

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

**ПАРАХІН ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК 631.37 + 631.3.004.65

**ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ І КЕРОВАНОСТІ  
ТРАНСПОРТНОГО РУХУ БЛОКОВО-МОДУЛЬНОГО  
МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТУ**

спеціальність - 05.05.11 – машини і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва

Автореферат дисертації  
на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Мелітополь – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Таврійському державному агротехнологічному університеті імені Дмитра Моторного Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: член-кореспондент НААН України,  
доктор технічних наук, професор  
**Надикто Володимир Трохимович**,  
Таврійський державний агротехнологічний  
університет імені Дмитра Моторного, професор  
кафедри машиновикористання в землеробстві

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Козаченко Олексій Васильович**,  
Харківський національний технічний  
університет сільського господарства  
імені Петра Василенка  
завідувач кафедри сільськогосподарських машин,  
кандидат технічних наук, доцент  
**Третяк Віктор Михайлович**,  
Національний науковий центр "Інститут механізації та електрифікації сільського господарства" Національної академії аграрних наук України Міністерства освіти і науки України,  
завідувач відділу мобільних енергетичних засобів та біоенергетики

Захист відбудеться « 7 » травня 2021 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 18.819.01 в Таврійському державному агротехнологічному університеті імені Дмитра Моторного за адресою: 72312, Запорізька обл., м. Мелітополь, пр-т Б.Хмельницького, 18, ауд. 1.111

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного за адресою: 72312, Запорізька обл., м. Мелітополь, пр-т Б.Хмельницького, 18  
Автореферат та дисертація розміщені в мережі Internet за адресою <http://www.tsatu.edu.ua/nauka/n/specializovani-vcheni-radu/specializovana-vchena-rada-d-18-819-01/>

Автореферат розісланий «2» квітня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

О.Ю. Вовк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Перспективи підвищення продуктивності праці, зменшення питомих витрат пального тощо машинно-тракторними агрегатами на основі тракторів тягової концепції практично вичерпані. Розв'язати цю проблему можна лише шляхом реалізації тягово-енергетичної концепції розвитку енергетичних засобів на основі блоково-модульної їх побудови.

Теоретичні та практичні аспекти використання модульних енергетичних засобів (МЕЗ) в технологічних варіантах розроблені. За результатами досліджень обґрунтовано конструктивно-технологічні схеми блоково-модульних МТА. Встановлено, що для забезпечення їх задовільної керованості і стійкості руху у горизонтальній площині технологічний (ТМ) модуль МЕЗ на гоні повинен бути нерухомим, а поворотній смузі – рухомим відносно енергетичного (ЕМ). Відносна нерухомість енергетичного і технологічного модулів МЕЗ на робочому гоні забезпечується автоматичним блокуванням вертикального шарніру останнього. Проте, таке конструктивне рішення з одного боку забезпечує стійкість і керованість руху блоково-модульних МТА, а з другого – породжує такі недоліки, як складність конструкції, низька надійність її роботи тощо.

У зв'язку з цим виникає потреба пошуку такого технічного рішення, яке б дозволило усунути недоліки системи з'єднання енергетичного і технологічного модулів і у горизонтальній площині і принаймні не погіршило стійкість і керованість руху машинно-тракторного агрегату на основі МЕЗ. Особливо це стосується навісних машинно-тракторних агрегатів, швидкісний режим руху яких близький до транспортного.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.** Дисертаційну роботу виконано відповідно до плану наукових досліджень Таврійського державного агротехнологічного університету (Запорізька обл., м. Мелітополь) за підпрограмою 1.1 “Розробити та перевірити в умовах півдня України комплекси машин на основі нових енергетичних засобів” (державний реєстраційний номер №0106U001219), яка є складовою науково-технічної програми №1 “Розробка наукових систем, технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки південного регіону України”.

**Мета і задачі дослідження.** *Мета дослідження* – підвищення експлуатаційних показників блоково-модульного машинно-тракторного агрегату шляхом обґрунтування схеми і параметрів з'єднання технологічного модуля МЕЗ з енергетичним у горизонтальній площині.

В основу досягнення поставленої мети покладено перевірку сформульованої *робочої гіпотези*, суть якої полягає в наступному: вибір потрібного ступеню демпфірування системи з'єднання технологічного модуля МЕЗ з енергетичним у горизонтальній площині дозволить забезпечити задовільну стійкість і керованість руху блоково-модульного МТА.

Для досягнення поставленої вище мети сформульовано наступні *задачі дослідження*:

- на основі теоретичних досліджень синтезувати схему та вибрати параметри з'єднання технологічного і енергетичного модулів МЕЗ у горизонтальній площині, які впливають на стійкість та керованість транспортного руху блоково-модульного агрегату;
- виявити вплив ступеню дроселювання системи гідроциліндрів технологічного модуля МЕЗ на стійкість і керованість транспортного руху машинно-тракторного агрегату;
- встановити вплив профілю агротехнічного фону на динаміку руху блоково-модульного агрегату у горизонтальній площині;
- розробити науково-обґрунтовані практичні рекомендації з вибору схеми і параметрів, які забезпечують задовільну керованість і стійкість транспортного руху блоково-модульного МТА.

*Об'єкт дослідження* – процес транспортного руху блоково-модульного машинно-тракторного агрегату.

*Предмет дослідження* – закономірності впливу схемних рішень і параметрів блоково-модульного МТА на керованість і стійкість його руху у горизонтальній площині.

**Методи дослідження.** Синтез схемних рішень, конструктивних параметрів і режимів роботи блоково-модульного МТА здійснювали шляхом математичного моделювання на ЕОМ умов його функціонування з використанням основних положень теоретичної механіки, статистичної динаміки та частотних методів теорії автоматичного регулювання лінійних динамічних систем при відпрацюванні ними статистично випадкових збурювальних впливів.

Експериментальні дослідження проводили із застосуванням тензометричного обладнання, аналогово-цифрового перетворювача і портативної ЕОМ. Обробку отриманих даних здійснювали з використанням теорії ймовірності і кореляційно-спектрального аналізу.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

Уперше отримано аналітичні залежності, які дають можливість оцінити динаміку транспортного руху блоково-модульного агрегату за наявності дроселювання гідроциліндра технологічного модуля МЕЗ.

Визначено нові залежності впливу коефіцієнта гідравлічного опору демпферу гідроциліндра технологічного модуля МЕЗ на стійкість та керованість транспортного руху блоково-модульного МТА.

Встановлено вплив нерівностей профілю агротехнічного фону на динаміку транспортного руху блоково-модульного агрегату у горизонтальній площині.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Основне практичне значення результатів досліджень полягає у реалізації ідеї підвищення керованості і стійкості транспортного руху блоково-модульного агрегату шляхом уведення дроселювання гідроциліндрів технологічного модуля МЕЗ.

На основі отриманих теоретичних та експериментальних даних розроблено практичні рекомендації з налаштування модульного енергетичного засобу. Орний агрегат на основі МЕЗ перемінного тягового класу 1,4-3 (МЕЗ-80) упроваджено на площі 50 га у навчально-виробничому центрі ТДАТУ (Запорізька обл., Мелітопольський р-н, с. Лазурне), а також використовуються в навчальному процесі Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного.

### **Особистий внесок здобувача** полягає:

- у розробленні математичної моделі блоково-модульного МТА у складі модульного енергетичного засобу з навішеним на нього ґрунтообробним знаряддям (плугом) [2,3,4];
- у розробленні методики теоретичних та експериментальних досліджень блоково-модульного агрегату [5,7,10];
- в організації і безпосередній участі при проведенні лабораторно-польових наукових досліджень [5,7,8];
- в обробці отриманих експериментальних даних [8,9];
- у розробленні практичних рекомендацій з вибору схеми і параметрів блоково-модульного агрегату [1,9].

### **Апробація результатів дисертації.**

Основні результати дисертаційної роботи викладено в доповідях на науково-технічних конференціях викладачів та аспірантів Таврійського державного агротехнологічного університету (м. Мелітополь, 2007...2010 рр.), міжнародній науково-практичній конференції «Технічний прогрес в АПК» (м. Харків, 2007 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Дніпропетровськ, 2009 р., міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Луганськ, 2011 р.)

**Публікації.** За результатами досліджень у фахових виданнях опубліковано 11 друкованих праць, із яких дві написані особисто.

