



DOI: 10.32782/2220-8674-2024-24-2-3

УДК 631.37:631.3.00.65

В. П. Кувачов, д.т.н.

ORCID: 0000-0002-5762-256X

В. М. Дружич, аспірант

ORCID: 0009-0007-5361-5921

С. О. Шевченко, аспірант

ORCID: 0009-0007-3371-1262

К. О. Зеленов, аспірант

ORCID: 0009-0001-1235-6341

*Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного*

e-mail: volodymyr.kuvachov@tsatu.edu.ua, тел.: +380673751964

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ РУХУ САМОХІДНОЇ МАШИНИ З РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ РЕАКТИВНОГО ТИПУ

Анотація. Проблема стійкості руху одноосьової машини з робочими органами реактивного типу полягає в тому, що така динамічна система має обмежену здатність до самовирівнювання, тому необхідно враховувати не лише розподіл маси та силу тяги, а й постійно коригувати траєкторію її руху. Досліджень в цьому плані було проведено науковцями не достатньо. Метою досліджень є підвищення стійкості руху агрегатів у складі одновісних енергетичних засобів та с.-г. знарядь реактивного типу, шляхом обґрунтування схеми, параметрів та режимів їх роботи. Наукова новизна полягає в отриманні математичних моделей, використання яких дозволяють обґрунтувати параметри і режими руху самохідної одноосьової машини з позиції її стійкого руху. Практична цінність досліджень полягає у наданні рекомендацій щодо промислового виробництва вказаних машин та вибір оптимальних режимів їх роботи. В результаті проведених досліджень встановлено, що для забезпечення найкращої стійкості руху одноосьової самохідної машини з робочими органами реактивного типу її швидкість робочого руху має не перевищувати 1 м/с. Водночас, на частотах збурювального впливу близьких до нуля збільшений швидкісний режим призводить до поперечного відхилення машини на 20 мм на 1 кН коливань тягового опору с.-г. знаряддя, що вимагає більшої ширини агротехнічного допуску на операції зі смугового обробітку ґрунту. Покращення стійкості руху самохідної одноосьової машини з робочими органами реактивного типу можна досягти зменшенням характеру збурювального впливу від тягового опору робочих органів, шляхом вдосконалення їх конструкції та принципу вертикального різання ґрунту. Водночас питання керуваності самохідної машини з силовим (бортовим) способом її керування потребує подальшого дослідження.

Ключові слова: плоско паралельний рух, стійкість руху, самохідна машина, збурювальний вплив, теоретичні дослідження.

Постановка проблеми. Проблема стійкості руху одноосьової самохідної машини з робочими органами реактивного типу є однією з ключових у забезпеченні її ефективного функціонування [1]. Проблема її функціонування полягає у виникненні нерівномірного розподілу

реактивної тяги, що створює асиметричні сили та моменти, які дестабілізують рух машини [2]. Одноосьові конструкції машин особливо вразливі до таких впливів, оскільки їх стабільність залежить від точного балансування тягових і реактивних сил [3]. При виникненні нерівномірного тягового навантаження машини або коливань у поздовжньо-горизонтальній площині можуть з'являтися небажані резонансні явища, що призводять до значних відхилень від заданої траєкторії її руху. Це може спричинити погіршення керованості машини, погіршення якості виконання робочих операцій тощо [4, 5].

Інша проблема полягає у виникненні нестабільності в роботі одноосьової машини через вплив зовнішніх факторів, які діють на неї, таких як нерівності поверхні агрофону, або нерівномірність дотичної сили тяги через змінний циклічний характер роботи робочих органів з активним приводом [6, 7]. Для вирішення цих проблем необхідне вдосконалення системи керування самохідної одноосьової машини, що повинно враховувати її динамічні властивості та забезпечувати корекцію траєкторії її руху в режимі реального часу. Точне моделювання руху самохідної машини з робочими органами реактивного типу, а також врахування всіх чинників, що впливають на стійкість її руху, та розробка алгоритмів щодо її стабілізації руху – є актуальними питаннями для підвищення надійності та безпеки експлуатації таких машин [8, 9].

Однак, найважливішою проблемою динаміки одноосьових самохідних машин з робочими органами реактивного типу є стійкість їх руху у горизонтальній площині [10, 11]. Розроблення нової конструкції такої машини потребує наукового обґрунтування щодо значень її конструктивно-технологічних параметрів та режимів роботи з точки зору забезпечення задовільної стійкості руху.

Питаннями оцінки стійкості руху традиційних машинно-тракторних агрегатів науковцями приділено багато уваги. Найбільш упорядкованим підходом до методології вивчення проблеми стійкості машинно-тракторних агрегатів викладено в працях проф., член-кор. НААНУ В.Т. Надикто [12, 13]. Зокрема, у наукових працях за його співавторством [14, 15] наголошується, що з точки зору загальновідомих понять рух в горизонтальній площині таких незамкнених динамічних систем, як машинно-тракторні агрегати, може бути стійким, але лише у малому і за обов'язкової умови урахування тих чинників, які стабілізують їх плоско-паралельне переміщення. У теоретичних дослідженнях умов функціонування динамічних систем без урахування стабілізаційних чинників слід відходити з того поняття, що стійкість руху машинно-тракторного агрегату – це рівень його здатності протистояти дії зовнішнього збурення. Одним із найбільш ефективних методів синтезу схеми і

конструктивно-технологічних параметрів машинно-тракторного агрегату є застосування амплітудних і фазових частотних характеристик відпрацювання динамічною системою вхідного збурення [15, 16].

