

# **МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ, РОБОЧІ ОРГАНИ ТА МАШИНИ ДЛЯ РОСЛИННИЦТВА**

УДК 631.3.06.001.66

## **Теоретичне дослідження нового удобрювально-посівного агрегату**

**Булгаков В. М.**, д.т.н., проф., академік НААН, Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Адамчук В. В.**, д.т.н., проф., академік НААН, Національний науковий центр «Інститут механізації і електрифікації сільського господарства» НААН України

**Петриченко Є. А.**, к.т.н., Вінницький національний аграрний університет

**Кувачов В. П.**, Таврійський державний агротехнологічний університет

### **Анотація**

Відомо, що внесення мінеральних добрив одночасно з сівбою зернових та інших сільськогосподарських культур, коли стартові дози добрив вносяться на рівні ложа для насіння, а основна доза добрив вноситься нижче рівня загортання насіння зі зміщенням у горизонтальній площині, дає можливість досягти економії добрив на 30...45%. Таким чином, очевидно, що суміщення операції сівби зернових та інших сільськогосподарських культур з основним удобренням ґрунту є ресурсоощадним заходом. У зв'язку з цим виникає необхідність у розробці та дослідженні такого комбінованого машинно-тракторного агрегату, який би давав можливість здійснювати висів з одночасним внесенням мінеральних добрив відразу стартовими й основними дозами. Причому його конструкційно-технологічне виконання повинно забезпечувати підвищення техніко-економічних показників роботи.

**Мета.** Обґрунтування кінематичних і конструктивних параметрів комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату, що складається з колісного агрегатуєчого трактора та послідовно причеплених позаду тукової сівалки для смугового внесення мінеральних добрив і зернової сівалки, на основі розв'язання

математичної моделі його плоскопаралельного руху.

**Методи.** Використано методи побудови та розв'язання математичних моделей функціонування сільськогосподарських машин і машинних агрегатів на основі теоретичної механіки, вищої математики та теорії ймовірності.

**Результати.** Розроблено нову теорію плоскопаралельного руху удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату з одночасним попереднім смуговим внесенням мінеральних добрив і сівбою зернових культур. Отримана математична модель плоскопаралельного руху дає можливість оцінити стійкість руху комбінованого агрегату в площині поверхні поля при виконанні технологічного процесу.

**Висновки.** Кінематичні й конструктивні параметри комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату суттєво залежать від частоти коливань кута повороту керованих коліс агрегатуєчого трактора. Саме тому застосування систем автоматичного керування дозволить отримати таке конструкційно-технологічне виконання вказаного агрегату, яке забезпечить підвищення техніко-економічних показників його роботи.

**Ключові слова:** агрегат, трактор, внесення добрив, сівба, еквівалентна схема, рішення на ПК.

UDC 631.3.06.001.66

### Theoretical study of the new fertilizer-sowing aggregate

**Bulgakov V. M.**, Ph.D., professor, academician of NAAS, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

**Adamchuk V. V.**, Ph.D., professor, academician of NAAS, National Scientific Center "Institute for Agricultural Engineering and Electrification" NAAS of Ukraine

**Petrychenko Ye. A.**, Ph.D., Vinnitsa National Agrarian University

**Kuvachov V. P.**, Tavria State Agrotechnological University of Ukraine

#### Annotation

It is known that the introduction of mineral fertilizers simultaneously with the sowing of cereals and other crops, when the starting doses of fertilizers are introduced at the level of the bed for the seed, and the main dose of fertilizers is introduced below the level of seeding with a displacement in the horizontal plane, makes it possible to achieve fertilizer savings by 30 ... 45 %. Thus, it is obvious that the combination of the sowing of cereals and other crops with the main fertilizer of the soil is a resource-saving measure. In connection with this, there is a need for the development and research of such a combined machine-tractor unit that would enable hanging with the simultaneous introduction of mineral fertilizers at once starting and main doses. Moreover, its structural and technological implementation should ensure the improvement of technical and economic performance.

**Purpose.** The substantiation of the kinematic and structural parameters of a combined fertilizer-seeding machine-tractor unit consisting of a wheeled aggregate tractor and successively trailed behind the fat seeder for the bandwidth of mineral fertilizers and grain seeders, on the basis of solving the mathematical model of its plane-parallel motion.

**Methods.** Methods of constructing and solving mathematical models of functioning of agricultural machines and machine aggregates on the basis of theoretical mechanics, higher mathematics and probability theory are used.

**Results.** A new theory of the planar-parallel movement of a fertilizer-seeding machine-tractor unit with the simultaneous pre-strip introduction of mineral fertilizers and seeding of grain crops was developed. The obtained mathematical model of the plane-parallel motion gives an opportunity to estimate stability of motion of the combined aggregate in the plane of the surface of the field at the execution of the technological process.

**Conclusions.** The kinematics and design parameters of the combined fertilizer-seeding machine-tractor unit essentially depend on the frequency of oscillations of the angle of rotation of the controlled wheels of the aggregate tractor. That is why the use of automatic control systems will allow such structural and technological implementation of the specified unit, which will ensure the improvement of technical and economic indicators of its operation.

**Keywords:** aggregate, tractor, fertilizer application, seeding, equivalent scheme, decision on PC.

УДК 631.3.06.001.66

### Теоретическое исследование нового удобрительно-посевного агрегата

**Булгаков В. М.**, д.т.н., проф., академик НААН, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

**Адамчук В. В.**, д.т.н., проф., академик НААН, Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства» НААН Украины

**Петриченко Е. А.**, к.т.н., Винницкий национальный аграрный университет

**Кувачов В. П.**, Таврический государственный агротехнологический университет

#### Аннотация

Известно, что внесение минеральных удобрений одновременно с севкой зерновых и других сельскохозяйственных культур, когда стартовые

дозы удобрений вносятся на уровне ложа для семян, а основная доза удобрений вносится ниже уровня заделки семян со смещением в горизонтальной плоскости, дает возможность достичь

економії добрив на 30...45%. Таким образом, очевидно, что совмещение операции посева зерновых и других сельскохозяйственных культур с внесением удобрений почвы является ресурсосберегающим мероприятием. В связи с этим возникает необходимость в разработке и исследовании такого комбинированного машинно-тракторного агрегата, который бы дал возможность осуществлять посев с одновременным внесением минеральных удобрений сразу стартовыми и основными дозами. Причем его конструктивно-технологическое исполнение должно обеспечивать повышение технико-экономических показателей работы.

**Цель.** Обоснование кинематических и конструктивных параметров комбинированного удобрительно-посевого машинно-тракторного агрегата, состоящего из колесного агрегирующего трактора и последовательно прицепленных позади туковой сеялки для полосового внесения минеральных удобрений и зерновой сеялки, на основе решения математической модели его плоскопараллельного движения.

