

Кожушко А.П.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ РУХУ КОЛІСНИХ ТРАКТОРІВ З АГРЕГАТАМИ ЗМІННОЇ МАСИ

Сьогодні колісні трактори використовуються в агропромисловому комплексі держави під час як виконання транспортних робіт, так і технологічних робіт. Це зумовлено загальною функціональністю цих транспортних засобів. До складу транспортних робіт у будь-якому фермерському угідді входить перевезення рідких вантажів тракторними цистернами. Ці цистерни мають від'ємність порівняно з автомобільними – це відсутність внутрішніх перегородок усередині цистерни. Така конструктивна особливість зумовлена меншою транспортною швидкістю тракторних перевезень, ніж автомобільних. З постійним нарощуванням продуктивності перевезень рідких вантажів виникає проблема, а саме – виникнення суттєвих власних коливань рідини, що впливає на експлуатацію під час руху колісного трактора та цистерни. Рух рідини в тракторній цистерні призводить до поздовжньої та поперечної нестабільності, що сприяє підвищенню як енергетичних витрат, так і аварійних ситуацій (відбувається вплив на вібрацію, керованість і стійкість транспортного засобу, підвищення динамічної навантаженості ходової системи тощо). Метою роботи є представлення методики експериментального дослідження визначення динамічних характеристик руху колісного трактора з агрегатами змінної маси (причипними та напівпричипними тракторними цистернами). Окрім того, виконання спектрального аналізу отриманих експериментальних даних, який надасть інформацію щодо наявності резонансних частот під час руху трактора. Під час вирішення поставленої мети використовувалась методика, яка передбачала проведення експериментальних досліджень визначення динамічних характеристик під час виконання транспортної роботи перевезення рідких вантажів причипними та напівпричипними тракторними цистернами. Для фіксації експериментальних даних використовувався вимірювально-реєстраційний комплекс, до складу якого входили чотири акселерометри Freescale Semiconductor моделі MMA7260QT та безконтактний (радіолокаційний) датчик для вимірювання зміни дійсної швидкості транспортного засобу. Як результат, отримано дані експериментального дослідження, на основі яких стає можливим підтвердження теоретичних викладок автора з попередніх робіт, а саме: встановлення значень резонансних частот транспортного засобу під час аналізу вільних коливань трактора з агрегатами змінної маси. Практична значення роботи полягає в підтвердженні теоретичних з експериментальними значеннями резонансних частот транспортного засобу. Резонансні частоти з експериментальних даних лінійних прискорень (вертикальних і горизонтальних) отримано шляхом використання спектрального аналізу та побудови амплітудно-частотної та фазочастотної характеристик.

Ключові слова: колісний трактор, цистерна, коливання рідини, експериментальні дослідження, спектральний аналіз.

Постановка проблеми. Використання колісних тракторів під час виконання транспортних робіт в агропромисловому комплексі держави досить популярне. Це зумовлено багатофункціональністю виконання сільськогосподарських робіт. До складу транспортних робіт у будь-якому фермерському угідді входить перевезення рідких вантажів тракторними цистернами. Ці цистерни мають від'ємність порівняно з автомобільними – це відсутність внутрішніх перегородок усередині цистерни. Така конструктивна особливість зумовлена меншою транспортною швидкістю тракторних перевезень, ніж автомобільних. Але сьогодні в умовах постійного нарощування продуктив-

ності тракторних агрегатів транспортна швидкість підвищується [1], що призводить до функціональної нестабільності транспортного засобу. Тому вирішення проблематики функціональної стабільності колісних тракторів під час виконання транспортних робіт з агрегатами змінної маси є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Є низка наукових робіт [2–6], які присвячені дослідженню характеристик робіт колісного трактора з агрегатами змінної маси. Зокрема, в роботах [2; 3] автори вирішують питання керованості та стійкості засобу з агрегатами змінною масою, додаткові енергетичні втрати таких

транспортних засобів [4], питання стабілізації роботи такого агрегату шляхом створення моделі визначення швидкості руху [5; 6]. Отже, з упевненістю можна стверджувати, що дослідження руху колісного трактора з агрегатами змінної маси є доцільним.

Розгляд динамічних характеристик у контексті побудови лінеаризованої та нелінійної математичної моделі руху трактора з цистерною наведено в роботах [7–9]. Але отримані теоретичні залежності повинні бути підтверджені експериментальним шляхом. Це твердження зумовлює мету роботи.

Постановка завдання. Метою статті є представлення методики експериментального дослідження визначення динамічних характеристик руху колісного трактора з агрегатами змінної маси (причіпними (П) та напівпричіпними (НП) тракторними цистернами). Окрім того, виконання спектрального аналізу отриманих експериментальних даних, який надасть інформацію щодо наявності резонансних частот під час руху трактора.

Виклад основного матеріалу дослідження. Будь-які наукові виклади, які покликані вирішувати різного роду проблеми та завдання, повинні підтверджуватися експериментальними дослідженнями. В роботі [7] наведено динамічний аналіз колісного трактора під час виконання транспортної роботи з перевезення тракторних цистерн із рідиною. Динамічний аналіз ґрунтується на побудові лінеаризованої математичної моделі власних повздовжніх коливань, яка дає змогу оцінити наявність резонансних частот та аналізувати відповідні форми пов'язаних коливань транспортного засобу. На основі цього аналізу виділено групи вимушених коливань, наявність резонансних частот яких необхідно підтвердити експериментальним шляхом.