Водночас за своєю компоувальною схемою одноосьова самохідна машина з робочими органами реактивного типу передбачає приєднання до неї технологічної частини, яка є опорою для побудованого у такий спосіб агрегату. Тому дослідження стійкості руху згаданих машин є актуальним питанням для досліджень.

Аналіз останніх досліджень. Відомо достатньо наукових досліджень, які зосереджувалися на створенні математичних моделей, що описують динамічну поведінку одноосьової машини. Побудовані науковцями моделі враховують різні фактори, такі як реактивна тяга, асиметричні сили, а також вплив нерівностей поверхні агрофону. Згадані моделі дозволяють дослідникам краще розуміти, як різні чинники впливають на стабільність машини, і передбачати її поведінку в різних умовах. Зокрема, робота авторів Ван Лі та Чен Чжао [17] зосереджується на створенні математичних моделей для аналізу динамічної поведінки одноосьових машин. Вони використовують підходи на основі теорії систем та методи чисельного моделювання для прогнозування нестабільності руху, викликані асиметричними силами реактивних органів. У своїх дослідженнях автори вказують, що точні моделі є ключовими для розробки ефективних систем керування.

Науковці Сміт і Хенсон [18] у своїй роботі використовують методи моделювання на основі кінцевих елементів для аналізу впливу різних параметрів на стійкість одноосьових машин. Вони звертають увагу на важливість врахування нерівностей поверхні, яка значно впливає на стабільність руху.

Розробка алгоритмів для автоматичного коригування траєкторії машини в режимі реального часу є ще одним важливим напрямом. Останні дослідження зосереджуються на застосуванні методів оптимального керування та штучного інтелекту для розробки адаптивних систем, які можуть швидко реагувати на зміни умов експлуатації. Наприклад, застосування алгоритмів машинного навчання дозволяє системі керування навчатися та адаптуватися до нових умов, підвищуючи стійкість руху. Автори Кім та ін. [19] запропонували новий адаптивний алгоритм стабілізації, який використовує елементи штучного інтелекту та машинного навчання для коригування траєкторії машини в режимі реального часу. Їхня система може самостійно навчатися, покращуючи свою здатність підтримувати стійкість за змінних умов експлуатації. Джонс та Лі [20] розробили оптимізаційний алгоритм, що враховує вплив зовнішніх



факторів, таких як вітер та нерівності поверхні, на рух одноосьової машини. Їхній підхід показав високі результати в експериментальних тестах, зменшуючи відхилення від траєкторії на 30%.

Деякі дослідження зосереджуються на аналізі конструктивних змін, таких як зміна розподілу маси або форми робочих органів, для покращення стійкості руху. Дослідники розглядають, як ці зміни можуть зменшити асиметричні навантаження і підвищити стійкість машини без необхідності складних алгоритмів керування. В роботах [21, 22] дослідили вплив конструктивних змін на стійкість одноосьових машин. Вони показали, що зміна розподілу маси та форма робочих органів можуть суттєво покращити стійкість без необхідності застосування складних алгоритмів керування. В роботах [23, 24] провели серію експериментів, досліджуючи, як матеріали робочих органів впливають на динаміку руху. Вони рекомендують використовувати легші матеріали з високими показниками міцності для підвищення стійкості.

Крім теоретичних моделей, важливу роль відіграють експериментальні дослідження. Вони дозволяють перевірити ефективність запропонованих методів стабілізації на реальних прототипах машин. Такі дослідження часто виявляють додаткові фактори, які не враховувалися в моделях, і допомагають удосконалити підходи до забезпечення стійкості. Автори Мюллер та ін. [25] провели широкомасштабні експериментальні дослідження на реальних прототипах одноосьових машин. Їхні результати підкреслюють важливість експериментальної перевірки математичних моделей, оскільки в реальних умовах виникають додаткові фактори, які не завжди враховуються в теорії. Науковці Фукуда та Ямада [26] провели дослідження впливу нерівностей поверхні на рух самохідної машини. Їхня робота показала, що навіть незначні нерівності можуть значно знижувати стабільність, що підкреслює необхідність використання високочутливих систем керування.

Останні дослідження все частіше залучають мультидисциплінарні підходи, об'єднуючи знання з різних галузей, таких як механіка, кібернетика, та матеріалознавство. Це дозволяє створювати більш комплексні рішення, що враховують всі аспекти роботи одноосьових машин. Науковці Браун та Коен [27] запропонували мультидисциплінарний підхід до вирішення проблеми стійкості руху, об'єднавши методи з механіки, кібернетики та матеріалознавства. Вони підкреслюють важливість інтеграції знань із різних галузей для створення більш комплексних рішень, що враховують всі аспекти роботи одноосьових машин.

Узагальнюючи можна відзначити, що сучасні дослідження спрямовані на інтеграцію теоретичних моделей, розробку адаптивних

алгоритмів стабілізації, а також на експериментальні перевірки. Це дозволяє поступово наближатися до створення самохідних машин з підвищеною стійкістю руху, здатних ефективно працювати в різних умовах.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою досліджень є підвищення стійкості руху агрегатів у складі одновісних енергетичних засобів та с.-г. знарядь реактивного типу, шляхом обґрунтування схеми, параметрів та режимів їх роботи.

