



УДК 631.37

DOI: 10.31388/2220-8674-2020-1-12

МЕТОДОЛОГІЯ ПЕРЕВІРКИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ АГРОМОСТОВИХ СИСТЕМ НА АДЕКВАТНІСТЬ

Кувачов В. П., к. т. н.,

ORCID: 0000-0002-5762-256X

Мітков В. Б., к. т. н.,

ORCID: 0000-0002-3652-0687

Ігнат'єв Є. І., к. т. н.,

ORCID: 0000-0003-0315-1595

Аюбов А. М., к. т. н.

ORCID: 0000-0002-4969-044X

*Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного*

e-mail: volodymyr.kuvachov@tsatu.edu.ua

Постановка проблеми. Сучасний розвиток науки і техніки неможливо уявити без широкого застосування методів математичного моделювання. В останні роки математичне моделювання, як метод дослідження складних технічних систем в землеробстві, знаходить широке застосування для вирішення різних задач. До останніх можна віднести дослідження нових спеціалізованих ширококоліїних мостових агрозасобів для забезпечення їх функціонування за принципами колійного і мостового землеробства [1–3]. На думку багатьох учених такі мостові агрозасоби є перспективою переходу від традиційних тракторно-комбайнових технологій до «цехового» землеробства [4].

На сучасному етапі науково-технічного прогресу практична відсутність діючих дослідних зразків мостових агрозасобів ускладнює завдання вивчення їх властивостей з метою обґрунтування їх схем, а також конструктивних та інших параметрів. Тому заміна мостового агрозасобу аналогом або математичною моделлю для проведення досліджень дозволяє вивчити і отримати цінну наукову інформацію про нього за допомогою програмно-алгоритмічних засобів і ПК. При цьому слід врахувати тільки одну головну обставину, що скористатися перевагами методології математичного моделювання для вивчення функціонування таких нових технічних систем можна лише за умови адекватного відображення фізичної реальності в математичних і комп'ютерних моделях.

Аналіз останніх досліджень. За умови застосування сучасних програмних середовищ (наприклад, Mathematica, Statistica, Mathcad, MS Excel тощо) перевірка регресійних математичних моделей на адекватність є процедурою формалізованою [5]. У вказаних пакетах



прикладних програм вона здійснюється у декілька етапів, як правило, за таким алгоритмом:

- спочатку знаходять дисперсію адекватності функції відгуку;
- розраховують дійсну значину F-критерію Фішера;
- визначають числа ступенів вільності;
- задаються рівнем статистичної значущості;
- знаходять критичну значину критерію Фішера, яку порівнюють із дійсною.

Однак вказаний формалізований методологічний підхід перевірки математичних моделей на адекватність є не завжди прийнятним і можливим для його здійснення. Так, наприклад, при моделюванні поведінки динамічних систем, найбільш вдалим та інформативним є застосування методів статистичної динаміки та теорії автоматичного регулювання лінійних динамічних систем при відтворенні ними статистично випадкових керуючих та збурювальних вхідних впливів. За цією методологією на основі складених диференціальних рівнянь укладаються передаточні функції, а потім розраховуються амплітудно-частотні характеристики [6–10]. Водночас оцінювання адекватності теоретичних амплітудно-частотних характеристик відпрацювання досліджуваною динамічною системою вхідного збурення представляє доволі складну задачу. Її складність обумовлена неможливістю застосування формалізованої процедури програмної перевірки на адекватність. Науковцем В. Т. Надикто у своїх публікаціях [11–13] представлено методику перевірки на адекватність математичних моделей, рішення яких представлено амплітудно-частотними характеристиками відпрацювання машинно-тракторним агрегатом зовнішніх збурень, які діють на нього. Але сам алгоритм апаратного пошуку та формалізації вхідних і вихідних параметрів представлений в його наукових працях недостатньо повно.

Формулювання мети статті. Апробація методології перевірки на адекватність результатів математичного моделювання функціонування спеціалізованих ширококоліїних агросасобів мостового типу з використанням положень теорії автоматичного регулювання динамічних систем задля підвищення якості цієї процедури.

Методика досліджень. Продемонструємо методику перевірки на адекватність математичних моделей функціонування спеціалізованого ширококоліїного агросасобу мостового типу у вертикальній і горизонтальній площинах на адекватність для залежностей, які побудовані з аналізом їх рішення у наукових працях [14, 15].