Об'єктами випробувань виступають (рис. 1):

– трактор John Deere 8310 (США) з номінальною потужністю двигуна внутрішнього згоряння 310 к.с. (228 кВт) в зчпці з П-цистерною МЖТ-16 (Білорусь) вантажопідйомністю 16 т;

– трактор ХТЗ-150К (Україна) з номінальною потужністю двигуна внутрішнього згоряння 129 к.с. (94,9 кВт) в зчпці з НП-цистерною МЖТ-10 (Білорусь) вантажопідйомністю 10 т.

Експериментальні дослідження проводилися у фермерських угіддях Харківської області, де як полігон обиралася ділянка укоченої ґрунтової дороги, яка мала довжину 200 м, а її нахил становив не більше 2%.

Порядок проведення експериментальних досліджень:

1. Зовнішнім оглядом перевіряється технічний стан колісних машин.

2. На колісний трактор встановлюється вимірювальна апаратура.

3. Встановлена вимірювальна апаратура проходить процес калібрування та перевіряється її працездатність після фіксування затискачами на елементи агрегатів трактора.

4. Виконуються пробні заїзди, які надають інформацію щодо необхідності додаткового калібрування вимірювальної апаратури.

5. На перехідних режимах руху (розгоні та гальмуванні) та на сталому режимі руху відбувається фіксація експериментальних даних.

6. До колісного трактора чіпляється П-цистерна та на неї встановлюється вимірювальна апаратура.

7. Повторюється пункт 4. Заїзди виконуються з порожньою цистерною.

8. МТА разом із цистерною (яка заповнюється рідиною до рівня 1,7 м для П-цистерни) транспортується до місця проведення експериментів.

9. Після фіксації результатів із повністю заповненою цистерною проводиться злив 15% рідини (тобто для П-цистерни до 1,45 м), після чого повторюється операція 5.

10. Наступним кроком також проводиться злив 20% рідини (для П-цистерни до 1,15 м), після чого повторюється операція 5.

11. На завершальній стадії випробувань проводиться тестовий заїзд із порожньою цистерною для виконання порівняння результатів з операцією № 7, що дасть змогу стверджувати про похибку приладів.

Потім наведений порядок повторюється, тільки замість НП-цистерни в зчпці з трактором виступає НП-цистерна, яка має максимальну висоту заповнення рідиною 1,6 м.

Експериментальні заїзди для пунктів випробувань № 6, 7 та 8 проводилися не менше трьох разів згідно з ГОСТ 7057-2003 [10], 24055-2016 [11], СОУ-П УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого 71.2-37-046043090-017:2015 [12].

Вимірювально-реєстраційний комплекс (рис. 2, 3) складається з комплексу «ВДВММ 4-001» Паспорт 4-001.000.00 ПС [13] (4-ох акселерометрів Freescale Semiconductor моделі ММА7260QT) та з безконтактного (радіолокаційного) датчика [14], який призначено для фіксації дійсної швидкості транспортного засобу. На рис. 4 показано приклад отриманих експериментальних даних лінійних прискорень остова трактора.



а



б

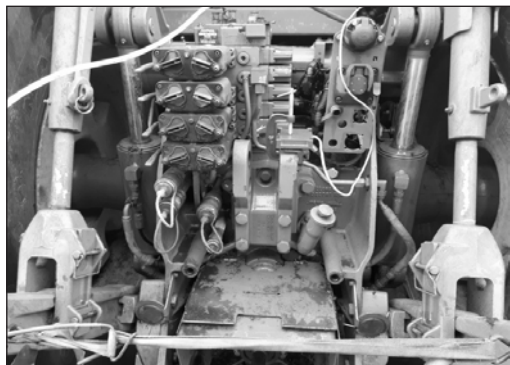
Рис. 1. Об'єкти експериментальних досліджень:
а – John Deere + МЖТ-16; б – ХТЗ-150К + МЖТ-10



а



б



в



г

Рис. 2. Розміщення датчиків на тракторі John Deere з МЖТ-16: а – акселерометр на передньому мосту; б – акселерометр на задній частині остова; в – акселерометр спереду цистерни; г – безконтактний датчик