**Методы.** Используются методы построения и решения математических моделей функционирования сельскохозяйственных машин и машин-

**Постановка проблеми.** Останнім часом в країні набула актуальності проблема переуцільнення орних земель, у зв'язку з високим тиском на них сільськогосподарської техніки та її багатократних проходів при реалізації технології вирощування культурних рослин. Це змушує науковців шукати все нові варіанти енергозберігаючих сучасних технологій і способів мінімізації впливу на ґрунт ходових систем машин за рахунок поєднання при одному проході агрегату операцій посіву, внесення мінеральних добрив, передпосівної та післяпосівної обробки ґрунту.

Такий підхід, в цілому, дозволяє скоротити агротехнічні терміни виконання польових робіт, зменшити втрати вологи шляхом скорочення міжопераційних проміжків часу, заощадити паливно-мастильні матеріали тощо.

Проведеними численними польовими агрономічними експериментальними дослідженнями встановлено, що внесення мінеральних добрив одночасно з сівбою зернових та інших сільськогосподарських культур, коли стартові дози добрив вносяться на насінневе ложе, а основна доза добрив

ных агрегатов на основе теоретической механики, высшей математики и теории вероятности.

**Результаты.** Разработана новая теория плоскопараллельного движения удобрительно-посевого машинно-тракторного агрегата с одновременным предварительным полосным внесением минеральных удобрений и посевом зерновых культур. Полученная математическая модель плоскопараллельного движения дает возможность оценить устойчивость движения комбинированного агрегата в плоскости поверхности поля при выполнении технологического процесса.

**Выводы.** Кинематические и конструктивные параметры комбинированного удобрительно-посевого машинно-тракторного агрегата существенно зависят от частоты колебаний угла поворота управляемых колес агрегирующего трактора. Именно поэтому применение систем автоматического управления позволит получить такое конструктивно-технологическое исполнение указанного агрегата, которое обеспечит повышение технико-экономических показателей его работы.

**Ключевые слова:** агрегат, трактор, внесение удобрений, посев, эквивалентная схема, решение на ПК.

вноситься нижче рівня закладання насіння зі зміщенням у горизонтальній площині, дає можливість досягнути значної економії добрив у середньому на 30...45%. Таким чином, поєднання операції сівби зернових та інших сільськогосподарських культур з основним внесенням у ґрунт мінеральних добрив є ефективним ресурсозберігаючим заходом.

Методика побудови розрахункових математичних моделей сільськогосподарських машин і машинних агрегатів досить широко представлена в численних працях академіка Василенка П. М. [1–4]. При цьому основним видом руху саме сільськогосподарських машин (причіпних, навісних і самохідних) є плоскопаралельний, оскільки цей вид руху визначає якість виконання заданих технологічних процесів. Дослідженню роботи комбінованих сільськогосподарських машинних агрегатів присвячено низку опублікованих робіт [5–11].

Слід підкреслити, що агротехнічні та експлуатаційно-технічні показники роботи, а також продуктивність комбінованих машинно-тракторних агрегатів у значній мірі залежить від характеру саме плоскопаралельного руху.

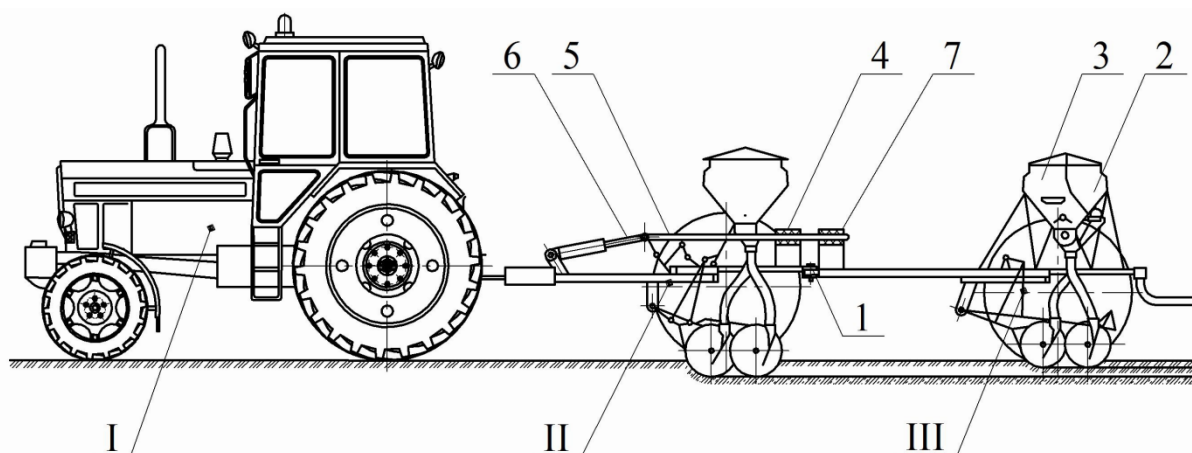
Тому, дослідження плоскопаралельного руху різних машинних агрегатів необхідні як при порівняльній оцінці існуючих, так і при проектуванні принципово нових. Основним методом таких досліджень є складання та рішення диференціальних рівнянь руху машинних агрегатів [4].

**Мета** дослідження полягала в обґрунтуванні кінематичних і конструктивних параметрів комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату, що складається з колісного агрегату трактора та послідовно причеплених позаду тукової сівалки для смугового внесення мінеральних добрив і зернової сівалки, на

основі розв'язання математичної моделі його плоскопаралельного руху.

**Методи.** Для проведення теоретичного дослідження використано методи побудови розрахункових математичних моделей функціонування сільськогосподарських машин і машинних агрегатів на основі теоретичної механіки, вищої математики та теорії ймовірності.

**Результати.** Нами запропоновано нову конструктивно-технологічну схему комбінованого агрегату для внутрішнь-грунтового мінерального удобрення та одночасної сівби зернових культур з використанням колісного трактора тягового класу 1,4 (рис. 1).