### **Структура і обсяг дисертації.**

Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, списку літератури зі 105 найменуваннями та додатків. Дисертація викладена на 152 с. машинопису і включає 56 рисунків та 2 таблиці.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Розділ 1 Стан проблеми та постановка задач досліджень

Аналіз керованості і стійкості руху блоково-модульних машинно-тракторних агрегатів досить ґрунтовно розглядали в своїх роботах такі дослідники, як Г.М. Кутьков, В.Т. Надикто, Є.В. Габай, А.В. Рославцев, В.Г. Іваніцький, О.Т. Мельник, В.Д. Черепухін, В.П. Кувачов. Число технологічних модулів при цьому було різним: три (Г.М. Кутьков і Є.В. Габай), два (В.Г. Іваніцький і О.Т. Мельник) та один (А.В. Рославцев, В.Д. Черепухін і В.Т. Надикто). Із усіх вчених лише д.т.н. Надикто В.Т. і к.т.н. Черепухін В.Д. проводили дослідження агрегатів на основі модульних енергетичних засобів як універсально-просапного, так і загального призначень.

Уведення гідравлічного демпферного зв'язку між двома технологічними та одним енергетичним модулями МЕЗ в горизонтальній площині здійснювали Г.М. Кутьков і Є.В. Габай. Подібне рішення застосував і Кувачов В.П. Проте він вирішував проблему зменшення коливань модулів МЕЗ у поздовжньо-вертикальній площині. До того ж, усі вони розглядали лише робочий рух блоково-модульних агрегатів.

Оскільки отримані попередниками результати не дозволяють добитися підвищення стійкості і керованості транспортного руху МТА на основі МЕЗ, то виникла необхідність проведення наукових досліджень, направлених на розв'язання цієї задачі.

### Розділ 2 Теоретичні основи обґрунтування параметрів та режиму транспортного руху блоково-модульного МТА

При розробленні математичної моделі блоково-модульного агрегату враховано наступні припущення:

- 1) крен та диферент агрегату на основі МЕЗ відсутні; 2) енергетичний та технологічний модулі МЕЗ є твердими тілами, центри мас яких розташовані в одній поздовжньо-вертикальній площині симетрії; 3) швидкість поступального руху блоково-модульного агрегату приймається постійною; 4) бокова взаємодія шин енергетичного та технологічного модулів МЕЗ з поверхнею руху блоково-модульного МТА розглядається в рамках гіпотези «бокового уводу»; 5) гіроскопічні та стабілізуючі моменти шин коліс обох модулів МЕЗ, а також моменти їх скручуванню відносно вертикальної осі є малими; 6) досить малі, а значить рівні між собою кути повороту керованих коліс енергетичного модуля МЕЗ; 7) кути уводу шин коліс модулів МЕЗ, розташованих на одній геометричній вісі, а також бокові сили, що діють на них, вважаємо малими.

Під час руху на розглядуваний МТА діють (рис. 1):  $P_{fa}$  – сила опору ковчезу передніх коліс ЕМ;  $P_{\delta a}$  – бокова сила, яка викликає кут «уводу»  $\delta_a$  шин передніх коліс енергетичного модуля МЕЗ;

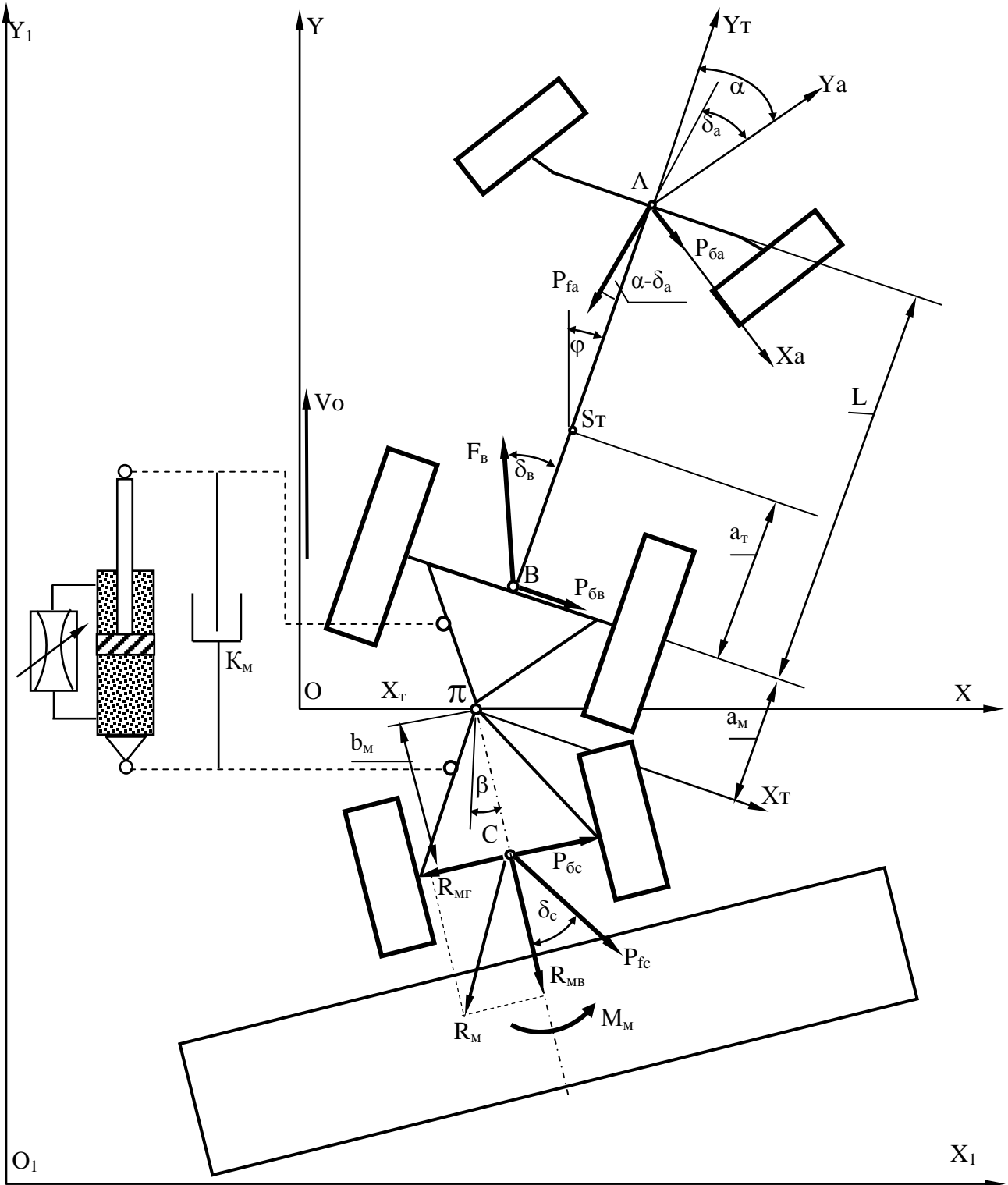


Рис.1 – Схема сил, які діють на блоково-модульний МТА у горизонтальній площині

$F_B$  – рушійна сила задніх коліс ЕМ;  $P_{\delta c}$  – бокова сила, яка викликає кут «уводу»  $\delta_c$  шин коліс технологічного модуля МЕЗ;  $R_{MB}$ ,  $R_{MG}$  – поздовжня та по-

перечна складові головного вектора сил  $R_M$ , який дій на ТМ збоку технологічної частини МТА і прикладений у точці С (див. рис.1);  $M_M$  – головний момент зовнішніх сил.

Під впливом зовнішніх сил і моментів блоково-модульний агрегат здійснює відносний рух у площині  $XOY$ . Мірою цього руху є: поперечне зміщення «приведеного» центру мас модульного енергетичного засобу (т.  $\pi$ ) на величину  $X_T$ ; курсовий кут енергетичного модуля МЕЗ –  $\varphi$ ; кут повороту ТМ у площині  $X_1O_1Y_1$  –  $\beta$ . Керуючим впливом при цьому є кут повороту керованих коліс ЕМ модульного енергетичного засобу –  $\alpha$ .

