

**Калінін Є. І.**

д.т.н., доцент

**Сайчук О. В.**

д.т.н., доцент

**Колпаченко Н. М.**

к.е.н., доцент

*Харківський національний  
технічний університет  
сільського господарства  
імені Петра Василенка*

**Kalinin E.****Saychuk O.****Kolpachenko N.**

*Kharkiv Petro Vasylenko  
National Technical  
University of Agriculture*

**УДК 681.518.52.001.63****DOI: 10.37128/2306-8744-2020-3-5**

## **РІВНЯННЯ РУХУ ТРАКТОРА JOHN DEERE 6095B ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО ВОДІННЯ**

Головним питанням, яке доводиться вирішувати при формуванні сучасних систем автоматичного водіння тракторів, є питання отримання інформації про поточний стан машино-тракторного агрегату відносно заданої траєкторії. Ця інформація за своєю якістю повинна відображати досить жорсткі вимоги сільськогосподарського виробництва по точності траєкторного управління. Отже, для створення пристроїв автоматичного водіння тракторів необхідно знати характеристики і властивості цих машин як об'єктів з точки зору теорії автоматичного регулювання. При дослідженні таких машин в першу чергу необхідно встановити, який параметр треба вважати вхідним. При ручному керуванні зворотний зв'язок замикається візуально на правому передньому колесі, точніше на точці дотику колеса з ґрунтом. Основною метою даної роботи є отримання рівнянь, що зв'язують між собою вихідну і вхідну координату, а також вхідну координату і координати середини передньої і задньої вісі трактора. Необхідно також встановити, за яких вихідних даних можна користуватися спрощеним рівнянням, що враховує тільки кінематику руху трактора і не враховує еластичності шин і деформації ґрунту. Для цього завдання вирішується як з урахуванням еластичності шин і деформації ґрунту, так і без урахування цих чинників. Порівнюються частотні характеристики, що отримані за спрощеним рівнянням і з урахуванням вищевказаних чинників при різних швидкостях руху. При проведенні досліджень отримано рівняння руху трактора з урахуванням деформації пневматичних шин і ґрунту. Це рівняння дозволяє вивчити рух трактора при наявності зовнішніх бічних сил. Такими силами можуть бути відцентрові сили при русі за криволінійною траєкторією і сили від причіпних і начіпних знарядь на тракторі. Рівняння справедливо для малих кутів повороту спрямовуючих коліс трактора. Отримано спрощене рівняння, що не враховує деформацію шин і ґрунту. Цим рівнянням можна наближено описати рух трактора на твердому ґрунті, що мало деформується, при порівняно малих швидкостях. Використовувати це рівняння бажано тільки при швидкостях не вище 1,7 м/сек на щільному ґрунті. Обидва рівняння характеризують трактор як об'єкт регулювання і дозволяють вибрати і спроектувати систему автоматичного водіння.

**Ключові слова:** трактор, автоматичне водіння, машино-тракторний агрегат, частотні характеристики.



**Постановка проблеми.** Для створення пристроїв автоматичного водіння тракторів та інших рухомих машин (автомобілів, комбайнів і т.д.) необхідно знати характеристики і властивості цих машин як об'єктів з точки зору теорії автоматичного регулювання.

При дослідженні таких машин в першу чергу необхідно встановити, який параметр, яку координату треба вважати вхідною і яку вихідною. При звичайному ручному керуванні на міжрядній обробці тракторист стежить за траєкторією руху трактора по правому передньому колесу. Іноді він коректує рух, орієнтуючись на задні колеса або начіпне знаряддя. Таким чином, при ручному керуванні зворотний зв'язок замикається візуально на правому передньому колесі, точніше на точці дотику колеса з ґрунтом. Коригування руху трактора за координатою задніх коліс або за положенням робочих органів начіпного знаряддя можна розглядати як додаткові зворотні зв'язки, що здійснюються трактористом. При достатньому досвіді тракторист може помічати (або відчувати) не тільки величину відхилення трактора від міжряддя, а й швидкість зміни цього відхилення, тобто першу похідну від координати. Цим тракторист передбачає подальший рух трактора. Якщо говорити мовою теорії регулювання, тракторист здійснює вплив за похідною від неузгодженості.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Під автоматичним водінням розуміються дії по тракторному управлінню МТА, що виконуються без участі водія. Головним чином воно призначене для сільськогосподарських МТА, що виконують польові операції рослинництва [1].

При виконанні цих операцій, як правило, МТА повинен рухатися за траєкторіями, близькими до прямих ліній. Зазвичай ці траєкторії спрямовані паралельно одній із сторін ділянки поля, що обробляється, на кінцях якого проводяться розвороти. При цьому МТА повинен рухатися, чергуючи ці траєкторії в порядку, визначеному технологією виконання операції.

Автоматичне водіння може обмежуватися рухом МТА тільки за цими траєкторіями (на гонах). У деяких випадках воно може охоплювати і розвороти, керуючи рухом МТА для чергування траєкторій [2].

Головним питанням, яке доводиться вирішувати при цьому, є питання отримання інформації про поточний стан МТА відносно заданої траєкторії. Ця інформація за своєю якістю повинна відображати досить жорсткі вимоги сільськогосподарського виробництва по точності траєкторного управління. Так, при оранці, траєкторна помилка не повинна перевищувати 5 см в будь-яку сторону, щоб було забезпечено необхідну якість обробки. Це питання може вирішуватися за двома напрямками [3, 4].

Перше полягає в тому, що положення

МТА визначається відносно обраної нерухокої системи координат і порівнюється з тим, яким воно повинно бути при виконанні заданої програми руху, що містить відомості про необхідні траєкторії, що записані в пам'ять в цій же системі координат. Такий напрям можна назвати програмним або координатомірним, і його реалізація вимагає наявності пристроїв, що дозволяють в кожен момент часу знати поточні координати об'єкта в цій системі з похибкою не більше декількох сантиметрів [5, 6].