**Рис. 1.** Агрегат для внутрішнь-грунтового мінерального удобрення та одночасної сівби зернових культур (вид збоку):

I – трактор; II – машина для внесення основної дози мінеральних добрив;

III – машина для сівби зернових та внесення стартової дози мінеральних добрив;

1 – шарнір; 2 – бункер для стартових добрив; 3 – бункер для насіння;

4 – направляючий елемент; 5 – блокуючий повзун; 6 – штанга; 7 – фіксуєчий елемент

**Fig. 1.** Unit for intra-soil mineral fertilizers and simultaneous sowing of grain crops (side view):

I – a tractor; II – a machine for introducing the main dose of mineral fertilizers;

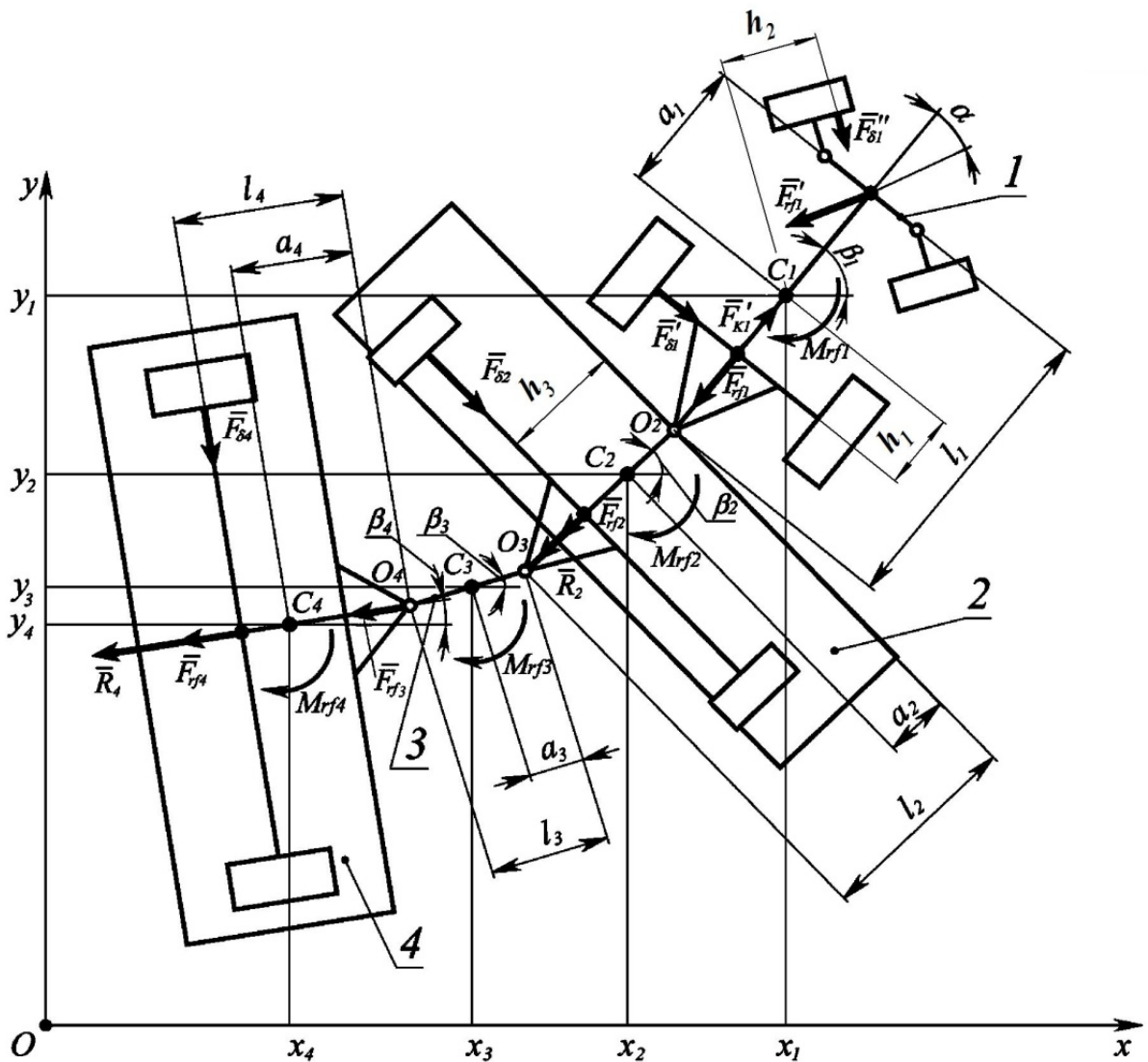
III – a machine for sowing of cereals and introduction of a starting dose of mineral fertilizers;

1 – hinge; 2 – bunker for starting fertilizers; 3 – seed hopper;

4 – guide element; 5 – blocking slider; 6 – rod; 7 – fixing element

Для побудови еквівалентної схеми комбінованого агрегату за рисунком 1 зробимо ряд припущень. Так, врахуємо тільки ті основні елементи удобрювально-посівного агрегату, які здійснюють різні рухи. Оскільки розглянута динамічна система є багатомасовою, то для спрощення розрахунків будемо враховувати тільки рухи, які впли-

вають на якість виконання технологічного процесу. Віднесемо такий машинний агрегат (динамічну систему) до нерухомої декартової системи координат  $OxOz$ . Також припустимо, що при русі агрегату вздовж поверхні поля всі його точки рухаються в площинах, які паралельні до площини  $xOy$  (рис. 2)



**Рис. 2.** Еквівалентна схема комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату:  
 1 – агрегуючий трактор; 2 – машина для внесення основної дози мінеральних добрив;  
 3 – причіпний пристрій; 4 – машина для сівби зернових та внесення стартової дози мінеральних добрив  
**Fig. 2.** The equivalent scheme of the combined fertilizer-seeding machine-tractor unit:  
 1 – aggregating tractor; 2 – machine for introducing the main dose of mineral fertilizers;  
 3 – trailer coupling; 4 – a machine for sowing cereals and introducing an initial dose of mineral fertilizers

При проведенні теоретичного дослідження була складена розрахункова математична модель плоскопаралельного руху комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату:

$$\left. \begin{aligned}
 A_{21}\ddot{y}_1 + A_{22}\ddot{\beta}_1 + A_{26}\beta_1 + A_{23}\ddot{\beta}_2 + A_{27}\beta_2 + A_{25}\ddot{\beta}_4 + A_{29}\beta_4 &= K\alpha + K_1, \\
 A_{31}\ddot{y}_1 + A_{32}\ddot{\beta}_1 + A_{36}\beta_1 + A_{33}\ddot{\beta}_2 + A_{37}\beta_2 + A_{35}\ddot{\beta}_4 + A_{39}\beta_4 &= B_3, \\
 A_{41}\ddot{y}_1 + A_{42}\ddot{\beta}_1 + A_{46}\beta_1 + A_{43}\ddot{\beta}_2 + A_{47}\beta_2 + A_{45}\ddot{\beta}_4 + A_{49}\beta_4 &= B_4, \\
 A_{61}\ddot{y}_1 + A_{62}\ddot{\beta}_1 + A_{66}\beta_1 + A_{63}\ddot{\beta}_2 + A_{67}\beta_2 + A_{65}\ddot{\beta}_4 + A_{69}\beta_4 &= B_6,
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

