпний пристрій, за допомогою якого він приєднується до заднього начіпного механізму енергетичного модуля, тобто трактора. Узгодження колових лінійних швидкостей

коліс технологічного і задніх коліс енергетичного модуля здійснюється за допомогою спеціального редуктора, розташованого на рамі технологічного модуля. Для агрегування із сільськогосподарськими знаряддями технологічний модуль обладнано гідравлічною начіпною системою, власним валом відбору потужності, сидельним пристроєм і гальмівною системою.

У горизонтальній площині енергетичний модуль з'єднується із технологічним модулем за допомогою вертикального шарніра. Він забезпечує поворот технологічного модуля щодо енергетичного на  $\pm 30^\circ$  під час руху на поворотній смузі. Обмеженість поворотності технологічного модуля щодо енергетичного в горизонтальній площині забезпечується двома гідроциліндрами, що з'єднують рами енергетичного і технологічного модулів.

У поздовжньо-вертикальній площині енергетичний модуль з'єднується із технологічним за допомогою горизонтального шарніра. Завдяки йому машинно-тракторний агрегат модульного типу може здійснювати задовільне копіювання поздовжнього профілю поля.

Для перетікання оливи із надпоршневої порожнини гідроциліндра у підпоршневу вони з'єднані між собою гідравлічним шлангом. Однак у процесі випробувань



**Рис. 1. Машинно-тракторний агрегат модульного типу з 5-корпусним плугом**

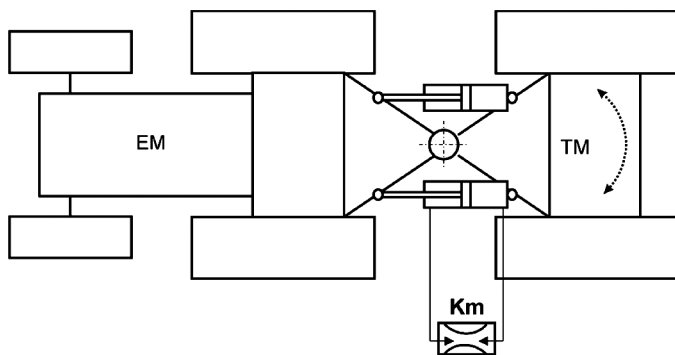
модульного енергетичного засобу було встановлено, що при його русі у складі агрегату на поворотній смузі технологічний модуль може здійснювати надмірні коливання у горизонтальній площині. Як наслідок виникала необхідність зниження швидкості руху модульного енергетичного засобу на поворотній смузі поля. А це призводить до зменшення продуктивності роботи машинно-тракторного агрегату. Отже, підвищення керованості руху МТА модульного типу, який складається з енергетичного модуля (трактора) та додаткового технологічного модуля, є актуальною науково-технічною проблемою.

Тому для зменшення коливань технологічного модуля у горизонтальній площині та підвищення керованості модульного енергетичного засобу (трактора) у гідравлічний шланг одного з гідроциліндрів

рів, що з'єднують модулі, був вмонтований дросель із коефіцієнтом опору  $K_m = 1,03 \times 10^6 \cdot \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{рад}^{-1}$ . На рис. 2 представлено схему з'єднання енергетичного (трактора) та технологічних модулів, на якій показано встановлення в один із гідроциліндрів дроселя.

Обґрунтування значення коефіцієнта опору, який створюється дроселем, на підставі даних, отриманих під час польових експериментальних досліджень, є предметом розгляду статті.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Керованість руху МТА сучасного технічного рівня — це істотна проблема галузі механізації сільського господарства. Тому розробка умов і технічних засобів, які забезпечують керований рух машинно-тракторних агрегатів, особливо орних і просяпних, засновується на наукових дослідженнях



**Рис. 2. Схема встановлення дроселя у гідравлічний циліндр, що з'єднує енергетичний і технологічний модулі: EM — енергетичний модуль; TM — технологічний модуль;  $K_m$  — дросель, який створює коефіцієнт опору**

і конструкторських розробках, спрямованих в основному на забезпечення прямолінійності траєкторії руху та мінімізації «бічного ведення» тощо. Особливо це стосується машинно-тракторних агрегатів, побудованих за модульним принципом. У науковій літературі питанням керованості руху сільськогосподарських МТА приділено багато уваги [1–11], зокрема теоретичному дослідженню плоскопаралельного руху агрегатів [3–5].