Основна частина. На даному етапі вивчення динаміки руху одноосьової самохідної машини з робочими органами реактивного типу в горизонтальній площині доцільно розглянути її спрощену еквівалентну схему (рис. 1) і представити диференціальні рівняння її руху у вигляді стаціонарних лінійних моделей.

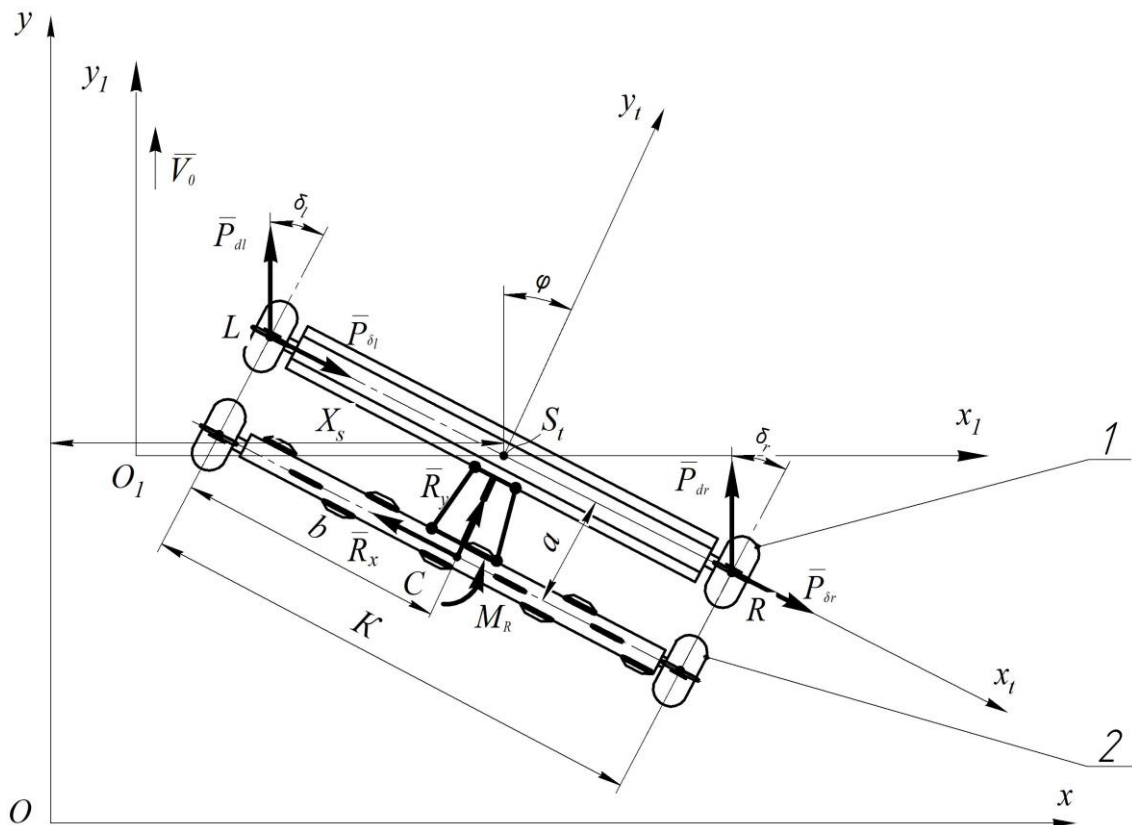


Рис. 1. Еквівалентна схема одноосьової самохідної машини [1] з робочими органами реактивного типу [2] при дослідженні її плоскопаралельного руху у горизонтальній площині за силовим (бортовим) способом керування

Для спрощення рішення поставленої задачі впливу усіх сил, які діють на самохідну машину з боку сільськогосподарських знарядь, виразимо через їх головний вектор $\bar{R}$ (складові $\bar{R}_x$ і $\bar{R}_y$) і головний момент M_R . Приймемо, що самохідна машина здійснює на гоні



відносно нерухомої горизонтальної площини xOy рівномірний поступальний рух з швидкістю V_0 . В процесі виконання роботи її остів під впливом випадкових збурень відхиляється від початкового положення і отримує додаткові швидкості. За якими починається відносний її рух по відношенню до площини $x_1O_1y_1$. При цьому площина $x_tS_ty_t$, що зв'язана з центром мас машини, обертає її в площині $x_1O_1y_1$ навколо осі S_tz , яка проходить через точку S_t . Мірою цього повороту машини служить кут φ , який побудований повздовжньою віссю S_ty_t і віссю O_1y_1 . В процесі відносного руху машини її центр мас переміщується по осі Ox , що характеризується зміною абсциси X_s .

Таким чином, самохідна машина по відношенню до площини $x_1O_1y_1$ має два ступеня вільності, яким відповідає дві узагальнені координати: кут φ і зміна абсциси X_s центра її мас.

