

**МАШИНОВИКОРИСТАННЯ У РОСЛИННИЦТВІ ТА ТВАРИННИЦТВІ**

УДК 631.3.06.001.66

**ТЕОРІЯ ПЛОСКОПАРАЛЕЛЬНОГО РУХУ УДОБРЮВАЛЬНО-ПОСІВНОГО
МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТУ****Калетнік Григорій Миколайович** д.е.н., академік НААН

Вінницький національний аграрний університет

Адамчук Валерій Васильович д.т.н., академік НААН**Петриченко Євгеній Анатолійович** інженерНаціональний науковий центр "Інститут механізації та електрифікації сільського
господарства" Національної академії аграрних наук України**Булгаков Володимир Михайлович** д.т.н., академік НААН

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Кувачов Володимир Петрович к.т.н., доцент

Таврійський державний агротехнологічний університет

Kaletnik H.

Vinnytsia National Agrarian University

Adamchuk V.**Petrychenko Ie.**

National Scientific Centre "Institute of Agricultural Engineering and Electrification" NAAS of Ukraine

Bulgakov V.

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Kuvachov V.

Tavria State Agro Technological University

Анотація: проблема енергозбереження при інтенсивному вирощуванні зернових культур є однією із найбільш пріоритетних у сільськогосподарському виробництві України. Завдання комплектування та використання комбінованих машинно-тракторних агрегатів дозволяє суттєво зменшувати енергетичні і трудові витрати на одиницю продукції рослинництва. Метою дослідження є підвищення ефективності використання удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату шляхом обґрунтування його конструктивних та інших параметрів з позиції покращення його стійкості і керованості руху. В основу дослідження покладені методи теоретичної механіки, статистичної динаміки і теорії трактора, з використанням пакету Mathcad. Розроблена математична модель плоско-паралельного руху комбінованого удобрювально-посівного агрегату, яка дозволяє обґрунтувати його конструктивні і кінематичні параметри, з позиції його стійкого руху у горизонтальній площині.

Ключові слова: комбінований машинно-тракторний агрегат, удобрювально-посівний агрегат, плоско-паралельний рух, математична модель.

Постановка проблеми

Проблема енергозбереження в даний час є однією із найбільш пріоритетних у сільськогосподарському виробництві України [1, 2].

Більшість технологічних процесів у сільськогосподарському виробництві механізовано, а тому рівень технологій, якість і собівартість одержуваної продукції багато в чому визначаються мірою досконалості використовуваних машин і агрегатів.

У вирішенні цього питання у нашій країні й за рубежом ведуться роботи з виявлення раціональних способів обробки ґрунту. Цільовою функцією ефективності останніх є мінімум енергетичних і трудових витрат на одиницю продукції рослинництва [3-6]. Удосконалювання технології обробки ґрунту здійснюється, в основному, по двох основних напрямках: мінімізація обробки ґрунту й поєднання декількох операцій за один прохід сільськогосподарського агрегату [7, 8].

Відомо, що за недостатньої кількості опадів в степовій зоні України та при їх дефіциті у весняний період азотні добрива разом із фосфорними і калійними вносяться повністю під зяблеву оранку або передпосівну культивування. Проведення двох окремих операцій, а саме сівби з внесенням стартових добрив та окремого підживлення по вегетуючим посівам, потребує не менше 8 кг палива на кожен гектар оброблюваної площі, в разі застосування популярного на півдні України односівалочного агрегату на базі трактора тягового класу 1,4.



Одним із шляхів зменшення цього показника є проведення одночасного внутрішньогрунтового мінерального удобрення та сівби зернових. Цілком зрозуміло, що для цього потрібно створити відповідний комбінований машинно-тракторний агрегат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням комплексного мінерального удобрення ґрунту присвячена достатня кількість праць, але більшість з запропонованих технологій передбачають кількарязовий прохід простих агрегатів та не забезпечують повноти зароблення добрив у ґрунт. Так, наприклад, часто взагалі використовують відцентрову машину для поверхневого удобрення ґрунту і важкі борони або культиватор [9]. При роботі такого комплексу машин повний комплекс мінеральних добрив відцентровою машиною розсипається по поверхні поля, та загортається у ґрунт важкими боронами або культиватором. Недоліком такої технології є те, що мінеральні добрива розсипаються по поверхні поля недостатньо рівномірно, а також загортаються у ґрунт на різну і недостатню глибину. Тому при проростанні насіння на таким чином удобреному полі паростки рослин недостатньо забезпечуються поживними речовинами, що обумовлює уповільнення їх росту і розвитку та зниження зимостійкості. Крім того, в процесі вегетації рослин верхній шар ґрунту висихає, а тому мінеральні добрива, що знаходяться у цьому шарі не розчиняються і не використовуються рослинами, що знижує ефективність удобрення ґрунту.

Аналізом переваг комбінованих агрегатів, встановлено, що їх використання забезпечує зниження витрат праці в середньому на 20%, пального – на 25%. Сумарна колія після проходу тракторів і сільськогосподарських машин зменшується на 45%, при цьому вміст вологи в ґрунті в шарі товщиною до 15 см збільшується на 8...10%. Тому, пошук оптимальної конструктивної технологічної схеми комбінованого агрегату для внутрішньогрунтового мінерального удобрення та одночасної сівби зернових культур, яка б була позбавлена вищезазначених недоліків є важливою народногосподарською задачею.

Мета досліджень

Метою дослідження є підвищення ефективності використання удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату шляхом обґрунтування його конструктивних та інших параметрів з позиції покращення його стійкості і керованості руху.

Методика досліджень

Теоретичні дослідження, синтез конструктивних схем і параметрів удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату здійснювався шляхом моделювання на ПК умов його функціонування. В основу методів дослідження покладені методи теоретичної механіки, статистичної динаміки і теорії трактора, з використанням пакету Mathcad.

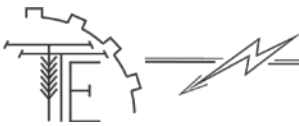
Аналіз керованості руху досліджуваного агрегату здійснювався за наступним алгоритмом. На основі побудованої передаточної функції за загальновідомою методикою теорії автоматичного регулювання динамічних систем розраховані відповідні амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) і фазово-частотні характеристики (ФЧХ) досліджуваного комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату при відпрацюванні ним керуючого впливу. Перші із них характеризують ступінь підсилення динамічною системою вхідного сигналу, а другі – величину запізнення її реакції на цей сигнал.

Оскільки за фізичною суттю досліджуваний агрегат є слідкуючою динамічною системою, то для неї заздалегідь відомі бажані (ідеальні) амплітудно-частотні характеристики і фазово-частотні характеристики. За умови відпрацювання системою коливального керуючого впливу в робочому діапазоні його частот ці характеристики мають бути такими [10]:

$$АЧХ = 1; ФЧХ = 0.$$

Багатьма попередніми науковими дослідженнями встановлено, що для сільськогосподарських машинно-тракторних агрегатів як слідкуючих динамічних систем, робочий діапазон частоти керуючого впливу (позначимо її ω) зазвичай не перевищує 0,5 Гц (або $3,14 \text{ с}^{-1}$ [11]). Звідси бажана (ідеальна) амплітудно-частотна характеристика агрегату в діапазоні частот коливальних кута повороту керованих коліс агрегату трактора до $3,14 \text{ с}^{-1}$ має дорівнювати 1, а поза цією частотою – 0. Фізично це означає, що при зміні частоти коливальних вхідного параметру α від $\omega = 0$ до $\omega = 3,14 \text{ с}^{-1}$ курсовий кут енергетичного засобу (як реакція на вхідний керуючий вплив) має дорівнювати куту повороту його керованих коліс, тобто $\varphi = \alpha$. За умови $\varphi > \alpha$ або $\varphi < \alpha$ маємо відповідно пере- або недорегулювання динамічною системою вхідного сигналу, що у однаковій мірі є небажаним.