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'_{rf1} - F_{rf1}); \\
 & A_{27} = F_{rf2} + R_2; A_{28} = F_{rf3}; A_{29} = F_{rf4} + 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_{rf2} - R_2 - F_{rf3} - F_{rf4} - R_4)(l_1 - a_1); \\
 & A_{37} = -(F_{rf2} + R_2)(l_1 - a_1); A_{38} = F_{rf3} (l_1 - a_1); \\
 & A_{39} = -(F_{rf4} + 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_{rf3} l_2 - F_{rf4} l_2 - R_4 l_2); A_{48} = -F_{rf3} l_2; \\
 & A_{49} = -(F_{rf4} 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_{rf4} - R_4) l_3; \\
 & A_{59} = -(F_{rf4} + 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'_{rf1} - F_{\delta 2} \alpha - F_{rf1} - F_{rf2} - R_2 - F_{rf3} - F_{rf4} - R_4; \\
 & B_2 = -F'_{\delta 1} + F'_{rf1} \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. \\
 \\
 & K = F'_{rf1}, K_1 = -F'_{\delta 1} - F'_{\delta 2} - F_{\delta 2} - F_{\delta 4}.
 \end{aligned}$$

Для спрощення рішення системи диференціальних рівнянь (1) застосуємо перетворення Лапласа. Суть їх, як відомо, полягає в переході від оригіналу функції до її відображення

шляхом введення комплексної змінної  $p = \frac{d}{dt}$ . У підсумку це дає можливість перейти від складної системи диференціальних рівнянь до відносно простої системи алгебраїчних рівнянь.

У результаті будемо мати:

$$\left. \begin{aligned} K_{21} \cdot y_1(p) + K_{22} \cdot \beta_1(p) + K_{23} \cdot \beta_2(p) + K_{25} \cdot \beta_4(p) &= K \cdot \alpha(p) + K_1 \cdot 1(p), \\ K_{31} \cdot y_1(p) + K_{32} \cdot \beta_1(p) + K_{33} \cdot \beta_2(p) + K_{35} \cdot \beta_4(p) &= B_3 \cdot 1(p), \\ K_{41} \cdot y_1(p) + K_{42} \cdot \beta_1(p) + K_{43} \cdot \beta_2(p) + K_{45} \cdot \beta_4(p) &= B_4 \cdot 1(p), \\ K_{61} \cdot y_1(p) + K_{62} \cdot \beta_1(p) + K_{63} \cdot \beta_2(p) + K_{65} \cdot \beta_4(p) &= B_6 \cdot 1(p), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

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 (2) відображає динамічний стан даного комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату під впливом керуючого  $[\alpha(p)]$  і збурювального вхідних змінних. До останніх належать 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 даної системи рівнянь є координата  $y_1$  і кути  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  і  $\beta_4$ .

Передавальна функція ( $W_\alpha$ ) відпрацювання комбінованим удобрювально-посівним машинно-тракторним агрегатом керуючого впливу матиме такий вигляд:

$$W_\alpha = \frac{p^2 (F_4 \cdot p^4 + F_2 \cdot p^2 + F_0)}{p^2 (C_6 \cdot p^6 + C_4 \cdot p^4 + C_2 \cdot p^2 + C_0)}, \quad (3)$$

де

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

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

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

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

$$\begin{aligned}
 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} ,
 \end{aligned}$$

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

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

Функція (3) характеризує реакцію агрегатуючого трактора у вигляді зміни його курсового кута  $\beta_1$  під дією керуючого впливу, який має кут повороту  $\alpha$  його передніх коліс. Її знаменник репрезентує власні коливання динамічної системи і має два нульових кореня. Це однозначно вказує на те, що розглянута нами незамкнена динамічна система (тобто комбінований машинно-тракторний агрегат) є нестійкою. І розглядати при цьому критерії стійкості Рауса-Гурвіца, Михайлова або Найквіста просто не має сенсу.

Аналіз керованості руху досліджуваного машинно-тракторного агрегату будемо здійснювати за наступним алгоритмом. На основі передавальної функції (3) за загальновідомою методикою теорії автоматичного регулювання динамічних систем розрахуємо відповідні амплітудні (АЧХ) та фазові (ФЧХ) частотні характеристики розглянутого нами удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату при відпрацюванні ним керуючого впливу. Перші з них характеризують ступінь посилення динамічною системою

вхідного сигналу, а другі – величину запізнювання її реакції на цей сигнал.

Оскільки з фізичної суті даний машинно-тракторний агрегат є слідкуючою динамічною системою, то для неї заздалегідь відомі бажані (ідеальні) АЧХ та ФЧХ. За умови відпрацювання системою коливального керуючого впливу в робочому діапазоні його частот ці характеристики повинні бути такими [12]:

$$\begin{aligned}
 \text{АЧХ} &= 1; \\
 \text{ФЧХ} &= 0.
 \end{aligned}$$

Проведеними раніше фундаментальними науковими дослідженнями встановлено, що для сільськогосподарських машинно-тракторних агрегатів робочий діапазон частоти керуючого впливу (позначимо через  $\omega$ ) зазвичай не перевищує 0,5 Гц (або  $3,14 \text{ с}^{-1}$ ) [13]. Звідси бажана (ідеальна) АЧХ машинно-тракторного агрегату в діапазоні частот коливань кута повороту керованих коліс трактора до  $3,14 \text{ с}^{-1}$  повинна бути рівною 1, а поза цієї частоти – 0. Фізично це означає, що при зміні частоти коливань



вхідного параметра  $\alpha$  від  $\omega = 0$  до  $\omega = 3,14 \text{ с}^{-1}$  курсової кут енергетичного засобу (як реакція на вхідний керуючий вплив) повинен бути рівним куту повороту його керованих коліс, тобто  $\varphi = \alpha$ . За умови  $\varphi > \alpha$  або  $\varphi < \alpha$  маємо відповідно пере- або недорегулювання динамічної системи вхідного сигналу, що в однаковій мірі є небажаним.

За допомогою розробленої нами розрахункової математичної моделі плоскопаралельного руху комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату керованість його руху можна оцінити з урахуванням впливу будь-якого з його параметрів, які входять у коефіцієнти  $K$  і  $A_{ij}$  системи рівнянь (2).

