

А.П. КОЖУШКО, Б.І. КАЛЬЧЕНКО, О.Г. ЯНЧИК, Г.О. КОБЕЦЬ

ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ПІДРЕСО́РЮВАННЯ КАБІНИ КОЛІСНОГО ТРАКТОРА

Проаналізовано вплив впровадження системи підресорювання кабіни колісного трактора на показники плавності ходу колісного трактора при русі по різноманітним дорожнім покриттям. Як результат отримано залежності зміни вертикальних прискорень на сидінні оператора-водія трактора ХТЗ-160У від швидкості руху (частоти зовнішнього впливу) по різноманітним покриттям. Практична значимість роботи полягає у наданні результатів оцінки впливу коливань на організм оператора-водія при експлуатації вітчизняного трактора шляхом впровадження системи підресорювання кабіни.

Ключові слова: колісний трактор, система підресорювання, коливання, кабіна, математична модель, пневматична опора, деформація.

A. KOZHUSHKO, B. KALCHENKO, A. YANCHUK, H. KOBETS

JUSTIFICATION OF THE IMPLEMENTATION OF THE WHEELED TRACTOR CAB SUSPENSION SYSTEM

Today, there is a significant mechanization of agriculture, which is designed to facilitate the work of the driver-operator and prevent the driver-operators from getting health problems during the performance of agricultural work. Therefore, such processes become a priority, because the increase in the energy content of tractors, the increase in speed during the execution of technological and transport operations, the variety of machines and tools aggregated by the tractor - inevitably lead to an increase in the impact of vibrations on the body of the operator-driver. In order to create real competition, domestic manufacturers need to implement modern solutions, which is not possible without high-quality cooperation with scientists. Therefore, the material of this article aims to analyze the implementation of the suspension system of the cab of a wheeled tractor on the indicators of smoothness of the wheeled tractor (vertical accelerations on the seat) when moving on various road surfaces. When solving the set goal, a technique was used that involved the use of the D'Alembert principle, i.e., in the calculation model of the system from the massive elements, all available bonds were conditionally broken, then the action of the discarded bonds was compensated by the reactions of the bonds. As a result, the dependence of the change in vertical accelerations on the seat of the driver-operator of the KhTZ-160U tractor on the speed of movement (frequency of external influence) when moving on surfaces was obtained. The practical significance of the work lies in the provision of positive evaluation results regarding the reduction of the impact of vibrations on the body of the operator-driver for the domestic tractor industry through the introduction of the cabin suspension system.

Key words: wheeled tractor, suspension system, oscillations, cab, mathematical model, pneumatic support, deformation.

Вступ. З метою зменшення інтенсивності ручної праці, підвищення техніко-експлуатаційних показників колісної сільськогосподарської техніки та впровадження оптимізаційних заходів задля своєчасного вирішення окреслених задач відбувається модернізація механічних робіт в сільському господарстві. Така модернізація направлена перш за все на полегшення роботи оператора-водія, але вона остаточно не позбавляє його від отримання проблем зі здоров'ям в ході виконання сільськогосподарських робіт.

Оператори сільськогосподарських машин піддаються впливу низькочастотних та високочастотних коливань, які комплексно діють на все тіло. При дослідженні впливу коливальних дій на оператора-водія необхідно відмітити, що внутрішнім джерелом коливань (зазвичай високочастотних) є робота силових агрегатів, а зовнішнім – рух по складному мікропрофілю дорожньої поверхні та/або дією агрегатів.

Людське тіло має складну механічну систему, яке складається з безлічі лінійних та нелінійних складових. Ступінь шкідливого впливу коливань на організм людини залежить від частоти (рис. 1), тривалості та напрямку дії, а також індивідуальних особливостей людини.

У випадку співпадіння частот вимушених коливань колісного трактора з власною частотою будь-якого органа оператора-водія виникає дислокація внутрішніх органів, навіть при відносно невеликій амплітуді коливань. Спектр частот коливань колісного трактора

різноманітний та варіюється від низьких 1...100 Гц (коливання рульового колеса, поздовжньо-кутові коливання остову трактора, тощо) до середніх частот 100...1000 Гц (коливання в трансмісійній установці трактора) та високих частот 1000...5000 Гц (коливання в двигуні, механічний шум, тощо) [1, 2].