Звичайно реальні амплітудно-частотні характеристики, в більшості випадків, можуть



відрізнятися від бажаних (ідеальних) характеристик. Але алгоритм математичного моделювання при цьому залишається однозначним і незмінним. А саме: те схемне рішення машинно-тракторного агрегату, або те значення того чи іншого конструктивно-технологічного характеру є переважним, яке наближає дійсні амплітудно-частотні і фазово-частотні характеристики до ідеальних.

Результати досліджень

Для побудови розрахункової математичної моделі комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату, який складається із агрегатуючого колісного трактора, до якого спочатку, за допомогою стандартного начіпного пристрою, приєднана туковисівна сівалка (здійснює основне внесення мінеральних добрив на збільшену глибину стрічковим методом), а позаду неї, за допомогою розробленого спеціального пристрою, причеплена зерно-тукова сівалка (здійснює висів зернових культур разом зі стартовою дозою мінеральних добрив у вказані стрічки на меншу глибину), використаємо основні положення, які викладені в [12]. Побудуємо спочатку еквівалентну схему такого комбінованого машинно-тракторного агрегату. Для цього, насамперед, слід зробити ряд припущень.

Врахуємо тільки основні елементи комбінованого удобрювально-посівного агрегату, які здійснюють різні рухи. Оскільки динамічна система, яка буде розглядатись, є багатомасовою, то для спрощення розрахунків будемо враховувати тільки рухи, які впливають на якість виконання технологічного процесу. Віднесемо такий машинний агрегат (дану динамічну систему) до декартової системи координат $Oxyz$. Також припускаємо, що при русі даного машинно-тракторного агрегату уздовж поверхні поля, усі його точки рухаються у площинах, які паралельні до площини xOy (рис. 1).

Щоб скласти систему диференціальних рівнянь руху даної механічної системи, розглянемо її у додатному поточному положенні і опишемо її положення під час руху на площині шістьма незалежними узагальненими координатами. Також припускаємо, що у початковий момент часу $t = 0$ механічна система була орієнтована уздовж осі Ox і починає рухатись із стану спокою. Тому рух даної механічної системи буде описуватись шістьма диференціальними рівняннями другого порядку відносно вказаних незалежних узагальнених координат. Таким чином, і математична модель удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату – це модель механічної системи, яка має шість ступенів вільності (див. рис. 1).

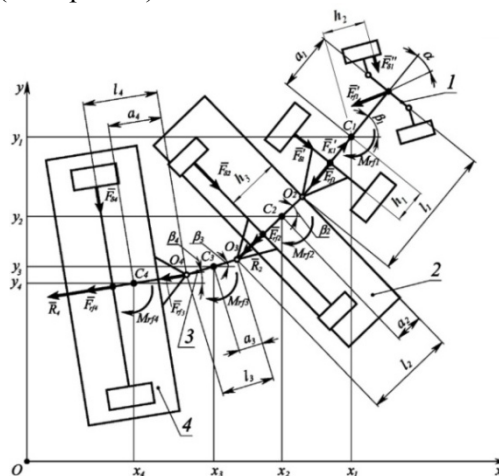


Рис. 1. Еквівалентна схема комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату: 1 - трактор; 2 - удобрювальний агрегат; 3 - причіпний пристрій; 4 - посівний агрегат

Механічна система, що досліджується, віднесена до нерухої декартової системи координат $Oxyz$ (див. рис. 1). Початок цієї системи знаходиться у довільній точці поверхні поля, а осі Ox та Oy розташовано у горизонтальній площині (площині поверхні поля), а вісь Oz спрямуємо вертикально вгору.

Для складання диференціальних рівнянь руху одержаної механічної системи покажемо її у поточному положенні в додатному напрямі і її положення під час руху опишемо шістьма незалежними узагальненими координатами:

$$x_1, y_1, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4,$$



де x_1, y_1 – координати центра мас агрегуючого трактора;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ – відповідно кути, утворені поздовжніми осями ланок механічної системи з віссю Ox ;

$m_i (i = \overline{1,4})$ – маси ланок механічної системи;

$C_i (x_i, y_i)$ – центр мас i -ої ланки системи, $(i = \overline{1,4})$;

a_i – відстані від центра мас ланки до її переднього шарніра;

l_i – відстані між двома сусідніми осями шарнірів.

Таким чином, розроблена еквівалентна схема на рис. 1 повністю відображує, з врахуванням відмічених припущень, стан вказаного комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату в процесі виконання ним технологічного процесу і дає можливість досліджувати його плоскопаралельний рух.

Нехай у початковий момент часу ($t = 0$) механічна система (див. рис. 1) була орієнтована вздовж осі Ox і починає рухатись зі стану спокою.

Оскільки дана механічна система є багатоланковою і багатомасовою, то її плоско паралельний рух опишемо рівняннями в формі Лагранжа 2-го роду [13]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_s} = Q_s \quad (s = \overline{1,6}), \quad (1)$$

де T – кінетична енергія механічної системи;

q_s – узагальнена координата;

s – номер узагальненої координати;

Q_s – узагальнена сила, що відповідає узагальненій координаті q_s .

Після розкриття відповідних похідних у рівнянні (1), отримуємо наступну систему диференціальних рівнянь (2), яка описує рух причіпного комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату у горизонтальній площині. Перше рівняння системи (2) - рух агрегуючого колісного трактора вздовж осі Ox , друге рівняння - рух трактора вздовж осі Oy , третє рівняння - поворот трактора навколо його центра мас.

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + \sum_{i=2}^4 m_i \ddot{x}_i &= \sum_{i=1}^4 F_{xi}, \\ m_1 \ddot{y}_1 + \sum_{i=2}^4 m_i \ddot{y}_i &= \sum_{i=1}^4 F_{yi}, \\ I_1 \ddot{\beta}_1 + (l_1 - a_1) \sum_{i=2}^4 m_i (\ddot{x}_i \sin \beta_1 - \ddot{y}_i \cos \beta_1) &= \\ &= M_{C_1} - M_{rf1} + (l_1 - a_1) \left(\sin \beta_1 \sum_{i=2}^4 F_{xi} - \cos \beta_1 \sum_{i=2}^4 F_{yi} \right), \\ I_2 \ddot{\beta}_2 + m_2 a_2 (\ddot{x}_2 \sin \beta_2 - \ddot{y}_2 \cos \beta_2) + l_2 [m_3 (\ddot{x}_3 \sin \beta_2 - \ddot{y}_3 \cos \beta_2) + \\ &+ m_4 (\ddot{x}_4 \sin \beta_2 - \ddot{y}_4 \cos \beta_2)] &= M_{O_2} - M_{rf2} + l_2 \left(\sin \beta_2 \sum_{j=3}^4 F_{xj} - \cos \beta_2 \sum_{j=3}^4 F_{yj} \right), \\ I_3 \ddot{\beta}_3 + m_3 a_3 (\ddot{x}_3 \sin \beta_3 - \ddot{y}_3 \cos \beta_3) + l_3 m_4 (\ddot{x}_4 \sin \beta_3 - \ddot{y}_4 \cos \beta_3) &= \\ &= M_{O_3} - M_{rf3} + l_3 (\sin \beta_3 F_{x4} - \cos \beta_3 F_{y4}), \\ I_4 \ddot{\beta}_4 + m_4 a_4 (\ddot{x}_4 \sin \beta_4 - \ddot{y}_4 \cos \beta_4) &= M_{O_4} - M_{rf4}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Слід зазначити, що останні три рівняння системи (2) описують поворот ланок комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату навколо власного центра мас, відповідно: четверте рівняння описує поворот першого удобрювального агрегату, рівняння п'ять - зчіпки, рівняння шість - посівного агрегату.

Для лінерізації системи диференціальних рівнянь (2) будемо вважати, що при малих кутах $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ малими будуть також і швидкості $\dot{\beta}_1, \dot{\beta}_2, \dot{\beta}_3, \dot{\beta}_4$. Це пояснюється достатньою інертністю мас агрегату і реальними умовами його переміщення по поверхні поля, де при малих переміщеннях складові елементи агрегату не встигають розігнатися до великих швидкостей).