Слід зазначити, що навіть в лінійній інтерпретації математична модель руху самохідної машини представляє собою систему досить складних диференціальних рівнянь. Тому, з метою спрощення їх складання, прийняті наступні припущення:

- 1) крен і диферент самохідної машини відсутні;
- 2) самохідна машина розглядається як фізичне тверде тіло, що має повздовжню площину симетрії, яка проходять через центр її мас;
- 3) циклічні коливання реактивного тягового опору та рушійної сили сільськогосподарських знарядь типу «копач» суттєво не впливає на швидкість поступального руху машини, в силу цього вона приймається постійною;
- 4) бокова взаємодія шин машини з поверхнею, що деформується, розглядається в рамках гіпотези «бокового уводу»;
- 5) гіроскопічні і стабілізуючі моменти шин і моменти опору їх скручування відносно вертикальної осі в силу їх незначності не враховуються.

На даному етапі вивчення динаміки руху самохідної машини в горизонтальній площині доцільно розглянути її спрощену еквівалентну схему (рис. 1) і представити диференціальні рівняння її руху у вигляді стаціонарних лінійних моделей.

До зовнішніх сил, які діють на самохідну машину при її плоско паралельному русі в горизонтальній площині (див. рис. 1), входять:

– рушійні сили P_{dl} , P_{dr} коліс лівого і правого бортів машини, що прикладені відповідно в точках L і R перетинання осей вказаних коліс з повздовжньою віссю S_ty ;

– бокові сили $P_{\delta l}$, $P_{\delta r}$, що прикладені відповідно в точках L і R , які призводять до виникнення кутів уводу δ_l і δ_r коліс лівого і правого бортів машини;



– горизонтальна та вертикальна R_x і R_y проекції сил і головний момент M_R , що діють з боку сільськогосподарських знарядь реактивного типу.

Дотичні сили тяги та сили опору кочення самохідної машини, за умов її рівномірного руху, виразимо через рушійні сили у вигляді:

$$\begin{aligned} P_{dl} &= P_{kl} - P_{fl1} - P_{fl2}, \\ P_{dr} &= P_{kr} - P_{fr1} - P_{fr2}, \end{aligned} \quad (1)$$

де P_{kl} , P_{kr} – рушійні сили тяги, які розвивають колеса з лівого та правого бортів машини відповідно;

P_{fl1} , P_{fr1} – опір кочення рушіїв самохідної машини з лівого та правого бортів машини відповідно;

P_{fl2} , P_{fr2} – опір кочення рушіїв сільськогосподарського знаряддя, відповідно з лівого та правого його бортів.

Для математичного опису бокової взаємодії енергетичного засобу з агрофоном найбільш часто використовується гіпотеза «бокового уводу» у лінійній інтерпретації [13, 14]. В цьому випадку для визначення бокових горизонтальних сил в місцях контакту коліс із ґрунтом використовують коефіцієнти опору боковому уводу шин згідно гіпотези Рокара [15, 16].

Отже, для умов функціонування самохідної машини отримаємо:

$$\begin{aligned} P_{\delta l} &= k_l \cdot \delta_l, \\ P_{\delta r} &= k_r \cdot \delta_r, \end{aligned} \quad (2)$$

де k_l і k_r – коефіцієнти опору уводу коліс відповідно лівого і правого бортів машини.

Кінетична енергія самохідної машини відносно площини x_1Oy_1 (див. рис. 1) складається із двох складових, які відображають її поступальний і обертальний рух:

$$T = (M_t \cdot V_{st}^2 + J_{st} \cdot \omega_t^2)/2, \quad (3)$$

де M_t – маса машини;

V_{st} – лінійна швидкість центру мас машини відносно площини x_1Oy_1 ;

J_{st} – момент інерції машини відносно її центру мас;

ω_t – кутова швидкість машини.

Очевидно, що

$$\begin{aligned} V_{st} &= \dot{x}_s, \\ \omega_t &= \dot{\varphi}. \end{aligned} \quad (4)$$

Після підстановки в рівняння кінетичної енергії (3) похідні кутових і лінійних швидкостей (4) отримаємо:

$$T = [M_t \cdot \dot{x}_s^2 + J_t \cdot \dot{\varphi}^2]/2. \quad (5)$$



Диференціальні рівняння руху самохідної машини по відношенню до площини x_1Oy_1 будемо складати у вигляді рівнянь Лагранжа другого роду.

Взявши похідні по прийнятим узагальненим координатам, після диференціювання отримаємо:

$$\begin{cases} M_t \cdot \ddot{x}_s = Q_x; \\ J_t \cdot \ddot{\varphi} = Q_\varphi, \end{cases} \quad (6)$$

де Q_x і Q_φ – узагальнені сили, які здійснюють переміщення самохідної машини по відповідним узагальненим координатам.

З урахуванням малості переміщень самохідної машини по відповідним узагальненим координатам рівняння для визначення узагальнених сил мають такий вид:

$$\begin{aligned} Q_x &= R_x - P_{\delta l} - P_{rl}, \\ Q_\varphi &= M_R - R_x \cdot a - P_{dl} \cdot b + P_{dr} \cdot (K - b), \end{aligned} \quad (7)$$

де K , b , a – конструктивні параметри машини, природа яких зрозуміла з рис. 1.

