

УДК 631.372

©Д.В. Борисюк

Вінницький національний технічний університет

©А.В. Спірін, к.т.н., І.В. Твердохліб, к.т.н., І.В. Гунько, к.т.н.

Вінницький національний аграрний університет

ВІБРОАКУСТИЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ КЕРОВАНИХ МОСТІВ КОЛІСНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ТРАКТОРІВ

Представлено математичний опис керованого моста колісного трактора як багатовимірної динамічної системи з метою визначення його технічного стану віброакустичним методом діагностування. Представлено систему для віброакустичного діагностування керованих мостів колісних сільськогосподарських тракторів.

ВІБРОАКУСТИЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ, КЕРОВАНИЙ МІСТ, ТРАКТОР, АМПЛІТУДНО-ФАЗОВА ХАРАКТЕРИСТИКА, АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНА ХАРАКТЕРИСТИКА, ФАЗО-ЧАСТОТНА ХАРАКТЕРИСТИКА.

Постановка проблеми. Під час руху по дорозі з нерівною поверхнею трактор сприймає удари і зазнає коливань. Основними вузлами, які захищають трактор від динамічної дії дороги і зводять коливання та вібрації до прийняттого рівня є керований міст і шини.

Багаторічний досвід показує, що нерівності дорожнього покриття і викликані ними коливання рами і коліс трактора призводять, як правило, до погіршення всіх його експлуатаційно-технічних якостей.

Справний керований міст колісного трактора забезпечує оптимальну керованість, безпеку руху, довговічність і надійність роботи.

Робота з несправними вузлами керованого моста погіршує керованість і стійкість трактора, знижує безпеку його руху, погіршує ергономічні показники.

Несправний керований міст сприяє появі вібрації рами трактора, внаслідок чого послаблюються заклепочні та різьбові з'єднання, порушується співвісність двигуна і коробки передач, виникають додаткові навантаження в корпусних деталях.

Вібрація всього трактора прискорює знос і викликає поломки багатьох деталей.

Досвід експлуатації машинно-тракторного парку показує, що керований міст є одним з найменш надійних і довговічних агрегатів трактора.

З вище сказаного видно, яке велике значення має підтримка керованого моста колісного трактора і окремих його елементів в справному технічному стані.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Механізм виникнення віброакустичних процесів в агрегатах керованих мостів колісних тракторів має специфічні особливості [1, 2], визначається внутрішніми і зовнішніми факторами, що викликані динамічними режимами роботи. В результаті у керованому мості трактора виникає комплекс взаємопов'язаних вібраційних процесів, які умовно поділяються на вимушені, вільні, параметричні і нелінійні [3].

Методи поділу джерел сигналів вібрації при діагностуванні розроблялися в роботах [2, 3], проте, на думку автора робіт [4] при діагностуванні тракторів є ряд специфічних питань, які вимагають розробки та вдосконалення.

Досить важливі дослідження коливань керованих мостів колісних тракторів як об'єкта діагностування виконані авторами [5-9]. Однак цілий ряд питань ще не вирішено.

Метою дослідження є визначення амплітудно-частотних і фазо-частотних характеристик керованих мостів колісних тракторів при віброакустичному діагностуванні.

Результати дослідження. Керований міст колісного трактора можна представити як багатовимірну динамічну систему, на вході в яку діють дорожні нерівності, що є випадковими функціями. На виході

цієї динамічної системи можуть бути розглянуті різні випадкові функції або процеси, наприклад вертикальні переміщення або прискорення рами трактора, відносні переміщення моста і рами, динамічні навантаження, що діють на пружні елементи моста, раму трактора тощо (рис. 1) [15, 16]. Зазвичай вхідну функцію називають впливом, а вихідну - реакцією динамічної системи.

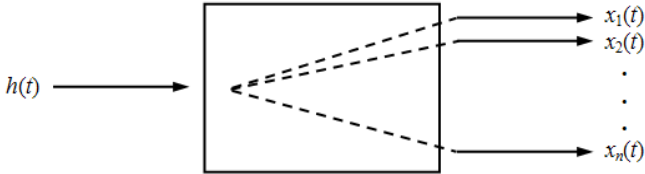


Рис.1 – Блок-схема керованого моста колісного трактора як багатовимірної діагностичної системи

Позначимо функції на вході динамічної системи $h(t)$, а на виході $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$.