У цьому випадку, тим більше, в першому наближенні, можна вважати досить малими добутки



$\beta_1 \cdot \dot{\beta}_1^2$, $\beta_2 \cdot \dot{\beta}_2^2$, $\beta_3 \cdot \dot{\beta}_3^2$, $\beta_4 \cdot \dot{\beta}_4^2$. Тому членами рівнянь даної системи, що містять зазначені добутки можна знехтувати. В результаті чого система диференціальних рівнянь значно спроститься та прийме вигляд лінійної системи, яка буде мати наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} & A_{11}\ddot{y}_1 + A_{12}\ddot{\beta}_1 + A_{13}\ddot{\beta}_2 + A_{14}\ddot{\beta}_3 + A_{15}\ddot{\beta}_4 + \\ & + A_{16}\beta_1 + A_{17}\beta_2 + A_{18}\beta_3 + A_{19}\beta_4 = B_1, \\ & A_{21}\ddot{y}_1 + A_{22}\ddot{\beta}_1 + A_{23}\ddot{\beta}_2 + A_{24}\ddot{\beta}_3 + A_{25}\ddot{\beta}_4 + \\ & + A_{26}\beta_1 + A_{27}\beta_2 + A_{28}\beta_3 + A_{29}\beta_4 = B_2, \\ & A_{31}\ddot{y}_1 + A_{32}\ddot{\beta}_1 + A_{33}\ddot{\beta}_2 + A_{34}\ddot{\beta}_3 + A_{35}\ddot{\beta}_4 + \\ & + A_{36}\beta_1 + A_{37}\beta_2 + A_{38}\beta_3 + A_{39}\beta_4 = B_3, \\ & A_{41}\ddot{y}_1 + A_{42}\ddot{\beta}_1 + A_{43}\ddot{\beta}_2 + A_{44}\ddot{\beta}_3 + A_{45}\ddot{\beta}_4 + \\ & + A_{46}\beta_1 + A_{47}\beta_2 + A_{48}\beta_3 + A_{49}\beta_4 = B_4, \\ & A_{51}\ddot{y}_1 + A_{52}\ddot{\beta}_1 + A_{53}\ddot{\beta}_2 + A_{54}\ddot{\beta}_3 + A_{55}\ddot{\beta}_4 + \\ & + A_{56}\beta_1 + A_{57}\beta_2 + A_{58}\beta_3 + A_{59}\beta_4 = B_5, \\ & A_{61}\ddot{y}_1 + A_{62}\ddot{\beta}_1 + A_{63}\ddot{\beta}_2 + A_{64}\ddot{\beta}_3 + A_{65}\ddot{\beta}_4 + \\ & + A_{66}\beta_1 + A_{67}\beta_2 + A_{68}\beta_3 + A_{69}\beta_4 = B_6. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де

$$\begin{aligned} & A_{11} = 0; A_{12} = 0; A_{13} = 0; A_{14} = 0; A_{15} = 0; \\ & A_{16} = F'_{\delta 1} - F_{\delta 2}; A_{17} = -F_{\delta 2}; A_{18} = 0; A_{19} = -F_{\delta 4}; \\ & A_{21} = m_1 + m_2 + m_3 + m_4; A_{22} = -(m_2 + m_3 + m_4)(l_1 - a_1); \\ & A_{23} = -(m_2 a_2 + m_3 l_2 + m_4 l_2); A_{24} = -(m_3 a_3 + m_4 l_3); \\ & A_{25} = -m_4 a_4; A_{26} = -(F'_{k1} - F'_{f1} - F_{f1}); \\ & A_{27} = F_{f2} + R_2; A_{28} = F_{f3}; A_{29} = F_{f4} + R_4; \\ & A_{31} = -(m_2 + m_3 + m_4)(l_1 - a_1); A_{32} = I_1 + (m_2 + m_3 + m_4)(l_1 - a_1)^2 + \\ & + 2I_{k1} \left(\frac{d_1}{r_{k1}} \right)^2 + \frac{2I'_{k1}(d_0 + d_1)[(d_0 + d_1) + a_1 \alpha]}{(r'_{k1})^2}; \\ & A_{33} = [m_2 a_2 + m_3 l_2 + m_4 l_2](l_1 - a_1); A_{34} = (m_3 a_3 + m_4 l_3)(l_1 - a_1); \\ & A_{35} = m_4 (l_1 - a_1) a_4; A_{36} = -(F_{f2} + R_2 - F_{f3} - F_{f4} - R_4)(l_1 - a_1); \\ & A_{37} = -(F_{f2} + R_2)(l_1 - a_1); A_{38} = F_{f3}(l_1 - a_1); \\ & A_{39} = -(F_{f4} + R_4)(l_1 - a_1); \\ & A_{41} = -(m_2 a_2 + m_3 l_2 + m_4 l_2); A_{42} = (m_2 a_2 + m_3 l_2 + m_4 l_2)(l_1 - a_1); \\ & A_{43} = I_2 + m_2 a_2^2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_2^2 + \frac{I_{k2}}{r_{k2}^2} (d_{l_2}^2 + d_{r_2}^2); \\ & A_{44} = m_3 l_2 a_3 + m_4 l_2 l_3; A_{45} = m_4 l_2 a_4; \\ & A_{46} = 0; A_{47} = -(F_{f3} l_2 - F_{f4} l_2 - R_4 l_2); A_{48} = -F_{f3} l_2; \\ & A_{49} = -(F_{f4} l_2 + R_4 l_2); \\ & A_{51} = -(m_3 a_3 + m_4 l_3); A_{52} = (m_3 a_3 + m_4 l_3)(l_1 - a_1); \\ & A_{53} = (m_3 a_3 + m_4 l_3) l_2; A_{54} = I_3 + m_4 l_3^2 + \frac{I_{k3}}{r_{k3}^2} (d_{l_3}^2 + d_{r_3}^2); \\ & A_{55} = m_4 l_3 a_4; A_{56} = 0; A_{57} = 0; A_{58} = -(F_{f4} - R_4) l_3; \\ & A_{59} = -(F_{f4} + R_4) l_3; \\ & A_{61} = -m_4 a_4; A_{62} = m_4 a_4 (l_1 - a_1); \\ & A_{63} = m_4 a_4 l_2; A_{64} = m_4 a_4 l_3; A_{65} = I_4 + m_4 a_4^2 + \frac{I_{k4}}{r_{k4}^2} (d_{l_4}^2 + d_{r_4}^2); \\ & A_{66} = 0; A_{67} = 0; A_{68} = 0; A_{69} = 0; \\ & B_1 = F_{k1} - F'_{f1} - F_{\delta 2} \alpha - F_{f1} - F_{f2} - R_2 - F_{f3} - F_{f4} - R_4; \\ & B_2 = -F'_{\delta 1} + F'_{f1} \alpha - F'_{\delta 2} - F_{\delta 2} - F_{\delta 4}; B_3 = M_{C1} + (F_{\delta 2} + F_{\delta 4})(l_1 - a_1); \\ & B_4 = M_{O2} + F_{\delta 4} l_2; B_5 = M_{O3} + F_{\delta 4} l_3; B_6 = M_{O4}; \\ & M_{C1} = F'_{\delta 1} \cdot h_1 - F'_{\delta 2} \cdot h_2; M_{O2} = F_{\delta 2} \cdot h_3; M_{O3} = 0; M_{O4} = F_{\delta 4} \cdot l_4. \end{aligned}$$



За умови $A_{11} \dots A_{15} = 0$ перше рівняння системи (3) стає статичним, дорівнює нулю, а тому далі не розглядається.

Розглядувана математична модель комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату описує його інерційні властивості. Про це свідчать диференціальні рівняння розрахункової моделі, які включають лише другі похідні незалежних координат (тобто $\ddot{y}_1, \ddot{\beta}_1, \ddot{\beta}_2, \ddot{\beta}_3, \ddot{\beta}_4$). Слід підкреслити, що із-за відносної малюнки маси третьої ланки досліджуємого машинно-тракторного агрегату її інерційними властивостями можна знехтувати.