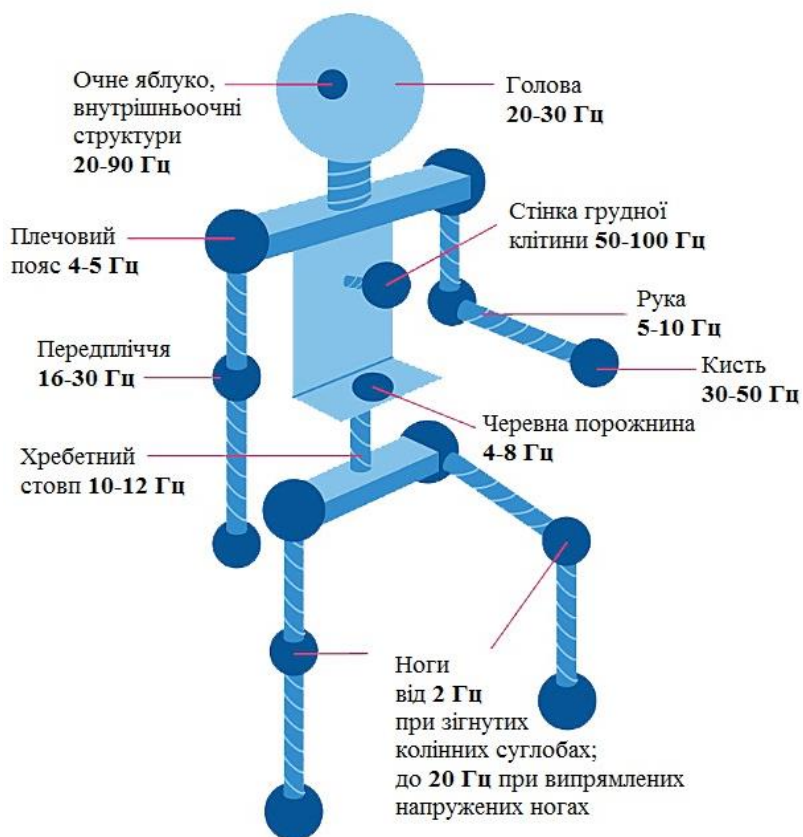


Рис. 1 – Модель коливальної системи людини та резонансні частоти частин тіла

Тому матеріали даної роботи будуть ґрунтуватися на аналізі низькочастотних коливань (дослідження плавності ходу), в подальшому плануються роботи з дослідження високочастотних коливань, які виникають в колісному тракторі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує низька наукових робіт [3 – 6], присвячених розкриттю питань пов'язаних з дослідженням впливу вертикальних коливань, які утворюються в колісному тракторі, при виконанні технологічних та транспортних операцій. Роботи [3 – 6] є класичними, адже досліджують плавність ходу колісних тракторів при наявності систем підресорювання переднього моста та сидіння оператора-водія.

Наукові роботи, які аналізують роботу системи підресорювання кабіни трактора мають задачу надати можливості зниження коливального навантаження на оператора-водія в межах, що накладаються основним обмеженням, тобто доступним простором для руху кабіни. Так в роботі [7] представлено модель оптимізації параметрів, яка описує характеристики пасивної нелінійної підвіски кабіни. Метод оптимізації засновано на еволюційному алгоритмі, метою якого є мінімізація загального коливального навантаження на оператора-водія.

В роботі [8] автори запропонували для підвищення комфорту їзди сільськогосподарського трактора модель гідропневматичної підвіски з напівактивним керуванням підвіскою кабіни. Розроблено оптимальний алгоритм керування напівактивною підвіскою трактора з використанням лінійно-квадратичної функції Гауса. Комфорт їзди (згідно з ISO 2631) оцінюється шляхом порівняння трактора з пасивною підвіскою кабіни та з гідропневматичною підвіскою з напівактивним керуванням.

Автори [9] з метою підвищення комфорту водіння при русі по нерівностям дороги та

Коливальний процес несе негативний вплив на оператора-водія: стрес, зменшення психомоторної працездатності, погіршення емоційної складової та розумової здатності – це заважає якісному виконанню робочих операцій та може призвести до зниження рівня функціонального стану оператора-водія.

На підставі вище зазначеного слід акцентувати увагу на тому, що шлях зменшення впливу коливань на організм оператора-водія колісного трактора є пріоритетним напрямком наукових досліджень, особливо з урахуванням збільшення енергонасиченості тракторів, підвищення швидкостей при виконанні технологічних та транспортних операцій, різноманіття машин та знарядь, що агрегуються трактором.

ізоляції кабіни трактора від коливань, використовують систему активної підвіски з гідравлічним приводом. У цьому дослідженні система активної підвіски трактора керувалася контролером IT2FOFPID для мінімізації коливань при русі по нерівностям, що передаються в кабіну водія.

В роботі [10] проведено дослідження, метою якого було дослідження системи активної підвіски кабіни, що встановлена на телескопічному навантажувачі, на процес ефективного зниження вібрації всього тіла і підвищення комфорту. Аналіз проводився згідно з ISO 5008 з увімкненою та вимкненою системою підвіски кабіни і показав, що система підвіски була ефективною для зниження вібрації всього тіла, але не впливала на відчуття комфорту операторами-водіями.

В роботі [11] досліджено зміну вібрації при експлуатації трактора за різних умов відповідно до типу підвіски кабіни, а також визначався вплив різних методів підресорювання кабіни на ці вібрації. Встановлено, що у тракторі із системою гідропневматичної підвіски кабіни рівень вібрації під час руху було зменшено приблизно на 7,1% в порівнянні з трактором, який використовував пасивне керування.

Зважаючи на проведений аналіз, виникає доцільність проведення дослідження з впровадження підресореної кабіни на вітчизняні трактори серії ХТЗ.

Мета дослідження, постановка задачі. Метою роботи є поліпшення показників плавності ходу колісного трактора за рахунок впровадження системи підресорювання кабіни.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- виконати аналіз систем підресорювання, які використовуються в сучасних колісних тракторах;
- сформулювати математичну модель трактора для оцінки показників плавності ходу;
- виконати аналіз результатів моделювання при впровадженні системи підресорювання кабіни в трактор ХТЗ-160У.

Аналіз систем підресорювання сучасних колісних тракторів. Підвіска трактора може зменшити нерівномірність опорної реакції та здатна забезпечувати економічно ефективну, безпечну та комфортну роботу на всьому діапазоні швидкостей – від технологічних до транспортних. Тому до підвісок тракторів висуваються наступні вимоги:

1. Підвищення плавності ходу, керованості та стійкості руху трактора з метою забезпечення належного комфорту.
2. Зниження динамічних навантажень на елементи конструкції трактора та на навісні знаряддя.
3. Забезпечення рівномірності тягового зусилля за рахунок постійного контакту коліс із ґрунтом.
4. Високий економічний ефект як від робіт, пов'язаних з обробкою ґрунту, так і на транспортних роботах.