Однак на даному етапі дослідження розглянемо наступні параметри:

- коефіцієнт опору коченню  $f$  ходової системи агрегатуючого трактора, а також тукової та зернової сівалок. У розрахунковій математичній моделі плоскопаралельного руху комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату зазначений 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 та зернової сівалок до центрів їх мас (рис. 2);

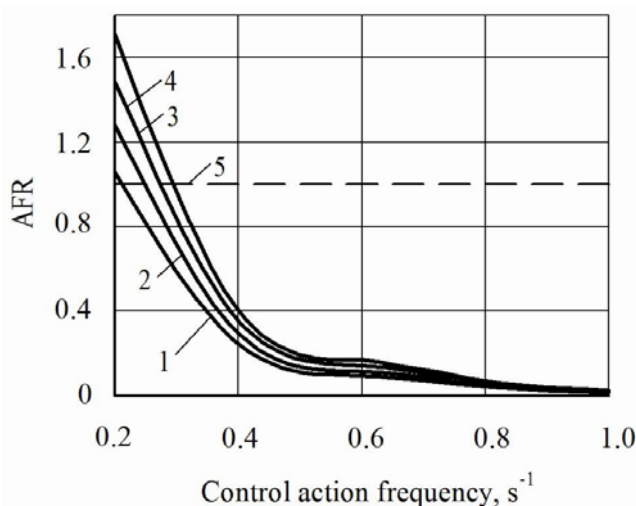
- $l_2$ ,  $l_4$  – довжини снічі тукової та зернової сівалок.

Оскільки маси причіпних машин (тукової та зернової сівалок)  $m_2$  і  $m_4$  відповідним чином пов'язані з тяговим класом використовуваного трактора (в даному випадку – це тяговий клас трактора 1,4), то встановлення впливу зміни цих параметрів на керованість руху комбінованого машинно-тракторного агрегату даним етапом дослідження не передбачене.

Аналіз отриманих фазово-частотних характеристик досліджуваної динамічної системи показав, що запізнювання її реакції на керуючий вплив є постійним і рівним  $180^\circ$  або  $3,14$  рад.

Взагалі такий перебіг фази відпрацювання керуючого впливу притаманний консервативним динамічним системам з практично відсутніми дисипативними процесами. Формально розглянута нами динамічна система є саме такою, оскільки вплив на неї дисипативних сил нами прийнято як незначний.

Аналіз отриманих розрахунків амплітудно-частотної характеристики показує наступне. При одній і тій же частоті коливань керуючого впливу коефіцієнт його посилення динамічною системою тим більше, чим більшим є коефіцієнт опору коченню (рис. 3).



**Рис. 3.** Амплітудно-частотна характеристика відтворення динамічною системою керуючого впливу при різних значеннях коефіцієнта опору коченню:

1 – 0,10; 2 – 0,12; 3 – 0,14; 4 – 0,16; 5 – бажана (ідеальна) амплітудно-частотна характеристика

**Fig. 3.** Amplitude-frequency characteristic of reproduction by a dynamic control system at various values of the coefficient of rolling resistance:

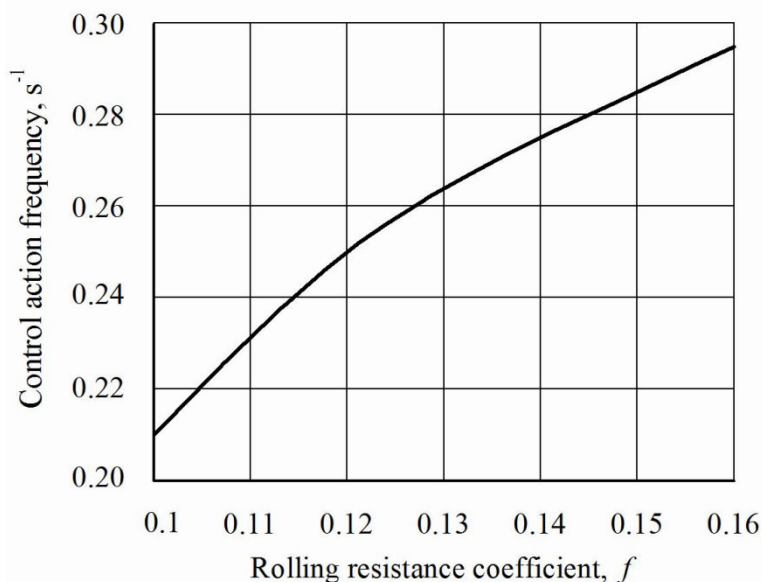
1 – 0.10; 2 – 0.12; 3 – 0.14; 4 – 0.16; 5 – desired (ideal) amplitude-frequency characteristic

Так, наприклад, при русі 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  $0,2 \text{ c}^{-1}$  обумовлює його реакцію у вигляді зміни курсового кута з коефіцієнтом посилення 1,1. Разом з тим, при роботі даного машинно-тракторного агрегату на розпушеному фоні ( $f = 0,16$  – крива 4, рис. 3) коефіцієнт посилення динамічною системою (трактором) розглянутого вхідного сигналу тієї ж частоти (тобто  $0,2 \text{ c}^{-1}$ ) зростає до рівня 1,7, все більше віддаляючись при цьому від ідеального його стану (крива 5, рис. 3).

При збільшенні частоти повороту керованих коліс агрегатуючого трактора

ступінь впливу агрофону, по якому переміщається комбінований машинно-тракторний агрегат, зменшується. За умови  $\omega > 0,3 \text{ c}^{-1}$  дійсні АЧХ стають менше 1. Вже згадана динамічна система переходить до режиму недорегулювання вхідного сигналу, що є небажаним.

Разом з тим, для кожного стану агротехнічного фону, який репрезентує своїм значенням коефіцієнт опору коченню  $f$ , існує така бажана частота повороту ( $\omega_o$ ) керованих коліс агрегатуючого трактора, при якій дійсна АЧХ відповідає ідеальній. Графічна інтерпретація цієї залежності має вигляд, що відображений на рисунку 4.



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

**Fig. 4.** Dependence of the desired frequency of rotation of the controlled wheels of the aggregating tractor of the combined fertilizer-sowing machine-tractor unit from its conditions of movement (rolling resistance coefficient  $f$ )

Як показує аналіз графічно отриманої функції  $\omega_o = f(f)$  (рис. 4), в залежності від агротехнічного фону частота коливань керуючого впливу повинна змінюватися в межах  $0,210 \dots 0,295 \text{ c}^{-1}$ . Слід підкреслити, що нижнє значення цього діапазону (тобто  $0,21 \text{ c}^{-1}$ ) збігається з рекомендованою дослідниками частотою повороту керованих коліс трактора під час виконання ним рухів на поворотній смузі [14].

Природно те, що підтримувати потрібну частоту в умовах реальної практики в ручному режимі управління енергетичним засобом (трактором) досить проблематично. Зараз для цього краще застосовувати GPS-навігатор з системою автоматичного керування типу UniDrive або інший.