З урахуванням того, що $m_3 = l_3 = \alpha_3 = 0$, система рівнянь (3) матиме наступний вид:

$$\left. \begin{aligned} A_{21}\ddot{y}_1 + A_{22}\ddot{\beta}_1 + A_{26}\beta_1 + A_{23}\ddot{\beta}_2 + A_{27}\beta_2 + A_{25}\ddot{\beta}_4 + A_{29}\beta_4 &= K\alpha + K_1, \\ A_{31}\ddot{y}_1 + A_{32}\ddot{\beta}_1 + A_{36}\beta_1 + A_{33}\ddot{\beta}_2 + A_{37}\beta_2 + A_{35}\ddot{\beta}_4 + A_{39}\beta_4 &= B_3, \\ A_{41}\ddot{y}_1 + A_{42}\ddot{\beta}_1 + A_{46}\beta_1 + A_{43}\ddot{\beta}_2 + A_{47}\beta_2 + A_{45}\ddot{\beta}_4 + A_{49}\beta_4 &= B_4, \\ A_{61}\ddot{y}_1 + A_{62}\ddot{\beta}_1 + A_{66}\beta_1 + A_{63}\ddot{\beta}_2 + A_{67}\beta_2 + A_{65}\ddot{\beta}_4 + A_{69}\beta_4 &= B_6, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де $K = F'_{\alpha 1}, K_1 = -F'_{\delta 1} - F'_{\delta 2} - F_{\delta 2} - F_{\delta 4}$.

Для спрощення розв'язання системи рівнянь (4) застосуємо перетворення Лапласа. Суть їх, як відомо, полягає в переході від оригінала функції до її відображення шляхом уведення спеціального оператора – комплексної перемінної $p = \frac{d}{dt}$. У підсумку це дозволяє перейти від складної системи диференціальних до відносно простої системи алгебраїчних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} K_{21} \cdot y_1(p) + K_{22} \cdot \beta_1(p) + K_{23} \cdot \beta_2(p) + K_{25} \cdot \beta_4(p) &= K \cdot \alpha(p) + K_1 \cdot 1(p), \\ K_{31} \cdot y_1(p) + K_{32} \cdot \beta_1(p) + K_{33} \cdot \beta_2(p) + K_{35} \cdot \beta_4(p) &= B_3 \cdot 1(p), \\ K_{41} \cdot y_1(p) + K_{42} \cdot \beta_1(p) + K_{43} \cdot \beta_2(p) + K_{45} \cdot \beta_4(p) &= B_4 \cdot 1(p), \\ K_{61} \cdot y_1(p) + K_{62} \cdot \beta_1(p) + K_{63} \cdot \beta_2(p) + K_{65} \cdot \beta_4(p) &= B_6 \cdot 1(p), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де

$$\begin{aligned} K_{21} &= A_{21} \cdot p^2, & K_{31} &= A_{31} \cdot p^2, & K_{41} &= A_{41} \cdot p^2, & K_{61} &= A_{61} \cdot p, \\ K_{22} &= A_{22} \cdot p^2 + A_{26}, & K_{32} &= A_{32} \cdot p^2 + A_{36}, & K_{42} &= A_{42} \cdot p^2, & K_{62} &= A_{62} \cdot p, \\ K_{23} &= A_{23} \cdot p^2 + A_{27}, & K_{33} &= A_{33} \cdot p^2 + A_{37}, & K_{43} &= A_{43} \cdot p^2 + A_{47}, & K_{63} &= A_{63} \cdot p, \\ K_{25} &= A_{25} \cdot p^2 + A_{29}, & K_{35} &= A_{35} \cdot p^2 + A_{39}, & K_{45} &= A_{45} \cdot p^2 + A_{49}, & K_{65} &= A_{65} \cdot p. \end{aligned}$$

Система рівнянь (5) відображає динамічний стан досліджуємого комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату під впливом керуючого $[\alpha(p)]$ і збудовального вхідних змінних. До останніх відносяться одиничні впливи $K_0 \cdot 1(p)$ і $B_3 = \cdot 1(p)$, $B_4 = \cdot 1(p)$ і $B_6 = \cdot 1(p)$. Вихідними змінними системи є координата y_1 і кути β_1, β_2 і β_4 .

Передаточною функцією (W_α) досліджуємого комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату, яка відображає керованість його руху, є відношення двох визначників:

$$W_\alpha = \frac{D_\alpha}{D}. \quad (6)$$

Функція (6) характеризує реакцію трактора у вигляді зміни його курсового кута (β_1) під дією керуючого впливу, яким виступає кут повороту передніх коліс трактора α .

Головний визначник системи (5), складений із коефіцієнтів її лівої частини, має наступний вигляд:

$$D = \begin{vmatrix} K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{25} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{35} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{45} \\ K_{61} & K_{62} & K_{63} & K_{65} \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Для формування визначника D_α у головному визначнику D другий стовпчик, який



репрезентує курсовий кут трактора β_1 , замінюємо стовпчиком тих коефіцієнтів правої частини системи рівнянь (5), які зв'язані із елементом $\alpha(p)$. Такій умові, як бачимо, відповідає лише коефіцієнт K в першій строчці і нулями – у останніх. З урахуванням цього маємо:

$$D_\alpha = \begin{vmatrix} K_{21} & K & K_{23} & K_{25} \\ K_{31} & 0 & K_{33} & K_{35} \\ K_{41} & 0 & K_{43} & K_{45} \\ K_{61} & 0 & K_{63} & K_{65} \end{vmatrix}. \quad (8)$$

З огляду на вищевикладене передаточна функція відпрацювання комбінованим удобрювально-посівним машинно-тракторним агрегатом керуючого впливу у підсумку є такою:

$$W_\alpha = \frac{p^2(F_4 \cdot p^4 + F_2 \cdot p^2 + F_0)}{p^2(C_6 \cdot p^6 + C_4 \cdot p^4 + C_2 \cdot p^2 + C_0)}, \quad (9)$$

де

$$F_4 = K(A_{31} \cdot A_{45} \cdot A_{63} - A_{31} \cdot A_{43} \cdot A_{65} + A_{41} \cdot A_{33} \cdot A_{65} - A_{41} \cdot A_{35} \cdot A_{63} - A_{33} \cdot A_{61} \cdot A_{45} + A_{43} \cdot A_{61} \cdot A_{35})$$

$$F_2 = K(A_{31} \cdot A_{63} \cdot A_{49} - A_{31} \cdot A_{47} \cdot A_{65} - A_{41} \cdot A_{63} \cdot A_{39} + A_{41} \cdot A_{37} \cdot A_{65} - A_{33} \cdot A_{61} \cdot A_{49} + \\ + A_{43} \cdot A_{61} \cdot A_{39} + A_{61} \cdot A_{35} \cdot A_{47} - A_{61} \cdot A_{45} \cdot A_{37}),$$

$$F_0 = K(A_{61} \cdot A_{37} \cdot A_{49} - A_{61} \cdot A_{37} \cdot A_{49}),$$

$$C_6 = A_{21} \cdot A_{32} \cdot A_{43} \cdot A_{65} - A_{21} \cdot A_{32} \cdot A_{45} \cdot A_{63} - A_{21} \cdot A_{33} \cdot A_{42} \cdot A_{65} + A_{21} \cdot A_{33} \cdot A_{62} \cdot A_{45} + \\ + A_{21} \cdot A_{42} \cdot A_{35} \cdot A_{63} - A_{21} \cdot A_{43} \cdot A_{35} \cdot A_{62} - A_{22} \cdot A_{31} \cdot A_{43} \cdot A_{65} + A_{22} \cdot A_{31} \cdot A_{45} \cdot A_{63} + \\ + A_{22} \cdot A_{41} \cdot A_{33} \cdot A_{65} - A_{22} \cdot A_{41} \cdot A_{35} \cdot A_{63} - A_{22} \cdot A_{33} \cdot A_{61} \cdot A_{45} + A_{22} \cdot A_{43} \cdot A_{61} \cdot A_{35} + \\ + A_{31} \cdot A_{23} \cdot A_{43} \cdot A_{65} - A_{31} \cdot A_{23} \cdot A_{62} \cdot A_{45} - A_{31} \cdot A_{42} \cdot A_{25} \cdot A_{63} + A_{31} \cdot A_{25} \cdot A_{43} \cdot A_{62} - \\ - A_{23} \cdot A_{32} \cdot A_{41} \cdot A_{65} + A_{23} \cdot A_{32} \cdot A_{61} \cdot A_{45} + A_{23} \cdot A_{41} \cdot A_{35} \cdot A_{62} - A_{23} \cdot A_{42} \cdot A_{61} \cdot A_{35} + \\ + A_{32} \cdot A_{41} \cdot A_{25} \cdot A_{63} - A_{32} \cdot A_{25} \cdot A_{43} \cdot A_{61} - A_{41} \cdot A_{33} \cdot A_{25} \cdot A_{62} + A_{33} \cdot A_{42} \cdot A_{25} \cdot A_{61} - \\ - A_{21} \cdot A_{32} \cdot A_{63} \cdot A_{49},$$