Сьогодні більшість тракторів із системами підресорювання обладнано підвісками виключно передніх коліс. Серійний випуск тракторів із системами підресорювання переднього мосту розпочато ще у 60-х роках ХХ століття. У закордонних тракторів, зокрема, застосовується *система підресорювання переднього моста* однією поперечною напівеліптичною ресорою, на листових ресорах, свічкових пружинних ресорах, тощо. Головними недоліками описаних вище схем підресорювання переднього моста є лінійна (або близька до неї) пружна характеристика, неможливість регулювання пружних та демпфуючих властивостей підвісок та неможливість блокування підвіски.

В даний час всі найбільші світові виробники тракторів (Deere & Co., Fendt, New Holland, Case, Deutz-Fahr, Massey Ferguson, Valtra Vaumet, Claas, AGCO, McCormick, Hurlimann, SAME, Lamborghini) використовують підвіски з гідропневматичними або пневматичними пружними елементами. Підвіски виготовляються керованими та блокованими, з можливістю автоматичної підтримки заданої висоти остова машини над опорною поверхнею незалежно від навантаження на передній міст.

Розглянемо типові схеми напрямних пристроїв підвісок, які використовуються виробниками тракторів.



Рис. 2 – Передня вісь TLS II підвіски John Deere

Більшість виробників тракторів при створенні підвіски переднього мосту приділяють увагу системам підресорювання з цільною балкою.



Рис. 3 – Підвіска TERRAGLIDE трактора New Holland



Рис. 4 – Підвіска Zahnradfabric

Важільна паралелограмна підвіска передніх коліс трактора випускається фірмами Deere & Co (рис. 2). Гідропневматичні ресори з протитиском розміщені між остовом машини і нижніми важелями паралелограмних механізмів.

Паралелограмний напрямний механізм має порівняно просту кінематику, але при його використанні унеможливується використання цільної балки переднього моста, що ускладнює конструкцію передачі тягового зусилля до коліс.

Підвіска з поперечною реактивною тягою випускається фірмами New Holland (рис. 3) та Zahnradfabric (рис. 4).

Поздовжній важіль, який закріплений на остові трактора, передає тягове зусилля від коліс на остів в поздовжньому напрямку. Шарнір, що з'єднує поздовжній важіль з остовом, дозволяє важелю обертатися щодо точки кріплення у вертикальній площині. Поперечна тяга (тяга Панара) рухомо з'єднує міст трактора з його остовом, обмежуючи тим самим переміщення моста в поперечному напрямку. Дві ресори сприймають вертикальні навантаження, що діють між остовом машини і мостом.

До плюсів системи підресорювання з поперечною тягою відноситься простота конструктивної схеми, а також те, що шарнір поздовжнього важеля не навантажується крутними моментами від бічних сил на передніх колесах. Недоліками цих підвісок є складна кінематика шарнірів.

Схема, в якій рух переднього моста визначається чотириланковим механізмом, використовується в системах підресорювання виробництва Carraro (рис. 5). Колеса незалежно з'єднані з подвійним важелем, зберігаючи положення трактора при пересіченій місцевості, а гідروпневматична підвіска забезпечує амортизаційний ефект із широкою варіацією навантаг. До плюсів такої системи підресорювання належить її компактність. До мінусів – велика кількість високонавантажених шарнірів.



Рис. 5 – Підвіска IFAS трактора Carraro

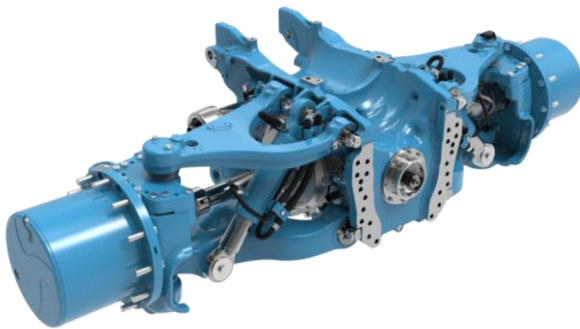


Рис. 6 – Підвіска Spicer 980 Fendt

Також треба відмітити підвіску JCB Fastrac (рис. 7). Усі моделі JCB Fastrac використовують підвіски з гвинтовими пружинами на передніх осях і гідравлічні/газові підвіски з самовирівнюванням на задніх осях, за винятком серії 7000, де використовується гідравлічна/газова установка, як на передній, так і на задній вісі.

На операторів-водіїв тракторів діють сили в трьох площинах – вгору і вниз, збоку в бік, назад і вперед. Розробники системи підресорювання кабіни намагаються обмежити ці рухи, щоб вони найменше впливали на організм людини. В автомобільному світі такі рухи були б зведені до нуля.

Але оператор, повністю позбавлений чуттєвих даних щодо того, як працює його трактор, буде схильний до надмірної самовпевненості. Отже, потрібен певний рівень руху кабіни. Деякі конструктори кабін раніше помилялися, і оператори-водії тракторів скаржилися на заколисування. Крім того, кабіни тракторів створені для забезпечення захисту оператора, і важливо, щоб системи підвіски не шкодили цьому важливому аспекту безпеки.

В основному існує три способи керування рухом, необхідним для гасіння сил, що діють на кабіну, – пружинний, пневматичний та гідравлічний (через газовий акумулятор).