Таким чином, динамічна система у вигляді розглядуваного блоково-модульного МТА має три ступеня вільності, яким відповідають три незалежні узагальнені координати, а саме: абсциса  $X_T$  і кути  $\varphi$  та  $\beta$ . Математична модель агрегату при цьому є такою:

$$\left. \begin{aligned} A_{11} \cdot \ddot{X}_T + A_{12} \cdot \dot{X}_T + A_{13} \cdot \dot{\varphi} + A_{14} \cdot \varphi + A_{15} \cdot \dot{\beta} + A_{16} \cdot \beta &= B_{11} \cdot \alpha - B_{12} \cdot R_{MG}; \\ A_{21} \cdot \ddot{\varphi} + A_{22} \cdot \dot{X}_T + A_{23} \cdot \dot{\varphi} + A_{24} \cdot \varphi + A_{25} \cdot \dot{\beta} + A_{26} \cdot \beta &= B_{21} \cdot \alpha; \\ A_{31} \cdot \ddot{\beta} + A_{32} \cdot \dot{X}_T + A_{33} \cdot \dot{\varphi} + A_{34} \cdot \varphi + A_{35} \cdot \dot{\beta} + A_{36} \cdot \beta &= B_{31} \cdot \alpha + B_{32} \cdot M_o, \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\begin{aligned} \text{де } A_{11} &= M_M; & A_{12} &= (k_a + k_b + k_c + P_{fa} + P_{fc} - F_b)/V_o; \\ A_{14} &= -(k_a + k_b + P_{fa} - F_b); & A_{13} &= [(L + a_m) \cdot (k_a + P_{fa}) + a_m \cdot (k_b - F_b)]/V_o; \\ A_{15} &= a_m \cdot (k_c + P_{fc}); & A_{23} &= [(L + a_m)^2 \cdot (k_a + P_{fa}) + a_m^2 \cdot (k_b - F_b)]/V_o; \\ A_{16} &= -(k_c + P_{fc}); & A_{21} &= J_T; \\ A_{22} &= A_{13}; & A_{24} &= -A_{22} \cdot V_o; \\ A_{31} &= J_M; & A_{32} &= -A_{15}/V_o; \\ A_{35} &= (K_M + A_{32} \cdot a_m); & A_{36} &= A_{15}; \\ B_{11} &= k_a; & B_{12} &= B_{32} = 1; \\ B_{21} &= k_a \cdot (L + a_m); & M_o &= R_{MG} \cdot b_M - M_M. \\ A_{25} &= A_{26} = A_{33} = A_{34} = B_{31} = 0. \end{aligned}$$

У системі рівнянь (1)  $M_M$  – маса МЕЗ;  $k_a, k_b, k_c$  – коефіцієнти опору уводу шин коліс модулів МЕЗ;  $V_o$  – швидкість руху блоково-модульного МТА;  $J_T, J_M$  – моменти інерції енергетичного і технологічного модулів МЕЗ відносно вертикальної осі, яка проходить через точку  $\pi$  (рис.1);  $K_M$  – коефіцієнт опору гідравлічного дроселя;  $L$  – база енергетичного модуля МЕЗ;  $b_M$  – відстань від т.  $\pi$  до осі коліс ТМ ( $b_M = a_m$ ).

За характером перетворюючих властивостей розглядувана нами динамічна система відноситься до слідкуючих. Із практики відомо, що для такої системи бажані амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) вихідних параметрів при відтворенні нею збурень в робочому діапазоні частот повинні бути якомога меншими (в ідеалі – рівними нулю). Фазовий зсув (ФЧХ) при цьому повинен бути якомога більшим. При відпрацюванні системою керуючого впливу бажані АЧХ мають дорівнювати одиниці, а ФЧХ – дорівнювати нулю.



Необхідні АЧХ та ФЧХ отримували із відповідних передаточних функцій: а) по керуючому впливу відносно коливань курсового кута трактора; б) по збурювальному впливу відносно курсового кута агрегату; в) по збурювальному впливу відносно кута повороту технологічного модуля з навішеним на нього ґрунтообробним знаряддям.

Аналіз математичної моделі (1) показав, що при відпрацюванні збурення у вигляді розворотного моменту  $M_0$  (див. рис. 1), АЧХ коливань технологічного модуля МЕЗ починають покращуватися при коефіцієнті опору гідравлічного дроселя  $K_M$  не нижче  $10^5$  Н·м·с/рад. (рис. 2).

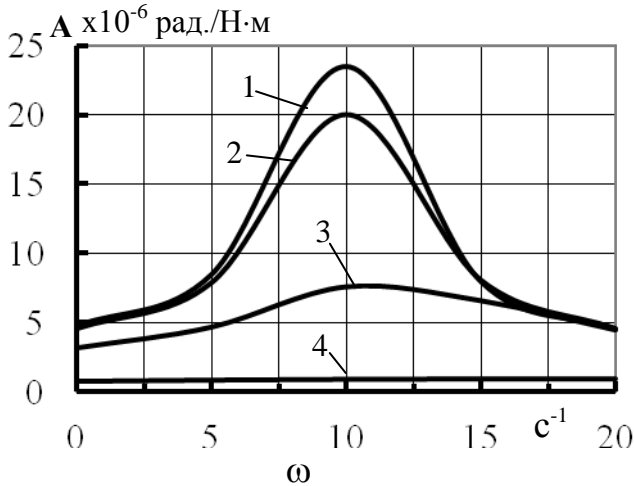


Рис. 2 – Амплітудні (А) частотні характеристики кута повороту технологічного модуля при відпрацюванні збурення у вигляді розворотного моменту за різних значин коефіцієнта демпфірування:

$K_M$  (Н·м·с/рад.): 1 –  $K_M = 0$ ; 2 –  $K_M = 10^4$ ; 3 –  $K_M = 10^5$ ; 4 –  $K_M = 10^6$ .

Згідно з розрахунками максимальна значина розворотного моменту, створюваного силою інерції ТМ з навішеним на нього плугом ПЛН-5-35, становить приблизно 22000 Н·м. За ступеню демпфірування гідроциліндрів на рівні  $10^6$  Н·м·с/рад. даний момент здатний повернути технологічний модуль лише на 0,022 рад. або  $1,25^\circ$ . Максимальна значина коефіцієнта підсилення збурення енергетичним модулем МЕЗ зменшується при цьому у 17 разів, а АЧХ не має резонансних піків.

Швидкість руху блоково-модульного агрегату практично дуже мало впливає на коливання кута повороту технологічного модуля МЕЗ з навішеним знаряддям під час дії збурення у вигляді розворотного моменту.

Це ж саме можна сказати і стосовно коефіцієнтів опору уводу шин передніх та задніх коліс енергетичного модуля МЕЗ. Інша справа з коефіцієнтом опору уводу шин коліс ТМ. За його збільшення від 160 до 210 кН/рад. максимальна значина АЧХ динамічної системи зростає (крива 2, рис. 3). За подальшого збільшення  $k_c$  вказані характеристики бажано зменшуються. Резонансний пік АЧХ при цьому зміщується у бік більших частот.

Слід підкреслити, що приблизно такий же вплив зміна коефіцієнта опору уводу коліс ТМ здійснює на динаміку коливань енергетичного модуля. При  $k_c \geq 260$  кН/рад. АЧХ останнього бажано зменшуються зі зміщенням максимуму у бік більш високих частот коливань збурювального впливу – моменту  $M_0$ .

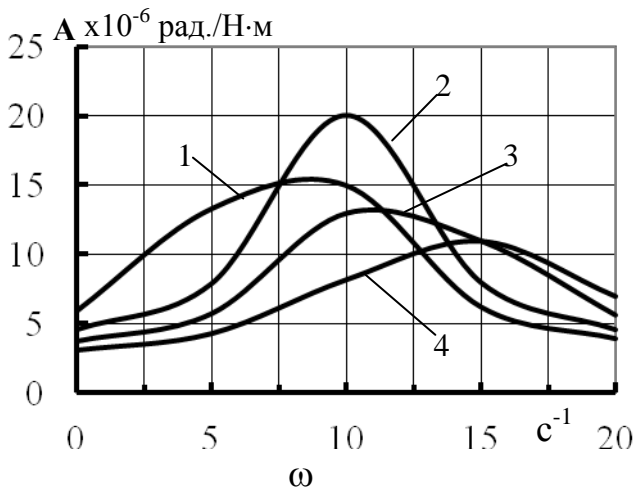


Рис. 3 – Амплітудно-частотні характеристики кута повороту ТМ при відпрацюванні ним збурення у вигляді розворотного моменту за різних значин коефіцієнта опору уводу шин його коліс ( $k_c$ ):  
1 – 160 кН/рад.; 2 – 210 кН/рад.;  
3 – 260 кН/рад.; 4 – 310 кН/рад.

При збільшенні швидкості транспортного руху блоково-модульного МТА ФЧХ його курсового кута при відпрацюванні керуючого впливу відрізняються лише на частотах коливань кута повороту керованих коліс енергетичного модуля МЕЗ, більших за  $0,5 \text{ c}^{-1}$  (рис. 4).

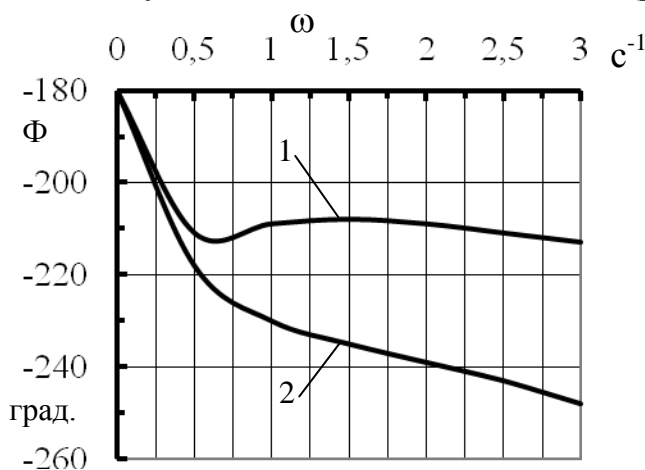


Рис.4 – Фазові ( $\Phi$ ) частотні характеристики курсового кута енергетичного модуля при відпрацюванні керуючого впливу з різною швидкістю руху МТА ( $V_0$ ):  
1 – 2 м/с; 2 – 5 м/с.