$$C_4 = A_{21} \cdot A_{32} \cdot A_{47} \cdot A_{65} + A_{21} \cdot A_{33} \cdot A_{62} \cdot A_{49} + A_{21} \cdot A_{42} \cdot A_{63} \cdot A_{39} - A_{21} \cdot A_{42} \cdot A_{37} \cdot A_{65} - \\ - A_{21} \cdot A_{43} \cdot A_{62} \cdot A_{39} + A_{21} \cdot A_{43} \cdot A_{36} \cdot A_{65} - A_{21} \cdot A_{35} \cdot A_{62} \cdot A_{47} + A_{21} \cdot A_{62} \cdot A_{45} \cdot A_{37} - \\ - A_{21} \cdot A_{36} \cdot A_{45} \cdot A_{63} + A_{22} \cdot A_{31} \cdot A_{63} \cdot A_{49} - A_{22} \cdot A_{31} \cdot A_{47} \cdot A_{65} - A_{22} \cdot A_{41} \cdot A_{63} \cdot A_{39} - \\ + A_{22} \cdot A_{41} \cdot A_{37} \cdot A_{65} - A_{22} \cdot A_{33} \cdot A_{61} \cdot A_{49} + A_{22} \cdot A_{43} \cdot A_{61} \cdot A_{39} + A_{22} \cdot A_{61} \cdot A_{35} \cdot A_{47} - \\ - A_{22} \cdot A_{61} \cdot A_{45} \cdot A_{37} - A_{31} \cdot A_{23} \cdot A_{62} \cdot A_{49} + A_{31} \cdot A_{42} \cdot A_{27} \cdot A_{65} - A_{31} \cdot A_{42} \cdot A_{63} \cdot A_{29} + \\ + A_{31} \cdot A_{25} \cdot A_{62} \cdot A_{47} - A_{31} \cdot A_{43} \cdot A_{26} \cdot A_{65} + A_{31} \cdot A_{43} \cdot A_{29} \cdot A_{29} + A_{31} \cdot A_{26} \cdot A_{46} \cdot A_{63} - \\ - A_{31} \cdot A_{62} \cdot A_{27} \cdot A_{45} + A_{23} \cdot A_{32} \cdot A_{61} \cdot A_{49} + A_{23} \cdot A_{41} \cdot A_{62} \cdot A_{39} - A_{23} \cdot A_{41} \cdot A_{36} \cdot A_{65} - \\ - A_{23} \cdot A_{42} \cdot A_{61} \cdot A_{39} + A_{23} \cdot A_{61} \cdot A_{36} \cdot A_{45} - A_{32} \cdot A_{41} \cdot A_{27} \cdot A_{65} + A_{32} \cdot A_{41} \cdot A_{63} \cdot A_{29} - \\ - A_{32} \cdot A_{25} \cdot A_{61} \cdot A_{47} - A_{32} \cdot A_{43} \cdot A_{61} \cdot A_{29} + A_{32} \cdot A_{61} \cdot A_{27} \cdot A_{45} + A_{41} \cdot A_{33} \cdot A_{26} \cdot A_{65} - \\ - A_{41} \cdot A_{33} \cdot A_{62} \cdot A_{29} - A_{41} \cdot A_{25} \cdot A_{62} \cdot A_{37} + A_{41} \cdot A_{25} \cdot A_{36} \cdot A_{63} - A_{41} \cdot A_{26} \cdot A_{35} \cdot A_{63} + \\ + A_{41} \cdot A_{35} \cdot A_{62} \cdot A_{27} + A_{33} \cdot A_{42} \cdot A_{61} \cdot A_{29} - A_{33} \cdot A_{61} \cdot A_{26} \cdot A_{45} + A_{42} \cdot A_{25} \cdot A_{61} \cdot A_{37} - \\ - A_{42} \cdot A_{61} \cdot A_{35} \cdot A_{27} - A_{25} \cdot A_{43} \cdot A_{61} \cdot A_{36} + A_{43} \cdot A_{61} \cdot A_{26} \cdot A_{35},$$

$$C_2 = A_{21} \cdot A_{62} \cdot A_{39} \cdot A_{49} - A_{21} \cdot A_{62} \cdot A_{47} \cdot A_{39} - A_{21} \cdot A_{36} \cdot A_{63} \cdot A_{49} + A_{21} \cdot A_{36} \cdot A_{47} \cdot A_{65} - \\ - A_{22} \cdot A_{61} \cdot A_{37} \cdot A_{49} + A_{22} \cdot A_{61} \cdot A_{47} \cdot A_{39} + A_{31} \cdot A_{26} \cdot A_{63} \cdot A_{49} - A_{31} \cdot A_{26} \cdot A_{47} \cdot A_{65} - \\ - A_{31} \cdot A_{62} \cdot A_{27} \cdot A_{49} + A_{31} \cdot A_{62} \cdot A_{29} \cdot A_{47} + A_{23} \cdot A_{61} \cdot A_{36} \cdot A_{49} + A_{32} \cdot A_{61} \cdot A_{27} \cdot A_{49} - \\ - A_{32} \cdot A_{61} \cdot A_{29} \cdot A_{47} - A_{41} \cdot A_{26} \cdot A_{63} \cdot A_{39} + A_{41} \cdot A_{26} \cdot A_{37} \cdot A_{65} + A_{41} \cdot A_{62} \cdot A_{27} \cdot A_{39} - \\ - A_{41} \cdot A_{62} \cdot A_{37} \cdot A_{29} - A_{41} \cdot A_{27} \cdot A_{36} \cdot A_{65} + A_{41} \cdot A_{36} \cdot A_{63} \cdot A_{29} - A_{33} \cdot A_{61} \cdot A_{26} \cdot A_{49} - \\ - A_{42} \cdot A_{61} \cdot A_{27} \cdot A_{39} + A_{42} \cdot A_{61} \cdot A_{37} \cdot A_{29} - A_{25} \cdot A_{61} \cdot A_{36} \cdot A_{47} + A_{43} \cdot A_{61} \cdot A_{26} \cdot A_{39} - \\ - A_{43} \cdot A_{61} \cdot A_{36} \cdot A_{29} + A_{61} \cdot A_{26} \cdot A_{35} \cdot A_{47} - A_{61} \cdot A_{26} \cdot A_{45} \cdot A_{37} + A_{61} \cdot A_{27} \cdot A_{36} \cdot A_{45},$$

$$C_0 = A_{61} \cdot A_{26} \cdot A_{47} \cdot A_{39} - A_{61} \cdot A_{26} \cdot A_{37} \cdot A_{49} + A_{61} \cdot A_{27} \cdot A_{36} \cdot A_{49} - A_{61} \cdot A_{36} \cdot A_{29} \cdot A_{47}.$$

Знаменник передаточної функції (9), який через головний визначник системи D репрезентує її власні коливання, має два нульових корені. І однозначно вказує на те, що розглядувана нами



незамкнена динамічна система (тобто комбінований удобрювально-посівний агрегат) є нестійкою. І розглядати при цьому критерії стійкості Рауса-Гурвіца, Михайлова або Найквіста є просто недоречним. Тільки після доповнення системи диференціальних рівнянь руху даної системи (5) математичною моделлю водія можна вести мову про її стійкість.