Останнім часом в закордонній літературі з'явилися пропозиції з автоматизації водіння МТА і самохідних сільськогосподарських машин на основі інформації, отриманої за допомогою супутникових навігаційних систем. Однак, потрібно розуміти, що для цього необхідна спеціальна апаратура, набагато дорожча, ніж прості приймачі з пред'явленням карт. Більш того, точність вимірювання координат об'єкту, що необхідна для автоматичного водіння, досягається тільки при наявності спеціальних наземних ретрансляторів з дуже складним і дорогим обладнанням [7, 8].

Другий напрямок пов'язаний з тим, що положення МТА визначається не абсолютно, а відносно деякого наявного орієнтира, властивого виконуваної операції. У своєму русі МТА копіює (або відстежує) цей орієнтир, тому такий напрямок називають копіювальним або слідовим. Як правило, і сам цей орієнтир є слідом або попереднього проходу, або попередньої операції [9, 10].

**Мета досліджень.** Основною метою даної роботи є отримання рівнянь, що зв'язують між собою вихідну і вхідну координату, а також вхідну координату і координати середини передньої і задньої вісі трактора.

Необхідно також встановити, за яких вихідних даних можна користуватися спрощеним рівнянням, що враховує тільки кінематику руху трактора і не враховує еластичності шин і деформації ґрунту. Для цього завдання вирішується як з урахуванням еластичності шин і деформації ґрунту, так і без урахування цих чинників. Порівнюються частотні характеристики, що отримані за спрощеним рівнянням і з урахуванням вищевказаних чинників при різних швидкостях руху.

**Методика досліджень.** Таким чином, досвід застосування різних пристроїв для автоводіння тракторів показує, що найчастіше точку відліку координат встановлюють попереду трактора і праворуч від його поздовжньої геометричної осі. Це пов'язано з технологічними особливостями більшості сільськогосподарських процесів.

Необхідно відмітити, що повної аналогії з ручним водінням такі автомати не дають. У них зворотні зв'язки замикаються через точку



контакту правого переднього колеса трактора з ґрунтом або з рядом культури, що обробляється. Назвемо «точкою копіювання» геометричну уявну точку, що жорстко зв'язана з рамою трактора і збігається з точкою контакту правого колеса переднього борту трактора з ґрунтом при нейтральному положенні останнього. Очевидно, що координата цієї точки і буде вихідною координатою трактора як об'єкта регулювання. Вхідною координатою трактора, як об'єкта в системі автоматичного водіння, буде, очевидно, кут повороту керованих коліс. Розгляд такої

системи відліку з урахуванням окремих особливостей функціонування трактора дозволяє створити математичну модель руху останнього як об'єкта автоматичного регулювання.

**Результати дослідження.** Розглянемо рух колісного трактора з жорсткими колесами по горизонтальній площині, що не деформується. При цьому будемо вважати, що колеса котяться без ковзання, миттєві центри повороту всіх коліс збігаються, і швидкість руху середини ведучої вісі постійна. Схема руху показана на рис.1.

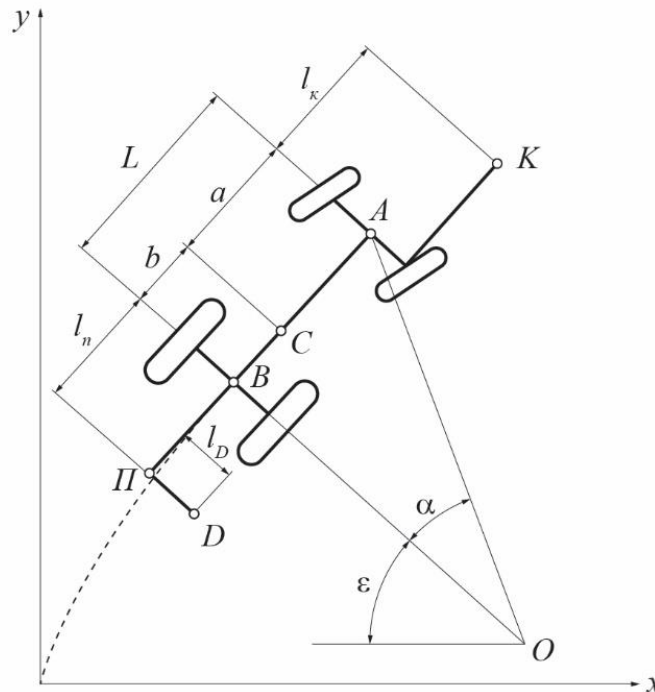


Рис. 1. Геометрична схема руху трактора

Для цього випадку маємо:

$$x_b = \pm V_b \int_0^t \sin \varepsilon dt ; y_b = V_b \int_0^t \cos \varepsilon dt , \quad (1)$$

де  $V_b$  – швидкість середини ведучої вісі трактора;  $\varepsilon$  – кут повороту поздовжньої вісі трактора.

Знак «плюс» для  $x_b$  відноситься до першого квадранту, а знак мінус – до другого. Враховуючи, що кут  $\varepsilon$  в процесі руху трактора вздовж борозни змінюється в межах не більше  $4^\circ$ , координату  $y_b$  з достатнім ступенем точності можна отримати як добуток  $tV_b$ , тому зупинимо увагу лише на координаті  $x_b$ . Для випадку повороту колісного трактора при постійній кутовій швидкості повороту спрямовуючих коліс [11], тобто  $\alpha = \omega_1 t$ , кут  $\varepsilon$  як функція часу

визначається виразом виду

$$\varepsilon = \frac{V_b}{L} \int_0^t \frac{dt}{\operatorname{ctg} \omega_1 t} , \quad (2)$$

де  $\omega_1$  – кутова швидкість повороту спрямовуючих коліс;  $L$  – база трактора.

Замінюючи в останньому виразі  $\omega_1 t$  на  $\alpha$ , отримаємо:

$$\varepsilon = \frac{V_b}{L} \int_0^t \operatorname{tg} \alpha dt . \quad (3)$$

З огляду на те, що  $\alpha$  змінюється в межах  $10^\circ$ , остаточно отримаємо залежність  $\varepsilon$  від  $\alpha$  виду:



$$\varepsilon = \frac{V_b}{L} \int_0^t \alpha dt, \quad (4)$$

де  $\alpha = \alpha(t)$  – довільна функція часу.