При  $\omega = 0,75 \text{ c}^{-1}$  різниця у фазових зсувах складає  $20^\circ$  або  $0,35 \text{ рад}$ . Практично це означає, що запізнення реакції МТА на керуючий вплив становить  $0,35/0,75 = 0,47 \text{ с}$ . При  $\omega = 3 \text{ c}^{-1}$  вказане запізнення дорівнює лише  $0,23 \text{ с}$ .

Із коефіцієнтів опору уводу лише  $k_a$  здійснює більш-менш відчутний вплив на керованість руху блоково-модульного агрегату. І то лише стосовно АЧХ. На практиці збільшити коефіцієнт уводу шин коліс можна шляхом підвищення тиску повітря в них. Саме це стосовно передніх рушіїв енергетичного модуля МЕЗ і слід робити. Встановлення такого тиску в їх шинах, яке забезпечить коефіцієнт опору уводу не менше  $50 \text{ кН/рад}$ ., сприятиме підвищенню керованості руху досліджуваного блоково-модульного агрегату.

Зміна коефіцієнта  $K_m$  в межах  $0 \dots 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с/рад}$ . практично не впливає на характер керованості руху блоково-модульного МТА. Фазовий зсув становить при цьому  $180^\circ$  і більше (рис. 5). На частотах коливання кута повороту керованих коліс МЕЗ  $0,5 \dots 3,0 \text{ c}^{-1}$  в середньому він становить  $220^\circ$  або  $3,8 \text{ рад}$ . Запіз-

нення реакції енергетичного модуля на керуючий вплив змінюється при цьому від 7,6 с (коли  $\omega = 0,5 \text{ с}^{-1}$ ) до 1,3 с (при  $\omega = 3,0 \text{ с}^{-1}$ ).

Якісно і кількісно змінюється стан речей при збільшенні коефіцієнта демпфірування  $K_M$  до величини  $10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{рад}$ . В цьому варіанті в частотному діапазоні  $0 \dots 0,5 \text{ с}^{-1}$  фазовий зсув бажано зменшується з  $180^\circ$  до  $70^\circ$  ( $1,2 \text{ рад}$ ). При  $\omega = 0,5 \text{ с}^{-1}$  збільшення значини коефіцієнта  $K_M$  з  $10^5$  до  $10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{рад}$  обумовлює зменшення ФЧХ на  $150^\circ$ . На практиці це приводить до зменшення запізнення реакції енергетичного модуля МЕЗ з 7,6 до 2,4 с, тобто більше, ніж втричі.

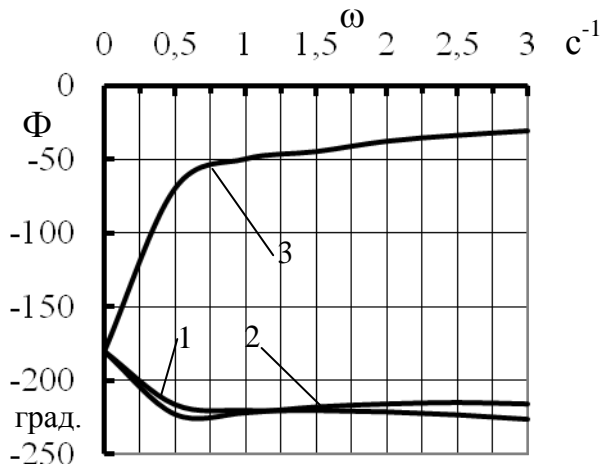


Рис. 5 – Фазові частотні характеристики курсового кута енергетичного модуля при відпрацюванні керуючого впливу при різних значинях коефіцієнта демпфірування  $K_M$  ( $\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{рад}$ ):  
1 –  $K_M = 0$ ; 2 –  $K_M = 10^5$ ; 3 –  $K_M = 10^6$

### Розділ 3 Методика експериментальних досліджень

За фізичний об'єкт досліджень було прийнято орний агрегат на основі модульного енергетичного засобу перемінного тягового класу 1,4-3 під умовною маркою МЕЗ-80 (рис. 6).



Рис. 6 – Орний агрегат на основі МЕЗ-80

Програма експериментальних робіт включала проведення лабораторних і лабораторно-польових досліджень. У процесі лабораторно-польових досліджень аналізували транспортний рух орного агрегату по полю. На практиці він мав місце при повороті МТА на поворотній смузі і переїзді з поля на бригаду.

Програма лабораторних досліджень передбачала визначення залежності коефіцієнта гідравлічного опору шайби від її діаметра.

Під час проведення лабораторно-польових експериментів транспортного МТА на основі МЕЗ передбачалось: визначення необхідних для розрахунків на математичній моделі масово-геометричних характеристик транспортного агрегату; отримання експериментальних даних, необхідних для перевірки математичної моделі МТА на адекватність; аналіз впливу коефіцієнта гідравлічного опору демпферної шайби гідроциліндра ТМ на керованість та стійкість транспортного руху блоково-модульного руху МТА.

З урахуванням конструктивних особливостей досліджуваного блоково-модульного агрегату було розроблено комплект вимірювально-реєструвальної апаратури, який дозволив отримати об'єктивну оцінку досліджуваних параметрів (рис. 7).

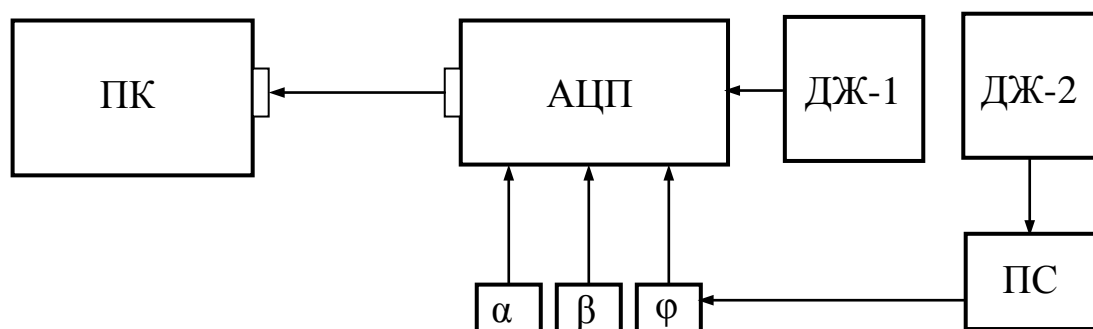


Рис. 7 – Блок-схема вимірювально-реєструвального комплексу:

ПК – електронна обчислювальна машина; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; ДЖ-1 – джерело живлення постійного струму 12 В; ДЖ-2 – джерело постійного струму 24 В; ПС – перетворювач струму;  $\alpha$  – датчик кута повороту керованих коліс ЕМ;  $\beta$  – датчик кута повороту ТМ;  $\phi$  – датчик курсу гіропівкомпасу ГПК-52

Перевірку математичної моделі проводили шляхом порівняння теоретичних та експериментальних амплітудно-частотних характеристик коливань курсового кута трактора  $\phi$  (як вихідної величини) при відпрацюванні блоково-модульним агрегатом вхідного керуючого впливу (кут  $\alpha$ ).

Експериментальну АЧХ дослідного МТА розраховували із виразу:

$$A_{E(\omega)} = (\sigma_{\phi} / \sigma_{\alpha}) \cdot \sqrt{S_{\phi} / S_{\alpha}},$$

де  $\sigma_{\alpha}$ ,  $S_{\alpha}$  – середнє квадратичне відхилення і нормована спектральна щільність вхідної величини (кут  $\alpha$ );  $\sigma_{\phi}$ ,  $S_{\phi}$  – середнє квадратичне відхилення і

нормована спектральна щільність вихідної величини (кут  $\varphi$ );  $\omega$  – частота коливань керуючого впливу.

Теоретичну амплітудо-частотну характеристику для цього ж агрегату розраховували, використовуючи передаточну функцію по керуючому впливу відносно курсового кута енергетичного модуля МЕЗ.

Встановлено, що візуально найбільша розбіжність експериментальних і теоретичних даних має місце на частотах коливань керуючого впливу (кута повороту керованих коліс енергетичного модуля МЕЗ) 1,5 і 3,0  $\text{с}^{-1}$ . Проте, у відносному співвідношенні експериментальні значини амплітудо-частотної характеристики найбільше відрізняються від теоретичних на частотах, менших за 1  $\text{с}^{-1}$ . Найбільша різниця має місце при нульовій частоті керуючого впливу і становить 12,5% (рис. 8).