За допомогою розробленої розрахункової математичної моделі горизонтального руху комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату керованість його руху можна оцінити з урахуванням впливу будь-якого із параметрів, що входять до коефіцієнтів K і A_{ij} системи рівнянь (5). Але на даному етапі розглянемо тільки наступні параметри:

- коефіцієнт опору коченню f ходової системи агрегатуючого трактора, а також тукової та зернової сівалок. У математичній моделі плоскопаралельного руху досліджуваного машинно-тракторного агрегату вказаний коефіцієнт репрезентує сили опору коченню його ланок: F'_{rf1} , F_{rf1} , F'_{rf2} і F_{rf4} ;

- a_2 , a_4 – відстані від точок причепу тукової і зернової сівалок до центрів їх мас (див. рис. 1);

- l_2 , l_4 – довжини сниць тукової та зернової сівалок.

Оскільки маси причіпних машин (тукової і зернової сівалок) m_2 і m_4 відповідним чином зв'язані з тяговим класом використовуваного агрегатуючого трактора (у даному випадку – це тяговий клас трактора 1,4), то встановлення впливу зміни цих параметрів на керованість руху комбінованого удобрювально-посівного агрегату даним етапом досліджень не передбачено.

Аналіз отриманих фазово-частотних характеристик досліджуваної динамічної системи показав, що запізнення її реакції на керуючий вплив є постійним і рівним -180° або $-3,14$ рад (рис. 2).

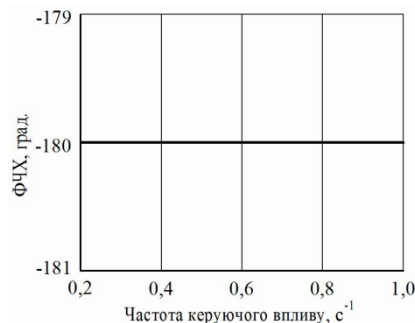


Рис. 2. Фазово-частотні характеристики відтворення динамічною системою керуючого впливу

Взагалі такий перебіг фази відпрацювання керуючого впливу притаманний консервативним динамічним системам з практично відсутніми дисипативними процесами. Формально розглядувана нами система є саме такою, оскільки вплив на неї дисипативних сил нами прийнятий незначним.

Аналіз отриманих розрахунків амплітудно-частотних характеристик показує наступне. За однієї і тієї ж частоти коливань керуючого впливу коефіцієнт його підсилення динамічною системою тим більший, чим більшим є коефіцієнт опору коченню f (рис. 3).

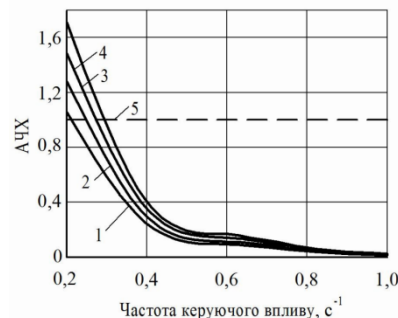


Рис. 3. Амплітудно-частотні характеристики відтворення динамічною системою керуючого впливу за різним значенням коефіцієнта опору коченню: 1 – 0,10; 2 – 0,12; 3 – 0,14; 4 – 0,16; 5 – бажана (ідеальна) амплітудно-частотна характеристика



Так, наприклад, за руху комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату на відносно твердому агротехнічному фоні ($f = 0,10$, крива 1 рис. 3) поворот передніх керованих коліс трактора з частотою $0,2 \text{ с}^{-1}$ обумовлює його реакцію у вигляді зміни курсового кута з коефіцієнтом підсилення 1,1. Водночас, при роботі агрегату на розпушеному фоні ($f = 0,16$, крива 4 рис. 3) коефіцієнт підсилення динамічною системою (трактором) розглядуваного вхідного сигналу тієї ж частоти (тобто $0,2 \text{ с}^{-1}$) зростає до позначки 1,7, все більше віддаляючись при цьому від ідеального стану (крива 5, рис. 3).

При збільшенні частоти повороту керованих коліс агрегатуючого трактора ступінь впливу агрофону, по якому переміщується даний комбінований машинно-тракторний агрегат, зменшується. За умови $\omega > 0,3 \text{ с}^{-1}$ дійсні амплітудно-частотні характеристики стають меншими за 1. Динамічна система переходить до режиму недорегулювання вхідного сигналу, що є явищем небажаним.

Водночас, для кожного стану агротехнічного фону, репрезентованого своїм значенням коефіцієнту опору коченню f , існує така бажана (ω_o) частота повороту керованих коліс агрегатуючого трактора, за якої дійсна амплітудно-частотна характеристика відповідає ідеальній. Графічна інтерпретація цієї залежності має вид, відображений на рис. 4.

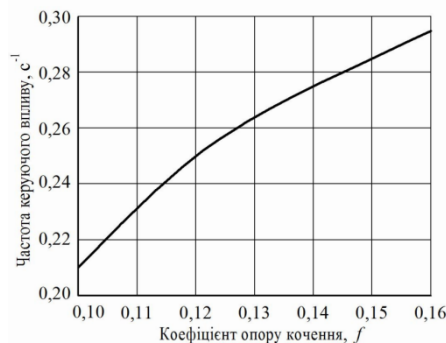


Рис. 4. Залежність бажаної частоти повороту керованих коліс агрегатуючого трактора комбінованого удобрювально-посівного агрегату від умов його руху (коефіцієнта опору коченню f)

Як показує аналіз графічно отриманої функції $\omega_o = f(f)$, в залежності від агротехнічного фону частота коливань керуючого впливу має змінюватися в межах $0,210 \dots 0,295 \text{ с}^{-1}$. Слід підкреслити, що нижня позначка цього діапазону (тобто $0,21 \text{ с}^{-1}$) співпадає з рекомендованою дослідниками частотою повороту керованих коліс трактора машинно-тракторного агрегату під час виконання ним руху на поворотній смузі [14].

Певна річ, що витримати потрібну частоту ω_o в умовах реальної практики у ручному режимі керування трактором украй проблематично. Нині для цього краще застосовувати GPS-навігатор з системою автоматичного підкерування типу UniDrive або іншою.

Як уже підкреслювалось вище, певний вплив на керованість руху розглядуваного комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату можуть здійснювати такі його конструктивні параметри, як α_2 і l_2 (рис. 1). Перший із них, за умови близькості розміщення центру ваги причіпної удобрювальної сівалки 2 до осі її ходової системи, по суті справи є довжиною сніці. Другий визначає поздовжню координату причеплення до трактора зернової сівалки 4 (див. рис. 1).

Із теорії динаміки причіпних машин відомо, що для забезпечення кращої стійкості їх плоскопаралельного руху у горизонтальній площині параметри α_2 і l_2 мають бути якомога більшими. Водночас, зростаючи при цьому кінематична довжина комбінованого агрегату обумовлює збільшення ним не виробничих витрат часу при здійсненні маневру на поворотній смузі. З огляду на це компромісне рішення щодо величин параметрів α_2 і l_2 можна приймати лише після оцінки їх впливу на керованість руху досліджуваного удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату.

Аналіз результатів математичного моделювання показує, що збільшення параметру α_2 з 1,15 м до 3,15 м на частотах коливань керуючого впливу $\omega < 0,24 \text{ с}^{-1}$ бажано, а на частотах $\omega \geq 0,3 \text{ с}^{-1}$ – небажано зменшує дійсні амплітудно-частотні характеристики (рис. 5).

Так, за $\omega = 0,2 \text{ с}^{-1}$ при $\alpha_2 = 3,15 \text{ м}$ амплітудно-частотна характеристика відпрацювання динамічною системою керуючого впливу становить 1,58 (крива 1, рис. 5). В дійсності це означає, що



курсний кут β_1 агрегуючого трактора даного комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату (див. рис. 1) по відношенню до кута повороту α його керованих коліс буде змінюватися з підсиленням у 1,58 разів.