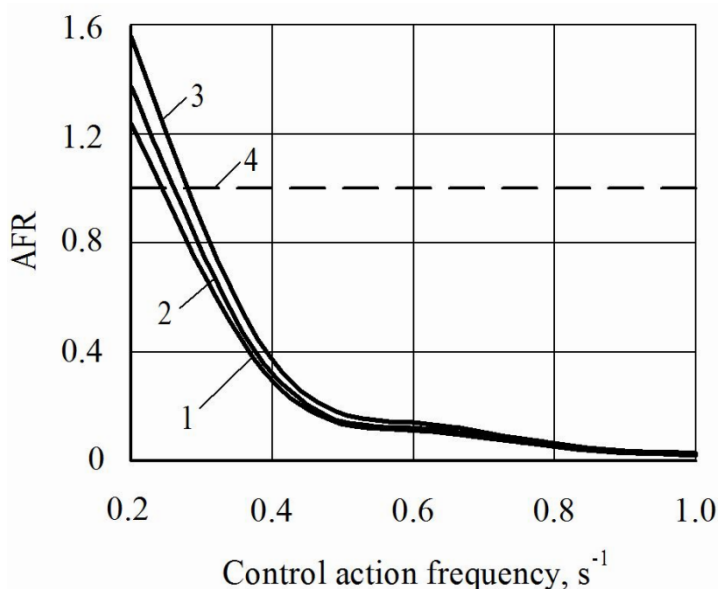
Як уже відмічалось раніше, певний вплив на керованість руху розглянутого

комбінованого машинно-тракторного агрегату можуть здійснювати такі його конструктивні параметри, як  $\alpha_2$  і  $l_2$  (рис. 2). Перший з них, за умови близькості розміщення центру мас причіпної машини 2 до осі її ходової системи, по суті справи є довжиною сниси. Другий визначає поздовжню координату приєднання до трактора зернової сівалки 4 (рис. 2).

З теорії динаміки причіпних машин відомо, що для забезпечення кращої стійкості їх плоскопаралельного руху в горизонтальній площині параметри  $\alpha_2$  і  $l_2$  повинні бути по можливості великими. Водночас зростає при цьому кінематична довжина комбінованого агрегату, що обумовлює збільшення ним

невиробничих витрат часу при здійсненні маневру на поворотній смузі. З огляду на це компромісне рішення щодо величин параметрів  $\alpha_2$  і  $l_2$  можна приймати лише після оцінки їх впливу на керованість руху досліджуваного комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату.

Аналіз результатів математичного моделювання показує, що збільшення параметра  $\alpha_2$  від 1,15 м до 3,15 м коливаний керуючого впливу  $\omega < 0,24 \text{ c}^{-1}$  бажано, а на частотах  $\omega \geq 0,3 \text{ c}^{-1}$  небажано зменшує дійсні амплітудно-частотні характеристики (рис. 5).



**Рис. 5.** Амплітудно-частотна характеристика відтворення динамічною системою керуючого впливу при різному значенні конструктивного параметра  $\alpha_2$  :

1 – 1,15 м; 2 – 2,15 м; 3 – 3,15 м; 4 – бажана (ідеальна) амплітудно-частотна характеристика

**Fig. 5.** Amplitude-frequency characteristic of reproduction by a dynamic control system with different values of the constructive parameter  $\alpha_2$  :

1 – 1.15 m; 2 – 2.15 m; 3 – 3.15 m; 4 – desired (ideal) amplitude-frequency characteristic

Так, при  $\omega = 0,2 \text{ c}^{-1}$  і при  $\alpha_2 = 3,15 \text{ м}$  амплітудно-частотна характеристика відпрацювання динамічною системою керуючого впливу становить 1,58 (крива 1, рис. 5). На практиці це означає, що курсовий кут  $\beta_1$  трактора даного комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату (рис. 5) по відношенню до кута повороту його керованих коліс буде змінюватися з посиленням у 1,58 разів. Іншими словами, динамічна система буде функціонувати з

перерегулюванням (тобто надмірним посиленням) вхідного сигналу на 58%, що, як відомо з теорії автоматичного управління динамічних систем, також є небажаним.

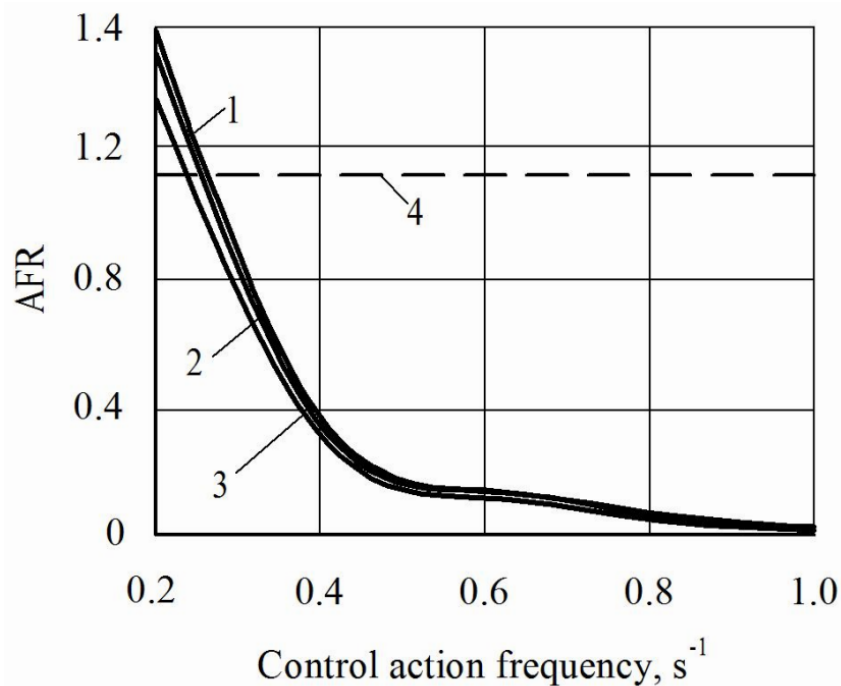
Разом з тим, зі зменшенням параметра  $\alpha_2$  до 1,15 м вказане небажане перерегулювання буде більше ніж удвічі меншим, оскільки АЧХ розглянутої динамічної системи при цьому опуститься до рівня 1,23 (крива 3, рис. 5).

При встановленні частоти коливань повороту керованих коліс енергетичного засобу (трактора) на рівні  $\omega = 0,3 \text{ c}^{-1}$  АЧХ відпрацювання машинно-тракторним агрегатом керуючого впливу при  $\alpha_2 = 1,15 \text{ м}$  взагалі є ідеальною, тобто рівною 1, (крива 1, рис. 5). Збільшення даного конструктивного параметра  $\alpha_2$  до 3,15 м на цій же частоті  $\omega$  зменшує АЧХ до позначки 0,7 (крива 3, рис. 5). У даному випадку динамічна система відтворює керуючий вплив з недорегулюванням на 30%, що є також фактом небажаним.

Лише в діапазоні частот коливань кута повороту керованих коліс трактора  $\omega$  від  $0,24 \text{ c}^{-1}$  до  $0,30 \text{ c}^{-1}$  (рис. 5) можна підібрати та-

ке значення конструктивного параметра  $\alpha_2$ , яке відтворить практично ідеальну керованість руху даного комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату.