При такій заміні похибка не перевищує одного відсотка.

Підставляючи вираз (4) в (1) і замінюючи, враховуючи малість величин,  $\sin \varepsilon = \varepsilon$ , отримаємо:

$$x_b = \frac{V_b^2}{L} \int_0^t dt \int_0^t \alpha dt. \quad (5)$$

З цього випливає, що координата  $x_b$  змінюється пропорційно подвійному інтегралу від кута повороту коліс  $\alpha$ . Знак координати визначається знаком кута  $\alpha$ : плюс – при повороті вправо і мінус – при повороті вліво.

У диференційній формі вираз (5) запишеться як:

$$x_b'' = \frac{V_b^2}{L} \alpha. \quad (6)$$

Положення будь-якої точки, що жорстко пов'язана з рамою трактора, можна визначити через координату  $x_b$  і кут поздовжньої вісі  $\varepsilon$ .

З рис.1 для координати середини передньої вісі трактора отримаємо:

$$x_a = x_b + L \sin \varepsilon, \quad (7)$$

або, приймаючи  $\sin \varepsilon = \varepsilon$ :

$$x_a = x_b + L \varepsilon. \quad (8)$$

Підставляючи (4) і (6) в (8), отримаємо:

$$x_a = \frac{V_b^2}{L} \int_0^t dt \int_0^t \alpha dt + V_b \int_0^t \alpha dt, \quad (9)$$

або в диференційній формі

$$x_a'' = \frac{V_b^2}{L} \alpha + V_b \alpha'. \quad (10)$$

Аналогічно, для координати точки копіювання маємо:

$$x_k = x_b + (L + l_k) \varepsilon + \frac{S}{2};$$

$$x_k = \frac{V_b^2}{L} \int_0^t dt \int_0^t \alpha dt + \frac{L + L_k}{L} V_b \int_0^t \alpha dt + \frac{S}{2}, \quad (11)$$

де  $S$  – колія передніх коліс трактора;  $l_k$  – величина виносу точки копіювання відносно передньої вісі трактора.

У диференційній формі:

$$x_k'' = \frac{V_b^2}{L} \alpha + \frac{L + L_k}{L} V_b \alpha'. \quad (12)$$

Для координати будь-якої точки трактора рівняння прийме наступний вигляд:

$$x_D = x_b \pm l_n \varepsilon \pm l_D$$

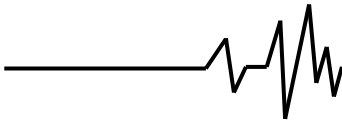
$$x_D = \frac{V_b^2}{L} \int_0^t dt \int_0^t \alpha dt + \frac{l_n}{L} V_b \int_0^t \alpha dt + l_D \quad (13)$$

де  $l_n$  – величина виносу точки  $D$  відносно вісі ведучих коліс вздовж поздовжньої вісі трактора (знак «плюс» відповідає виносу вперед);  $l_D$  – величина виносу точки  $D$  від поздовжньої вісі трактора в бік (знак «плюс» відповідає виносу вправо).

Отримані рівняння (10), (12), (13) дають можливість при відомому законі зміни кута повороту керованих коліс трактора  $\alpha$  знайти траєкторію руху будь-якої точки трактора або націпного знаряддя.

При установці точки копіювання поблизу вісі ведучих коліс трактора в рівнянні (9) отримаємо  $l_k = -L$ . Саме рівняння (9) в цьому випадку має вигляд, аналогічний рівнянню (4). Це означає, що на вхід системи автоматичного водіння потраплятиме сигнал, пропорційний тільки подвійному інтегралу від  $\alpha$ , і система виявиться нестійкою. Тому точку копіювання необхідно ставити біля передніх коліс так, щоб величина  $l_k$  становила  $(0,1 \dots 0,3)L$ . Це забезпечує достатню чутливість і стійкість.

Необхідно сказати, що рівняння (10), (12), (13) справедливі при невеликих швидкостях руху по поверхні що мало деформується вздовж рядків або борозен, коли кути повороту коліс  $\alpha$  і поздовжньої вісі трактора  $\varepsilon$  невеликі. Ці рівняння не враховують дії зовнішніх сил, таких, як інерційні сили або сили з боку причіпних знарядь. Дія цих сил проявляється в тому, що колеса



трактора починають котитися не в площині обертання, а під деяким кутом до неї.

У загальному випадку кут бічного відведення визначається за формулою виду:

$$\delta = \xi Y, \quad (14)$$

де  $\delta$  – кут бічного відведення;  $Y$  – бічна реакція на колесах;  $\xi$  – коефіцієнт бічного відведення.

Під знаком  $\xi$  слід розуміти деяку нелінійну функцію, що складається з суми трьох функцій: лінійної – бічного відведення і двох нелінійних – ковзання площадки контакту і деформації ґрунту.

При русі на трактор діють сили від причіпних і начіпних знарядь. Бічні складові цих сил досить великі і викликають бічне відведення і ковзання коліс. На трактор також діють і відцентрові сили, оскільки, зазвичай, його рух являє собою криву з мінливим радіусом кривизни.

Для вивчення причин виникнення автоколивань, а також з'ясування дії зовнішніх сил на трактор (від причіпних знарядь і відцентрових) необхідно отримати рівняння, що враховує деформацію коліс і ґрунту.

На рис. 2 представлена схема руху трактора на повороті з урахуванням бічного відведення коліс і схема сил, що діють на трактор.