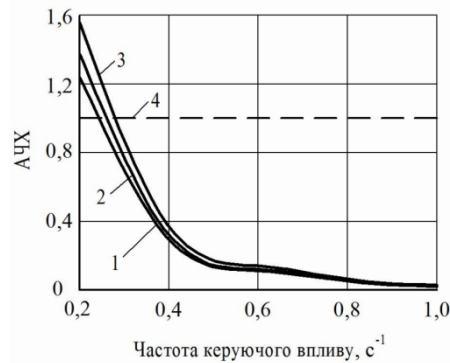


Рис. 5. Амплітудно-частотні характеристики відтворення динамічною системою керуючого впливу за різним значенням конструктивного параметру α_2 : 1 – 1,15 м; 2 – 2,15 м; 3 – 3,15 м; 4 – бажана (ідеальна) амплітудно-частотна характеристика

Іншими словами, розглядувана динамічна система функціонуватиме з перерегулюванням (тобто надмірним підсиленням) вхідного сигналу на 58%, що, як відомо із теорії автоматичного керування слідкуючих динамічних систем, небажано.

Водночас, зі зменшенням параметру α_2 до 1,15 м вказане небажане перерегулювання буде більше, ніж удвічі меншим, оскільки амплітудно-частотна характеристика досліджуваної системи при цьому опуститься до позначки 1,23 (крива 3, рис. 5).

За установлення частоти коливань повороту керованих коліс енергетичного засобу на рівні $\omega = 0,3 \text{ с}^{-1}$ амплітудно-частотна характеристика відпрацювання удобрювально-посівним агрегатом керуючого впливу при $\alpha_2 = 1,15 \text{ м}$ взагалі є ідеальною, тобто дорівнює 1 (крива 1, рис. 5).

Збільшення розглядуваного конструктивного параметру α_2 до 3,15 м на цій же частоті ω зменшує амплітудно-частотну характеристику до позначки 0,7 (крива 3, рис. 5). У даному випадку динамічна система відтворює керуючий вплив із недорегулюванням на 30%, що є фактом небажаним.

І лише в діапазоні частот коливань кута α повороту керованих коліс трактора ω від $0,24 \text{ с}^{-1}$ до $0,30 \text{ с}^{-1}$ (див. рис. 5) можна підібрати таке значення конструктивного параметру α_2 , яке сприятиме практично ідеальній керованості руху даного комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату.

Якісно схожий висновок можна зробити і стосовно вибору конструктивного параметру l_2 . Відміна при цьому полягає у тому, що частотний діапазон коливань керуючого впливу, у якому дійсні амплітудно-частотні характеристики розглядуваної динамічної системи (тобто розглядуваного комбінованого машинно-тракторного агрегату) відповідають ідеальним, є дещо вузьким. Як випливає із аналізу кривих рис. 6, він (діапазон) становить приблизно $0,23 \dots 0,26 \text{ с}^{-1}$.

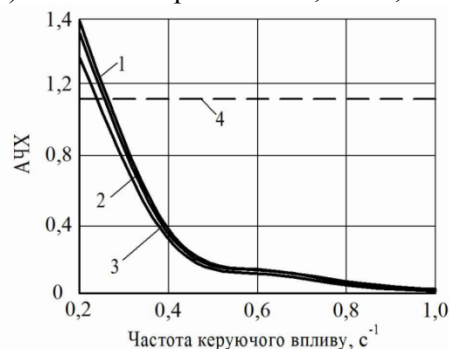
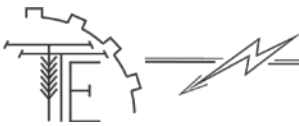


Рис. 6. Амплітудно-частотні характеристики відтворення динамічною системою керуючого впливу за різним значенням конструктивного параметру l_2 : 1 – 2,15 м; 2 – 3,15 м; 3 – 4,15 м; 4 – бажана (ідеальна) амплітудно-частотна характеристика



Якщо збільшення конструктивного параметру a_2 обумовлює однозначну поведінку відповідних амплітудно-частотних характеристик динамічної системи, то така ж зміна параметру l_2 – ні. Так, за частоти $\omega = 0,2 \text{ с}^{-1}$, наприклад, амплітудно-частотна характеристика дорівнює $f(a_2)$ є відємнокорельованою і майже лінійною (крива 1, рис. 7).

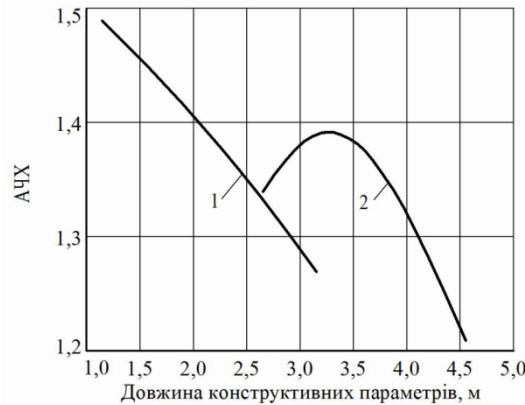


Рис. 7. Амплітудно-частотні характеристики відтворення динамічною системою керуючого впливу частоти $0,2 \text{ с}^{-1}$ за різного значення конструктивних параметрів a_2 (1) і l_2 (2)

Водночас, функція амплітудно-частотна характеристика дорівнює $f(l_2)$ на частоті $\omega = 0,2 \text{ с}^{-1}$ є криволінійною і певною мірою наближеною до параболічної (крива 2, рис. 7). І такий характер залежності амплітудно-частотної характеристики від параметру l_2 зберігається, як впливає із аналізу рис. 6), при збільшенні частоти коливань кута повороту керованих коліс трактора щонайменше до $0,5 \text{ с}^{-1}$.

Характер зміни кривої 2 (рис. 7) вказує на те, що при виборі параметра l_2 перевагу слід віддавати його більшим значенням. У цьому випадку значення дійсної амплітудно-частотної характеристики динамічної системи є більш близькою до 1.

Водночас, збільшення параметра l_2 обумовлює поворот зернової сівалки 4 відносно тукової сівалки 2 (див. рис. 1) без їх зіткнення під час руху комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату на поворотній смузі. У підсумку це означає, що межею збільшення параметру l_2 є таке його значення, яке обумовлюватиме безаварійну поворотність комбінованого агрегату.

Аналіз результатів моделювання керованого руху комбінованого удобрювально-посівного агрегату в горизонтальній площині показує, що вплив на цей процес конструктивних параметрів α_4 і l_4 (див. рис. 1), як і параметрів α_2 і l_2 якісно і кількісно є аналогічним.

Висновки

1. Розроблена математична модель плоскопаралельного руху комбінованого удобрювально-посівного агрегату, яка дозволяє обґрунтувати його конструктивні і кінематичні параметри, з позиції його стійкого руху у горизонтальній площині.

2. В результаті теоретичних досліджень встановлено, що в залежності від поверхні оброблюваного поля частота коливань керуючого впливу – кута повороту керованих коліс комбінованого удобрювально-посівного агрегату – має знаходитися у діапазоні $\omega = 0,210 \dots 0,295 \text{ с}^{-1}$. При цьому більші його значення характерні для роботи агрегату на більш розпушеному агротехнічному фоні, а менші – на більш твердому.

3. Для забезпечення кращої керованості руху комбінованого удобрювально-посівного агрегату перевагу слід віддавати більшим значенням конструктивних параметрів α_2 , l_2 і l_4 (рис. 1). Граничними їх значеннями є такі, які забезпечать безаварійну поворотність ґрунто-удобрювальної машини як відносно трактора, так і відносно причіпної сівалки.

Список літератури

1. Наумов Ю.Ф. Енергоспоживання в Україні / Ю.Ф. Наумов, А.В. Усенко // Організаційно-економічні проблеми розвитку АПК: Колективна монографія у чотирьох частинах / За ред. П.Т. Саблука. – К.: IAE, 2001. –



С. 321-323.