Тоді перетворення функції $h(t)$ у функції $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ позначаємо виразом:

$$x_i(t) = A_i h(t), \quad (1)$$

де A_i - оператор динамічної системи.

Оператор A_i повністю описує стан керованого моста колісного трактора як динамічної системи. Якщо в процесі експлуатації відбулися якісь зміни в стані вузлів моста, то обов'язково зміняться і вихідні параметри $x_i(t)$ при незмінній вхідній функції $h(t)$. А це означає, що змінився оператор A_i . Якщо ж у стані моста відбулися такі зміни, які не вплинули на його вихідні параметри, то, очевидно, такі зміни не мають суттєвого значення, бо вони не змінили робочих характеристик моста як динамічної системи.

Отже, теоретичне або експериментальне визначення оператора A_i є основним завданням діагностування керованих мостів колісних тракторів [10].

Якщо на вхід системи (див. рис. 1) подавати незмінні за часом постійні навантаження h_c , то на виході отримаємо також постійне навантаження:

$$x_c = A_c h_c, \quad (2)$$

де A_c - статична характеристика керованого моста колісного трактора.

Розподіл статичного навантаження на пружні елементи керованого моста колісного трактора є статичною характеристикою керованого моста.

Пружна характеристика керованого моста є статичною характеристикою, причому

$$A_c = f(c^{-1}), \quad (3)$$

де c - жорсткість пружних елементів керованого моста колісного трактора.

Однак з огляду на те що на керований міст при русі діє динамічне навантаження, то статичні характеристики не можуть дати повної оцінки його якостей або технічного стану.

Властивості керованих мостів колісних тракторів як динамічної системи можуть бути описані амплітудно-фазовою характеристикою [11]:

$$\Phi(\omega) = \frac{X(\omega)}{H(\omega)} = A(\omega) e^{i\varphi(\omega)}, \quad (4)$$

де $\Phi(i\omega)$ – амплітудно-фазова характеристика динамічної системи;
 $H(i\omega)$, $X(i\omega)$ - перетворені по Лапласу зображення випадкових функцій вхідного впливу $h(t)$ і реакції $x(t)$;

$A(\omega)$ - амплітудно-частотна характеристика динамічної системи;

$\varphi(\omega)$ – фазо-частотна характеристика динамічної системи;

ω – частота коливань.

Найбільше значення при визначенні технічного стану має амплітудно-частотна характеристика. Як амплітудно-фазова характеристика, так і її складові - амплітудно-частотна характеристика і фазо-частотна характеристика можуть бути отримані теоретичним і експериментальним шляхом.

Позначимо випадкові функції на виході системи:

$x(t)$ – вертикальні переміщення рами трактора;

\ddot{x} – вертикальне прискорення трактора;

$x_0(t)$ – вертикальні відносні переміщення рами трактора відносно коліс.

Для встановлення зв'язку частотних характеристик як основних характеристик технічного стану керованого моста і його параметрів розглянемо теоретичний метод їх визначення.

Для цієї мети напишемо диференціальні рівняння вертикальних коливань трактора і за допомогою прямого перетворення Лапласа знайдемо амплітудно-фазову характеристику.

В зв'язку з тим що для більшості колісних тракторів коефіцієнт розподілу має близький до одиниці, то коливання підресорених частин над передньою і задньою осями розглядаються незалежно одне від іншого.

Тоді з урахуванням загальновідомих припущень [12] еквівалентна коливальна система передньої і задньої частини колісного трактора буде представлена двомасовою системою, диференціальні рівняння руху якої мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} -M \ddot{x}_0 + M \ddot{\psi} - k \dot{x}_0 - cx_0 &= 0; \\ m \ddot{\phi} + k \dot{x}_0 + cx_0 + k_{ш} \dot{\psi} + c_{ш} \psi &= k_{ш} \dot{h} + c_{ш} h, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де M – приведена підресорена маса;

m – маса непідресорених частин колісного трактора;

k – коефіцієнт опору керованого моста;

$k_{ш}$ – коефіцієнт опору шин;

ψ – вертикальне переміщення коліс;

h – висота нерівності під колесом.