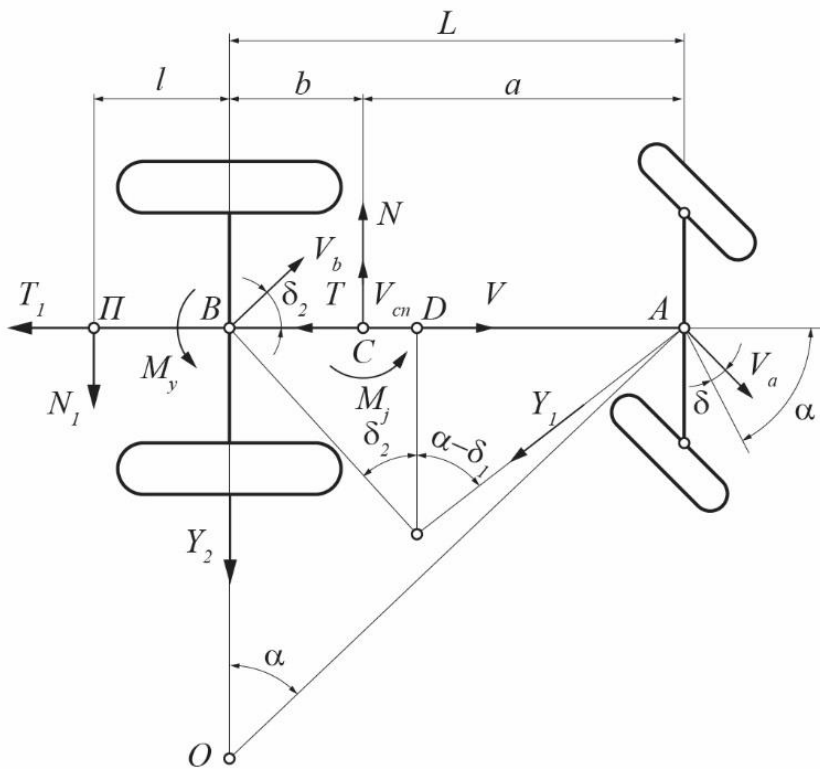


Рис. 2. Система сил, що діє на трактор при його русі в повороті

Введемо позначення:  $\delta_1'$  і  $\delta_1''$  – кути бічного відведення внутрішнього і зовнішнього передніх коліс;  $\delta_1$  – кут між напрямком швидкості середини передньої вісі і середньою площиною передніх коліс. Аналогічні кути  $\delta_2'$ ,  $\delta_2''$  і  $\delta_2$  – для задніх коліс.

При русі трактора на повороті на нього діють такі сили і моменти: тангенціальна і нормальна складові сили інерції  $T$  і  $N$ , що прикладені до центру ваги; сумарна колова сила на задніх колесах  $P_p$ ; сумарна сила  $P_w$ , що

враховує опір коченню передніх і задніх коліс (при малих кутах  $\alpha$  цю силу можна направити вздовж вісі трактора); результируючий момент  $M_y$ , що виникає при нерівності сил опору руху задніх коліс; сумарні бічні реакції на передніх і задніх колесах  $Y_1$  і  $Y_2$ ; поздовжня і поперечна складові сили  $N_1$  і  $T_1$ , що діють на гаку трактора; інерційний момент, що визначається з виразу виду:

$$M_j = J \frac{d\omega_2}{dt} = M \rho_i^2 \frac{d\omega_2}{dt}, \quad (15)$$



де  $J$  – момент інерції трактора відносно вертикальної вісі, що проходить через центр ваги;  $\rho_i$  – радіус інерції маси трактора відносно тієї ж вісі;  $\omega_2$  – кутова швидкість повороту корпусу трактора навколо тієї ж вісі.

Рух трактора можна розглядати як поворот навколо миттєвого центру обертання (точки  $O$ ), і описати системою рівнянь виду [12, 13]:

$$\begin{cases} J_1 L \cos \alpha - N_b - M_j - M_y - N_1 l = 0; \\ J_2 L - N_a + M_j + M_y + N_1 (l + L) = 0; \\ \delta_1 = \xi_1 Y_1; \\ \delta_2 = \xi_2 Y_2; \\ V_{bn} = V \operatorname{tg} \delta_2; \\ V_{an} = V \operatorname{tg} (a - \delta_1); \\ V_{bn} = b \omega_2 - V_{cn}; \\ V_{an} = a \omega_2 - V_{cn}; \\ Y_2 b + N_1 (b + l) - Y_1 a + M_j = 0, \end{cases} \quad (16)$$

де  $N = M \left( V \omega_2 + \frac{dV_{cn}}{dt} \right)$ ;  $T = M \omega_2 V_{cn}$ ;

$M_j = M \rho_i^2 \frac{d\omega_2}{dt}$ ;  $M$  – маса трактора;  $l$  –

відстань виносу точки прикладання сил  $N_1$  і  $T_1$  відносно задньої вісі трактора;

швидкість середини передньої вісі трактора;  $V_{an}$  – нормальна складова швидкості  $V_a$ ;  $V_{cn}$  – нормальна складова швидкості центру ваги.

Розв'язуючи цю систему рівнянь, отримаємо диференціальне рівняння виду:

$V_{bn}$  – нормальна складова швидкості  $V_b$ ;  $V_a$  –

$$\frac{d^2 \omega_2}{dt^2} + B \frac{d\omega_2}{dt} + C \omega_2 = D \alpha + E \frac{d\alpha}{dt} + F N_1 + K \frac{dN_1}{dt}, \quad (17)$$

$$\text{де } B = \frac{1}{JV} \left( \frac{b^2}{\xi_2} + \frac{a^2}{\xi_1} \right) + \frac{1}{MV} \left( \frac{1}{\xi_2} + \frac{1}{\xi_1} \right); C = \frac{L^2}{JMV^2 \xi_1 \xi_2} + \frac{1}{J} \left( \frac{b}{\xi_2} - \frac{a}{\xi_1} \right);$$

$$D = \frac{L}{JMV \xi_1 \xi_2}; E = \frac{a}{J \xi_1}; L_1 = a + b + l; K = -\frac{b+l}{J}; F = -\frac{1}{JMV} \left( \frac{L_1}{\xi_1} + \frac{l}{\xi_2} \right).$$

Рівняння (17) пов'язує кутову швидкість обертання трактора  $\omega_2$  з незалежними змінними, а саме: кутом повороту керованих коліс трактора  $\alpha$  і бічною силою на гаку  $N_1$ .