Якісно схожий висновок можна зробити і щодо вибору конструктивного параметра  $l_2$ . Відмінність при цьому полягає в тому, що частотний діапазон коливань керуючого впливу, в якому дійсні амплітудно-частотні характеристики динамічної системи (тобто розглянутого комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату) відповідають ідеальним, є більш вузьким. З аналізу кривих рисунку 6 цей діапазон становить приблизно  $0,23 \dots 0,26 \text{ c}^{-1}$ .



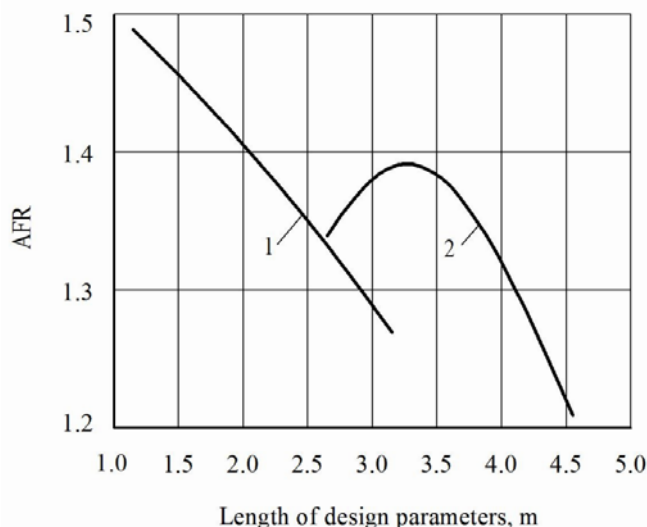
**Рис. 6.** Амплітудно-частотна характеристика відтворення динамічною системою керуючого впливу при різному значенні конструктивного параметра  $l_2$ :

1 – 3,15 м; 2 – 2,15 м; 3 – 4,15 м; 4 – бажана (ідеальна) амплітудно-частотна характеристика

**Fig. 6.** Amplitude-frequency characteristic of reproduction by a dynamic control system at different design parameters  $l_2$ :

1 – 3.15 m; 2 – 2.15 m; 3 – 4.15 m; 4 – desired (ideal) amplitude-frequency characteristic

Разом з тим функція АЧХ  $f(l_2)$  на частоті  $\omega = 0,2 \text{ c}^{-1}$  є криволінійною і певною мірою наближеною до параболічного виду (крива 2, рис. 7). І такий характер залежності АЧХ від параметра  $l_2$  зберігається при збільшенні частоти коливань кута повороту керованих коліс агрегатуючого трактора щонайменше до  $0,5 \text{ c}^{-1}$ , що впливає з аналізу рисунку 6.



**Рис. 7.** Амплітудно-частотна характеристика відтворення динамічною системою керуючого впливу частоти  $0,2 \text{ s}^{-1}$  при різних значеннях конструктивних параметрів  $\alpha_2$  (1) і  $l_2$  (2)

**Fig. 7.** Amplitude-frequency characteristic of reproduction dynamic system of controlling influence of frequency  $0,2 \text{ s}^{-1}$  at various values of the structural parameters  $\alpha_2$  (1) and  $l_2$  (2)

Характер зміни кривої 2 (рис. 7) вказує на те, що при виборі параметра  $l_2$  перевагу слід віддавати його великим значенням. У цьому випадку значення дійсної АЧХ динамічної системи є ближчим до 1.

Водночас збільшення параметра  $l_2$  обумовлює поворот зернової сівалки 4 відносно удобрювальної машини 2 (рис. 2) без їх зіткнення під час руху даного комбінованого машинно-тракторного агрегату на поворотній смузі. У підсумку це означає, що межею збільшення параметра  $l_2$  є таке його значення, яке буде обумовлювати безаварійну поворотність даного комбінованого машинно-тракторного агрегату.

Аналіз результатів моделювання керованого руху комбінованого удобрювально-посівного машинно-тракторного агрегату в горизонтальній площині показує, що вплив на цей процес конструктивних параметрів  $\alpha_4$  і  $l_4$ , як і параметрів  $\alpha_2$  і  $l_2$  (рис. 2), якісно й кількісно є аналогічним.

### Висновки

1. Розроблена математична модель плоскопаралельного руху комбінованого удобрювально-посівного агрегату, яка дає можливість обґрунтувати його конструктивні та кінематичні параметри з позиції його

стійкого руху в горизонтальній площині. Встановлено, що динамічна система комбінованого удобрювально-посівного агрегату є консервативною з практично відсутніми дисипативними процесами. З позиції стійкого руху розроблена математична модель його функціонування в поздовжньо-горизонтальній площині дозволяє обґрунтувати конструктивні та кінематичні параметри.

2. У 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 в діапазоні  $0,210 \dots 0,295 \text{ s}^{-1}$ . При цьому більші його значення характерні для роботи агрегату на більш розпушеному агротехнічному фоні, а менші – на більш твердому.

3. На частотах коливань кута повороту керованих коліс агрегуючого трактора менших за  $0,24 \text{ s}^{-1}$  бажано збільшення відстані від точок причепу тукової та зернової сівалок до центрів їх мас з  $1,15 \text{ м}$  до  $3,15 \text{ м}$ , а на частотах більших за  $0,3 \text{ s}^{-1}$  – небажано, оскільки динамічна система відтворює керуючий вплив із недорегулюванням. Якісно схожий результат спостерігається щодо вибору довжини сніці тукової та зернової сівалок, але бажаний частотний діапазон коливань кута повороту керованих коліс

агрегуючого трактора є дещо вужчим – 0,23 ... 0,26 с<sup>-1</sup>. При цьому межею збільшення довжини сніці тукової сівалки є таке його значення, яке обумовлюватиме безаварійну поворотність комбінованого агрегату.

### Бібліографія

1. Василенко П. М., Василенко В. П. Методика построения расчетных моделей функционирования механических систем (машин и агрегатов): учебник. К.: УСХА, 1980. 136 с.

2. Василенко П. М. Об уравнениях движения мобильных машинных агрегатов. *Земледельческая механика: сборник трудов*. М.: Сельхозгиз, 1952. Т. 2. С. 76–84.

3. Василенко П. М. Элементы теории устойчивости движения прицепных сельскохозяйственных машин и орудий. *Земледельческая механика: сборник трудов*. М.: Сельхозгиз, 1954. Т. 2. С. 202–211.

4. Василенко П. М. Введение в земледельческую механику. К.: Сельхозобразование, 1996. 252 с.