Теоретичні дослідження керованості руху машинно-тракторних агрегатів базуються на фундаментальних дослідженнях, викладених у [12–19].

Однак ґрунтовні дослідження керованості руху МТА модульного типу при русі на поворотних полосах і при транспортних переїздах у літературі нині не достатньо викладені.

**Мета досліджень** — підвищення рівня керованості руху машинно-тракторного агрегату модульного типу із начіпним плугом шляхом оснащення одного із гідроциліндрів, що з'єднують енергетичний і технологічний модулі, спеціальним дроселем.

**Матеріали і методи досліджень.** Експериментальні дослідження машинно-тракторного агрегату модульного типу із начіпним плугом проводили у польових умовах на стерні пшениці озимої після її лущення.

Технічна характеристика машинно-тракторного агрегату модульного типу представлена у таблиці.

При цьому перед проведенням польових експериментальних досліджень вимірювали

вологість і щільність ґрунту у шарі 0–10 см, а також амплітуду та частоту коливань нерівностей поля уздовж майбутнього руху МТА.

Рух орного агрегату на поворотній смузі здійснювали на одній і тій самій передачі при встановленому дроселі ( $K_m = 1,03 \times 10^6 \cdot \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{рад}^{-1}$ ) у гідроциліндрі й без нього ( $K_m = 0$ ). Шлях переміщення агрегату при цьому становив 50 м. Виходячи з того, що агрегат рухався рівномірно, швидкість  $V_a$  його руху визначали за таким виразом:

$$V_a = 50 \cdot t^{-1},$$

де  $t$  — час проходження агрегатом ділянки довжиною 50 м.

Для реєстрації часу руху мобільного МТА модульного типу з плугом на поворотній смузі використали електронний секундомір з точністю виміру  $\pm 0,1$  с.

У процесі руху машинно-тракторного агрегату модульного типу за допомогою спеціального обладнання реєстрували кут  $\alpha$  повороту керованих коліс енергетичного модуля (трактора) і його курсовий кут  $\varphi$ .

Для вимірювання вологості ґрунту  $W$  використали електронний прилад MG-44 (Україна) з точністю виміру  $\pm 1\%$ . Вимірювання щільності ґрунту  $\rho_q$  здійснювали розробленим нами приладом за методикою [5]. Кількість вимірювань кожного із параметрів  $W$  і  $\rho_q$  становила не менше 50.

Кут  $\alpha$  повороту керованих коліс енергетичного модуля модульного енергетичного засобу реєстрували за допомогою резистора SP-3A з лінійною характеристикою і номіналом 470 Ом. Резистор встановлювали на осі повороту лівого переднього колеса енергетичного модуля.

Для вимірювання коливань поздовжнього профілю поля використали спеціальний прилад для реєстрування, елементом якого був резистор SP-3A з лінійною характеристикою і номіналом 470 Ом.

Курсовий кут  $\varphi$  енергетичного модуля МТА модульного типу реєстрували за допомогою гіроскопа GY-521 із пристроєм Arduino (Китай).

Електричні сигнали з гіроскопа і резисторів для реєстрації кута  $\varphi$ , а також коливань поздовжнього профілю поля потрапляли на аналого-цифровий перетворювач (Україна) і потім на персональний комп'ютер.

#### Технічна характеристика машинно-тракторного агрегату модульного типу

<b>Енергетичний модуль (трактор):</b>	
Маса в робочому стані, кг (т)	3900 (3,9)
Потужність двигуна, кВт	77,2
Швидкість насичення енергією, кВт·т <sup>-1</sup>	19,8
Колія передніх коліс, мм	1500
Колія задніх коліс, мм	1500
Розмір шин передніх коліс	13.6R20
Розмір шин задніх коліс	15.5R38
<b>Технологічний модуль:</b>	
Маса в робочому стані, кг	2600
Розмір колії, мм	1500
Розмір шин	16.9R38

Повторність вимірювання цих параметрів дорівнювала 3. З отриманих при цьому масивів даних розраховували такі статистичні характеристики, як дисперсії, а також нормовані кореляційні функції і спектральні щільності.