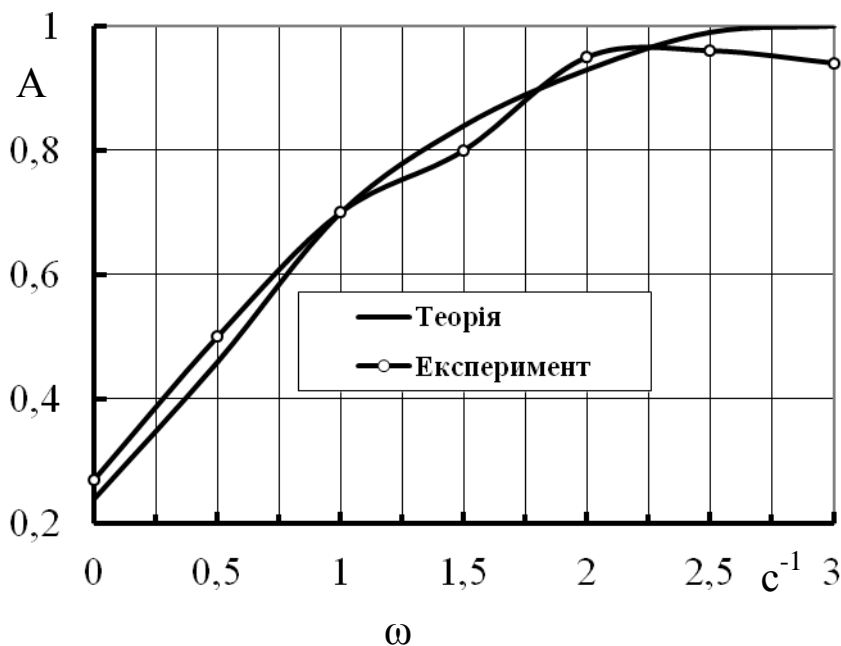


Рис. 8 – Теоретична та експериментальна АЧХ транспортного руху модульного машинно-тракторного агрегату

Такий збіг натурних та розрахункових даних вказує на адекватність розробленої математичної моделі. А це, своєю чергою, дозволяє використовувати її для достовірного обґрунтування схеми, режимів роботи і конструктивних параметрів досліджуваного нами блоково-модульного агрегату під час виконання ним транспортного руху.

#### Розділ 4 Результати експериментальних досліджень блоково-модульного МТА

Лабораторними дослідженнями встановлено, що зі зменшенням прохідного діаметра ( $d$ ) коефіцієнт гідравлічного опору демпферної шайби ( $K_M$ ) збільшується. Отримана залежність є нелінійною і з достатньою для практики точністю (коефіцієнт детермінації  $R^2_d = 0,94$ ) описується параболічною залежністю виду  $K_M = (0,02 \cdot d^2 - 0,36 \cdot d + 1,67) \cdot 10^6$ .

Водночас, згідно з результатами математичного моделювання, задовільна керованість та стійкість транспортного руху досліджуваного блоково-модульного машинно-тракторного агрегату забезпечується тоді, коли значина коефіцієнта гідравлічного опору демпферної шайби ( $K_M$ ) є більшою за  $10^6 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{рад}$ . Для цього у штуцер шлангу, який з'єднує над- і підпоршньову порожнини гідравлічного циліндру технологічного модуля МЕЗ, слід вставити демпферну шайбу, діаметр прохідного отвору якої є не більшим, ніж 2,2 мм. В умовах експерименту діаметр отвору вказаної шайби становив 2 мм.

Блоково-модульний орний агрегат здійснював транспортний рух по двох агрофонах: злущеному полю і необробленій стерні озимої пшениці. Причому, коливання нерівностей незлущеного поля були більш високочастотними і мали більшу дисперсію. У необробленого агрофону спектр її частот виявився втричі ширшим ( $6 \text{ м}^{-1}$ ), ніж у обробленого ( $2 \text{ м}^{-1}$ ).

Аналіз отриманих даних показав, що дисперсія кутових коливань технологічного модуля МЕЗ із навішеним на нього плугом при рухові блоково-модульного агрегату по злущеному полю зосереджена у відносно вузькому діапазоні частот  $0,25 \dots 1,50 \text{ с}^{-1}$  (рис. 9а).

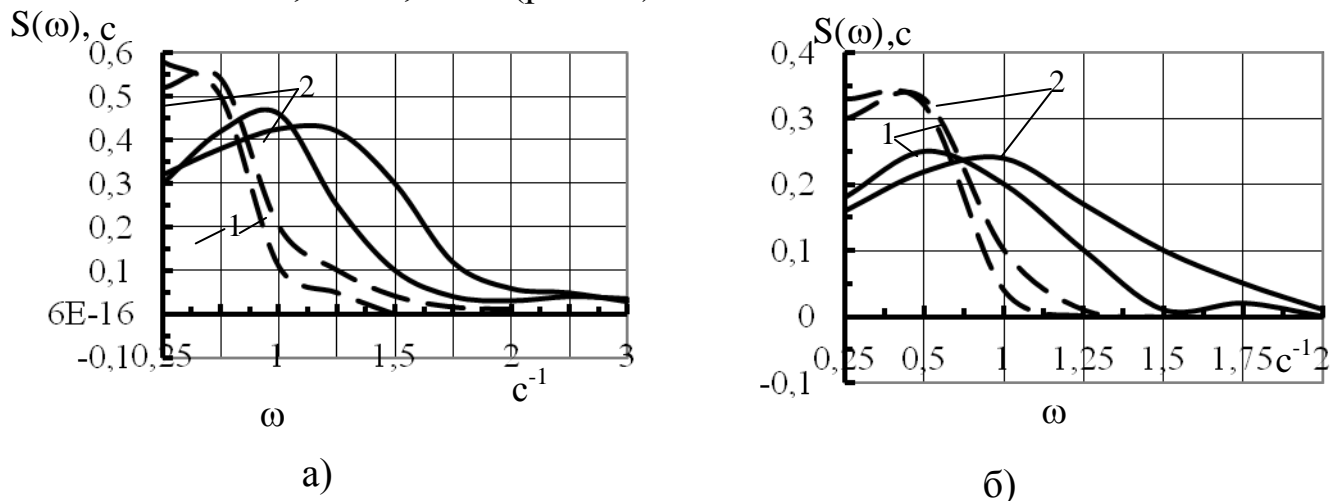


Рис. 9– Нормовані спектральні щільності коливань кута повороту технологічного (а) та енергетичного (б) модулів МЕЗ за різних швидкостей руху МТА на злущеному (- - -) і необробленому (—) фонах: 1 – 1,7 м/с; 2 – 3,1 м/с

Натомість, під час переміщення даного МТА по необробленому фоні цей діапазон був удвічі ширшим:  $0,25 \dots 3,00 \text{ с}^{-1}$ . Це практично однозначно вказує на те, що коливання ТМ з плугом на злущеному полі носять більш низькочастотний характер, ніж на необробленому. Такий результат досягнуто за рахунок більшої вирівняності мікрорельєфу злущеного поля. Навіть за швидкості агрегату 3,1 м/с частота зрізу коливань профілю такого агрофону не перевищує  $6 \text{ с}^{-1}$  або 0,95 Гц. При  $V_0 = 1,7 \text{ м/с}$  вона взагалі менша за 0,5 Гц.

У якісному плані характер нормованих спектральних щільностей зміни кута  $\varphi$  такий же, як і  $\beta$ . У кількісному плані відміна полягає у наступному.

По-перше, частотний діапазон коливань курсового кута вужчий. Так, на злушеному агротехнічному фоні частота зрізу коливань кута  $\varphi$  навіть за швидкості МТА 3,1 м/с не перевищує  $1,2 \text{ с}^{-1}$ . На необробленому полі цей показник менший за  $2,0 \text{ с}^{-1}$  (рис. 9б). По-друге, максимумами оцінюваних нормованих спектральних щільностей мають меншу значину і зміщені у бік більш низьких частот. Причому, це явище більш відчутне за більшої швидкості транспортного руху блоково-модульного машинно-тракторного агрегату і особливо на необробленому агротехнічному фоні. По-третє, дисперсія кутових коливань енергетичного модуля МЕЗ менша, ніж значина аналогічної статистичної оцінки для ТМ з навішеним зняряддям. У принципі такий результат цілком логічний, оскільки експлуатаційна маса трактора більша за сумарну масу технологічного модуля і агрегатованого плуга.

Застосування демпфера з гідравлічним опором  $1,03 \times 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{рад}$ . приводить до того, що спектр кутових коливань технологічного модуля МЕЗ разом з навішеним на нього ґрунтообробним зняряддям суттєво звужується, тобто стає більш низькочастотним (рис. 10а). Середнє квадратичне відхилення кутових коливань ТМ зменшується при цьому майже у п'ять разів.