Здійснив певні перетворення диференціальних рівнянь [6] отримаємо математичну модель руху самохідної машини в горизонтальній площині при силовому (бортовому) способі її керування в диференціальній формі запису:

$$\begin{cases} A_{11} \cdot \ddot{x}_s + A_{12} \cdot \dot{x}_s + A_{13} \cdot \dot{\varphi} + A_{14} \cdot \varphi = R_x; \\ A_{21} \cdot \ddot{\varphi} + A_{22} \cdot \dot{\varphi} + A_{23} \cdot \dot{x}_s + A_{24} \cdot x_s = M_R - R_x \cdot a - P_{dl} \cdot b + P_{dr} \cdot (K - b), \end{cases} \quad (8)$$

де $A_{11} = M_t$;
 $A_{12} = (k_l + k_r)/V_0$;
 $A_{13} = 0$;
 $A_{14} = -(k_l + k_r)$;
 $A_{21} = J_t$;
 $A_{22} = 0$;
 $A_{23} = 0$;
 $A_{24} = 0$.

В основу визначення ступеню впливу схеми та параметрів досліджуваної машини на її стійкість руху нами покладені амплітудні і фазові частотні характеристики. Для їх визначення в рівняннях [8] оператор диференціювання замінимо уявною величиною $i \cdot \omega$, де $i = \sqrt{-1}$, а ω – частота зовнішнього впливу [1].

Амплітудно-частотні характеристики представляють залежності модулів передаточних функцій розглядуваної динамічної системи від частоти ω , а фазові частотні характеристики – залежність фазового зсуву від ω . В математичній моделі досліджуваної динамічної системи характеристиками збурювального впливу є тяговий опір R_x с.-г. знаряддя.

Аналіз результатів математичного моделювання показав, що характер відпрацювання збурювального впливу самохідною машиною залежить від швидкості V_0 її робочого руху (рис. 2).

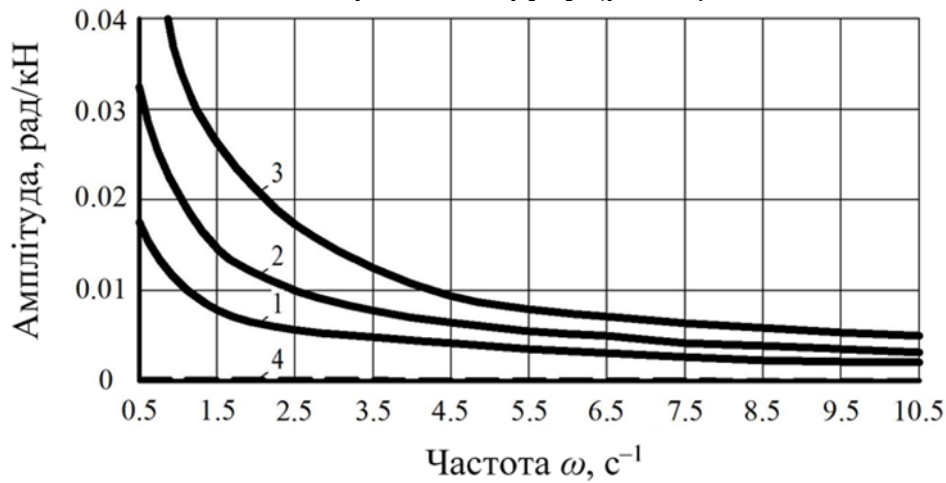


Рис. 2. Амплітудно-частотні характеристики коливань курсового кута φ самохідної машини при відпрацюванні нею збурювального впливу (тягового опору R_x с.-г. знаряддя) при різних швидкостях руху: 1 – $V_0 = 1$ м/с; 2 – $V_0 = 2$ м/с; 3 – $V_0 = 3$ м/с; 4 – ідеальна характеристика

З аналізу розрахункових амплітудно-частотних характеристик (див. рис. 2) випливає, що при збільшенні швидкості руху самохідної машини коливання амплітуди курсового кута φ , як вихідного параметру, теж зростає, що не є бажаним, оскільки віддаляє вказану характеристику від ідеальної. Для забезпечення найкращої стійкості руху машини швидкість її робочого руху має бути близькою 1 м/с. Водночас, максимальна амплітуда кутового кута φ на частотах близьких до нуля не перевищує 0,04 рад на 1 кН коливань тягового опору.

Фаза-частотні характеристики при цьому мають аналогічний характер (рис. 3).