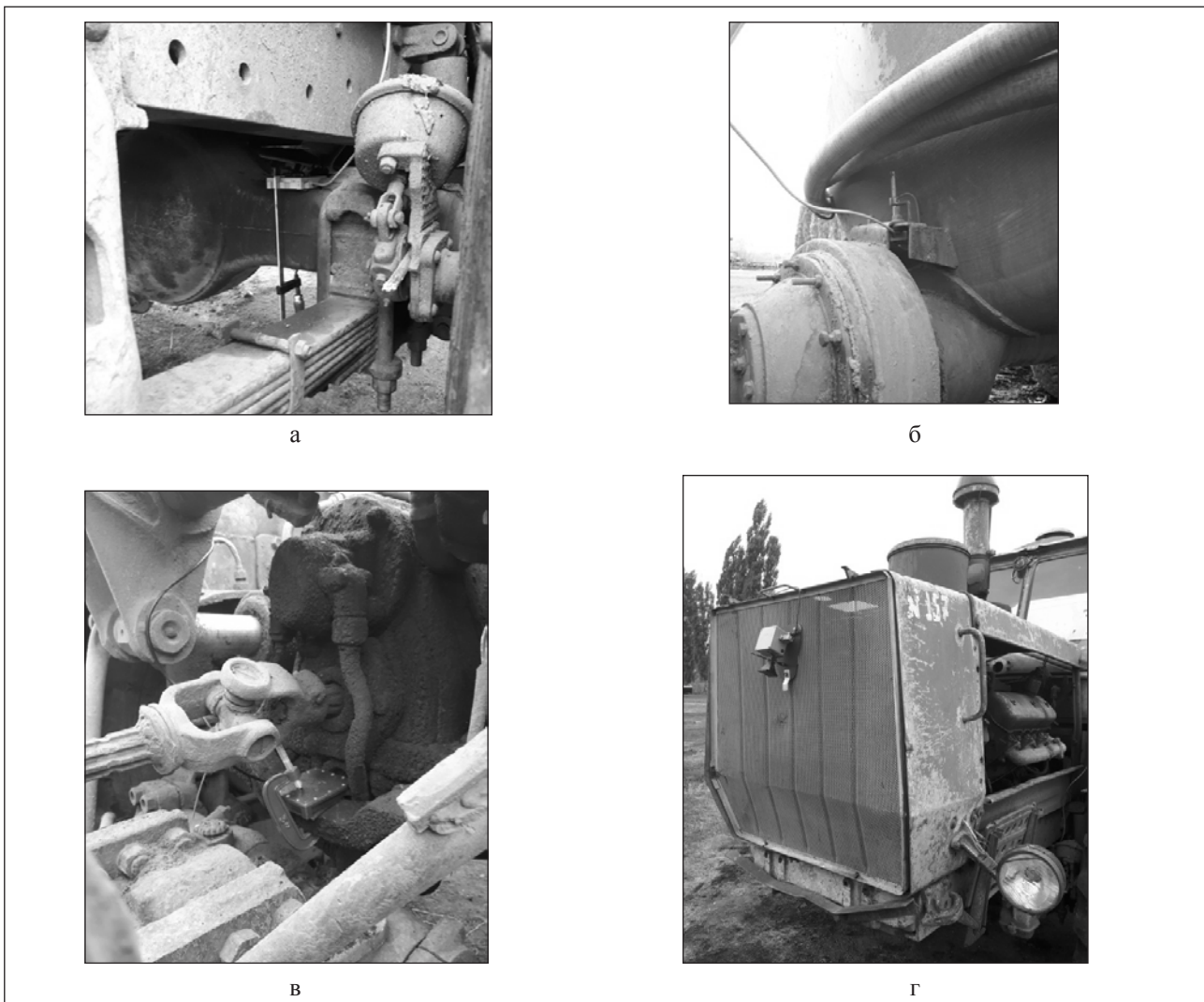


Рис. 3. Розміщення датчиків на тракторі ХТЗ-150К з МЖТ-10: а – акселерометр на передньому мосту; б – акселерометр на задній частині остова; в – акселерометр спереду цистерни; г – безконтактний датчик

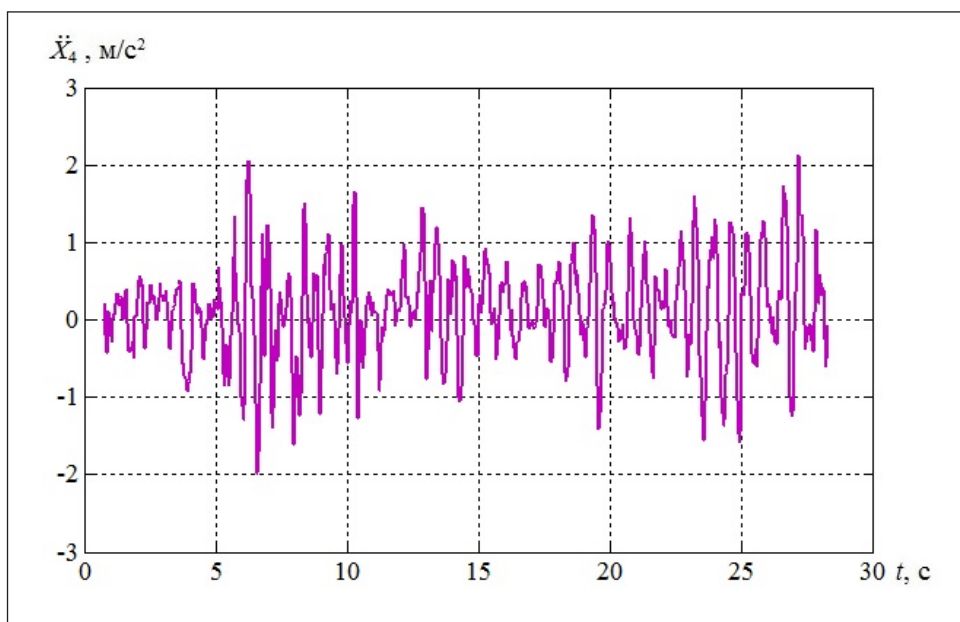


Рис. 4. Приклад отриманих лінійних прискорень під час випробувань

Наступним кроком виконується спектральний аналіз отриманих експериментальних даних. В основі спектрального аналізу сигналів лежить перетворення Фур'є (яке базується на рядах Фур'є), що призначено для роботи з різними видами сигналів (періодичних і неперіодичних).

Під час дослідження спектра періодичного (або неперіодичного) сигналу можливе представлення результатів за допомогою різних характеристик. У табл. 1 зведено характеристики спектрів.

На рис. 5 представлено амплітудно-частотну характеристику (далі – АЧХ) лінійних прискорень у вертикальній та горизонтальній площинах руху з повністю заповненою цистерною.