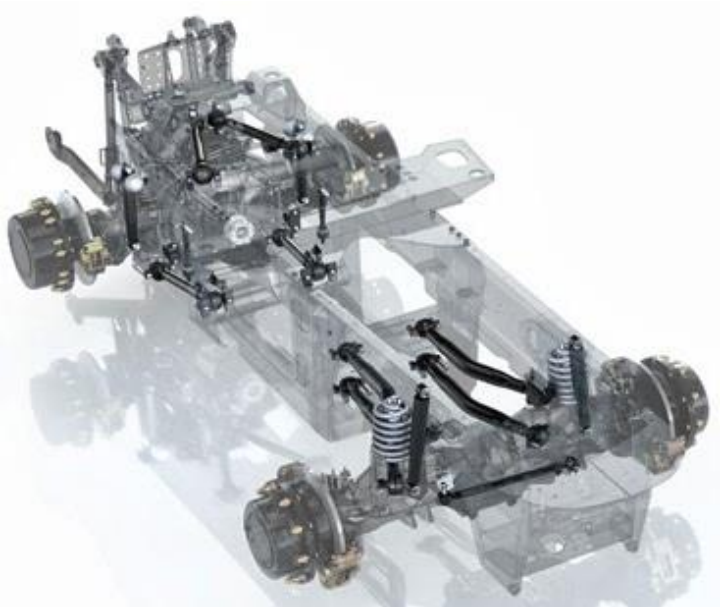


Рис. 7 – Підвіска JCB Fastrac

Прикладом гідравлічної системи підвіски кабіни є варіант HCS (рис. 8) від John Deere. Як і в більшості систем, тільки задня частина кабіни має блоки підвіски – передня частина з'єднана з шасі за допомогою шарнірних підшипників на кожному куті, що забезпечує невеликий поперечний і поздовжній рух.

На відміну від системи колісних тракторів John Deere, кабіна (рис. 9) Claas Arion має пружину підвіски та амортизатори в усіх чотирьох кутах кабіни, а не лише в двох задніх. Цей пристрій, призначений для зменшення не лише вертикального руху, але в поздовжньому русі.

Компанія Valtra розробила напівактивну систему підвіски кабіни – AutoComfort (рис. 10), яка автоматично адаптується до різних умов руху. AutoComfort складається з амортизаторів з електронним керуванням, датчика положення та блоку керування, підключеного до трактора через шину CAN, а також пневматичних пружин для підтримки сталої висоти незалежно від навантаження. Реагуючи на дані руху від датчика положення та інформацію про умови руху від шини CAN, система здатна регулювати швидкість амортизації кожні дві мілісекунди.

Кабіна Fendt VisioPlus (рис. 11) має також напівактивну систему підвіски кабіни, яка працює за схожим принципом, як і AutoComfort.



Рис. 8 – Підвіска кабіни John Deere серія 8R



Рис. 9 – Кабіна Renault TZ трактора Claas



Рис. 10 – Напівактивна підвіски кабіни AutoComfort



Рис. 11 – Підвіска кабіни Fendt 500 Vario

Система підресорювання сидіння оператора-водія розміщується безпосередньо між сидінням водія і кабіною оператора, що безпосередньо впливає на комфорт водія і знижує рівень коливань, що впливає на нього. Сидіння із системою підресорювання – не складна та недорога конструкція, що дозволило впровадити її майже у всіх сучасних сільськогосподарських тракторах. Тип системи підресорювання може бути механічним, пневматичним, гідравлічним, гідропневматичним або комбінацією цих систем.

Зважаючи на вище окреслене необхідно відзначити, що вітчизняне тракторобудування також пішло шляхом впровадження активних систем підресорювання в конструкцію колісних

тракторів. Так, на тракторі ХТЗ-160У впроваджено гідропневматичну систему підресорювання переднього мосту та пневматичну систему підресорювання сидіння. В подальшому доцільно провести дослідження з впровадження системи підресорювання кабіни.

Складання математичної моделі вертикальних коливань колісного трактора. Для формування математичної моделі руху колісного трактора з урахуванням системи підресорювання кабіни необхідно на першому етапі побудувати розрахункову схему, яка враховуватиме вертикальні та поздовжньо-кутові переміщення від основних складових сил, що діють при русі. Колісний трактор, який досліджується, симетричний щодо поздовжньої вертикальної площини. Це дозволяє використати плоску розрахункову схему, де пружні зв'язки по бортах поєднуються, а маса умовно розділяється на підресорену та непідресорену. Сформуємо підґрунтя для моделювання коливальних процесів при русі колісного трактора ХТЗ-160У.

Математична модель формується за допомогою методики, яка використовує принципи Даламбера [3, 6, 12] та впроваджує ряд допущень і спрощень. В основу цього принципу покладено наступну особливість: у розрахунковій моделі системи, що досліджується, від масивних елементів умовно розриваються всі наявні зв'язки. Тоді дія відкинутих зв'язків компенсується реакціями зв'язків.