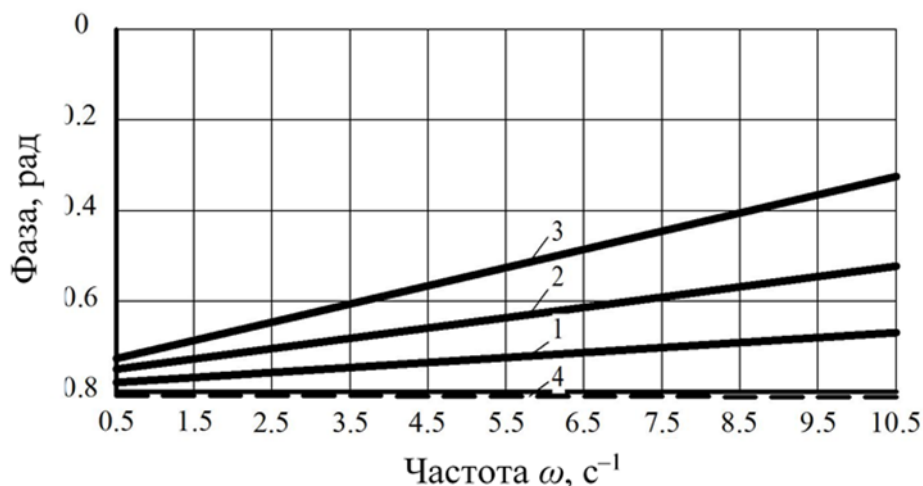


Рис. 3. Фаза-частотні характеристики коливань курсового кута φ самохідної машини при відпрацюванні нею збурювального впливу (тягового опору R_x с.-г. знаряддя) при різних швидкостях руху: 1 – $V_0 = 1$ м/с; 2 – $V_0 = 2$ м/с; 3 – $V_0 = 3$ м/с; 4 – бажана характеристика

Величина запізнення реакції динамічної системи на вхідне збурювання (див. рис. 3) при збільшенні швидкісного режиму машини змінюється не більше за 15%. У зв'язку з цим можна констатувати, що зміна швидкісного режиму машини на частотах $\omega > 3$ с⁻¹ практично не погіршує стійкості її руху в горизонтальній площині.

При збільшенні швидкості руху самохідної машини амплітуда коливання X_s також зростає (рис. 4 та 5). Найбільш відчутно цей процес проявляється на частотах коливання тягового опору, близьких до нуля. Водночас, максимальна амплітуда поперечного відхилення самохідної машини на частотах близьких до нуля при цьому не перевищує 20 мм на 1кН коливань поперечної складової тягового опору.

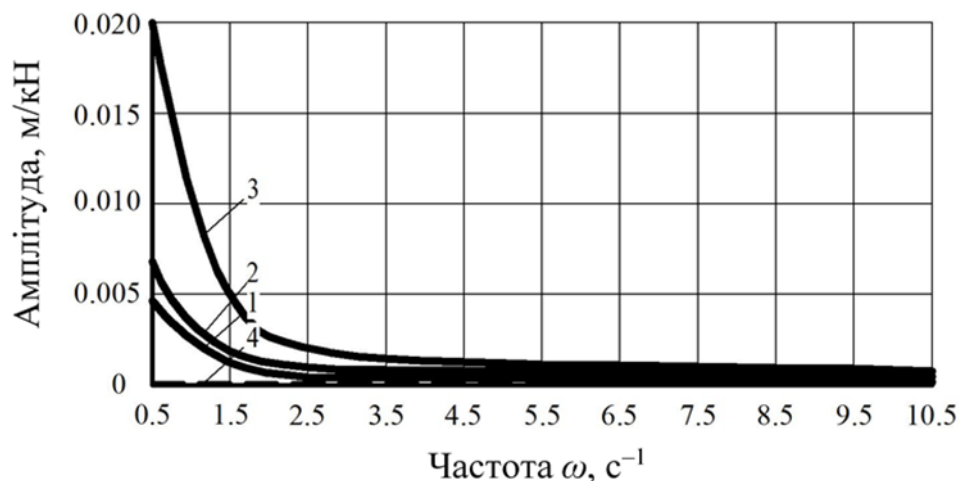


Рис. 4. Амплітудно-частотні характеристики коливань лінійного поперечного відхилення X_s при відпрацюванні самохідною машиною збурювального впливу (тягового опору R_x с.-г. знаряддя) при різних швидкостях руху: 1 – $V_0 = 1$ м/с; 2 – $V_0 = 2$ м/с; 3 – $V_0 = 3$ м/с; 4 – ідеальна характеристика

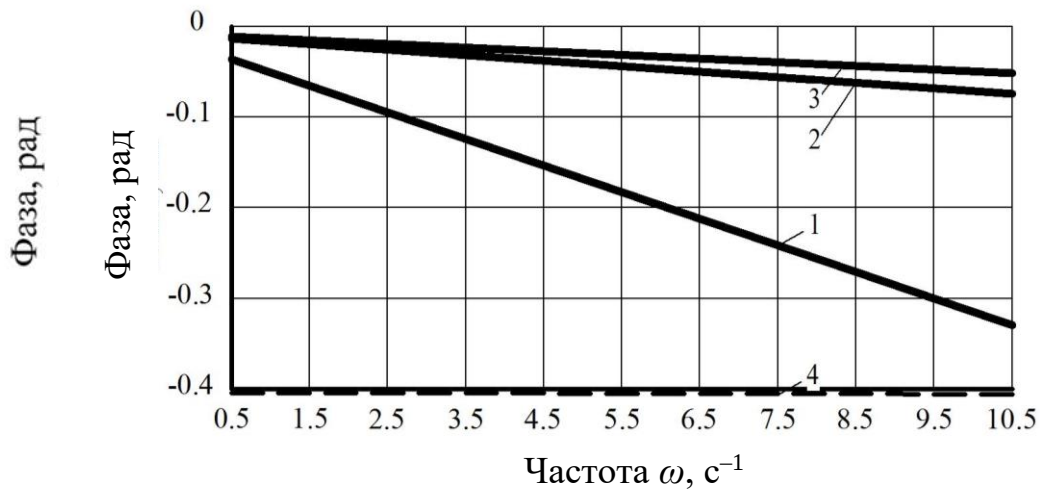


Рис. 5. Фаза-частотні характеристики коливань лінійного поперечного відхилення X_s при відпрацюванні самохідною машиною збурювального впливу (тягового опору R_x с.-г. знаряддя) при різних швидкостях її руху: 1 – $V_0 = 1$ м/с; 2 – $V_0 = 2$ м/с; 3 – $V_0 = 3$ м/с; 4 – бажана характеристика