Для аналізу керованості руху машинно-тракторного агрегату модульного типу із начіпним плугом при різних значеннях дроселювання гідроциліндра використали нормовану взаємну кореляційну функцію, що зв'язує коливання кута  $\alpha$  повороту керованих коліс енергетичного модуля із коливаннями його курсового кута  $\varphi$ .

**Результати досліджень.** Під час проведення експериментальних досліджень руху МТА модульного типу із начіпним плугом на поворотній смузі середнє значення вологості ґрунту поля в шарі 0–10 см дорівнювало 15,3%. Щільність ґрунту у цьому ж шарі не перевищувала  $1,24 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ .

Середнє значення швидкості руху орного машинно-тракторного агрегату модульного типу на поворотній смузі становило  $2,4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Аналіз даних, що характеризують коливання поздовжнього профілю поля, показав, що довжина кореляційного зв'язку нормованої кореляційної функції цього процесу дорівнює 1 м (рис. 3).

Знаючи швидкість руху агрегату, можна легко визначити час кореляційного зв'язку. У цьому випадку при швидкості руху агрегату  $2,4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  він дорівнює:  $1\cdot(2,4)^{-1} = 0,42 \text{ с}$ . Можна сказати, що коливання поздовжнього профілю поля майже не містять прихованої періодичної складової. Інформація про перебіг кореляційної функції, показаної на рис. 3, не дає можливості однозначно визначити джерело генерування цих коливань.

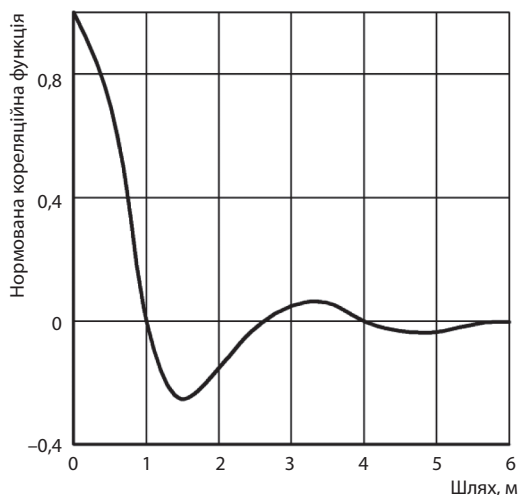
Дисперсія коливань розглянутого процесу при цьому дорівнює  $0,91 \text{ см}^2$ . В основному вона зосереджена у досить вузькому діапазоні частот  $0\ldots 2 \text{ м}^{-1}$  (рис. 4). З урахуванням швидкості руху машинно-тракторного агрегату  $2,4 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  цей діапазон дорівнює  $0\ldots 4,8 \text{ с}^{-1}$ , або  $0\ldots 0,76 \text{ Гц}$ .

Частота зрізу спектральної щільності, як бачимо з даних рис. 4, практично не перевищує  $6 \text{ м}^{-1}$ , або  $14,4 \text{ с}^{-1}$ , що дорівнює  $2,3 \text{ Гц}$ .

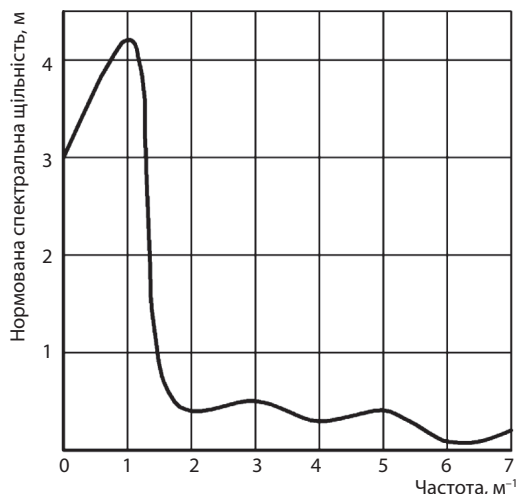
При русі агрегату на агротехнічному фоні з такими характеристиками коливань

поздовжнього профілю керуючий вплив у вигляді кута  $\alpha$  повороту керованих коліс модульного енергетичного засобу змінювався у дуже вузькому діапазоні. Так, основна частина дисперсії коливань цього параметра зосереджена у діапазоні частот  $0\ldots 2,0 \text{ с}^{-1}$ , або  $0\ldots 0,32 \text{ Гц}$  (рис. 5).