Перевірку математичної моделі горизонтальних коливань спеціалізованого ширококоліїного агросасобу на адекватність проведемо шляхом порівняння теоретичних $A_T(\omega)$ та

експериментальних $A_E(\omega)$ амплітудно-частотних характеристик коливань його курсового кута φ і поперечного зміщення x_s (як вихідних величин) при відпрацюванні ним (агрозасобом) вхідного керуючого впливу. В якості останнього виступає рушійна сила коліс одного із бортів $P_{\text{об}}$ агрозасобу при бортовому силовому способі його повороту, яку змінювали шляхом відключення живлення в приводі його коліс з одного борту. Перевірку математичної моделі вертикальних коливань агрозасобу на адекватність здійснювали шляхом порівняння теоретичної $S_{Ta}(\omega)$ і експериментальної $S_{Ea}(\omega)$ нормованих спектральних щільностей вертикальних коливань остова спеціалізованого ширококолісного агрозасобу. За вхідний параметр було прийнято коливання нерівностей поздовжнього профілю слідів постійної технологічної колії по якій рухається агрозасіб, а за вихідний – коливання його остова в місці над задніми його колесами.

Теоретичні амплітудно-частотні характеристики коливань курсового кута φ і поперечного зміщення x_s агрозасобу при відпрацюванні ним керуючого впливу при силовому способі його керування, а також відтворення ним коливань нерівностей профілю шляху, розраховували, використовуючи при цьому відповідні передаточні функції [14, 15].

Для визначення експериментальної амплітудно-частотної характеристики в польових умовах проводили дослідження спеціалізованого ширококолісного агрозасобу конструкції ТДАТУ в агрегаті з зубовими боронами (типу БЗСС-1,0) (рис. 1), які конструктивно виконанні по типу борони «Надикти-Аюбова».



Рис. 1. Спеціалізований ширококолісний агрозасіб ТДАТУ в складі боронувального агрегату під час проведення досліджень



Для проведення досліджень використовувалася спеціально обладнана лабораторія для випробування агрозасобу. В умовах цієї лабораторії була штучно створена на ґрунті постійна технологічна колія. Поздовжній профіль нерівностей якої був остаточно сформований багатократними проходами рушіїв агрозасобу по ним.

Керування спеціалізованим ширококоліїним агрозасобом здійснювалося оператором в ручному режимі. Принцип керування агрозасобу полягав в тому, що при його відхиленні від прямолінійного руху по слідах постійної технологічної колії оператор відслідковує рух точки керування. В цій ролі виступав центр колеса одного із бортів агрозасобу на рівні опорної поверхні, яка пролягає через центральну лінію сліду шини, паралельну поздовжній площині агрозасобу. Задача керування агрозасобу полягала в тому, щоб центр його колеса на рівні опорної поверхні був якомога ближчим до осі симетрії постійної технологічної колії.

Відхилення траєкторії точки візування коригувалося оператором шляхом зменшення (практично до нуля) величини дотичної сили тяги P_{dl} на колесах агрозасобу одного борту. Зокрема, якщо відбувалося правостороннє відхилення агрозасобу від напрямку його руху, то дотична сила тяги зменшувалася на колесах лівого борту, і навпаки. В результаті цієї дії оператора через певний час агрозасіб відповідним чином змінює курсовий кут. З цього випливає, що бажана керованість руху розглядуваного ширококоліїного агрозасобу матиме місце тоді, коли за встановленою швидкістю його руху, тривалість керуючого впливу (зменшення дотичної сили тяги на колесах одного борту) буде достатньою, щоб агрозасіб без запізнення у часі був здатний компенсувати амплітуду його курсового кута або поперечного зміщення без виїзду коліс за межі встановленої ширини постійної технологічної колії.

Під час робочого руху агрозасобу з допомогою аналого-цифрового перетворювача і ПК та мобільного комунікатора синхронно реєстрували:

- курсовий кут φ (град.) агрозасобу;
- вертикальні прискорення Z (м/с²) остова агрозасобу;
- тривалість τ_{Pdl} (с) впливу на дотичну сили тяги на колесах агрозасобу з одного його борту для відновлення його прямолінійного руху внаслідок відхилення від нього, що визначало коливання керуючого впливу.

Перші два параметри під час проведення експериментальних досліджень реєстрували за допомогою мобільного комунікатора з операційною системою Android. В цьому програмному середовищі за допомогою спеціального додатка Accelerometer Meter (версія 1.32) отримувалися оцифровані вихідні сигнали та їх частотний спектр від

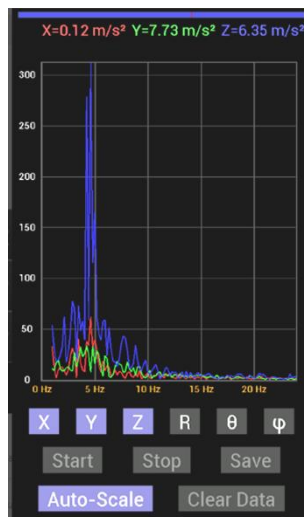
датчиків акселерометра, які вбудовані в мобільний комунікатор, за часом (рис. 2).