Застосовуючи пряме перетворення Лапласа до системи рівнянь (5) з урахуванням нульових початкових умов ($h_{t=0}=0$), отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} L[-M \ddot{x}_0 + M \ddot{\psi} - k \dot{x}_0 - cx_0] &= 0; \\ L[m \ddot{\psi} + k \dot{x}_0 + cx_0 + k_{ш} \dot{\psi} + c_{ш} \psi] &= L[k_{ш} \dot{h} + c_{ш} h]. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Підставляючи зображення функцій $x_0(t)$, $\psi(t)$, $h(t)$ та їх похідні в систему рівнянь (6), будемо мати:

$$\left. \begin{aligned} -Ms^2 X_0 + Ms \dot{X}_0 - ks X_0 - c X_0 &= 0; \\ -ms^2 \Psi + ks X_0 - c X_0 + k_{ш} s \Psi + c_{ш} \Psi &= k_{ш} s H + c_{ш} H \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де $X_0(s)$, $\Psi(s)$, $H(s)$ – зображення за Лапласом функцій $x_0(t)$, $\psi(t)$, $h(t)$.

Розв'язуючи останню систему рівнянь, знайдемо передаточну функцію стиснення пружних елементів керованого моста:

$$\Phi_{x_0} = \frac{X_0}{H} = \frac{a_1 s^2 + a_2 s^3}{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + b_3 s^3 + b_4 s^4}, \quad (8)$$

де $a_1 = Mc_{ш}$; $a_2 = Mk_{ш}$; $b_0 = cc_{ш}$; $b_1 = kc_{ш} + k_{ш}c$; $b_2 = Mc + Mc_{ш} + mc + kk_{ш}$; $b_3 = Mk + Mk_{ш} + mk$; $b_4 = Mm$.

Замінюючи комплексну змінну $s = i\omega$ (де i – уявна одиниця), отримаємо амплітудно-фазову характеристику стиснення пружних елементів керованого моста:

$$\Phi_{x_0}(\omega) = \frac{-a_1 \omega^2 - a_2 i \omega^3}{b_0 + b_1 i \omega - b_2 \omega^2 - b_3 i \omega^3 + b_4 \omega^4}. \quad (9)$$

Модуль амплітудно-фазової характеристики який називається амплітудно-частотною характеристикою, становить

$$|\Phi_{x_0}(\omega)| = \frac{|a_1 \omega^2 + a_2 i \omega^3|}{|b_0 - b_2 \omega^2 + b_4 \omega^4 + i \omega [b_1 - b_3 \omega^2]|} = A_{x_0} \quad (10)$$

Квадрат амплітудно-частотної характеристики стиснення пружних елементів керованого моста:

$$H_{x_0}(\omega) = \frac{a_1^2 \omega^4 + a_2^2 \omega^6}{(b_0 - b_2 \omega^2 + b_4 \omega^4) + (b_1 \omega - b_3 \omega^3)^2} \quad (11)$$

Передаточну функцію вертикальних переміщень рами трактора знайдемо з умови

$$X(s) = \Psi(s) - X_0(s) \quad (12)$$

де $X(s)$ – зображення по Лапласу функції $x(t)$.

Тоді з рівнянь (7, 8, 12) знайдемо передаточну функцію вертикальних швидкостей моста і рами колісного трактора

$$\Phi_x(\omega) = \frac{X(\omega)}{H(\omega)} = \frac{ks+c}{Ms^2} \Phi_{x_0}(\omega) \quad (13)$$

Замінюючи комплексну змінну $s = i\omega$ і звівши в квадрат останній вираз, отримаємо амплітудно-частотну характеристику вертикальних переміщень моста і рами колісного трактора:

$$H_x(\omega) = \frac{k^2 \omega^2 + c^2}{M^2 \omega^4} H_{x_0}(\omega) \quad (14)$$