Максимальне значення нормованої спектральної щільності коливань кута  $\alpha$  припадає на досить вузький діапазон частот:  $0,30\ldots 0,35 \text{ с}^{-1}$ . Усе це вказує на бажаний



**Рис. 3.** Нормована кореляційна функція коливань поздовжнього профілю поля

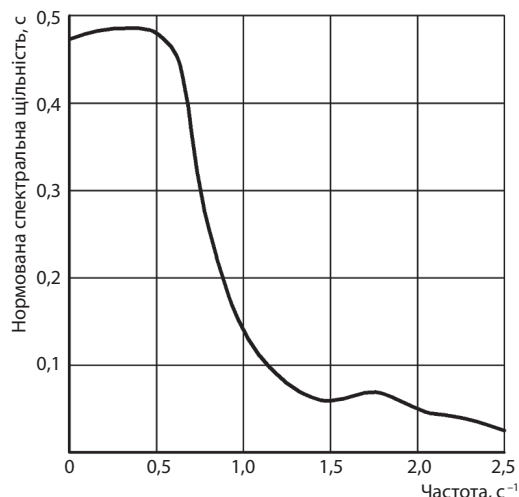


**Рис. 4.** Спектральна щільність коливань поздовжнього профілю поля

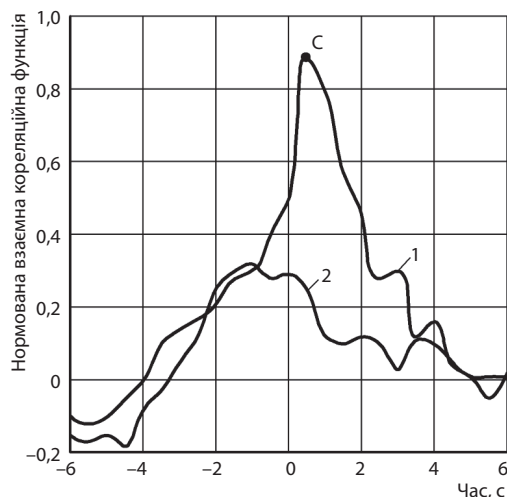


низькочастотний характер змін розглянутого керуючого впливу.

Як виявилось, коливання вхідного впливу блочно-модульний агрегат відпрацьовував по-різному. Без дроселювання гідроциліндра технологічного модуля модульного енергетичного засобу між параметрами  $\alpha$



**Рис. 5. Нормована спектральна щільність коливань кута повороту  $\alpha$  керованих коліс модульного енергетичного засобу**



**Рис. 6. Нормовані взаємні кореляційні функції коливань курсового кута  $\varphi$ , викликані коливаннями кута  $\alpha$  при різних рівнях дроселювання гідроциліндра технологічного модуля: 1 —  $K_m = 1,03 \times 10^6 \cdot \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{рад}^{-1}$ ; 2 —  $K_m = 0$**

і  $\varphi$  виявлено позитивний кореляційний зв'язок. Але, по-перше, він є досить слабким, оскільки максимальне значення взаємної кореляційної функції при цьому не перевищує оцінки 0,34 (крива 2, рис. 6).

По-друге, максимальне значення цієї функції зміщене вліво від нульової ординати приблизно на 1 с. Це означає, що входом цієї динамічної системи є не кут  $\alpha$  повороту керованих коліс енергетичного модуля, а його курсовий кут  $\varphi$ . Тобто керуючий вплив  $\alpha$  є реакцією на зміну курсового кута  $\varphi$  із запізненням у часі на рівні 1 с.

Причиною зміни курсового кута  $\varphi$  модульного енергетичного засобу може бути коливання розворотного моменту, що діє збоку технологічного модуля, або якесь інше збурення.