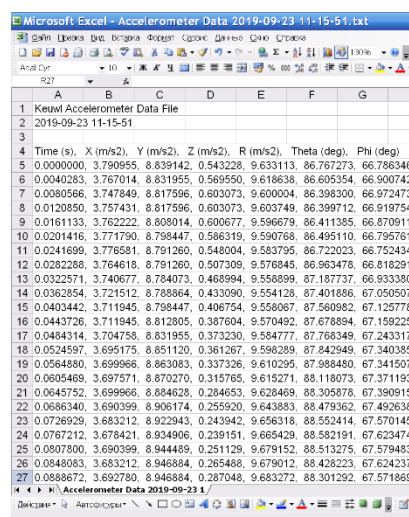
а)



б)



в)



д)

Рис. 2. Інтерфейс програмного середовища Accelerometer Meter на базі Android: а – вимірювання курсового кута φ і вертикального прискорення Z ; б – функція запису вимірювання вихідних параметрів; в – розподілення амплітуд вихідних параметрів по частотам; д – результати експортовані у формат «.txt»

Також під час експериментальних досліджень після робочого руху агрозасобу вимірювали амплітуду x_s його поперечного відхилення від осі симетрії постійної технологічної колії. За для цього визначали середину слідів його коліс з одного боку внаслідок їх відхилення від прямолінійного руху і вимірювали найкоротшу відстань від неї до осі симетрії постійної технологічної колії.

Характеристики коливань нерівностей поздовжнього профілю слідів постійної технологічної колії реєстрували з допомогою



автоматизованого профілографа з АЦП і ПК за методикою, яка ґрунтовно викладена в [16].

Із отриманих реалізацій визначали такі статистичні характеристики, як середні квадратичні відхилення та нормовані спектральні щільності за методикою, яка представлена в [16].

Експериментальну амплітудно-частотну характеристику агрозасобу розраховували із виразу [5]:

$$A(\omega) = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \cdot \left(\frac{S_y(\omega)}{S_x(\omega)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

де σ_x , $S_x(\omega)$ – середнє квадратичне відхилення і нормована спектральна щільність вхідної величини;

σ_y , $S_y(\omega)$ – середнє квадратичне відхилення і нормована спектральна щільність вихідної величини;

ω – частота коливань керуючого впливу, с^{-1} .

Теоретичну спектральну щільність коливань вихідного параметру знаходили із виразу [5]:

$$S_T(\omega) = \frac{A_T(\omega)^2 \cdot S_x(\omega) \cdot D_x}{D_y}, \quad (2)$$

де $S_x(\omega)$, D_x – нормована спектральна щільність та дисперсія коливань вхідної величини;

D_y – дисперсія коливань вихідної величини.

Дисперсії характеристик випадкових процесів на виході лінійної динамічної системи знаходили із виразу:

$$D_y = \int_{\omega_{\text{поч}}}^{\omega_{\text{зр}}} S_y(\omega) d\omega, \quad (3)$$

де $\omega_{\text{поч}}$, $\omega_{\text{зр}}$ – початкове значення частоти діапазону дослідження спектральних характеристик і частота зрізу (або кінцеве значення частоти в діапазоні дослідження характеристики).

Оскільки ордината спектральної щільності коливань вертикальних прискорень остова агрозасобу має одиницю вимірювання $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$, що є реалізацією сигналів від датчиків акселерометра, то для переходу до лінійної амплітуди z_y (м) ординати точок згадуваної спектральної щільності, з деяким припущенням та достатньою при цьому точністю, перераховували наступним чином:

$$z_y = \frac{Z \cdot T^2}{2},$$

де Z – прискорення вертикальних коливань за даними програмного середовища Accelerometer Meter, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$;

T – час, який дорівнює довжині кореляційного зв'язку щільності прискорень вертикальних коливань агрозасобу, с.