Для отримання залежності координат різних точок трактора від  $\alpha$  і  $N_1$ , виразимо координати цих точок через координату середини задньої вісі.

З виразу (1) маємо:

$$\frac{dx_b}{dt} = V \sin \xi \approx V \xi, \quad (18)$$

$$\frac{d^2 x_b}{dt^2} = V \frac{d\xi}{dt} = V \omega_2. \quad (19)$$

Звідки



$$\omega_2 = \frac{1}{V} \frac{d^2 x_b}{dt^2}; \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{V} \frac{d^3 x_b}{dt^3};$$
$$\frac{d^2 \omega_2}{dt^2} = \frac{1}{V} \frac{d^4 x_b}{dt^4}. \quad (20)$$

Підставивши значення кутової швидкості

$$\frac{d^4 x_b}{dt^4} + B \frac{d^3 x_b}{dt^3} + C \frac{d^2 x_b}{dt^2} = VD\alpha + VE \frac{d\alpha}{dt} + VFN_1 + VK \frac{dN_1}{dt}. \quad (21)$$

Для будь-якої точки машини можна записати наступне рівняння:

$$x_D = x_b - l_n \sin \xi + l_D \cos \xi. \quad (22)$$

Беручи  $\cos \xi = \xi$ , отримаємо:

$$\frac{d^2 \omega_2}{dt^2} + B \frac{d\omega_2}{dt} + C\omega_2 = D\alpha + E \frac{d\alpha}{dt} + FN_1 + K \frac{dN_1}{dt}; \quad (24)$$
$$\frac{d^2 x_k}{dt^2} = V\omega_2 + (L + l_k) \frac{d\omega_2}{dt}.$$

Система рівнянь для точки копіювання буде мати вигляд:

$$\frac{d^2 \omega_2}{dt^2} + B \frac{d\omega_2}{dt} + C\omega_2 = D\alpha + E \frac{d\alpha}{dt} + FN_1 + K \frac{dN_1}{dt}; \quad (25)$$
$$\frac{d^2 x_D}{dt^2} = V\omega_2 - l_n \frac{d\omega_2}{dt}.$$

Рівняння (21), (24) та (25) описують рух різних точок трактора з урахуванням деформації коліс і ґрунту під дією бічних сил. Рівняння (6) і (12) є окремим випадком рівнянь (21) і (25) і можуть бути отримані з них при умові  $\xi_1 = \xi_2 = 0$ .

Для того щоб з'ясувати ступінь впливу еластичності шин і деформованості ґрунту на характер руху трактора, побудуємо його амплітудно-фазові характеристики для різних швидкостей руху [14, 15].

Візьмемо рівняння (12) для точки копіювання без урахування бічного відведення, і з урахуванням бічного відведення.

Передавальна функція трактора за рівнянням (6) має вигляд:

$$W(p) = \frac{K(1 + T_p)}{p^2}, \quad (26)$$

$\omega_2$  і її похідних в вираз (17), отримаємо рівняння, що зв'язує координату середини вісі ведучих коліс трактора  $x_b$ , кут повороту коліс  $\alpha$  і бічну силу на причіпному гаку трактора:

$$x_D = x_b - l_n \xi + l_D. \quad (23)$$

Продиференціювавши двічі і використовуючи вираз (17), прийдемо до системи рівнянь, що визначають рух довільної точки  $x_D$  в залежності від  $\alpha$  і  $N_1$ :

де  $K = \frac{V^2}{L}$  – коефіцієнт підсилення;

$T = \frac{L + l_k}{V}$  – постійна часу.

В системі рівнянь (25) є дві вхідні функції  $\alpha$  і  $N_1$ . Сила  $N_1$  діє на трактор тільки при наявності причіпного знаряддя і знаходиться в певній залежності від  $\alpha$ , яку можна встановити тільки при розгляді спільного руху трактора з причіпним знаряддям. Якщо трактор рухається без причіпного знаряддя, то сила  $N_1$  буде відсутньою. Для цього випадку передавальна функція трактора, за системою рівнянь (25), має вигляд:



$$W(p) = \frac{K(T_1 p + 1)}{(T_3^2 p^2 + T_4 p + 1) p^2}, \quad (27)$$

де  $K = \frac{D}{C} V$  – коефіцієнт передачі трактора;

$$T_1 = \frac{L + l_k}{V}; T_2 = \frac{E}{D}; T_3 = \sqrt{\frac{1}{C}};$$

$$T_4 = \frac{b}{C} \text{ – постійні часу.}$$

На рис. 3 представлені амплітудно-фазові характеристики трактора, що підраховані при  $\xi = 3,0 \cdot 10^{-4} \text{ кг}^{-1}$ , що справедливо для тракторних шин на оранці. Інші параметри взяті для трактора John Deere 6095B з довідникових джерел. Крива 1 відповідає рівнянню без врахування деформації ґрунту і еластичності коліс для швидкостей 1,70; 2,50; 4,36 та 5,90 м/сек. Всі чотири криві проходять дуже близько одна від одної і тому зливаються. Зі збільшенням швидкості для однієї частоти збурення модуль амплітудно-фазової характеристики збільшується.