Рис. 12 – Колісний трактор ХТЗ-160У

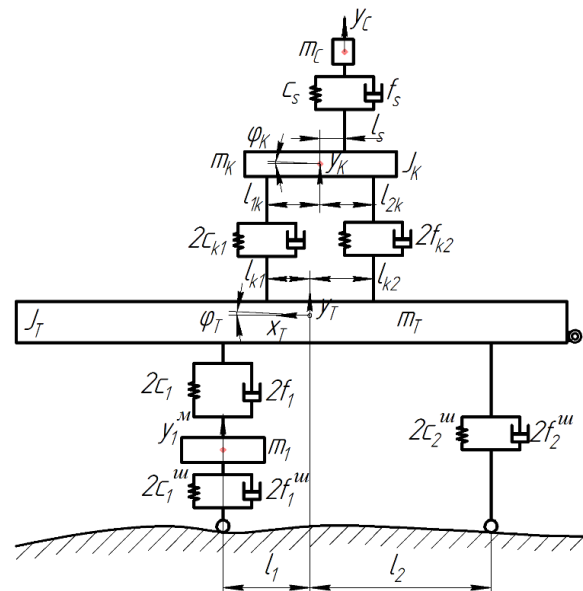


Рис. 13 – Коливальна схема трактора

З метою надання наочних результатів дослідження в математичній моделі використовується функція зовнішнього впливу дорожнього покриття на русії колісного трактора, що описується за синусоїдальним законом. В роботі розглядається 4 види дорожнього покриття, які наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристика дорожнього покриття

Варіант покриття	Висота нерівності A , м	Довжина хвилі a , м	Формульна реалізація
1	0,008	2	$y_{gr1} = A \cdot \sin(2\pi \cdot x_T / a);$ $y_{gr2} = A \cdot \sin(2\pi(x_T - (l_1 + l_2)) / a).$
2	0,02	3	
3	0,03	0,45	
4	0,04	0,7	

Відзначимо, що моделювання гідропневматичної підвіски переднього моста трактора ХТЗ-160У базується на роботі [13]. Визначення пружних характеристик колісних шин на матеріалах [14]. При моделюванні використовувалась пневматична опора (рис. 14) виробництва Blacktech, її пружна характеристика наведена на рис. 15.



Рис. 14 – Пневмоопора підвіски кабіни

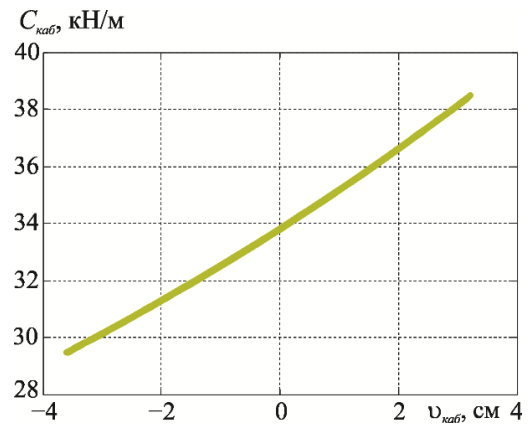


Рис. 15 – Залежність жорсткості пневмоопори підвіски кабіни від її деформації

Результати моделювання. На рис. 16 побудовано амплітудно-частотну характеристику вертикальних прискорень на сидінні оператора-водія при русі по різних покриттях з урахуванням та без врахування підресорювання кабіни. Відмітимо, що впровадження системи підресорювання кабіни дає змогу зменшувати амплітуду вертикальних прискорень в зоні дії резонансних частот. Так, аналізуючи отриманий результат помітно зменшується амплітуда прискорень в зоні резонансних частот коливань остова трактора (~2,3 Гц), що пов'язано зі «зближенням» резонансних частот кабіни (~2,0 Гц) та остова. Зменшення амплітуди коливань в зоні резонансної частоти коливань остова при русі по 1 варіанту покриття складає 32,5%; по 2 варіанті – 17,2%; по 3 варіанті – 11,7%; по 4 варіанті – 13,6%.