Про кількісну статистичну оцінку адекватності порівнянних теоретичних та експериментальних даних робили висновок за F -критерієм Фішера. Згідно цього критерію перевірялася гіпотеза про рівність порівнюваних дисперсій (теоретичної та експериментальної) коливань вихідної величини. Якщо розраховане значення F -критерію Фішера менше за критичне значення, то нуль гіпотеза про рівність порівнюваних дисперсій не відхилялася (на певному статистичному рівні значущості). Останнє визначалося з допомогою функції ФРАСПОБР у середовищі Microsoft Office Excel 2003. При цьому числа ступенів вільності обиралися рівними 10, оскільки за такою кількістю точок кореляції будувалися графіки спектральної щільності коливань розглядуваних вхідних та вихідних параметрів. В такому випадку критична значина F -критерію Фішера на статистичному рівні значущості 0,05 становить 2,97, а на рівні 0,01 – відповідно дорівнює 4,84.

Основна частина. Як показав аналіз отриманих та оброблених експериментальних даних, спектр коливань керуючого впливу під час виконання агрозасобом робочого руху є низькочастотним (рис. 3). Основний спектр дисперсій цього параметра зосереджений в діапазоні частот $0 \dots 2 \text{ с}^{-1}$, що відповідає частотам $0 \dots 0,32 \text{ Гц}$. Середнє квадратичне відхилення керуючого впливу дорівнює $\pm 1200 \text{ Н}$. Практично в такому ж діапазоні частот сконцентрована і дисперсія коливань вихідного параметру, тобто курсового кута φ агрозасобу (рис. 3). Стандарт коливань цього параметру дорівнює $\pm 0,014 \text{ рад}$

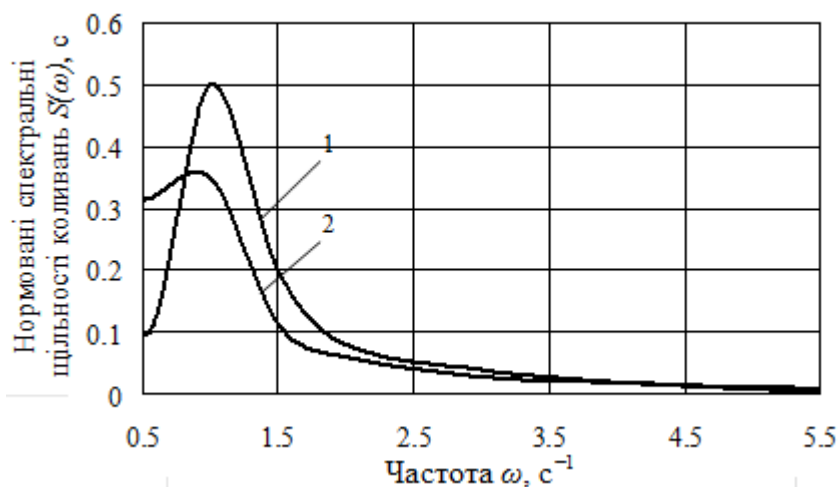


Рис. 3. Нормовані спектральні щільності коливань дотичної сили тяги (1) агрозасобу та його курсового кута (2)

Подальший розрахунок експериментальної амплітудно-частотної характеристики ширококолійного агрозасобу і її порівняння з теоретичною (рис. 4) показав, що в робочому діапазоні частот

(0...2) с^{-1} розбіжність між коливаннями вхідного і вихідного сигналів не перевищує 15%.

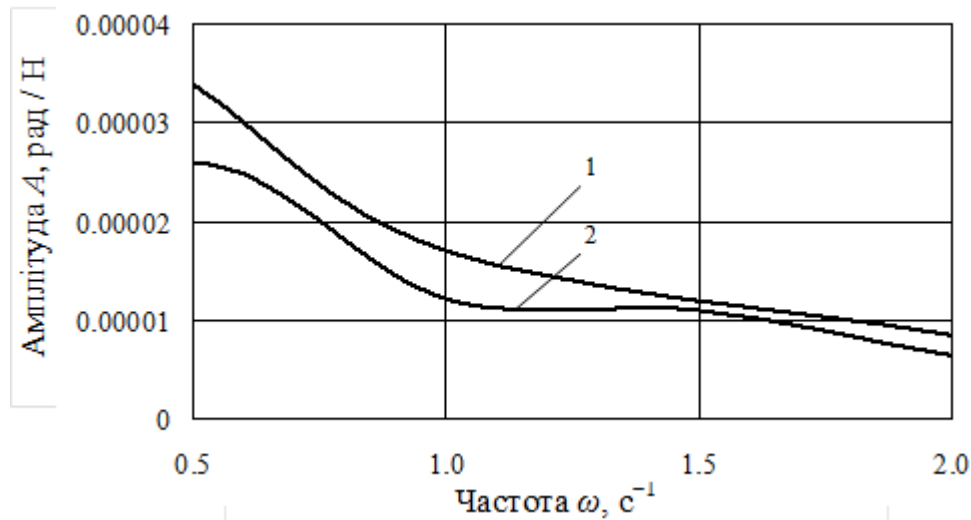


Рис. 4. Теоретична (1) та експериментальна (2) амплітудно-частотні характеристики коливань курсового кута φ при відпрацюванні агрозасобом в складі боронувального агрегату керуючого впливу