Водночас уведення гідравлічного демпфера в гідроциліндр технологічного модуля модульного енергетичного засобу із коефіцієнтом опору  $K_m = 1,03 \times 10^6 \cdot \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{рад}^{-1}$  принципово змінює характер поведінки взаємної кореляційної функції  $\alpha - \varphi$ . Причому як якісно, так і кількісно (крива 1, рис. 6).

По-перше, різко зростає сила кореляційного зв'язку між змінними параметрів  $\alpha$  і  $\varphi$ . Порівняно з варіантом  $K_m = 0$  максимум взаємної кореляційної функції збільшується у 2,6 раза, досягаючи оцінки 0,89.

По-друге, максимум оцінюваної функції (крива 1, рис. 6) зміщений вправо від нульової ординати. А це вказує на те, що керуючий вплив (тобто кут  $\alpha$ ) є входом, а курсовий кут  $\varphi$  модульного енергетичного засобу — виходом розглянутої динамічної системи.

По-третє, запізнення реакції курсового кута  $\varphi$  на зміну керуючого впливу  $\alpha$  коліс енергетичного модуля зменшується майже вдвічі. У цьому разі воно приблизно дорівнює 0,51 с. Такий результат є бажаним, оскільки реакція розглянутої нами слідуючої динамічної системи на зміну керуючого впливу в ідеалі повинна бути миттєвою, тобто здійснюватися із нульовим запізненням. Але оскільки на практиці досягти цього неможливо, то будь-яке конструктивно-технологічне рішення, спрямоване на зменшення реакції динамічної системи на вхідний корисний сигнал, є бажаним. У нашому випадку таким рішенням є встановлення дроселя у гідроциліндр технологічного модуля.

## Висновки

Підвищити керованість руху машинно-тракторного агрегату модульного типу, що складається з енергетичного і технологічного модулів, можна шляхом дроселювання одного із гідроциліндрів, які обмежують взаємну поворотність цих модулів між собою у горизонтальній площині.

Оснащення гідроциліндра модульного енергетичного засобу дроселем із коефіцієнтом опору на рівні  $1,03 \times 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{рад}^{-1}$  дає можливість:

- довести максимальне значення взаємної кореляційної функції між керуючим

впливом, тобто кутом  $\alpha$  повороту керованих коліс енергетичного модуля модульного енергетичного засобу, і його курсовим кутом  $\varphi$  до рівня 0,89;

- змістити максимальне значення цієї взаємної кореляційної функції вправо від нульової ординати, забезпечивши тим самим куту  $\alpha$  повороту керованих коліс енергетичного модуля роль вхідного (а не вихідного) впливу;

- майже вдвічі зменшити запізнення реакції курсового кута  $\varphi$  енергетичного модуля на зміну кута  $\alpha$  повороту його керованих коліс.

Adamchuk V.<sup>1</sup>, Bulgakov V.<sup>2</sup>, Nadykto V.<sup>3</sup>, Holovach I.<sup>4</sup>, Prysiazniuk D.<sup>5</sup>, Parakhin O.<sup>6</sup>

<sup>1</sup>NSC «Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture», 11 Vokzalna Str., Hlevakha township, Vasytkiv district, Kyiv oblast, 08631, Ukraine,

<sup>2</sup>«National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine, <sup>3</sup>«Tavria State Agrotechnological University named after Dmytro Motornyi, 18 B. Khmelnytskoho Ave., Melitopol, Zaporizhzhia oblast, 72312, Ukraine, <sup>5</sup>Ladyzhyn College of Vinnytsia National Agrarian University, 5 Petra Kravchyka Str., Ladyzhyn, Vinnytsia oblast, 24321, Ukraine; e-mail:

<sup>1</sup>vadamchuk@gmail.com; <sup>2</sup>vbulgakov@meta.ua; <sup>3</sup>volodymyr.nadykto@tsatu.edu.ua; <sup>4</sup>holovach.iv@gmail.com; <sup>5</sup>m09049@meta.ua; <sup>6</sup>oleksandr.parakhin@tsatu.edu.ua; ORCID: <sup>1</sup>0000-0003-0358-7946, <sup>2</sup>0000-0003-3445-3721, <sup>3</sup>0000-0002-1770-8297, <sup>4</sup>0000-0003-1387-4789, <sup>5</sup>0000-0002-6369-5781, <sup>6</sup>0000-0003-1972-3762