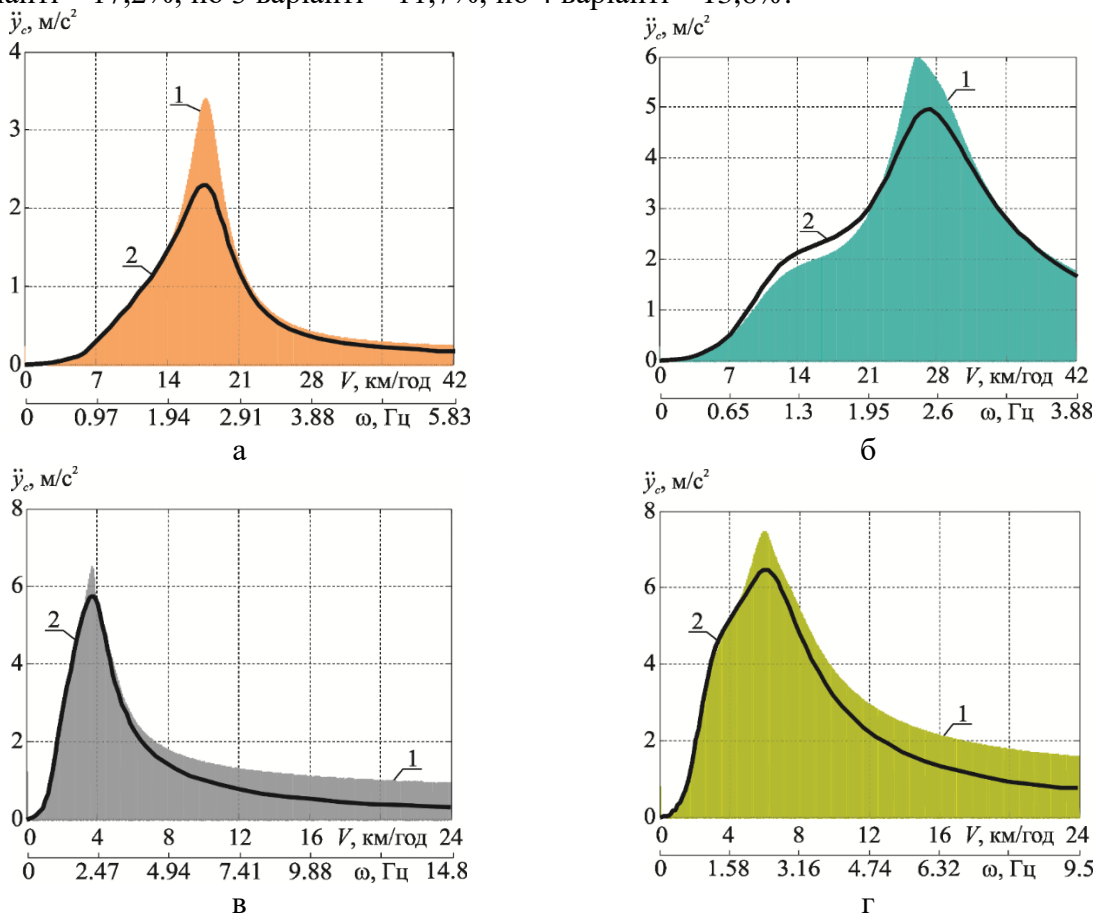


Рис. 16 – Залежність вертикальних прискорень на сидінні оператора-водія трактора ХТЗ-160У від швидкості руху (частоти зовнішнього впливу) при русі по покриттях: а – 1 варіант; б – 2 варіант; в – 3 варіант; г – 4 варіант;

1 – без урахування підресорювання кабіни; 2 – з урахуванням підресорювання кабіни
 З рис. 16 в, г помітно зменшення вертикальних прискорень на сидінні в 2 рази при максимальних швидкостях руху (24 км/год), а на рис. 16 а, б зменшення при швидкості (42 км/год) складає лише до 5%.

З рис. 16 помітно, що максимальна амплітуда вертикальних прискорень спостерігається на середніх транспортних швидкостях (рис. 16 а, б) та в тягових режимах руху (рис. 16 в, г).

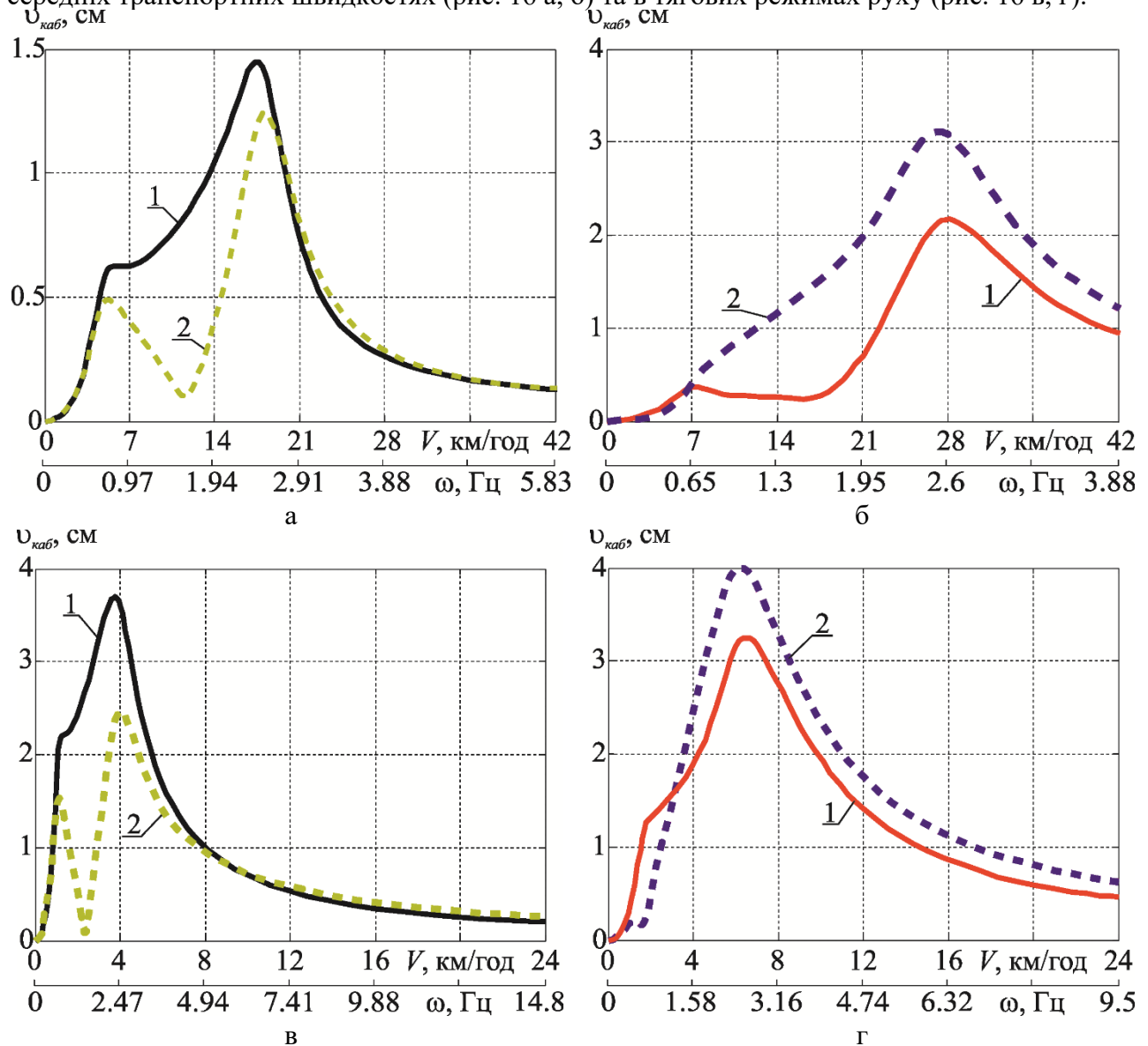


Рис. 17 – Залежність деформації системи підресорювання кабіни трактора ХТЗ-160У від швидкості руху (частоти зовнішнього впливу) при русі по покриттях:

а – 1 варіант; б – 2 варіант; в – 3 варіант; г – 4 варіант;

1 – передніх опор; 2 – задніх опор

З рис. 17 помітно, що максимальна амплітуда деформації пневмоопори кабіни є допустимою.

Висновки. В роботі вирішено задачу зменшення впливу низькочастотних коливань на організм оператора-водія колісного трактора ХТЗ-160У шляхом впровадження системи підресорювання кабіни. Виконано аналіз систем підресорювання в сучасних колісних тракторах (John Deere, New Holland, Fendt, Deutz-Fahr, Valtra, JCB): переднього моста, кабіни та сидіння. Наведено основні складові, які необхідні при формуванні математичної моделі трактора для оцінки показника вертикальних прискорень на сидінні оператора-водія з урахуванням системи підресорювання кабіни. Впровадження системи підресорювання кабіни

дає змогу зменшувати амплітуду вертикальних прискорень в зоні дії резонансної частоти від 11% до 32% залежно від характеристик дорожнього покриття.

Список літератури:

1. ДСТУ ISO 2631-5:2019 Вібрація та удар механічні. Оцінювання впливу загальної вібрації на людину. Частина 5. Метод оцінювання вібрації, яка містить багаторазові ударні імпульси (ISO 2631-5:2018, IDT). ДП «УкрНДНЦ», 2020. (Державний Стандарт України).
2. Кожушко А.П. Експериментальні дослідження ергономічних властивостей колісних тракторів з агрегатами змінної маси. *Автомобильный транспорт*. 2019. № 45. С. 38 – 45. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2019.45.0.38>.
3. Кальченко Б.І., Ребров О.Ю., Мамонтов А.Г., Кожушко А.П., Якунін М.Є. Динаміка руху колісних тракторів : монографія. Харків : Мірошниченко О. А., 2021. 320 с.
4. Kabir M. S. N., Chung S. O., Kim Y. J. [et al.] Measurement and evaluation of whole body vibration of agricultural tractor operator. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2017. № 10(1). P. 248 – 255. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20171001.2113>.
5. Singh A., Samuel S., Singh H., Singh J., Prakash C., Dhahi Y.K. Whole body vibration exposure among the tractor operator during soil tillage operation: an evaluation using ISO 2631-5 standard. *Shock and Vibration*. 2022. Vol. 2022. 8 p. <https://doi.org/10.1155/2022/6412120>.
6. Кальченко Б.І., Ребров О.Ю., Кожушко А.П., Мамонтов А.Г. Плавність руху як складова динаміки трактора : монографія. – Харків: ФОП Панов А.М., 2018. 164 с.
7. Hansson P.-A. Optimization of agricultural tractor cab suspension using the evolution method. *Computers and Electronics in Agriculture*. 1995. № 12(1). P. 35 – 49. [https://doi.org/10.1016/0168-1699\(94\)00036-P](https://doi.org/10.1016/0168-1699(94)00036-P).
8. Sim K., Lee Hw., Yoon J.W., Choi Ch., Hwang S.-H. Effectiveness evaluation of hydro-pneumatic and semi-active cab suspension for the improvement of ride comfort of agricultural tractors. *Journal of Terramechanics*. 2017. № 69. P. 23 – 32. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2016.10.003>.
9. Mohammadikia R., Aliasghary M. Design of an interval type-2 fractional order fuzzy controller for a tractor active suspension system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. № 167. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105049>.
10. Caffaro F., Cremasco M.M., Preti Chr., Cavallo Eu. Ergonomic analysis of the effects of a telehandler's active suspended cab on whole body vibration level and operator comfort. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2016. № 53. P. 19 – 26. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2015.10.009>.
11. Oh J., Chung W.-J., Han H.-W., Kim J.-T., Son G.-H., Park Y.-J. Evaluation of tractor ride vibrations by cab suspension system. *Transactions of the ASABE*. 2020. № 63(5). P. 1465 – 1476. <https://doi.org/10.13031/trans.13795>.
12. Мамонтов А.Г., Кожушко А.П., Ребров О.Ю. Формування математичної моделі динамічної навантаженості ходової системи колісного трактора з напівпричіпним агрегатом. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Сер. Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ». 2019. № 1. С. 29 – 41. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2019.01.04>.
13. Bonan Q., Zeng R., Li X., Yang J. Design and Performance Analysis of the Hydropneumatic Suspension System for a Novel Road-Rail Vehicle. *Applied Sciences* 2021. № 11(5). P. 2221. <https://doi.org/10.3390/app11052221>.
14. Ребров А.Ю. Идентификация сельскохозяйственных тракторных шин численным методом. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Сер. Математичне моделювання в техніці та технологіях. Харків: НТУ «ХПІ». 2015. № 6 (1115). С. 114 – 121.