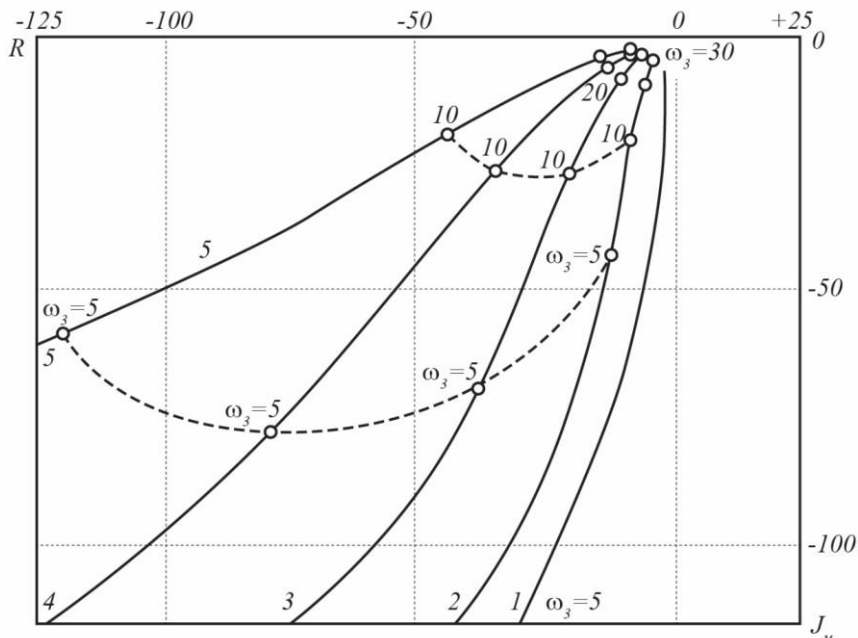


Рис. 3. Амплітудно-фазова характеристика трактора John Deere 6095B

Криві 2, 3, 4, 5 ілюструють амплітудно-фазові характеристики з урахуванням еластичності коліс і деформації ґрунту для тих саме швидкостей руху відповідно.

Криві 1 і 2 для швидкості 1,70 м/сек мало відрізняються одна від одної. Криві 3, 4, 5 мають менший модуль і більший фазовий зсув в порівнянні з відповідними на кривій 1.

Колова частота коливань коліс трактора взята в межах від 5 до 30, що приблизно відповідає реальному діапазону частот від 0,6 до 5 Гц, отриманого експериментально при автоматичному керуванні трактора.

З рис. 3 видно, що близькими по фазі і по модулю є амплітудно-фазові характеристики для швидкості 1,70 м/сек. Для більш високих швидкостей відмінність по фазі значно збільшується, модуль залишається приблизно таким же для  $\omega_3 < 5$  і зменшується для  $\omega_3 > 5$ .

**Висновки.** Отримано рівняння руху трактора з урахуванням деформації

пневматичних шин і ґрунту. Це рівняння дозволяє вивчити рух трактора при наявності зовнішніх бічних сил. Такими силами можуть бути відцентрові сили при русі за криволінійною траєкторією і сили від причіпних і начіпних знарядь на тракторі. Рівняння справедливо для малих кутів повороту спрямовуючих коліс трактора, наприклад, при русі трактора вздовж рядків просяпаних культур і ін.

Отримано спрощене рівняння, що не враховує деформацію шин і ґрунту. Цим рівнянням можна наближено описати рух трактора на твердому ґрунті, що мало деформується, при порівняно малих швидкостях. Використовувати це рівняння бажано тільки при швидкостях не вище 1,7 м/сек на щільному ґрунті.

Рівняння характеризують трактор як об'єкт регулювання і дозволяють вибрати і спроектувати систему автоматичного водіння.



**Список використаних джерел**

1. Федоренко В.Ф., Буклагин Д.С., Аронов Э.Л. Инновационная деятельность в АПК: состояние, проблемы, перспективы. М.: Росинформагротех, 2010. 280 с.
2. Россоха В.В. Технологічний чинник у розвитку сільськогосподарського виробництва. Вісник аграрної науки. 2009. № 3. С. 66-70.
3. Семичев С.В. Анализ устройств управления траекторией движения сельскохозяйственных машин. Инновации в сельском хозяйстве. 2017. № 4(25). С. 217-221.
4. Труфляк Е. В. Использование систем точного земледелия ведущими производителями сельскохозяйственной техники. Краснодар: КубГАУ, 2016. 76 с.
5. Кутырёв А.И., Хорт Д.О., Филиппов Р.А., Смирнов И.Г., Вершинин Р.В. Система автоматизированного управления параметрами агрегата магнитно-импульсной обработки растений в садоводстве. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12. № 1. С. 16-21.
6. Балабанов В.И., Железова С.В., Железова Е.В., Березовский Е.В. и др. Навигационные системы в сельском хозяйстве. Координатное земледелие: учеб. пос. М.: Изд-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2013. 143 с.
7. Генике А.А., Побединский Г.Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. М.: Картгеоцентр, 2004. 165 с.
8. Воронков В., Ефимов Н., Тянь Т. Электронная карта – излишество или необходимость? Новое сельское хозяйство. 2005. № 5. С. 32-36.
9. Труфляк Е. В., Курченко Н.Ю., Креймер А.С. Мониторинг и прогнозирование в области цифрового сельского хозяйства по итогам 2018 г. Краснодар: КубГАУ, 2019. 100 с.
10. Труфляк Е. В., Креймер А.С., Курченко Н.Ю. Точное сельское хозяйство: вчера, сегодня, завтра. British Journal of Innovation in Science and Technology. 2017. Т. 2. № 4. С.15–26.
11. Лебедев А.Т., Калинин Е.И., Шуляк М.Л., Колесник І.В. Аналітична модель повороту трактора з шарнірно-зчленованою рамою. Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. 2016. Вип. 173. С. 161 – 167.
12. Калинин Е.И., Шуляк М.Л., Мальцев В.П. Вплив нестационарності гачкового навантаження на буксування рушіїв колісного трактора. Системи обробки інформації. 2017. № 5. С. 27-30.
13. Лебедев А.Т., Калинин Е.И.

Теоретичне дослідження тягово-зчіпних властивостей тракторів, обладнаних здвоєними шинами, під час виконання ґрунтообробних робіт на агрофоні підвищеної вологості. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: Зб. наук. пр. УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. 2010. Вип. 14 (28). С. 216-224.

14. Калинин Е.И. Частотный анализ колебаний гусеничных тракторов. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України Збірник наукових праць УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. 2018. №. 22(36). С. 86-91.

15. Ovsyannikov S., Kalinin E., Kolesnik I. Oscillation process of multi-support machines when driving over irregularities. Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport, 2018, PP. 307-317.