Проводячи аналіз АЧХ, звернемо увагу на піки коливальних спектра, адже їхні величини характеризують енергетичність системи на відповідній гармоніці (резонансній частоті). По графічному виду піку (резонансу) можна стверджувати про зосередженість великої частки запасу механічної енергії. Звернемо увагу на те, що резонанси АЧХ (рис. 5) під час дослідження вертикальних прискорень трактора мають більшу амплітуду, що підтверджує висновки [17] щодо теоретичного визначення енергетичності системи.

Оскільки АЧХ також вказує на величину резонансних частот коливальної системи, то доцільно провести порівняльний аналіз між результатами динамічного аналізу [7] та частотами, які отримано під час експериментальних досліджень.

На основі принципу динамічного аналізу встановлено резонансні частоти для John Deere з МЖТ-16. В табл. 2 наведено низькі та найнижчі частоти, тому що вони є небезпечними для самопочуття оператора-водія.

Як видно з рис. 6, 7, розбіжності між значеннями амплітуди значні, що і не дивно, адже вони характеризують енергетичність системи в різних площинах. А ось збіжність значень горизонтальних і вертикальних резонансних частот не перевищує 2,6%. Порівнюючи експериментальні та теоретичні значення величин резонансних частот, зауважимо, що збіжність не перевищує 1,7%; це дає змогу стверджувати про коректність складання лінійної моделі трактора з цистерною [7].

АЧХ неможливо розглядати без фазочастотної характеристики (далі – ФЧХ), то на рис. 8, 9 наведено ФЧХ горизонтальних і вертикальних прискорень.

Згідно з рис. 8, 9, графіки ФЧХ представлено у вигляді криволінійних залежностей, які підпорядковані зміні різноманітних інтегрованих частот зі змінним фазовим відношенням. Отримані ФЧХ описують зсув фаз гармонік, як видно, цей зсув не має явного характеру, тому з впевненістю можна стверджувати, що фазовий зсув є коротко-строківим.

Спектральний аналіз показав, що, окрім власних (резонансних) і вимушених частот, в експериментальних сигналах, отриманих з акселерометрів, присутні перешкоди (зашумлений сигнал); для боротьби з ними необхідно використовувати так звані фільтри нижніх частот.

Висновки. У статті наведено вимірювальний комплекс, який дає змогу фіксувати в реальному часі динаміку руху колісного трактора з агрегатами змінної маси. Представлено порядок проведення експериментального дослідження з вимірюванням прискорень на перехідних і сталих рухів.

Таблиця 1

Характеристики спектрів [15; 16]

Характеристика	Періодичний сигнал	Неперіодичний сигнал
Комплексний спектр	$f(n\omega) = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cdot e^{-jn\omega x} dx$	$f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot e^{-2\pi j\omega x} dx$
Амплітудний спектр	$ A_n = \frac{1}{2} \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$	$A(\omega) = f(j\omega) = \sqrt{(\text{Re}[f(j\omega)])^2 + (\text{Im}[f(j\omega)])^2}$
Фазовий спектр	$\varphi_n = \text{arctg}\left(-\frac{b_n}{a_n}\right)$	$\varphi(j\omega) = \text{arctg}\left(\frac{\text{Im}[f(j\omega)]}{\text{Re}[f(j\omega)]}\right)$

Таблиця 2

Значення резонансних частот John Deere з МЖТ-16 (із заповненою)

№ гармоніки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Частота, Гц	0	0,15	0,3	0,53	0,77	0,83	0,91	1,06	1,14	1,46	1,51	1,72

На основі спектрального аналізу побудовано АЧХ та ФЧХ лінійних прискорень колісного трактора з агрегатом змінної маси. На основі порівняння теоретичних (згідно з принципами динамічного

аналізу лінійної системи [7]) з експериментальними значеннями резонансних частот встановлено, що збіжність не перевищує 1,7%, що дає змогу стверджувати про коректність складання лінійної моделі.