Оскільки передаточна функція вертикальних прискорень

$$\Phi_x(\omega) = s^2 \Phi_x(\omega)$$

то амплітудно-частотна характеристика цих прискорень

$$H_x(\omega) = \frac{k^2 \omega^2 + c^2}{M^2} H_{x_0}(\omega) \quad (15)$$

Амплітудно-частотна характеристика повних вертикальних динамічних навантажень, що передаються через невіднесену масу на раму трактора:

$$A_x(\omega) = M A_x(\omega) \quad (16)$$

Для виконання операцій віброакустичного діагностування керованих мостів колісних тракторів за вищенаведеними розрахунками, розроблена система (рис. 2, а) на базі персональної електронно-обчислювальної машини та стандартних п'єзокерамічних приймачів прискорень KD-35 (акселерометрів) [13].

Розроблена система діагностування керованих мостів колісних тракторів (рис. 2, б) складається з двох акселерометрів, які встановлені на висувних трубах переднього моста (перший акселерометр – зліва, другий – справа), мультиплексора, аналого-цифрового перетворювача, обчислюючого пристрою, результат з якого можна відобразити на моніторі та друкуючому пристрої.

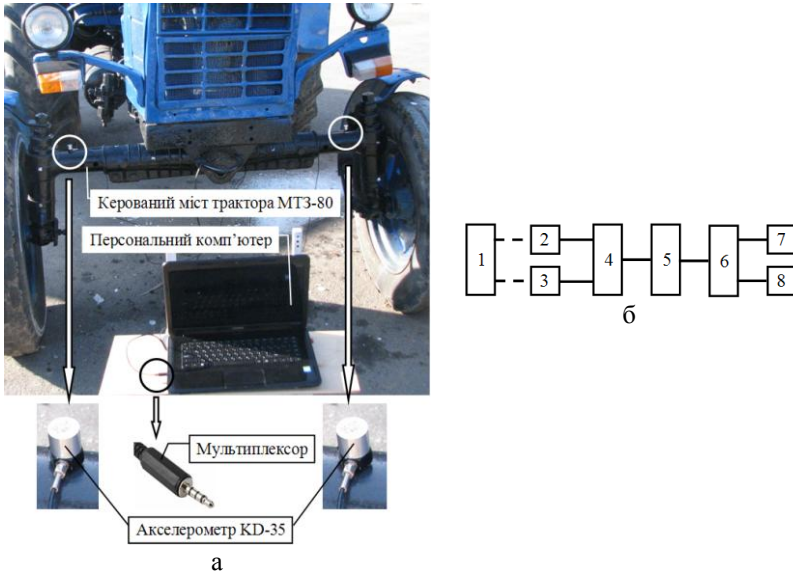


Рис. 2 – Система діагностування керованих мостів колісних тракторів:
а – загальний вигляд; б – структурна схема;
1 – керований міст трактора; 2, 3 – акселерометри; 4 – мультиплексор; 5 – аналого-цифровий перетворювач; 6 – обчислюючий пристрій; 7 – монітор; 8 – друкуючий пристрій

На рис. 3 представлено осцилограми віброприскорення керованого моста трактора МТЗ-80, на рис. 4 - спектральний аналіз осцилограм віброприскорення керованого моста трактора МТЗ-80, на рис. 5 - фазо-частотну характеристику керованого моста трактора МТЗ-80 (де 1 – крива, що відповідає несправному стану; 2 - крива, що відповідає справному стану) [14].

На рис. 6 представлено аналіз фаз віброприскорення керованого моста трактора МТЗ-80, на рис. 7 - спектограми віброприскорення керованого моста трактора МТЗ-80.