З аналізу вищевикладених результатів досліджень можна констатувати, що коливання тягового опору знаряддя (як збурювального впливу) із підвищенням швидкісного режиму самохідної машини збільшує амплітуди її поперечного відхилення, що вимагає збільшення величини технологічного допуску на операції з смугового обробітку ґрунту. Якщо у реальних умовах експлуатації швидкість руху самохідної машини становитиме близькою до 3 м/с та при тяговому навантаженні в 5 кН амплітуда поперечного зміщення робочого органу при смуговому обробітку ґрунту становитиме $5\text{кН} \cdot 0,020\text{м/кН} = 0,12\text{м}$.

Висновки. Для забезпечення найкращої стійкості руху одноосьової самохідної машини з робочими органами реактивного типу її швидкість робочого руху має не перевищувати 1 м/с. При більшій швидкості її руху амплітудно-частотні характеристики відпрацювання динамічною системою збурювального впливу погіршуються (тобто небажано зростають). Водночас, на частотах збурювального впливу близьких до нуля збільшений швидкісний режим негативно відображається на величині поперечного зміщення машини. Практично це означає, що на 1кН коливань тягового опору с.-г. знаряддя амплітуда її поперечного відхилення наближається до 20 мм, що вимагає більшої ширини агротехнічного допуску на операції зі смугового обробітку ґрунту, що не є бажаним.

Дослідження встановлено, що максимальна амплітуда курсового кутового кута φ самохідної одноосьової машини на частотах близьких



до нуля становить 0,04 рад на 1 кН коливань тягового опору, а на частотах $\omega > 3 \text{ с}^{-1}$ збільшення швидкісного режиму руху машини практично не погіршує стійкості її руху в горизонтальній площині.

Покращення стійкості руху самохідної одноосової машини з робочими органами реактивного типу можна досягти зменшенням характеру звурювального впливу від тягового опору робочих органів, шляхом вдосконалення їх конструкції та принципу вертикального різання ґрунту. Водночас питання керованості самохідної машини з силовим (бортовим) способом її керування потребує подальшого дослідження.

Список використаних джерел

1. Надикто В. Т. [та ін.]. Нові мобільні енергетичні засоби України. Теоретичні основи використання в землеробстві: навч. посібник. Мелітополь: Видавничий будинок «ММД», 2005. 338 с.
2. Надикто В. Т., Кюрчев В. М., Кувачов В. П. Використання техніки в АПК: підручник. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2020. 268 с.
3. Кобець А. С., Теслюк Г. В., Пугач А. М. [та ін.]. Мостове землеробство. Елементи теорії та результати досліджень: монографія. Дніпро: Акцент ПП, 2023. 367 с.
4. Булгаков В. М., Адамчук В. В., Кувачов В. П. Результати експериментальних досліджень блоково-модульного сільсько-господарського агрегату. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 7 (820). С. 49–58.
5. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Надикто В. Т. [та ін.]. Теорія стійкого руху дискової борони. *Механізація та електрифікація сільського господарства*, 2021. № 6. С. 10–22.
6. Bulgakov V., Ivanovs S., Volskyi V., Kuvachov V. Simulation of the Flat-parallel Movement of a Bridge Agricultural Unit with an Articulated Frame. *Rural sustainability research*. 2020. Vol. 44(339). P. 8–14.
7. Bulgakov V., Olt J., Ivanovs S., Kuvachov V. Research into Dynamics of Motion Performed by Modular Power Unit as Part of Ploughing Tractor-Implement Unit. *Proceedings of the 32nd DAAAM International Symposium* (Vienna, Austria). P. 0576–0585.
8. Bulgakov V., Olt J., Chernovol M., Kuvachov V. та ін. A study of the interaction between soil and the pneumatic wheels of agricultural gantry systems. *AGRAARTEADUS: Journal of Agricultural Science*. 2020. Vol. 1. XXXI. P. 3–9.
9. Juzwik J. Incorporation of tracers and dozomet by rotary tillage and spading machines. *Soil and Tillage Research*. 1997. № 41. P. 237–248.
10. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Головач І. В., Кувачов В. П. Дослідження кочення рушіїв мостових агрозасобів по слідах постійної технологічної колії. *Вісник аграрної науки*. 2020. №10. С. 48–56.