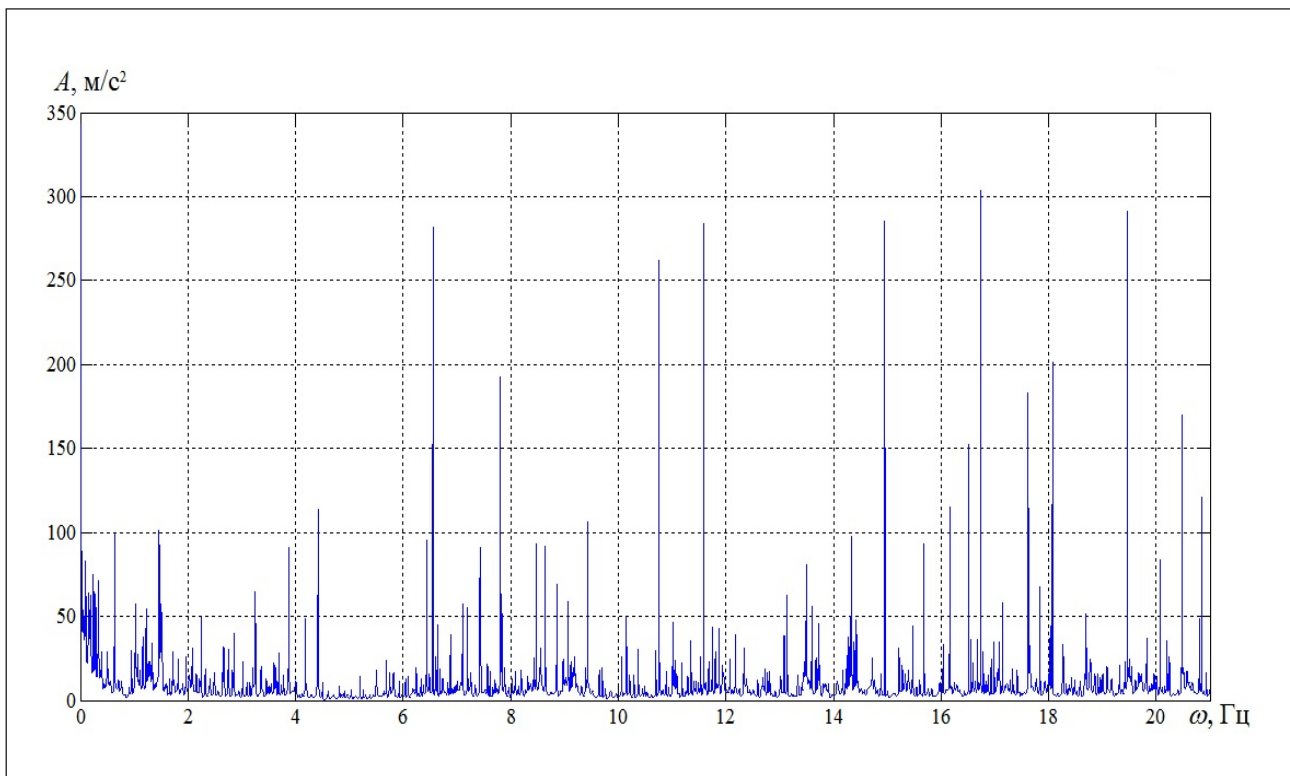
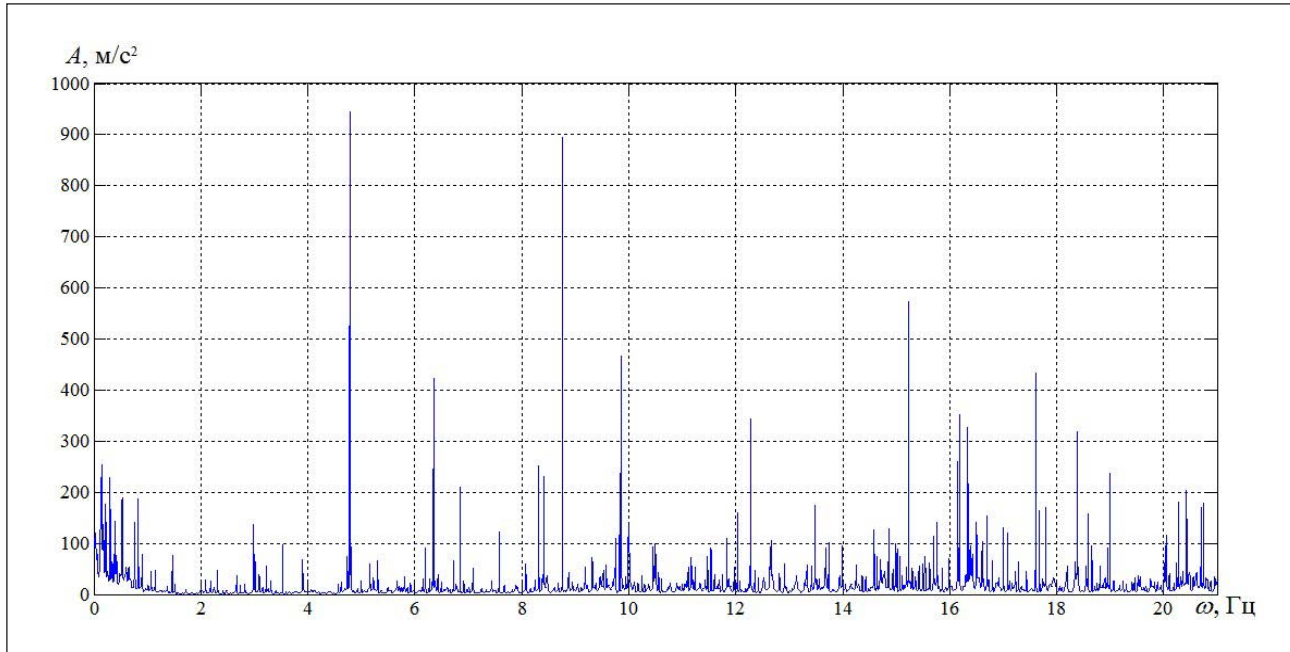


Рис. 5. АЧХ лінійних прискорень трактора з агрегатом змінної маси: а – горизонтальних; б – вертикальних