2. Бондар С.М. Основні проблеми машиновикористання в сучасних технологіях обробітку ґрунту Полісся України / С.М. Бондар, І.І. Мельник // Науковий вісник НАУ, вип. 33. – К.: НАУ. – 2000. – С. 101-107.
3. Самородов В. Перспективний напрямок створення комбінованих та широкозахватних МТА / В. Самородов, В. Надикто // Техніка АПК. – 2006. – №4. – С. 6-9.
4. Перспективы использования комбинированных машинно-тракторных агрегатов / В. Кюрчев [и др.] // Научни известия. – Варна (Болгария), 2013. – Т. XXI, Вып. 5 (142). – С. 104-108.
5. Карабаницкий А.П. Современный подход к вопросу комплектования машинно-тракторных агрегатов / А.П. Карабаницкий, В.А. Жихарь // Тр. КубГАУ. – 2009. – Вып. №3(18). – С. 193-196.
6. Надикто В.Т. Перспективное направление создания комбинированных и широкозахватных МТА / В.Т. Надикто // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. – №3. – С. 26-30.
7. Мойсенко В. Вітчизняні комбіновані ґрунтообробні агрегати / В. Мойсенко, С. Дудака // Пропозиція: український журнал з питань агробізнесу. – 2013. – №9. – С. 108-111.
8. Ткач О.В. Використання комбінованих агрегатів для передпосівного обробітку ґрунту / О.В. Ткач // Збірник наукових праць Інституту цукрових буряків "Наукові основи виробництва цукрових буряків та інших культур бурякової сівозміни в сучасних економічних та екологічних умовах" – Книга 2. – К.: ІЦБ, 1998. – С. 114-119.
9. Лихочвор В. Система удобрення озимої пшениці / В. Лихочвор // Агробізнес сьогодні. – 2014. – №7(278). – С. 24-57.
10. Солодовников В.В. Основы теории и элементов систем автоматического регулирования. Учебное пособие для вузов / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.
11. Габай Е.В. Математическая модель и анализ качества управления направлением движения МТА с рассредоточенными по ширине захвата активными колесами / Е.В. Габай. – В сб.: Научные основы создания мобильных энерготехнологических средств (МЭС). Труды НАТИ. М., 1983. – С.38-42.
12. Василенко П.М. Введение в земледельческую механику / П.М. Василенко. – К.: Сельхозобразование, 1996. – 252 с.
13. Василенко П.М. Об уравнениях движения мобильных машинных агрегатов. Сборник трудов по земледельческой механике т. II / П.М. Василенко. – М.: Сельхозгиз, 1952. – С. 76-84.
14. Иофинов С.А. Справочник по эксплуатации машинно-тракторного парка / С.А. Иофинов, Э.П. Бабенко, Ю.А. Зуев. – М.: Агропромиздат, 1986. – 272 с.

References

1. Naumov YU.F. Enerhospozhyvannya v Ukrayini / YU.F. Naumov, A. V. Usenko // Orhanizatsiyno-ekonomichni problemy rozvytku APK: Kolektyvna monohrafiya u chotirokh chastyn / Za red. P.T. Sabluka. - K.: IAE, 2001. - S. 321-323.
2. Bondar S.M. Osnovni problemy mashynovykorystannya v suchasnykh tekhnolohiyakh obrobittu gruntu Polissya Ukrayiny / S.M. Bondar, I.I. Melnyk // Naukovyy visnyk NAU, vyp. 33. - K.: NAU. - 2000. - S. 101-107.
3. Samorodov V. Perspektyvnyy napryamok sozdaniya kombinovanih ta shirokokozakhvatnikh MTA / V. Samorodov, V. Nadykto // Tekhnika APK. - 2006. - №4. - S. 6-9.
4. Perspektivy ispol'zovaniya kombinirovannykh mashinno-traktornykh agregatov / V. Kyurchev [i dr.] // Nauchnoye izvestiya. - Varna (Bolgariya), 2013. - T. XXI, Vyp. 5 (142). - S. 104-108.
5. Karabanitskiy A.P. Sovremennyy podkhod k voprosu komplektovaniya mashinno-traktornykh agregatov / A.P. Karabanitskiy, V.A. Zhikhar' // Tr. KubGAU. - 2009. - Vyp. №3 (18). - S. 193-196.
6. Nadykto V.T. Perspektivnoye napravleniye sozdaniya kombinirovannykh i shirokozakhvatnykh MTA / V.T. Nadykto // Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny. - 2008. - №3. - S. 26-30.
7. Moyseneyko V. Vitshiznyani kombinovani gruntoobrobni ahrehaty / V. Moyseneyko, S. Dudakov // Propozytsiya: ukraiyinsky zhurnal po voprosam ahrobiznesu. - 2013. - №9. - S. 108-111.
8. Tkach O.V. Vykorystannya kombinovanih ahrehativ dlya peredposivnoho obrobittu gruntu / O.V. Tkach // Zbirnyk naukovykh prats Instytutu tsukrovyykh buryakiv "Naukovi osnovy vyrobnytstva tsukrovyykh buryakiv ta druhyykh kultur buryakovoyi sivozminy v suchasnykh ekonomichnykh ta ekolohichnykh umovakh" - Knyha 2. - K.: ITSБ, 1998. - S. 114-119.
9. Lykhochvor V. Systema dobryv ozymoyi pshenytsi / V. Lykhochvor // Ahrobiznes sohodni. - 2014. - №7 (278). - S. 24-57.
10. Solodovnikov V.V. Osnovy teorii i elementov sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. Uchebnoye posobiye dlya vuzov / V.V. Solodovnikov, V.N. Plotnikov, A.V. Yakovlev.
11. Gabay Ye.V. Matematicheskaya model' i analiz kachestva upravleniya napravleniyem dvizheniya MTA s rassredotochenym po shirine zakhvata aktivnyimi kolesami / Ye.V. Gabay. - V sb.: Nauchnyye osnovy sozdaniya mobil'nykh energotekhnologicheskikh sredstv (MES). Trudy NATI. M., 1983. - S.38-42. –
12. Vasilenko P.M. Vvedeniye v zemledel'cheskuyu mekhaniku / P.M. Vasilenko. - M.: Sel'khozobrazovaniye, 1996. - 252 s.
13. Vasilenko P.M. Ob uravneniyakh dvizheniya mobil'nykh mashinnykh agregatov. Sbornik trudov po



zemledel'cheskoy mekhanike t. II / P.M. Vasilenko. - M.: Sel'khozgiz, 1952. - S. 76-84.

14. Iofinov S.A. Spravochnik po ekspluatatsii mashinno-traktornogo parka / S.A. Iofinov, E.P. Babenko, YU. Zuyev. - M.: Agropromizdat, 1986. -272 s.

ТЕОРИЯ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ УДОБРЮВАЛЬНО-ПОСЕВНОГО МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА

Аннотация: проблема энергосбережения при интенсивном выращивании зерновых культур является одной из наиболее приоритетных в сельскохозяйственном производстве Украины. Задачи комплектования и использования комбинированных машинно-тракторных агрегатов позволяет существенно уменьшить энергетические и трудовые затраты на единицу продукции растениеводства. Целью исследования является повышение эффективности использования удобрительно-посевного машинно-тракторного агрегата путем обоснования его конструктивных и других параметров с позиции улучшения его устойчивости и управляемости движения. В основу исследования положены методы теоретической механики, статистической динамики и теории трактора, с использованием пакета Mathcad. Разработана математическая модель плоскопараллельного движения комбинированного удобрительно-посевного агрегата, которая позволяет обосновать его конструктивные и кинематические параметры, с позиции его устойчивого движения в горизонтальной плоскости.

Ключевые слова: комбинированный машинно-тракторный агрегат, удобрительно-посевной агрегат, плоскопараллельное движение, математическая модель.

THEORY OF PLANAR MOTION OF FERTILIZER-SEEDING MACHINE-TRACTOR UNIT

Summari: the problem of energy saving during intensive cultivation of crops is one of the top priorities in agricultural production in Ukraine. The challenge of recruitment and use of combined machine and tractor units can significantly reduce energy and labor costs per unit of crop production. The investigation aims to increase the efficiency use of fertilizer, seed tractor unit by grounding its design and other parameters of the position to improve its stability and control movement. The investigations aims to study of the method of theoretical mechanics, dynamics and statistical theory of the tractor using the package of Mathcad. It is elaborated the mathematical model of plane-parallel movement of a combined fertilizer-seed unit, which allows it to justify structural and kinematic parameters of the position of its steady movement in the horizontal plane.

Keywords: combined machine-tractor unit, fertilizing, seeding unit, plane-parallel movement mathematical model.