<sup>5</sup>Ladyzhyn College of Vinnytsia National Agrarian University, 5 Petra Kravchyka Str., Ladyzhyn, Vinnytsia oblast, 24321, Ukraine; e-mail:

<sup>1</sup>vadamchuk@gmail.com; <sup>2</sup>vbulgakov@meta.ua; <sup>3</sup>volodymyr.nadykto@tsatu.edu.ua; <sup>4</sup>holovach.iv@gmail.com; <sup>5</sup>m09049@meta.ua; <sup>6</sup>oleksandr.parakhin@tsatu.edu.ua; ORCID: <sup>1</sup>0000-0003-0358-7946, <sup>2</sup>0000-0003-3445-3721, <sup>3</sup>0000-0002-1770-8297, <sup>4</sup>0000-0003-1387-4789, <sup>5</sup>0000-0002-6369-5781, <sup>6</sup>0000-0003-1972-3762

<sup>5</sup>Ladyzhyn College of Vinnytsia National Agrarian University, 5 Petra Kravchyka Str., Ladyzhyn, Vinnytsia oblast, 24321, Ukraine; e-mail:

<sup>1</sup>vadamchuk@gmail.com; <sup>2</sup>vbulgakov@meta.ua; <sup>3</sup>volodymyr.nadykto@tsatu.edu.ua; <sup>4</sup>holovach.iv@gmail.com; <sup>5</sup>m09049@meta.ua; <sup>6</sup>oleksandr.parakhin@tsatu.edu.ua; ORCID: <sup>1</sup>0000-0003-0358-7946, <sup>2</sup>0000-0003-3445-3721, <sup>3</sup>0000-0002-1770-8297, <sup>4</sup>0000-0003-1387-4789, <sup>5</sup>0000-0002-6369-5781, <sup>6</sup>0000-0003-1972-3762

### **The study of controllability of motion of tractor aggregate of module type**

**Goal.** To increase the level of controllability of motion of tractor aggregate (MTA) of modular type with the plow by equipping one of the hydro-cylinders, connecting energy and technological modules, with a special choke. **Methods.** Correlation and spectral analysis of output parameters of the dynamic system. **Results.** When driving MTA of module type with a plow on an agrotechnical background the control influence in the form of angle  $\alpha$  of rotation of the steered wheels of the unit changed in a very narrow frequency range: 0...2.0 s<sup>-1</sup>, or 0...0,32 Hz. They fixed, although a positive but relatively weak, correlation between

the parameters  $\alpha$  and  $\varphi$  (heading angle of power module) without throttling of the hydraulic cylinder of the technological module. The maximum value of the mutual correlation function of the connection between parameters  $\alpha$  and  $\varphi$  is shifted to the left of the zero ordinate for about 1 sec. Given this, the input dynamic system is not the angle  $\alpha$ , but its heading angle  $\varphi$ , which is undesirable for control. At the throttling of the hydraulic cylinder, the maximum of the estimated correlation function is shifted to the right from the zero ordinate. That means that the control action (angle  $\alpha$ ) is the input and the heading angle  $\varphi$  is the output of the considered dynamic system. In this case, the delay of the response of heading angle  $\varphi$  on the change of control action  $\alpha$  is approximately equal 0.51, which is desirable for the improved control over MTA. **Conclusions.** Equipment of hydraulic cylinder of the modular power means with the throttle with the coefficient of resistance at the level of  $1,03 \times 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{рад}^{-1}$  allows: to increase the maximum value of the mutual correlation function between the control effect, i.e. the angle  $\alpha$  of rotation of the steered wheels of the power module and its directional angle  $\varphi$  to the level of 0.89; to shift the maximum value of that function to the right of the zero ordinate, providing the steering angle  $\alpha$  of the steered wheels of the power module the role of the input (not output) influence; almost to halve the response lag of the heading angle  $\varphi$  of the power module by changing the angle  $\alpha$  of rotation of its driven wheels.