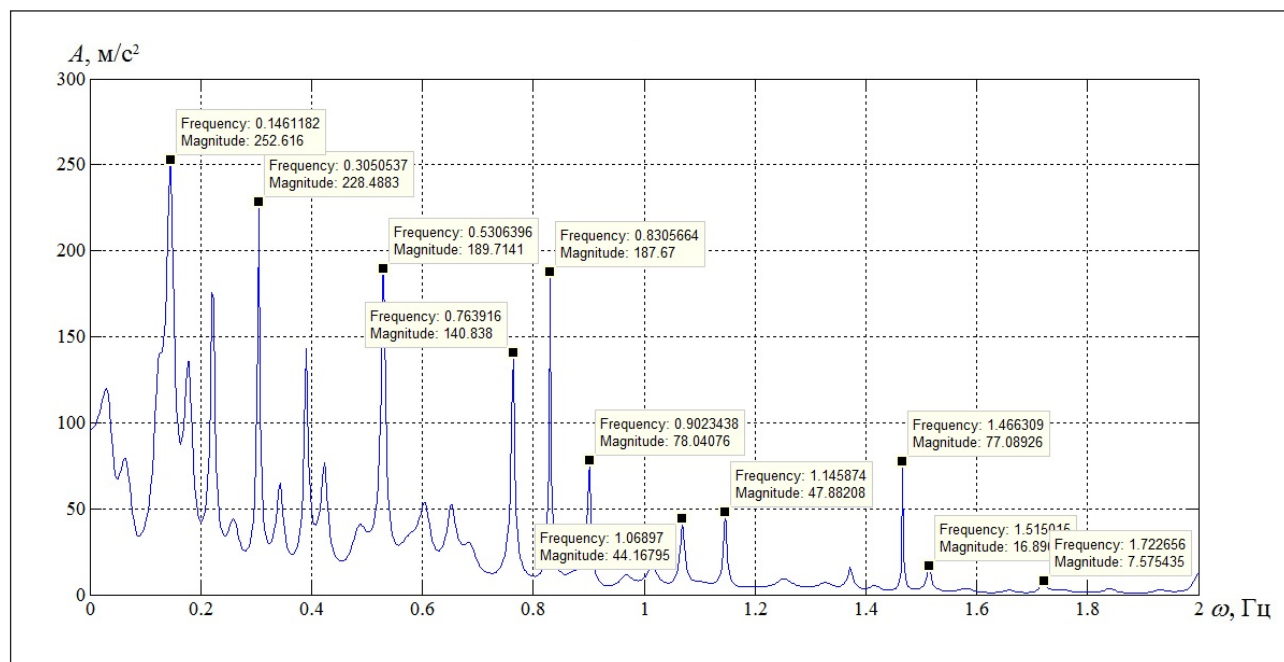


Рис. 6. АЧХ низьких і найнижчих частот горизонтальних прискорень, отриманих під час експериментального дослідження John Deere + МЖТ-16 (із заповненою): Frequency – частота; Magnitude – амплітуда

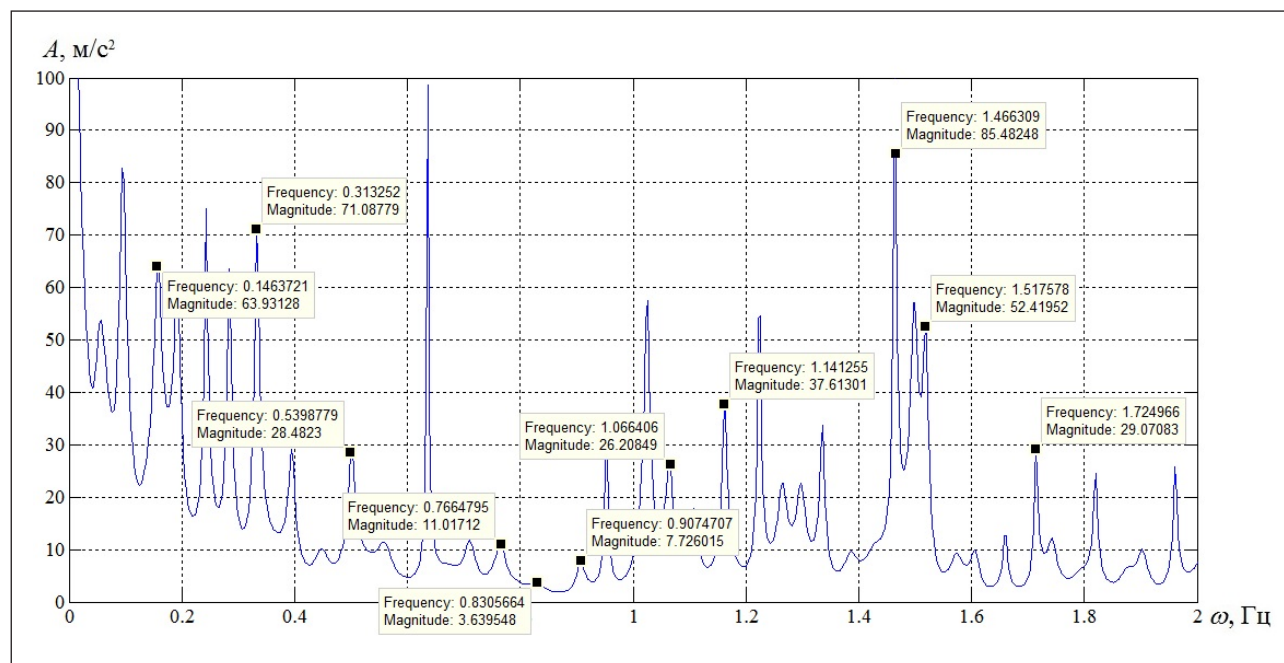


Рис. 7. АЧХ низьких і найнижчих частот вертикальних прискорень, отриманих під час експериментального дослідження John Deere + МЖТ-16 (із заповненою): Frequency – частота; Magnitude – амплітуда