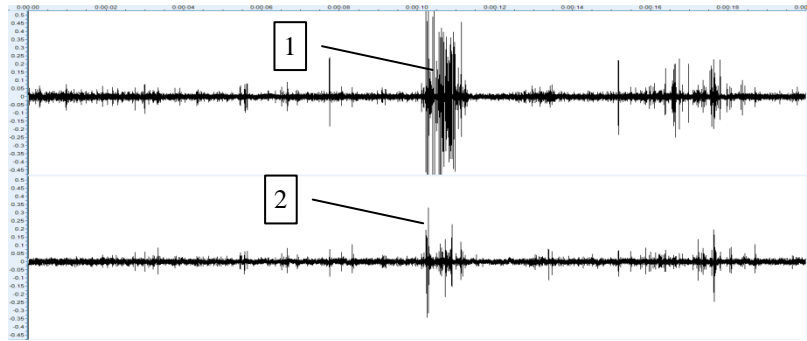


Рис. 3 - Осцилограма віброприскорення керованого моста трактора МТЗ-80

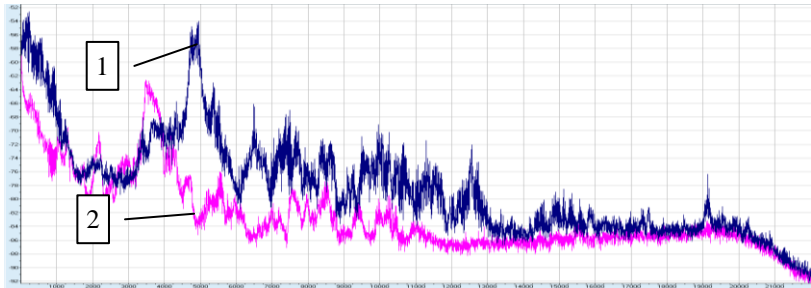


Рис. 4 - Спектральний аналіз осцилограми віброприскорення керованого моста трактора МТЗ-80

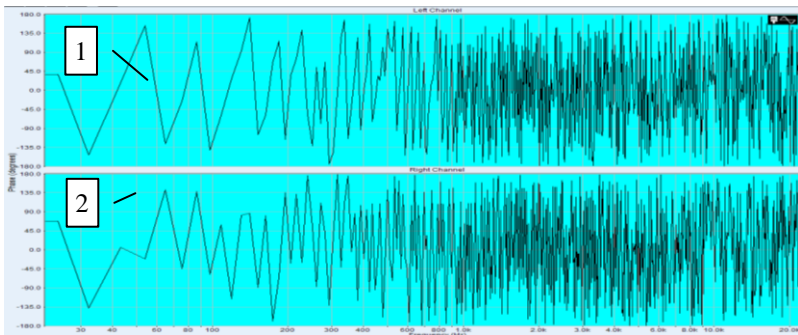


Рис. 5 - Фазо-частотна характеристика керованого моста трактора МТЗ-80

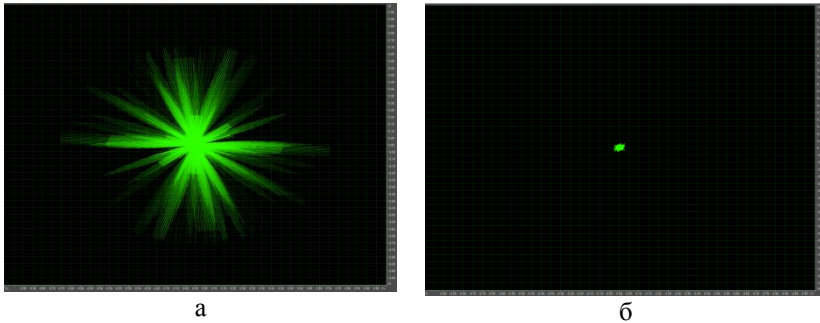


Рис. 6 – Аналіз фази віброприскорення керованого моста трактора МТЗ-80:
а – несправний стан; б - справний стан

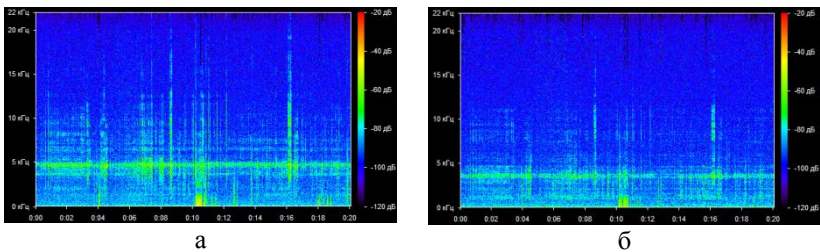


Рис. 7 – Спектограма віброприскорення керованого моста трактора МТЗ-80:
а – несправний стан; б - справний стан

Отже, з рис. 3-7 видно, що при віброакустичному діагностуванні несправність вузлів керованого моста трактора визначається підвищенням рівня віброприскорення і частоти коливання.