Результат кількісної оцінки даних характеристик показав, що за F-критерієм Фішера нуль-гіпотеза про рівність порівнювальних дисперсій ($1,57 \text{ с}^2$ і $1,67 \text{ с}^2$) не відхиляється як на статичному рівні значущості 0,05, так і рівні 0,01.

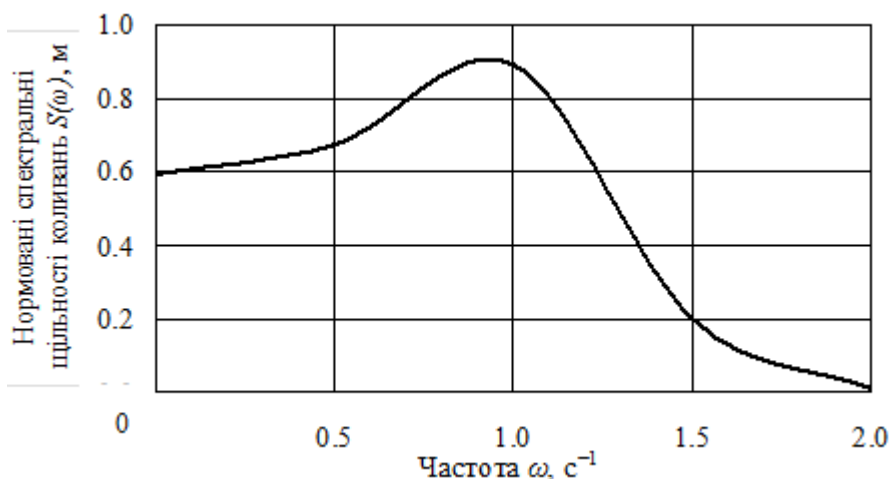


Рис. 5. Нормовані спектральні щільності коливань лінійного поперечного зміщення x_s агрозасобу

Коливання поперечного зміщення спеціалізованого ширококоліяного агрозасобу в складі боронувального агрегату під час виконання ним робочого руху також є низькочастотними (рис. 5). Основний спектр дисперсій зосереджений в діапазоні частот $0...2 \text{ с}^{-1}$. Стандарт коливань цього параметру дорівнює $\pm 0,05 \text{ м}$.

Розрахунок експериментальної амплітудно-частотної характеристики за (1) і її порівняння з теоретичною показав (рис. 6),

що в робочому діапазоні частот ($0 \dots 2 \text{ с}^{-1}$) коливань вхідного сигналу найбільше розходження теоретичних і натурних даних не перевищує 15%.

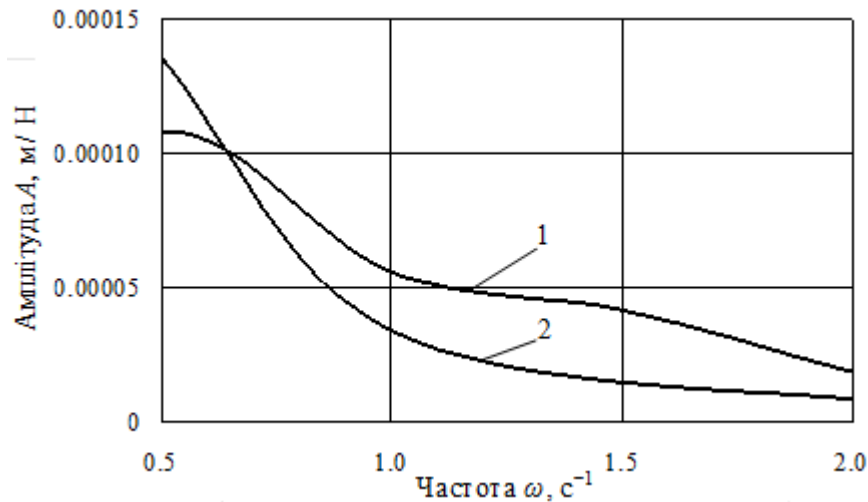


Рис. 6. Теоретична (1) та експериментальна (2) амплітудно-частотні характеристики коливань лінійного поперечного зміщення X_s при відпрацюванні агрозасобом в складі боронувального агрегату керуючого впливу

За даними вимірювання характеристик нерівностей поздовжнього профілю слідів постійної технологічної колії був отриманий графік нормованої спектральної щільності (рис. 7).