**Key words:** modular power tool, spectral density, normalized correlation function, throttling the hydraulic cylinder, the spectral density.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202006-06>

## Бібліографія

1. Bulgakov V., Ivanovs S., Nadykto V., Kuva-chov V., Masalabov V. Research on the turning ability of a two-machine aggregate. *INMATEH – Agric. Eng.* 2018. V. 54. P. 139–146.
2. Padureanu V., Lupu M.I., Canja C.M. Theoretical research to improve traction performance of wheeled tractors by using a supplementary driven axle. *Computational Mechanics and Virtual Engineering*. Brasov, Romania. 2013. P. 410–415.
3. Касымов А.Ш., Золотарев В.В. Установившееся прямолинейное движение пахотного агрегата с передней и задней навеской. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 1988. № 1. С. 34–38.
4. Стасилевич А.Г. Управляемость колесного трактора с навесками сельскохозяйственных машин. *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2013. № 4. С. 95–100.
5. Надикто В.Т. Оцінка керованості руху машинно-тракторних агрегатів. *Техніка і технології АПК*. 2016. № 2. С. 10–14.
6. Фомин С.Д. Устойчивость управляемого движения МТА с различным типом кинематической связи ведущих колес. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2011. № 4. С. 1–7.
7. Tajanowskij G., Tanas W. Analysis of movement kinematics at turn of wheel tractor with semi-trailer with articulated operated draught bar. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2012. V. 57 (2). P. 190–196.
8. Лебедев А.Т., Артьомов М.П., Шуляк М.Л. Забезпечення стійкості і керованості сільськогосподарських агрегатів із змінною масою. *Зб. наук. пр. Вінницького нац-го аграрного ун-ту*. 2015. Т.1. Вип. №1 (89). С. 57–61.
9. Бондар А.М. Фактори поліпшення керованості МТА. *Вісник Дніпропетровського держ. аграрного ун-ту*, 2009. № 2. С. 268–270.
10. Чорна Т.С. Аналіз способів оцінювання стійкості та керованості робочого руху посівних агрегатів. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2016. Т. 1. Вип. 3. С. 224–232.
11. Артьомов М.П. Дослідження критеріїв керованості мобільних сільськогосподарських машин. *Конструювання, виробництво, та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2011. Ч. 1. Вип. 41. С. 265–271.
12. Припоров Е.В. Повышение продольной устойчивости навесных агрегатов. *Инновации в сельском хозяйстве*. 2015. № 5 (15). С. 115–119.
13. Васильев А.О., Андреев Р.В., Григорьев А.О. Влияние параметров опорных колес на величину отклонения прицепной машины от курса следования. *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2018. № 1 (22). С. 55–59.
14. Жилейкин М.М., Шинкаренко В.А. Качественный анализ методов повышения управляемости и устойчивости колесных машин. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2015. № 1 (658). С. 42–48. doi: 18698/0536-1044-2015-1-42-48
15. Купряшкин В.Ф., Наумкин Н.И., Купряшкин В.В. Исследование устойчивости движения подвижного модуля экспериментальной установки при испытании активных ротационных рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Вестник Мордовского университета*. 2017. Т. 26. № 2. С. 246–258. doi: 10.15507/0236-2910.026.201602.246-258
16. Залипака В.Д. Спосіб збільшення позовжньої стійкості короткобазових колісних машин та його математичний аналіз координатним методом. *Системи озброєння і військова техніка*. 2015. № 3 (43). С. 81–84.
17. Бородин И.Ф., Кирилин Н.И. Основы автоматизации и автоматизации производственных процессов. Москва: Колос, 1977. 328 с.
18. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Основы теории и элементов систем автоматического регулирования. Москва: Машиностроение, 1985. 536 с.
19. Bulgakov V., Pascuzzi S., Santoro F., Anifantis A.S. Mathematical Model of the Plane-Parallel Movement of the Self-Propelled Root-Harvesting Machine. *Sustainability*. Switzerland. 2018. V. 10 (10), 3614. P. 1–11. doi: 10.3390/su10103614