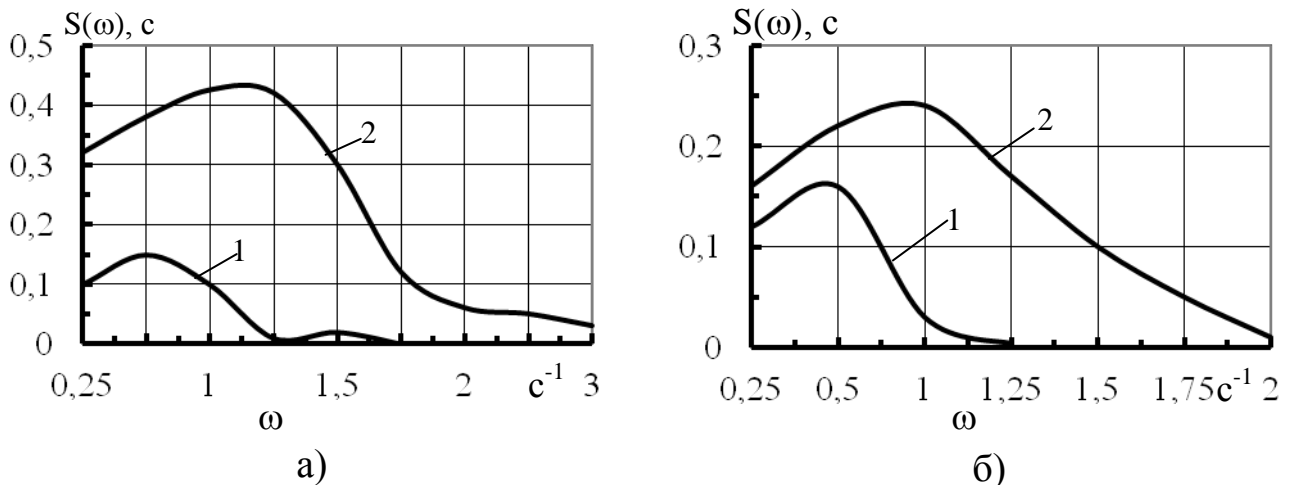


Рис. 10 – Нормовані спектральні щільності коливань кута повороту технологічного (а) та енергетичного (б) модулів МЕЗ за різних рівнів дроселювання гідроциліндру ТМ:  
1 –  $1,03 \times 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{рад}$ .; 2 – 0

Якісні зміни динаміки кутових коливань енергетичного модуля МЕЗ після уведення дроселювання практично такі ж, як і у ТМ. Інша справа, що зменшення стандарту коливань кута  $\varphi$  відбулося при цьому не у 5, а у 2,8 рази (рис. 10б).

Приведений вище аналіз показує, що між кутовими коливаннями енергетичного і технологічного модулів МЕЗ існують кореляції. Причому, як без гідравлічного демпфування, так і за його наявності.

Тісноту такого зв'язку розкриває нормована взаємна кореляційна функція між процесами зміни кутів  $\beta$  і  $\varphi$ . У даному випадку маємо наступний результат. За відсутності дроселювання гідроциліндру ТМ зв'язок між кутовими коливаннями технологічного і енергетичного модулів МЕЗ хоча і є позитив-

ним, але незначним. Максимальна значина нормованої взаємної кореляційної функції не перевищує позначки 0,32 (рис. 11, крива 2).

Натомість, при уведенні гідравлічного демпфера з коефіцієнтом опору  $1,03 \times 10^6$  Н·м·с/рад. максимальна значина позитивного кореляційного зв'язку між кутовими коливаннями технологічного і енергетичного модулів МЕЗ зростає до 0,87 (рис. 11, крива 1), тобто збільшилась у 2,7 рази.

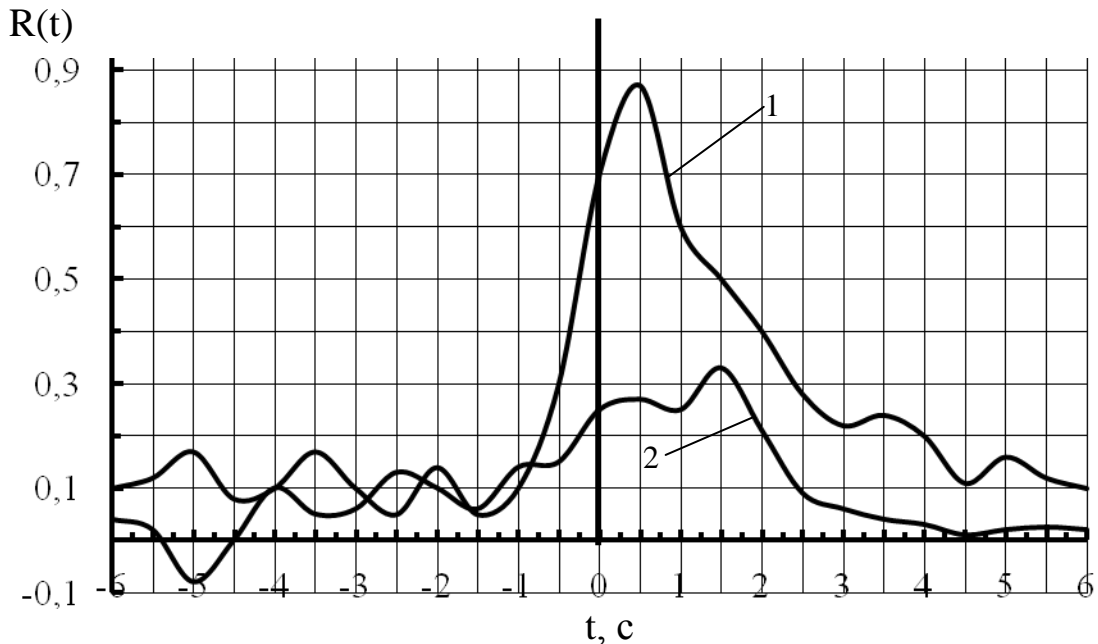


Рис. 11 – Нормовані взаємні кореляційні функції коливань курсового кута  $\varphi$  від впливу коливань  $\beta$  за різних рівнів дроселювання гідроциліндру ТМ:  
1 –  $1,03 \times 10^6$  Н·м·с/рад.; 2 – 0

У цілому такий результат є позитивним. Адже одна річ, коли модулі МЕЗ здійснюють майже незалежні коливання у горизонтальній площині, і інша – коли вони відповідним чином є взаємозалежними. У останньому випадку ЕМ і ТМ практично разом протидіють збурювальному впливу у вигляді розворотного моменту. А це позитивно відбивається на стійкості руху усього блоково-модульного агрегату, про що однозначно свідчать дані проаналізованого вище рис. 4.11.

Дію керуючого впливу блоково-модульний агрегат відпрацьовував по різному в залежності від ступеню дроселювання гідроциліндру технологічного модуля. За його відсутності між кутом  $\alpha$  і курсовим кутом  $\varphi$  має місце позитивний кореляційний зв'язок. Проте, максимальна його значина не перевищує позначки 0,35 і зміщена вліво від нульової ординати (рис. 12).

Натомість, при уведенні гідравлічного демпфера в гідроциліндр технологічного модуля з коефіцієнтом жорсткості  $1,03 \times 10^6$  Н·м·с/рад. характер поведінки взаємної кореляційної функції  $\alpha$ - $\varphi$  принципово (якісно і кількісно) змінюється (крива 1, рис. 12). По-перше, максимум взаємного кореляційного зв'язку між керуючим впливом і курсовим кутом енергетичного модуля досягає позначки 0,89.



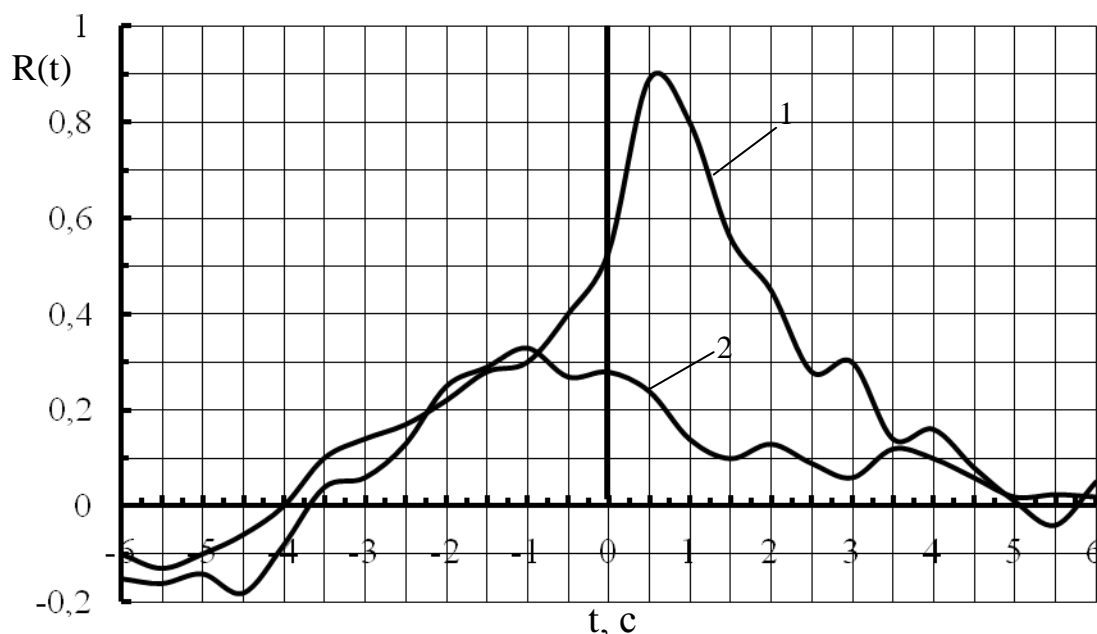


Рис.12 – Нормовані взаємні кореляційні функції коливань курсового кута  $\varphi$  від керуючого впливу  $\alpha$  за різних рівнів дроселювання гідроциліндру ТМ:  
1 –  $1,03 \times 10^6$  Н·м·с/рад.; 2 - 0.