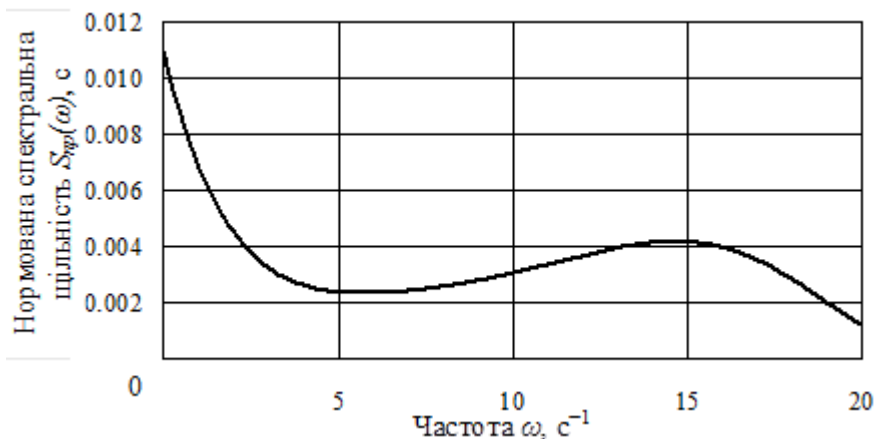


Рис. 7. Нормована спектральна щільність нерівностей поздовжнього профілю слідів постійної технологічної колії за часовим аргументом

З аналізу рис. 7 випливає, що робочий діапазон частот коливань нерівностей профілю слідів постійної технологічної колії становить $0 \dots 20 \text{ с}^{-1}$ (або $0 \dots 3,2 \text{ Гц}$). Цей частотний діапазон і використано при перевірці математичної моделі динаміки вертикальних коливань ширококоліїного агрозасобу у вертикальній площині.

Співставлення теоретичної $S_{Ta}(\omega)$ та експериментальної $S_{Ea}(\omega)$ нормованих спектральних щільностей вертикальних коливань остова

агрозасобу показує (рис. 8), що обидва процеси характеризуються приблизно однаковим характером зміни частотного діапазону.

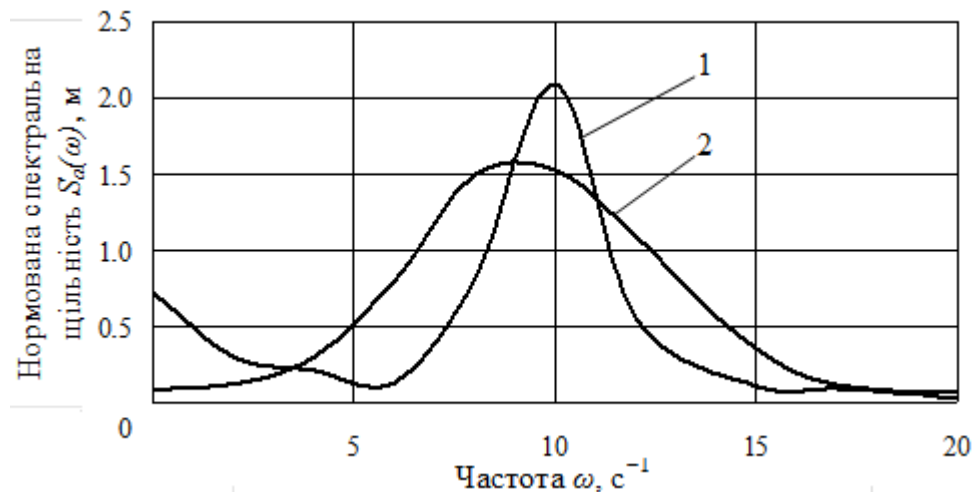


Рис. 8. Теоретична (1) та експериментальна (2) нормовані спектральні щільності вертикальних коливань остова агрозасобу

Різниця в максимальній теоретичній дисперсії (див. рис. 8), яка припадає на $\omega_T = 10 \text{ с}^{-1}$, і експериментальній $\omega_T = 9 \text{ с}^{-1}$, становить 1 с^{-1} . Як показала перевірка нуль-гіпотези про рівність теоретичної дисперсії $D_{Ta} = 1,21 \text{ см}^2$ і експериментальної $D_{Ta} = 1,56 \text{ см}^2$, то згідно F-критерію Фішера вона не відхиляється на статичних рівнях значущості 0,05 і 0,01.