11. Bulgakov V., Adamchuk V., Shymko L., Kuvachov V. A theoretical and experimental study of combined agricultural gantry unit with a mineral fertiliser spreader. *Agraarteadus: Journal of Agricultural Science*. 2020. № 2. XXXI. P. 139–146.
12. Булгаков В., Адамчук В., Надикто В. [та ін.]. Розробка та обґрунтування нового методу теоретичного дослідження коливальних процесів функціонування сільськогосподарських машин і машинних агрегатів. *Вісник аграрної науки*, 2022. Вип.100 (6). С. 48–54.
13. Olt J., Bulgakov V., Nadykto V. [et al.]. A mathematical model of the rear-trailed top harvester and an evaluation of its motion stability. *Agronomy Research*. 2020. Vol. 20(2). 371–388.
14. Bulgakov V., Aboltins A., Nadykto V. et al. A mathematical model of plane-parallel movement of the tractor aggregate modular type. *Agriculture (Switzerland)*. 2020. Vol. 10(10). P. 1–22.
15. Адамчук В., Булгаков В., Надикто В. та ін. Теоретичне дослідження стійкості руху асиметричного посівного машинно-тракторного агрегату. *Вісник аграрної науки*. 2023. Вип. 101(5). С. 57–64.
16. Bulgakov V., Aboltins A., Nadykto V. et al. Theoretical investigation of selection (calculation) of design parameters of modular draft device in aggregation of semitrailers. *Applied Sciences*. 2022. Vol.12 (20). P. 10267.
17. Li Wang, Zhao Chen. Dynamic Modeling and Stability Analysis of Single-Axis Autonomous Vehicles with Reactive Work Units. *Journal of Systems and Control Engineering*. 2022.
18. Smith J., Hanson E. Finite Element Modeling of Stability in Single-Axis Autonomous Vehicles: Impact of Surface Irregularities. *International Journal of Vehicle Dynamics*. 2021. 206–218.
19. Kim J., Lee S., Park H. Adaptive Real-Time Stabilization of Single-Axis Autonomous Vehicles Using AI and Machine Learning Algorithms. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2023. 163–178.
20. Jones M., Lee H. Optimization Algorithm for Stability Control of Single-Axis Vehicles Under External Disturbances. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2022. 64–72.
21. Bulgakov V., Pascuzzi S., Ivanovs S., Kuvachov V. та ін. Study of the steering of a wide span vehicle controlled by a local positioning system. *Journal of Agricultural Engineering*. 2021. Vol. LII. P.1144.
22. Bulgakov V., Pascuzzi S., Ivanovs, S., Kuvachov V. та ін. Measure of the deflections from linear trajectory of a skid-steer gantry tractor during its motion. *2021 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*. 2021. P. 22–26.



23. Bulgakov V., Olt J., Smolinskyi S., Kuvachov V. A theoretical and experimental study of the traction properties of agricultural gantry systems. *AGRAARTEADUS: Journal of Agricultural Science*. 2020. Vol. 1. XXXI. P. 10–16.

24. Bulgakov V., Ivanovs S., Viktor M., Kuvachov V. Simulation of elastic-dissipative connection of multi-axle block-modular agricultural tractor modules. *Proceeding 20th International Scientific Conference engineering for rural development* (Jelgava, 26.-28.05.2021). 2021. P. 628–634.

25. Müller F., Schmidt A., Bauer L. Experimental Validation of Mathematical Models for Single-Axis Machines: Insights from Large-Scale Prototyping. *Journal of Mechanical Engineering and Robotics*. 2023. P. 72–81.

26. Fukuda T., Yamada K. Impact of Surface Irregularities on the Stability of Autonomous Vehicles: A Case Study on Single-Axis Machines. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*. 2022. P. 121–128.

27. Brown J., Cohen D. Multidisciplinary Approach to Enhancing Stability in Single-Axis Vehicles: Insights from Mechanics, Cybernetics, and Material Science. *Journal of Advanced Vehicle Systems*. 2023. P. 265–273.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2024 р.

**V. Kuvachov, V. Druzhych, S. Shevchenko, K. Zelenov,
Dmytro Motornyi Tavria state agrotechnological university**

STUDY OF STABILITY OF MOTION OF A SELF-PROPELLED MACHINE WITH JET-TYPE AGRICULTURAL UNITS

Summary

The problem of the stability of the movement of a single-axle machine with agricultural units of the reactive type is that such a dynamic system has a limited ability to self-level, so it is necessary to take into account not only the distribution of mass and the force of traction, but also to constantly adjust the trajectory of its movement. Scientists have not conducted enough research in this regard. The purpose of the research is to increase the stability of the movement of aggregates in the composition of single-axis power tools and agricultural machinery. a jet-type tool, by substantiating the scheme, parameters and modes of their operation. The scientific novelty consists in obtaining mathematical models, the use of which allows you to substantiate the parameters and modes of motion of a self-propelled uniaxial machine from the position of its steady motion. The practical value of the research lies in the provision of recommendations for the industrial production of the specified machines and the selection of optimal modes of their operation. As a result of the conducted research, it was established that to ensure the best stability of the movement of a single-axle self-propelled machine with agricultural units of the reactive type, its operating speed should not exceed 1 m/s. At the same time, at frequencies of disturbance influence close to zero, the increased speed mode leads to a lateral deviation of the machine by 20 mm per 1 kN of the traction resistance oscillations. a tool that requires a greater width of



agrotechnical tolerance. Improving the stability of the movement of a self-propelled single-axle machine with agricultural units of the reactive type can be achieved by reducing the nature of the binding effect from the traction resistance of the working bodies, by improving their design and the principle of vertical cutting of the soil. At the same time, the issue of controllability of a self-propelled machine with a power (on-board) control method requires further research.

Key words: plane-parallel motion, stability of motion, self-propelled machine, disturbing influence, theoretical studies.