Це у 2,6 рази більше, ніж у попередньому варіанті налагодження ТМ. По-друге, максимум взаємної кореляційної функції зміщений вправо від нульової ординати. А це вказує на те, що керуючий вплив є входом, а курсовий кут – виходом розглядуваної динамічної системи. По-третє, запізнення реакції курсового кута на зміну кута повороту керуючих коліс енергетичного модуля зменшується майже удвічі і становить 0,51 с.

Такий результат є бажаним, оскільки відпрацювання розглядуваною нами слідкуючою системою керуючого впливу в ідеалі має бути миттєвим, тобто здійснюватися з нульовим запізненням. Оскільки на практиці цього досягти практично неможливо, то це конструктивно-технологічне рішення, яке забезпечує зменшення реакції системи на вхідний корисний сигнал, – є бажаним.

### Розділ 5 Оцінка ефективності використання блоково-модульного МТА

Експериментальному дослідженню підлягав один і той же орний агрегат, у якого у першому варіанті дроселювання гідроциліндра ТМ було відсутнє, а у другому – існувало. У кожному варіанті налагодження блоково-модульний МТА здійснював оранку протягом однієї зміни, тривалістю 8 год. Показники його роботи були наступними: робоча ширина захвату  $B_p = 1,77$  м; середня глибина оранки  $h = 25$  см; середня швидкість робочого руху  $V_p = 2,4$  м/с (8,64 км/год.); основна (чиста) продуктивність  $W_o = 1,53$  га/год.

Аналіз даних хронометражних спостережень показав, що упровадження гідравлічного демпфера циліндра технологічного модуля МЕЗ (тобто шайби з

отвором діаметром 2 мм) дозволило зменшити під час виконання оранки: час на повороті МТА – на 30%; час переїзду блоково-модульного агрегату з місця стоянки до місця роботи та навпаки – у 3 рази.

В кінцевому рахунку це привело до збільшення коефіцієнта використання часу зміни, змінної продуктивності роботи і зменшення питомих витрат праці удосконаленим машинно-тракторним агрегатом на 8,4 %.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі приведено розв'язання нової наукової задачі – підвищення керованості і стійкості транспортного руху блоково-модульного агрегату. Отримані при цьому результати теоретичних і експериментальних досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Науково обґрунтоване застосування дроселювання гідроциліндру, який з'єднує енергетичний та технологічний модулі МЕЗ у горизонтальній площині, дозволяє підвищити керованість та стійкість транспортного руху блоково-модульного машинно-тракторного агрегату на його основі.

2. Коефіцієнт гідравлічного опору дроселя гідроциліндру ТМ здійснює відчутний вплив на характер відтворення блоково-модульним агрегатом керуючого впливу та збурення лише при значині, рівній  $10^6$  Н·м·с/рад. Для її забезпечення в штуцер шлангу, який з'єднує над- і підпоршньову порожнини гідравлічного циліндру технологічного модуля МЕЗ, слід вставити демпферну шайбу, діаметр прохідного отвору якої є не більшим, ніж 2,2 мм.

3. При збільшенні коефіцієнта гідравлічного опору дроселя гідроциліндра ТМ до  $10^6$  Н·м·с/рад. розворотний момент здатний повернути його лише на  $1,25^\circ$ . Зменшення фазово-частотних характеристик коливань енергетичного модуля досягає при цьому  $150^\circ$ . На практиці це приводить до зменшення запізнення його реакції на збурення з 7,6 до 2,4 с при одночасному зменшенні амплітуди коливань майже в 17 разів, що є бажаним.

4. При збільшенні швидкості руху блоково-модульного агрегату від 2 до 5 м/с амплітудні частотні характеристики відпрацювання збурення технологічним модулем разом з навішеним на нього знаряддям, а також енергетичним модулем МЕЗ змінюються мало і мають резонансний пік, який припадає на частоту  $10$  с<sup>-1</sup>. По відношенню до технологічного, АЧХ відтворення енергетичним модулем збурення у вигляді розворотного моменту – менші.

5. Характер стійкості руху блоково-модульного агрегату є практично інваріантним по відношенню до коефіцієнтів опору уводу шин переднього та заднього мостів енергетичного модуля МЕЗ. Установка шин мосту технологічного модуля із загальним коефіцієнтом опору уводу на рівні 260 кН/рад. і більше сприяє зменшенню амплітуди як його коливань, так і коливань енергетичного модуля. В діапазонах частот зміни збурювального впливу 0...5 та 10...20 с<sup>-1</sup> кут повороту ТМ взагалі не буде перевищувати  $4^\circ$ .

6. Дисперсія кутових коливань технологічного модуля МЕЗ із навішеним на нього плугом при рухові агрегату по злущеному полю зосереджена у відносно вузькому діапазоні частот  $0,25 \dots 1,50 \text{ с}^{-1}$ . Під час переміщення блоково-модульного МТА по необробленому фонові цей діапазон вдвічі ширший:  $0,25 \dots 3,00 \text{ с}^{-1}$ . Це вказує на те, що коливання ТМ з плугом на злущеному полі носять більш низькочастотний характер, ніж на необробленому.

7. При уведенні гідравлічного демпфера з коефіцієнтом опору не меншим за  $10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{рад}$ . максимальна значина позитивного кореляційного зв'язку між кутовими коливаннями технологічного і енергетичного модулів МЕЗ зростає до 0,87, тобто збільшується у 2,7 рази. У цьому випадку ЕМ і ТМ практично разом протидіють збурювальному впливу у вигляді розворотного моменту, що позитивно відбивається на стійкості руху усього блоково-модульного МТА.

8. Гідравлічне демпфірування гідроциліндра технологічного модуля з коефіцієнтом жорсткості не меншим, ніж  $10^6 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{рад}$ ., дозволяє довести максимум взаємного кореляційного зв'язку між керуючим впливом і курсовим кутом енергетичного модуля до 0,89, змстити його вправо від нульової ординати і зменшити запізнення реакції курсового кута на зміну кута повороту керуючих коліс енергетичного модуля майже удвічі.

9. Упровадження орного блоково-модульного агрегату, налагодженого згідно з розробленими практичними рекомендаціями, дозволяє збільшити змінну продуктивність його роботи і зменшити питомі витрати праці на 8,4%.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Публікації, у яких опубліковані основні результати дисертації*

1. Парахін О. О. Аналіз шляхів ефективного використання МТА на основі модульних енергетичних засобів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2009. Вип. 9, т. 4. С. 125-133.

2. Парахін О. О., Надикто В. Т. Дослідження керованості транспортного руху блоково-модульного МТА. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2010. Вип. 10, т. 6. С. 13-21 (здобувачем здійснено оцінку впливу параметрів модульного засобу на керованість руху агрегату).

3. Парахін О. О., Надикто В. Т., Аюбов А. М. Математична модель транспортного руху блоково-модульного руху МТА. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2010. Вип. 11, т. 7. С. 21-31 (здобувачем розроблена методика дослідження математичної моделі руху блоково-модульного МТА).

4. Парахін О. О., Кюрчев С. В. Вплив параметрів з'єднання модулів МЕЗ на стійкість транспортного руху блоково-модульного МТА. *Науковий вісник*

*Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь, 2011. Вип. 1, т. 3. С. 13-18. URL: <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/pdf1t3/11POOMBVM.pdf> (дата звернення: 02.11.2020) (здобувачем здійснено аналіз впливу демпферного з'єднання модулів МЕЗ на стійкість руху блоково-модульного МТА).*

5. Парахін О. О. Статистичні характеристики профілю шляху для дослідження транспортного руху блоково-модульного МТА. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка*. Харків, 2012. Вип. 124: Механізація сільського господарства, ч. 1. С. 136-139.