Задовільний збіг вищевикладених теоретичних та експериментальних результатів, а також позитивний результат перевірки математичних моделей вертикальних та горизонтальних коливань агрозасобу на адекватність вказує на можливість їх подальшого використання для вирішення наукових та практичних задач.

Висновки. Таким чином, проведені дослідження підтверджують той факт, що математичне моделювання функціонування спеціалізованих ширококолієних агрозасобів мостового типу з використанням положень теорії автоматичного регулювання динамічних систем достатньо ефективно піддається перевірці на адекватність. Водночас для експериментальної реєстрації таких параметрів агрозасобу, як характеристики його курсового кута та вертикальних переміщень і прискорень достатньо мобільного комунікатора на базі Android з вбудованими в нього датчиками акселерометра і додатка Accelerometer Meter.

Список використаних джерел.

1. Investigation of technological properties of wide span tractors for controlled traffic farming / V. Bulgakov et al. *Engineering for rural development*. 2017. Vol. 16. P. 303–308. DOI: 10.22616/ERDev2017.16.N060.



2. Study of effectiveness of controlled traffic farming system and wide span self-propelled gantry-type machine / V. Bulgakov et al. *Research in Agricultural Engineering*. 2018 (1). Vol. 64. P. 1–7. DOI:10.17221/19/2017-rae.
3. Bulgakov V., Kuvachov V., Olt J. Theoretical study on power performance of agricultural gantry systems. *"Intelligent Manufacturing & Automation"* : Proceedings of the 30th International DAAAM Symposium. 2019. Vol. 30, № 1. P. 0167–0175. DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.022.
4. Улексин В. А. Мостовое земледелие: монография. Днепропетровск: Пороги, 2008. 224 с.
5. Надикто В. Т. Основи наукових досліджень: підручник. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2017. 268 с.
6. Theory of vertical oscillations and dynamic stability of combined tractor-implement unit / V. Bulgakov et al. *Agronomy Research*. 2016. Vol. 14, № 3. P. 689–710.
7. Theory of motion controllability of a wheel machine-tractor aggregate / V. Adamchuk et al. *Agricultural science and practice*. 2016. Vol. 3, № 2. P. 3–10. DOI: 10.15407/agrisp3.02.003.
8. Theoretical investigation of turning ability of machine and tractor aggregate on basis of ploughing and intertilling wheeled tractor / V. Bulgakov et al. *Engineering for Rural Development*. 2016. Vol. 2016-January. P. 1077–1084.
9. Theoretical consideration of the controllability indicator of machine-tractor unit movement / V. Kyurchev et al. *Acta Technologica Agriculturae*. 2017. Vol. 20, № 1. P. 11–18. DOI: 10.1515/ata-2017-0003.
10. Исследование управляемости движения машинно-тракторного агрегата / В. Т. Надикто и др. *Научни известия «Scientific technical union of mechanical engineering»*. 2015. Vol. 3, № 17. P. 90–93.
11. Надикто В. Т., Генев О. І., Мітков В. Б. Методики та результати перевірки математичних моделей МТА на адекватність. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2005. Вип. 27. С. 28–35.
12. Кюрчев В. М., Надикто В. Т. Математичне моделювання функціонування машинно-тракторних агрегатів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2010. Вип. 10, т. 7: *Моделювання технологічних процесів в АПК*: матеріали міжнар. наук.-практ. конференції. С. 3-9.
13. Надикто В. Т. Методологія розробки математичної моделі МТА і перевірки її на адекватність. *Академік П.М. Василенко - яскравий погляд у майбутнє*. Київ, 2012. С. 406–418.
14. The study of movement of the wide span tractor-based field machine unit with power method of its control / V. Bulgakov et al. *Acta*



Technologica Agriculturae. 2018. Vol. 4. P. 163–168. DOI: 10.2478/ata-2018-0029.

15. Study into movement of wide span tractors (vehicles) used in controlled traffic farming / V. Adamchuk et al. *Proceedings of the 28th DAAAM International symposium on intelligent manufacturing and automation*. 2017. P. 0199–0208.

16. Кувачов В. П., Кюрчев В. М., Надикто В. Т. Методика та результати оцінки нерівностей профілю ґрунтового-дорожніх фонів за допомогою ЕОМ. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2008. Вип. 8, т. 6. С. 28–34.