References (transliterated):

1. DSTU ISO 2631-5:2019 Vibratsiya ta udar mekhanichni. Otsinyuvannya vplyvu zahal'noyi vibratsiyi na lyudynu. Chastyna 5. Metod otsinyuvannya vibratsiyi, yaka mistyt' bahatorazovi udarni impul'sy [Vibration and shock are mechanical. Assessment of the impact of general vibration on a person. Part 5. Method of assessment of vibration containing repeated shock pulses] (ISO 2631-5:2018, IDT). SE "UkrNDNC", 2020. (State Standard of Ukraine).
2. Kozhushko A.P. Eksperymental'ni doslidzhennya erhonomichnykh vlastyvostey kolisnykh traktoriv z ahrehatamy zminnoyi masy [Experimental studies of ergonomic properties of wheeled tractors with variable mass units]. *Avtomobil'nyu transport [Automobile transport]*. 2019. no 45. pp. 38 – 45. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2019.45.0.38>.
3. Kalchenko B.I., Rebrov O.Yu., Mamontov A.G., Kozhushko A.P., Yakunin M. Ye. Dynamika rukhu kolisnykh traktoriv : monohrafiya [Dynamics of movement of wheeled tractors: monograph]. Kharkiv: Miroshnychenko O.A., 2021. 320 p.

4. Kabir M. S. N., Chung S. O., Kim Y. J. [et al.] Measurement and evaluation of whole body vibration of agricultural tractor operator. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2017. no 10(1). pp. 248 – 255. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20171001.2113>.
5. Singh A., Samuel S., Singh H., Singh J., Prakash C., Dhabi Y.K. Whole body vibration exposure among the tractor operator during soil tillage operation: an evaluation using ISO 2631-5 standard. *Shock and Vibration*. 2022. Vol. 2022. 8 p. <https://doi.org/10.1155/2022/6412120>.
6. Kalchenko B.I., Rebrov O.Yu., Kozhushko A.P., Mamontov A.G. *Plavnist' rukhu yak skladova dynamiky traktora : monohrafiya [Smoothness of movement as a component of tractor dynamics: monograph]*. – Kharkiv: FOP Panov A.M., 2018. 164 p.
7. Hansson P.-A. Optimization of agricultural tractor cab suspension using the evolution method. *Computers and Electronics in Agriculture*. 1995. no 12(1). pp. 35 – 49. [https://doi.org/10.1016/0168-1699\(94\)00036-P](https://doi.org/10.1016/0168-1699(94)00036-P).
8. Sim K., Lee Hw., Yoon J.W., Choi Ch., Hwang S.-H. Effectiveness evaluation of hydro-pneumatic and semi-active cab suspension for the improvement of ride comfort of agricultural tractors. *Journal of Terramechanics*. 2017. no 69. pp. 23 – 32. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2016.10.003>.
9. Mohammadikia R., Aliasghary M. Design of an interval type-2 fractional order fuzzy controller for a tractor active suspension system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. no 167. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105049>.
10. Caffaro F., Cremasco M.M., Preti Chr., Cavallo Eu. Ergonomic analysis of the effects of a telehandler's active suspended cab on whole body vibration level and operator comfort. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2016. no 53. pp. 19 – 26. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2015.10.009>.
11. Oh J., Chung W.-J., Han H.-W., Kim J.-T., Son G.-H., Park Y.-J. Evaluation of tractor ride vibrations by cab suspension system. *Transactions of the ASABE*. 2020. no 63(5). pp. 1465 – 1476. <https://doi.org/10.13031/trans.13795>.
12. Mamontov A.G., Kozhushko A.P., Rebrov O.Yu. Formuvannya matematychnoyi modeli dynamichnoyi navantazhenosti khodovoyi systemy kolisnoho traktora z napivprychipnym ahrehatom [Formation of a mathematical model of the dynamic load of the running system of a wheeled tractor with a semi-trailer unit]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Ser: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser: New solutions in modern technologies]. Kharkiv, NTU "KhPI". 2019. no 1. pp. 29 – 41. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2019.01.04>.
13. Bonan Q., Zeng R., Li X., Yang J. Design and Performance Analysis of the Hydropneumatic Suspension System for a Novel Road-Rail Vehicle. *Applied Sciences*. 2021. no 11(5). pp. 2221. <https://doi.org/10.3390/app11052221>.
14. Rebrov A.Yu. Identifikatsiya sel'skokhozyaystvennykh traktornykh shin chislennym metodom [Identification of agricultural tractor tires by numerical method]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Ser. Matematychno modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. Mathematical modeling in engineering and technology]. Kharkiv, NTU "KhPI". 2015. no 6 (1115). pp. 114 – 121.

Надійшла (received): 10.12.2022 р.

Відомості про авторів / About the Authors

Кожушко Андрій Павлович (Andrii Kozhushko) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автомобіле- та тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4725-5911>; e-mail: Andreykozhushko7@gmail.com

Кальченко Борис Іванович (Boris Kalchenko) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри автомобіле- і тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3827-1693>; e-mail: kabor78@ukr.net

Янчик Олександр Григорович (Alexander Yanchyk) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри безпеки праці та навколишнього середовища, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1214-4883>; e-mail: alex_yanchik@ukr.net

Кобець Геннадій Олександрович (Hennadii Kobets) – магістрант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри безпеки праці та навколишнього середовища, м. Харків, Україна. e-mail: hennadii.kobets@mit.khpi.edu.ua