6. Motion stability estimation for modular traction vehicle-based combined unit / V. Bulgakov, I. Holovach, V. Nadykto, O. Parakhin, H. Kaletnik, L. Shymko, J. Olt. *Agronomy Research*. 2020. Vol. 18, № 4. P. 2340-2352. DOI: 10.15159/AR.20.183 (здобувачем розроблені передаточні функції розглядуваної динамічної системи і побудовані їй відповідні амплітудні і фазові частотні характеристики).

7. Дослідження стійкості руху модульного машинно-тракторного агрегату / В. М. Булгаков, В. Т. Надикто, І. В. Головач, Д. В. Присяжнюк, О. О. Парахін. *Вісник аграрної науки*. 2020. № 5. С. 61-68 (здобувачем здійснено апроксимацію теоретичних результатів досліджень з експериментальними).

8. Дослідження керованості руху машинно-тракторного агрегату модульного типу / В. В. Адамчук, В. М. Булгаков, В. Т. Надикто, І. В. Головач, Д. В. Присяжнюк, О. О. Парахін. *Вісник аграрної науки*. 2020. № 6. С. 47-54 (здобувачем здійснено кореляційно-спектральний аналіз результатів експериментальних досліджень).

### ***Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації***

9. Парахін О. О. Оптимізація конструктивної схеми і параметрів транспортного МТА на основі МЕЗ. *Сучасні проблеми землеробської механіки: матеріали XIII Міжнародної наукової конференції*. Вінниця, 2012. С. 72-73.

10. The coefficient determination of a damper washer hydraulic resistance for reducing a technical module oscillation amplitude / V. Bulgakov, O. Parakhin, B. Mitkov, T. Chorna. *Modern Development Paths of Agricultural Production Trends and Innovations*. 2019. Part I. P. 183-190. DOI: 10.1007/978-3-030-14918-5\_20 (здобувачем викладена методика лабораторних досліджень гідравлічного демпфера).

### ***Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації***

11. Спосіб підвищення стійкості руху машино-тракторного агрегату: патент України № 69365: МПК<sup>3</sup> А01В 69/00 / О. О. Парахін, С. В. Кюрчев, В. Т. Надикто. № u201112288; заявл. 20.10.2011; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8 (здобувачем запропоновано формулу винаходу).

## АНОТАЦІЯ

**Парахін О.О. Підвищення стійкості і керованості транспортного руху блоково-модульного машинно-тракторного агрегату. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття науково ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва (13 – Механічна інженерія). – Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Мелітополь, 2021.

Дисертацію присвячено підвищенню стійкості і керованості транспортного руху блоково-модульного агрегату на основі модульного енергетичного засобу (МЕЗ) перемінного тягового класу 1,4-3. На основі теоретичних досліджень синтезовано схему та вибрано параметри з'єднання технологічного і енергетичного модулів МЕЗ у горизонтальній площині, які впливають на стійкість та керованість транспортного руху блоково-модульного агрегату. Дослідженнями виявлено вплив ступеню дроселювання системи гідроциліндрів технологічного модуля МЕЗ на стійкість і керованість транспортного руху машинно-тракторного агрегату. В польових умовах встановлено вплив профілю агротехнічного фону на динаміку руху блоково-модульного агрегату у горизонтальній площині. Для практичного використання розроблено науково-обґрунтовані рекомендації з вибору схеми і параметрів нового МТА, які забезпечують підвищення його змінної продуктивності праці на 8,4%.

Ключові слова: модульний енергетичний засіб, енергетичний модуль, технологічний модуль, гідроциліндр, дросель, транспортний рух, стійкість, керованість, продуктивність

## АННОТАЦИЯ

**Парахин А.А. Повышение устойчивости и управляемости транспортного движения блочно-модульного машинно-тракторного агрегата. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.11 – машины и средства механизации сельскохозяйственного производства (13 – Механическая инженерия). – Таврический государственный агротехнологический университет имени Дмитрия Моторного, Мелитополь, 2021.

Диссертационная работа посвящена вопросу повышения устойчивости и управляемости транспортного движения блочно-модульного агрегата на основе модульного энергетического средства (МЭС) переменного тягового класса 1,4-3. На основании теоретических исследований, синтезирована схема и выбраны параметры технологического и энергетического соединения модулей МЭС в горизонтальной плоскости, которые оказывают влияние на стойкость и управляемость транспортного движения блочно-модульным агрегатом. Исследо-

ниями установлено влияние степени дросселирования системы гидроцилиндров технологического модуля МЭС на стойкость и управляемость транспортным движением машинно-тракторного агрегата. В полевых условиях установлено влияние профиля агротехнического фона на динамику движения блочно-модульного агрегата в горизонтальной плоскости. Для практического использования разработаны научно-обоснованные рекомендации выбора схемы и параметров нового МТА, которые обеспечивают повышение производительности труда за смену на 8,4%.

Ключевые слова: модульное энергетическое средство, энергетический модуль, технологичный модуль, гидроцилиндр, дроссель, транспортное движение, стойкость, управляемость, продуктивность.

## ANNOTATION

**Parakhin O.O. Increasing the traffic stability and controllability of the block-modular machine-tractor unit.** – As a manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.05.11 – machines and means of mechanization of agricultural production (13 - Mechanical engineering). – Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University, Melitopol, 2021.

The thesis is devoted to increasing the stability and controllability of a block-modular unit's traffic based on a modular power unit (MPU) of variable traction class 1.4-3. MPU consists of power (PM) and technological (TM) modules interconnected in the horizontal plane. To limit the TM's angular mobility relative to the PM, the connecting device of the first one is equipped with two hydraulic cylinders. To increase the MTU traffic stability and controllability, one of the indicated hydraulic cylinders is equipped with a washer-shaped throttle, the bore diameter of which is assumed to be 2 mm. This allows obtaining the hydraulic resistance coefficient value of the given throttle ( $K_m$ ) not less than  $10^6 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1}$ . With this value of  $K_m$ , the unfolding torque acting on the MTU from the side of its technological part is capable of turning the TM only by  $1.25^\circ$ . The decrease in the phase-frequency characteristics of the energy module oscillations reaches  $150^\circ$ . In practice, this leads to a reduction in the delay in his reaction to a disturbance from 7.6 to 2.4 s, while the amplitude of oscillations decreases by almost 17 times. With an increase in the speed of the block-modular unit from 2 to  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , the amplitude-frequency characteristics of the disturbance processing by the technological module together with the tool attached to it, as well as the power module of the MPU, change little and have a resonance peak, which falls at a frequency of  $10 \text{ s}^{-1}$ . Compared with the technological one, the frequency response of the disturbance's reproduction in the form of a turning torque by the energy module is less. The nature of the block-modular unit's movement's stability is practically invariant concerning the drag coefficients of the tire slip of the front and rear axles of the power module of the MPU. Installation of the technological module's axle tires with a total drag coefficient of  $260 \text{ kN}\cdot\text{rad}^{-1}$  and

more contributes to a decrease in the amplitude of both its oscillations and the oscillations of the energy module. In the frequency ranges of the disturbance change of 0-5 and 10-20  $s^{-1}$ , the TM rotation angle does not exceed  $4^\circ$  at all. The dispersion of the MPU technological module's angular vibrations with a plow attached to it when the unit moves along the field is concentrated in a relatively narrow frequency range of 0.25-1.50  $s^{-1}$ . During a block-modular MTU movement on an unprocessed background, this range is twice as wide: 0.25-3.00  $s^{-1}$ . This indicates that the TM's vibrations with a plow on a roughened field are lower than those on an untreated one. The introduction of a hydraulic damper with a resistance coefficient of at least  $10^6 N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}$ . The maximum value of the positive correlation between the angular oscillations of the technological and power modules of the MPU increases to 0.87, that is, increases by 2.7 times. In this case, PM and TM practically together counteract the disturbing influence in the form of a turning torque, which positively affects the entire block-modular MTU movement's stability. Hydraulic damping of the technological module's hydraulic cylinder with a stiffness coefficient not less than  $10^6 N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}$  allows to bring the maximum of the mutual correlation between the control influence and the heading angle of the energy module to 0.89, shift it to the right of the zero ordinate and reduce the delay the reaction of the heading angle to the change in the steering angle of the control wheels of the power module is almost doubled. The introduction of a plow block-modular unit, tuned according to the developed practical recommendations, allows increasing performance and reducing labor costs by 8.4%.

Key words: modular power unit (MPU), power unit, technological unit, hydraulic cylinder, throttle, stability, controllability, performance

Підписано до друку 23.03.2021 р. Зам. №1328  
Формат 60x84x 1/16. Умовн.-друк. арк. 1,0. Наклад 100 прим.  
Віддруковано в Таврійському державному  
агротехнологічному університеті імені Дмитра Моторного  
Адреса: 72312, Запорізька обл., м. Мелітополь,  
пр-т Б.Хмельницького, 18