МЕТОДОЛОГІЯ ПЕРЕВІРКИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ АГРОМОСТОВИХ СИСТЕМ НА АДЕКВАТНІСТЬ

Кувачов В. П., Мітков В. Б., Ігнат'єв Є. І., Аюбов А. М.

Анотація

В статті проведено апробацію методології перевірки на адекватність результатів математичного моделювання функціонування спеціалізованих ширококолієних агрозасобів мостового типу з використанням положень теорії автоматичного регулювання динамічних систем.

Перевірку математичних моделей горизонтальних і вертикальних коливань спеціалізованого ширококолієного агрозасобу на адекватність здійснено шляхом порівняння теоретичних та експериментальних амплітудно-частотних характеристик коливань курсового його кута і поперечного зміщення, а також теоретичної і експериментальної нормованих спектральних щільностей вертикальних коливань його остова (як вихідних величин) при відпрацюванні ним вхідних збурюючих впливів.

Результатом кількісного оцінювання досліджуваних характеристик встановлено, що за F-критерієм Фішера нуль-гіпотеза про рівність порівнювальних дисперсій вихідних величин не відхиляється.

Задовільний збіг теоретичних та експериментальних результатів, а також позитивний результат перевірки математичних моделей вертикальних та горизонтальних коливань агрозасобу на адекватність вказує на можливість їх подальшого використання для вирішення наукових та практичних задач.

Ключові слова: ширококолієний агрозасіб, математичне моделювання, частотні характеристики, спектральна щільність, адекватність.

МЕТОДОЛОГІЯ ПРОВЕРКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АГРОМОСТОВЫХ СИСТЕМ НА АДЕКВАТНОСТЬ

Кувачев В. П., Митков В. Б., Игнат'ев Е. И., Аюбов А. М.

Аннотация

В статье проведена апробация методологии проверки на адекватность результатов математического моделирования функционирования специализированных ширококолейных агросредств мостового типа с использованием положений теории автоматического регулирования динамических систем.



Проверку математических моделей горизонтальных и вертикальных колебаний специализированного ширококолейного агросредства на адекватность осуществлено путем сравнения теоретических и экспериментальных амплитудно-частотных характеристик колебаний его курсового угла и поперечного смещения, а также теоретической и экспериментальной нормированных спектральных плотностей вертикальных колебаний его остова (как исходных величин) при отработке им входных возмущающих воздействий.

Результатом количественной оценки исследуемых характеристик установлено, что согласно F-критерию Фишера ноль-гипотеза о равенстве сравниваемых дисперсий выходных величин не отклоняется.

Удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных результатов, а также положительный результат проверки математических моделей вертикальных и горизонтальных колебаний агросредства на адекватность указывает на возможность их дальнейшего использования для решения научных и практических задач.

Ключевые слова: мостовое агросредство, математическое моделирование, частотные характеристики, спектральная плотность, адекватность.

VERIFICATION OF MATHEMATICAL MODELS FUNCTIONING OF AGRICULTURAL SYSTEMS ON ADEQUACY Kuvachov V., Mitkov V., Ihnatiev Ye., Aiubov A.

Summary

The article methodology for checking adequacy of the results mathematical modeling functioning agricultural gantry systems for purposes using provisions of the theory automatic control dynamic systems are tested.

For experimental registration of such parameters a agricultural gantry system, such as the characteristics of changes in its heading angle and vertical displacements and accelerations, an Android mobile communicator with built-in accelerometer sensors and Accelerometer Meter applications was used.

The mathematical model of horizontal vibrations agricultural gantry system was checked for adequacy by comparing the theoretical and experimental amplitude-frequency characteristics of the oscillations its heading angle and lateral displacement (as initial values) when working out the input control action by it. The result of this check showed that in the operating frequency range $(0...2) s^{-1}$, the difference between the oscillations of the input and output signals does not exceed 15%.

A comparison of the theoretical and experimental normalized spectral densities of vertical vibrations of the skeleton agricultural gantry system use showed that both processes are characterized by approximately the same nature of the change in the frequency range. The difference in maximum theoretical and experimental dispersion is $1 s^{-1}$.

As a result of a quantitative assessment of these studied characteristics, it was found that, according to the Fisher F-criterion, the zero hypothesis that the compared variances of the output variables are equal does not deviate both at the static significance level of 0.05 and 0.01.

The satisfactory coincidence of the above theoretical and experimental results, as well as the positive result of checking the mathematical models vertical and horizontal vibrations of the agricultural gantry systems for purposes adequacy, indicates the possibility of their further use for solving scientific and practical problems.

Key words: agricultural gantry system, mathematical modeling, frequency characteristics, spectral density, adequacy.