**References**

1. Fedorenko V.F., Buklagin D.S., Aronov E.L. (2010) Innovacionnaya deyatelnost v APK: sostoyanie, problemy, perspektivy [Innovative activity in the agro-industrial complex: state, problems, prospects]. M.: Rosinformagrotekh, 280 s. [in Russian].
2. Rossoha V.V. (2009) Tekhnologichnij chinnik u rozvitku silskogospodarskogo virobnictva [Technological factor in the development of agricultural production]. Visnyk agrarnoi nauky. № 3. S. 66-70. [in Ukrainian].
3. Semichev S.V. (2017) Analiz ustrojstv upravleniya traektoriej dvizheniya sel'skohozyajstvennyh mashin [Analysis of trajectory control devices for agricultural machines]. Innovacii v sel'skom hozyajstve. № 4(25). S. 217-221. [in Russian].
4. Truflyak E. V. (2016) Ispolzovanie sistem tochnogo zemledeliya vedushchimi proizvoditelyami selskohozyajstvennoj tekhniki [The use of precision farming systems by leading agricultural machinery manufacturers]. Krasnodar: KubGAU. 76 s. [in Russian].
5. Kutyrkov A.I., Hort D.O., Filippov R.A., Smirnov I.G., Vershinin R.V. (2018) Sistema avtomatizirovannogo upravleniya parametrami agregata magnitno-impulsnoj obrabotki rastenij v sadovodstve [The system of automated control of the parameters of the unit for magnetic-pulse processing of plants in horticulture]. Selskohozyajstvennye mashiny i tekhnologii. T. 12. № 1. S. 16-21. [in Russian].
6. Balabanov V.I., Zhelezova S.V., Zhelezova E.V., Berезovskij E.V. i dr. (2013)



Navigacionnye sistemy v selskom hozyajstve. Koordinatnoe zemledelie: ucheb. pos. [Navigation systems in agriculture. Coordinate farming]. M.: Izd-vo RGAU-MSKHA im. K.A. Timiryazeva, 143 s. [in Russian].

7. Genike A.A., Pobedinskij G.G. (2004) Globalnye sputnikovye sistemy opredeleniya mestopolozheniya i ih primenenie v geodezii [Global satellite positioning systems and their application in geodesy]. M.: Kartgeocentr, 165 s. [in Russian].

8. Voronkov V., Efimov N., Tyan T. (2005) Elektronnaya karta – izlishestvo ili neobhodimost'? Novoe selskoe hozyajstvo [Electronic card - excess or necessity? New agriculture]. № 5. S. 32-36. [in Russian].

9. Truflyak E. V., Kurchenko N.YU., Krejmer A.S. (2019) Monitoring i prognozirovanie v oblasti cifrovogo selskogo hozyajstva po itogam 2018 g. [Monitoring and forecasting in the field of digital agriculture at the end of 2018]. Krasnodar: KubGAU. 100 s. [in Russian].

10. Truflyak E. V., Krejmer A.S., Kurchenko N.Y. (2017) Tochnoe selskoe hozyajstvo: vchera, segodnya, zavtra [Precision farming: yesterday, today, tomorrow]. British Journal of Innovation in Science and Technology. T. 2. № 4. S.15–26. [in Russian].

11. Lebedev A.T., Kalinin E.I., Shulyak M.L., Kolesnik I.V. (2016) Analitichna model povorotu traktora z sharnirno-zhelenovanyu ramoyu [Analytical model of tractor rotation with articulated frame]. Visnik HNTUSG im. P. Vasilenka. 2016. Vip. 173 S. 161 – 167. [in Ukrainian].

12. Kalinin E.I., Shulyak M.L., Malcev V.P. (2017) Vpliv nestacionarnosti gakovogo navantazhennya na buksuvannya rushiiv kolisnogo traktora [Influence of non-stationary hook load on towing of wheeled tractor engines]. Sistemi obrobki informacii. № 5. S. 27-30. [in Ukrainian].

13. Lebedev A.T., Kalinin E.I. (2010) Teoretichne doslidzhennya tyagovo-zchipnih vlastivostej traktoriv, obladnanih zdvoenimi shinami, pid chas vikonannya gruntoobrobnih robit na agrofoni pidvishchenoi vologosti [Theoretical study of traction and coupling properties of tractors equipped with double tires during tillage work on agro background of high humidity]. Tekhniko-tehnologichni aspekti rozvitku ta viprobuvannya novoi tekhniki i tekhnologij dlya silskogo gospodarstva Ukraini: Zb. nauk. pr. UkrNDIPVT im. L.Pogorilogo. Vip. 14 (28). S. 216-224. [in Ukrainian].

14. Kalinin E.I. (2018) Chastotnij analiz kolivan' gusenichnih traktoriv [Frequency analysis of caterpillar tractor oscillations]. Tekhniko-tehnologichni aspekti rozvitku ta viprobuvannya novoi tekhniki i tekhnologij dlya silskogo

gospodarstva Ukraini: Zb. nauk. pr. UkrNDIPVT im. L.Pogorilogo. №. 22(36). S. 86-91. [in Ukrainian].

15. Ovsyannikov S., Kalinin E., Kolesnik I (2018). Oscillation process of multi-support machines when driving over irregularities. Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport, PP. 307-317. [in English].

#### УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТРАКТОРА JOHN DEERE 6095В КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЧЕСКОГО ВОЖДЕНИЯ

Главным вопросом, который приходится решать при формировании современных систем автоматического вождения тракторов, является вопрос получения информации о текущем состоянии машинно-тракторного агрегата относительно заданной траектории. Эта информация по своему качеству должна отражать достаточно жесткие требования сельскохозяйственного производства по точности траекторного управления. Таким образом, для создания устройств автоматического вождения тракторов необходимо знать характеристики и свойства этих машин как объектов с точки зрения теории автоматического регулирования. При исследовании таких машин в первую очередь необходимо установить, какой параметр надо считать входным. При ручном управлении обратная связь замыкается визуально на правом переднем колесе, точнее на точке соприкосновения колеса с грунтом. Основной целью данной работы является получение уравнений, связывающих между собой входную и выходную координату, а также входную координату и координаты середины передней и задней оси трактора. Необходимо также установить, при каких исходных данных можно пользоваться упрощенным уравнением, учитывающим только кинематику движения трактора и не учитывающим эластичность шин и деформации грунта. Для этого задача решается как с учетом эластичности шин и деформации почвы, так и без учета данных факторов. Сравниваются частотные характеристики, полученные по упрощенному уравнению и с учетом вышеуказанных факторов при различных скоростях движения. При проведении исследований получены уравнения движения трактора с учетом деформации пневматических шин и грунта. Данное уравнение позволяет изучить движение трактора при наличии внешних боковых сил. Такими силами могут быть центробежные силы при движении по криволинейной траектории и



силы от прицепных и навесных орудий на тракторе. Уравнение справедливо для малых углов поворота направляющих колес трактора. Получено упрощенное уравнение, которое не учитывает деформацию шин и грунта. Этим уравнением можно приближенно описать движение трактора на твердом грунте, который мало деформируется, при сравнительно малых скоростях. Использовать это уравнение желательно только при скоростях не выше 1,7 м/сек на плотном грунте. Оба уравнения характеризуют трактор как объект регулирования и позволяют выбрать и спроектировать систему автоматического вождения.

**Ключевые слова:** трактор, автоматическое вождения, машинно-тракторный агрегат, частотные характеристики.

#### EQUATION OF MOTION OF THE JOHN DEERE 6095B TRACTOR AS AN AUTOMATIC DRIVING OBJECT

The main issue that has to be solved in the formation of modern systems for automatic driving of tractors is the issue of obtaining information about the current state of the machine-tractor unit relative to a given trajectory. In terms of its quality, this information should reflect the rather stringent requirements of agricultural production for the accuracy of trajectory control. Thus, to create devices for automatic driving of tractors, it is necessary to know the characteristics and properties of these machines as objects from the point of view of the theory of automatic control. When examining such machines, first of all, it is necessary to establish which parameter should be considered as input. With manual control, the

feedback is closed visually on the right front wheel, more precisely at the point of contact of the wheel with the ground. The main goal of this work is to obtain equations connecting the input and output coordinates, as well as the input coordinate and coordinates of the middle of the front and rear axles of the tractor. It is also necessary to establish under what initial data a simplified equation can be used, taking into account only the kinematics of the tractor movement and not taking into account the elasticity of tires and deformation of the soil. For this, the problem is solved both taking into account the elasticity of tires and deformation of the soil, and without taking into account these factors. Frequency characteristics are compared, obtained using a simplified equation and taking into account the above factors at different speeds. During the research, the equations of motion of the tractor were obtained taking into account the deformation of pneumatic tires and soil. This equation allows you to study the movement of the tractor in the presence of external lateral forces. Such forces can be centrifugal forces when moving along a curved trajectory and forces from trailed and mounted implements on a tractor. The equation is valid for small steering angles of the tractor idler wheels. A simplified equation is obtained that does not take into account the deformation of tires and soil. This equation can roughly describe the movement of a tractor on solid ground, which is little deformed, at relatively low speeds. It is advisable to use this equation only at speeds not exceeding 1.7 m/s on dense ground. Both equations characterize the tractor as an object of regulation and allow the selection and design of an automatic steering system.

**Key words:** tractor, automatic driving, machine-tractor unit, frequency response.

#### Відомості про авторів

**Калінін Євген Іванович** – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри надійності, міцності, будівництва та технічного сервісу машин імені В.Я. Аніловича Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка (вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, 61001, e-mail: [kalininhntusg@gmail.com](mailto:kalininhntusg@gmail.com)).

**Сайчук Олександр Васильович** – доктор технічних наук, доцент, директор навчально-наукового інституту технічного сервісу Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка (вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, 61001, e-mail: [sajchuksacha@gmail.com](mailto:sajchuksacha@gmail.com)).

**Колпаченко Надія Миколаївна** – кандидат економічних наук, доцент кафедри технологічних систем ремонтного виробництва Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка (вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, 61001, e-mail: [nadiiakolpachenko@gmail.com](mailto:nadiiakolpachenko@gmail.com)).



**Калинин Евгений Иванович** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой надежности, прочности, строительства и технического сервиса машин имени В.Я. Аниловича Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко (ул. Алчевских, 44, г. Харьков, Украина, 61001, e-mail: [kalininhntusg@gmail.com](mailto:kalininhntusg@gmail.com)).

**Сайчук Александр Васильевич** – доктор технических наук, доцент, директор учебно-научного института технического сервиса Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко (ул. Алчевских, 44, г. Харьков, Украина, 61001, e-mail: [sajchuksacha@gmail.com](mailto:sajchuksacha@gmail.com)).

**Колпаченко Надежда Николаевна** – кандидат экономических наук, доцент кафедры технологических систем ремонтного производства Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко (ул. Алчевских, 44, г. Харьков, Украина, 61001, e-mail: [nadiiakolpachenko@gmail.com](mailto:nadiiakolpachenko@gmail.com)).

**Kalinin Evgeniy** – Doctor of Technical Sciences, associate professor, head of the Veniamin Anilovich Reliability, Durability, Building and Technical Service of Machines department of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture (St. Alchevskih, 44, Kharkiv, Ukraine, 61001, e-mail: [kalininhntusg@gmail.com](mailto:kalininhntusg@gmail.com))

**Saychuk Olexander** – Doctor of Technical Sciences, associate professor, director of the educational and scientific institute of technical service of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture (St. Alchevskih, 44, Kharkiv, Ukraine, 61001, e-mail: [sajchuksacha@gmail.com](mailto:sajchuksacha@gmail.com))

**Kolpachenko Nadiia** – Candidate of Economical Sciences, associate professor, associate professor of the department of technological systems of repair production of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture (St. Alchevskih, 44, Kharkiv, Ukraine, 61001, e-mail: [nadiiakolpachenko@gmail.com](mailto:nadiiakolpachenko@gmail.com))