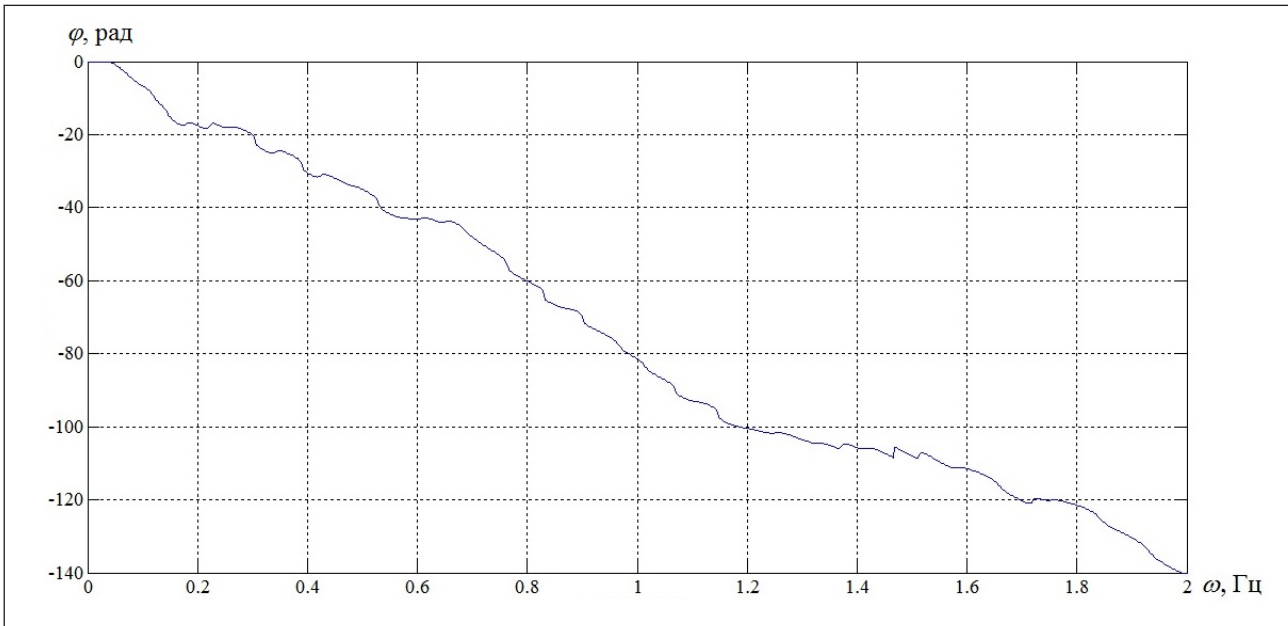


Рис. 8. ФЧХ горизонтальних прискорень у зоні низьких і найнижчих частот

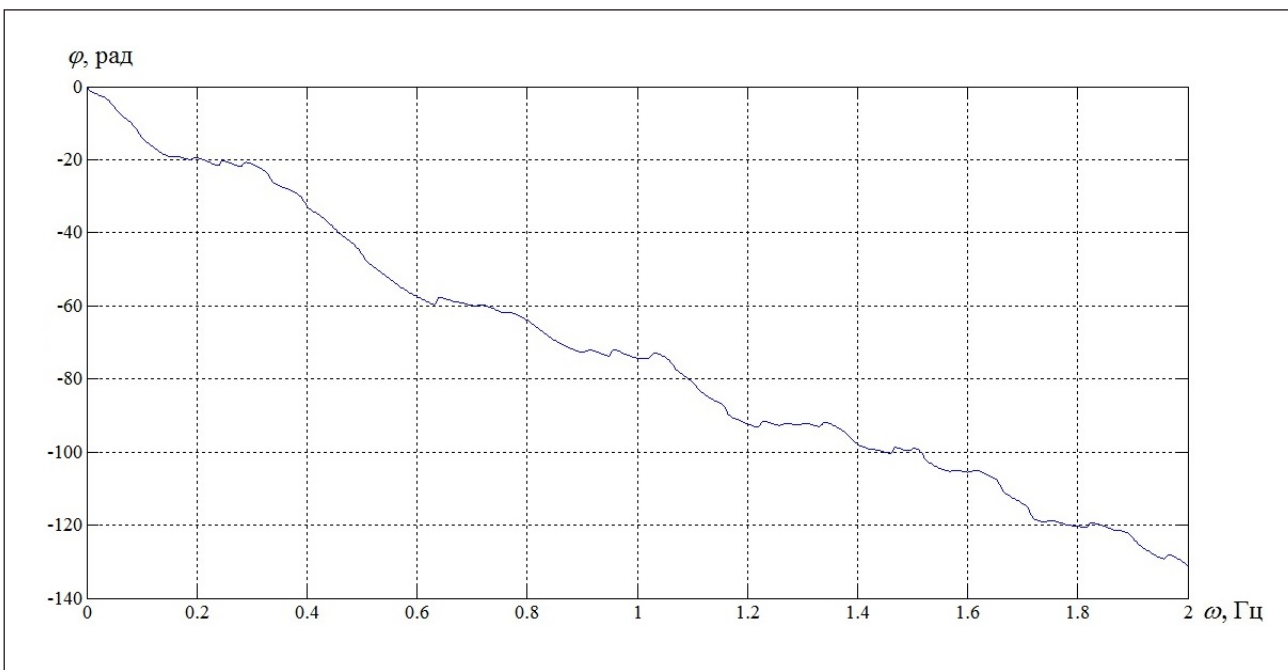


Рис. 9. ФЧХ вертикальних прискорень у зоні низьких і найнижчих частот

Список літератури:

1. Надикто В.Т., Кюрчев В.М., Аюбов А.М., Масалабов В.М., Кістечок О.Д. Перспективи зростання продуктивності роботи машинно-тракторного агрегату. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2018. № 8 (2). С. 1–12. DOI: 10.31388/2220-8674-2018-2-1.
2. Лебедев А.Т., Артёмов М.П., Шуляк М.Л., Лебедев І.А. Забезпечення стійкості і керованості сільськогосподарських агрегатів із змінною масою. *Технічні науки : зб. наук. пр. ВНАУ*. 2015. Вип. 1 (89). С. 57–62.
3. Колесник І.В., Шуляк М.Л., Шевченко І.О. Визначення керованості транспортного агрегату залежно від зміни маси вантажу. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2015. № 160. С. 255–260.
4. Шуляк М.Л. Підвищення ефективності експлуатації енергонасиченого трактора в агрегаті з сільськогосподарською машиною змінної маси. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2014. № 148. С. 280–286.
5. Леженкин А.Н., Григоренко С.М. Моделирование процесса движения агрегата с переменной массой. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2012. № 2 (2). С. 80–86.
6. Кравченко А.П., Ноженко Е.С., Вершина Г.А., Пилатов А.Ю. Общая методика минимизации функции расхода топлива машинотракторного агрегата с прицепом переменной массы. *Вісник СевНТУ*. 2013. № 143. С. 215–219.
7. Кожушко А.П., Григор'єв О.Л. Моделивання пов'язаних коливань колісного трактора та цистерни з рідиною на прямому шляху зі складним рельєфом. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2018. № 27 (1303). С. 34–61.
8. Кожушко А.П. Дослідження плавності руху машинно-тракторного агрегату з перемінною масою при виконанні транспортної роботи. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2019. № 15. С. 50–57. DOI: 10.30977/VEIT.2019.15.0.50.
9. Кожушко А.П., Кравченко С.С., Мамонтов А.Г., Болжаларський О.О. Шляхи зменшення впливу поздовжніх коливань транспортного засобу з агрегатами перемінної маси. *Двигатели внутреннего сгорания*. 2019. № 2. С. 59–65. DOI: 10.20998/0419-8719.2019.2.10.
10. ДСТУ ГОСТ 7057-2003 Трактори сільськогосподарські. Методи випробувань (ГОСТ 7057-2001, IDT). Київ, 2003. 15 с.
11. ГОСТ 24055-2016 Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно-технологической оценки. Межгосударственный стандарт, 2018. 27 с.
12. СОУ-П УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого 71.2-37-046043090-017:2015 «Сільськогосподарська техніка. Визначення тягових показників тракторів. Метод парціальних прискорень». Дослідницьке : Укр НДІПВТ, 2015. 10 с.
13. Бондаренко А.І., Кожушко А.П., Мітцель М.О., Самородов В.Б. Методика експериментального дослідження процесу розгону трактора Fendt 936 Varіо при виконанні польових та транспортних робіт. *Вісник Житомирського державного технічного університету*. 2014. № 2 (69). С. 48–55.
14. Шуляк М.Л., Лебедев А.Т., Артёмов М.П., Мальцев В.П. Експериментальне дослідження алгоритму керування режимами роботи транспортного агрегату. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2017. № 3. С. 38–42.
15. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях : в 2-х т. / пер. с франц. Москва : Мир, 1983. Т. 1. 312 с.
16. Тропченко А.Ю., Тропченко А.А. Цифровая обработка сигналов. Методы предварительной обработки: учебное пособие по дисциплине «Теоретическая информатика». Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2009. 100 с.
17. Кожушко А.П. Енергетичність системи машинно-тракторного агрегату з перемінною масою за сталого руху. *Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки»*. 2019. Т. 30 (69). Ч. 2. № 3. С. 161–166. DOI: 10.32838/2663-5941/2019.3-2/27.

Kozhushko A.P. SPECTRAL ANALYSIS OF THE EXPERIMENTAL DATA MOVEMENTS TRACTORS WITH VARIABLE MASS UNITS

Nowadays, wheeled tractors are used in the state agro-industrial complex, both in the performance of transport and technological work. This is due to the general functionality of these vehicles. Transportation work in any farming households includes transporting liquid cargoes by tractor tanks. Tractor tanks have a distinctive feature compared to automobile ones – the absence of internal partitions inside the tank. Such design feature is caused by the lower transport speed of tractor transport movement than automobile. With the constant increase of the productivity of liquid cargo transportation there is a problem of the onset of

significant own liquid oscillations which affect the operation during the movement of a wheeled tractor with a tank. The motion of liquid in the tractor tank causes longitudinal and lateral instability, and increases both energy costs and emergency situations (there is an effect on the vibration, controllability and stability of the vehicle, increasing the dynamic loading of the undercarriage, and etc.). The main objective is to present the experimental research methodology for determining the dynamic characteristics of the movement of a wheeled tractor with variable mass units (trailed and semi-trailer tractor tanks) and in addition, the spectral analysis of the obtained experimental data, which will provide information on the presence of resonant frequencies during tractor movement. Solving the problem, we have used a methodology for carrying out experimental studies to determine the dynamic characteristics during performing transport work on liquid cargoes transportation by trailer and semi-trailer tractor tanks. The measurement and registration complex was used to record the experimental data. It included four MMA7260QT Freescale Semiconductor accelerometers and a contactless (radar) sensor for measuring change in the actual speed of the vehicle. As a result, data from an experimental study have been obtained. Based on them it becomes possible to confirm the author's theoretical analysis from previous works, such as the determination of the values of the resonant frequencies of a vehicle in the analysis of free oscillations of a tractor with variable mass units. The practical importance of the study is to confirm the theoretical by experimental values of the resonant frequencies of the vehicle. Resonant frequencies of the experimental data of linear accelerations (vertical and horizontal) have been obtained by using spectral analysis and constructing the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics.

Key words: wheeled tractor, tank, fluid oscillations, experimental research, spectral analysis.