Дану методику можна застосовувати і для діагностування керованих мостів сучасних тракторів.

Висновки. При зміні параметрів окремих елементів керованого моста зміниться відповідним чином і амплітудно-частотна характеристика.

Визначення частотних характеристик є основою діагностування керованих мостів колісних тракторів.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили можливість застосування даної методики для діагностування

керованих мостів колісних тракторів. Дану методику можна застосовувати для діагностування інших вузлів і агрегатів тракторів, а також сільськогосподарських машин.

Література

1. Ополоник Т.Н. Эффективность диагностирования тракторов / Т.Н. Ополоник. – М.: Росагропромиздат, 1988. – 124 с.
2. Кухтов В.Г. Долговечность деталей шасси колесных тракторов / В.Г. Кухтов. – Харьков: РИО ХНАДУ, 2004. – 291 с.
3. Карасев В.А., Райтман А.Б. Доводка эксплуатационных машин. Вибродиагностические методы / В.А. Карасев, А.Б. Райтман. – М.: Машиностроение, 1986. – 88 с.
4. Мигаль В.Д. Вибродиагностика машин при эксплуатации / В.Д. Мигаль В.Д. – Харьков: ХГПУ, 1997. – 293 с.
5. Барский И.Б. Конструирование и расчет тракторов / И.Б. Барский. – М.: Машиностроение, 1980. – 337 с.
6. Бахтеев Р.Х. Влияние колебаний колесного трактора на величину давлений шины на почву (на примере трактора Т-150К): автореф. дис. ... канд. техн. наук / Р.Х. Бахтеев – М.: ВИМ, 1985. – 20 с.
7. Кутьков Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства / Г.М. Кутьков – М.: Колос, 2004. – 504 с.
8. Скотников В.А. Основы теории и расчета трактора и автомобиля / В.А. Скотников, А.А. Машенский, А.С. Солонский. – М.: Агропромиздат, 1986. – 383 с.
9. Тракторы: Теория / В.В. Гуськов и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 375 с.
10. Гельфандбейн Я.А. Методы кибернетической диагностики кибернетических систем / Я.А. Гельфандбейн. - Рига: Издательство «Зинатне», 1967. – 541 с.
11. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Книга 1: Математическое описание, анализ устойчивости и качества систем автоматического регулирования / Колл. авторов / Под ред. д-ра техн. наук, проф. В. В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1967. -770 с.
12. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля и его колебания / Р.В. Ротенберг. – М.: Машгиз, 1960. - 355 с.
13. Патент 108395 Україна (UA), МПК G01M G06F 15/00, G06F 5/16, G01M 17/00. Система діагностування керованих мостів колісних сільськогосподарських тракторів / Борисюк Д.В., Руткевич В.С.; Вінницький національний аграрний університет. — № u2016 01067; Заявл. 08.02.2016; Опубл. 11.07.2016, Бюл. № 13.

14. Патент 108394 Україна (UA), МПК G01M 17/00, G01P 15/00, G01D 21/02. Спосіб діагностування керованих мостів колісних сільськогосподарських тракторів / Борисюк Д.В., Руткевич В.С.; Вінницький національний аграрний університет. — № u2016 01065; Заявл. 08.02.2016; Опубл. 11.07.2016, Бюл. № 13.

15. Борисюк Д.В. Діагностування передніх мостів колісних тракторів / Д.В. Борисюк, В.І. Яцковський // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – Вінниця: ВНАУ, 2015, Випуск 2 (90). – С. 43-46.

16. Борисюк Д.В. Стійкість руху керованих коліс тракторів / Д.В. Борисюк, В.І. Яцковський // Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця: ВНАУ, 2016, Випуск 1 (81). – С. 19-22.

Рецензент д.т.н. Біліченко В.В.