5. Василенко П. М., Кузьминский В. Г. Уравнение движения самоходных машинных агрегатов при трогании с места и разгоне. *Земледельческая механика: сборник трудов*. / ВАСХНИЛ; под ред. В. А. Желиговского. М.: Машиностроение, 1965. Т. 5. С. 28–43.

6. Булгаков В. М., Горбовий А. Ю. Теорія руху льонозбиральних комбайнів: монографія. Львів: Вид. полігр. відділ Львів ЦНТІ, 2006. 156 с.

7. Тракторы. Теория: учебник / В. В. Гуськов, Н. Н. Велеев, Ю. Е. Атаманов [и др.]. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.

8. Тимофеев А. И. Анализ энергетического режима работы тракторного агрегата при разгоне. *Земледельческая механика: сборник трудов* / ВАСХНИЛ; под ред. В. А. Желиговского. М.: Машиностроение, 1965. Т. 5. С. 391–405.

9. Кутьков Г. М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства: учебник. М.: Колос, 2004. 504 с.

10. Надькто В. Т. Основы агрегатирования модульных энергетических средств: монография. Мелитополь: КП «ММД», 2003. 240 с.

11. Study plane-parallel motion movement combined seeding unit / V. Adamchuk,

I. Petrychenko, M. Korenko, H. Beloev, B. Borisov. *Agricultural machines. Research and testing. New machine designs: proceedings of the III International scientific and technical congress "Agricultural Machinery" (Varna, Bulgaria 22–25.06.2015)*. Vol. 1. Sofia, Bulgaria, 2015. P. 7–10.

12. Солодовников В. В., Плотников В. Н., Яковлев А. В. Основы теории и элементов систем автоматического регулирования: учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1985. 536 с.

13. Габай Е. В. Математическая модель и анализ качества управления направлением движения МТА с рассредоточенными по ширине захвата активными колесами. *Научные основы создания мобильных энерготехнологических средств (МЭС): сборник*. / НАТИ. Москва, 1983. С. 38–42.

14. Иофинов С. А., Бабенко Э. П., Зуев Ю. А. Справочник по эксплуатации машинно-тракторного парка. М.: Агропромиздат, 1986. 272 с.

### Bibliohrafiia

1. Vasilenko P. M., Vasilenko V. P. Metodika postroeniya raschetnyh modelej funkcionirovaniya mekhanicheskikh sistem (mashin i agregatov): uchebnik. K.: USKHA, 1980. 136 s.

2. Vasilenko P. M. Ob uravneniyah dvizheniya mobil'nyh mashinnyh agregatov. *Zemledel'cheskaya mekhanika: sbornik trudov*. M.: Sel'hozgiz, 1952. T. 2. S. 76–84.

3. Vasilenko P. M. Ehlementy teorii ustojchivosti dvizheniya pricepnyh sel'skohozyajstvennyh mashin i orudij. *Zemledel'cheskaya mekhanika: sbornik trudov*. M.: Sel'hozgiz, 1954. T. 2. S. 202–211.

4. Vasilenko P. M. Vvedenie v zemledel'cheskuyu mekhaniku. K.: Sel'hozobrazovanie, 1996. 252 s.

5. Vasilenko P. M., Kuz'minskij V. G. Uravnenie dvizheniya samohodnyh mashinnyh agregatov pri troganii s mesta i razgone. *Zemledel'cheskaya mekhanika: sbornik trudov*. / VASKHNIL; pod red. V. A. ZHeligovskogo. M.: Mashinostroenie, 1965. T. 5. S. 28–43.

6. Bulhakov V. M., Horbovyi A. Yu. Teoriia rukhu lonozbyralnykh kombainiv: monohrafiia. Lviv: Vyd. polihir. viddil Lviv TsNTI, 2006. 156 s.



7. Traktory. Teoriya: uchebnik / V. V. Gus'kov, N. N. Veleev, Yu. E. Atamanov [i dr.]. M.: Mashinostroenie, 1988. 376 s.
8. Timofeev A. I. Analiz ehnergeticheskogo rezhima raboty traktornogo agregata pri razgone. *Zemledel'cheskaya mekhanika: sbornik trudov* / VASKHNIL; pod red. V. A. Zheligovskogo. M.: Mashinostroenie, 1965. T. 5. S. 391–405.
9. Kut'kov G. M. Traktory i avtomobili. Teoriya i tekhnologicheskie svoystva: uchebnik. M.: Kolos, 2004. 504 s.
10. Nadykto V. T. Osnovy agregativaniya modul'nyh ehnergeticheskikh sredstv: monografiya. Melitopol': KP «MMD», 2003. 240 s.
11. Study plane-parallel motion movement combined seeding unit / V. Adamchuk, I. Petrychenko, M. Korenko, H. Beloev, B. Borisov. *Agricultural machines. Research and testing. New machine designs: proceedings of the III International scientific and technical congress "Agricultural Machinery" (Varna, Bulgaria 22–25.06.2015)*. Vol. 1. Sofia, Bulgaria, 2015. P. 7–10.
12. Solodovnikov V. V., Plotnikov V. N., Yakovlev A. V. Osnovy teorii i ehlementov sistem avtomaticheskogo regulirovaniya: uchebnoe posobie dlya vuzov. M.: Mashinostroenie, 1985. 536 s.
13. Gabaj E. V. Matematicheskaya model' i analiz kachestva upravleniya napravleniem dvizheniya MTA s rassredotochennymi po shirine zahvata aktivnymi kolesami. *Nauchnye osnovy sozdaniya mobil'nyh ehnergotekhnologicheskikh sredstv (MEHS): sbornik*. / NATI. Moskva, 1983. S. 38–42.
14. Iofinov S. A., Babenko E. P., Zuev Yu. A. Spravochnik po ehkspluatatsii mashinno-traktornogo parka. M.: Agropromizdat, 1986. 272 s.
1. Vasilenko P. M., Vasilenko V. P. A method for constructing computational models of functioning mechanical systems (machines and machine units): textbook. K.: USKHA, 1980. 137 p.
2. Vasilenko P. M. About equations of motion of mobile machine aggregates. *Agricultural mechanics: a collection of works*. M.: Sel'khozgiz, 1952. T. 2. P. 76–84.
3. Vasilenko P. M. Elements of the theory of stability of motion trailed agricultural machinery and implements. *Agricultural mechanics: a collection of works*. M.: Sel'khozgiz, 1954. T. 2. P. 202–211.
4. Vasilenko P. M. Introduction to agricultural mechanics. K.: Agricultural Education, 1996. 252 p.
5. Vasilenko P. M., Kuzminsky V. G. The equation of motion of self-propelled machine aggregates during starting and acceleration. *Agricultural mechanics: a collection of works*. / VASHNIL; ed. V. A. Zheligovsky. M.: Mechanical Engineering, 1965. T. 5. P. 28–33.
6. Bulgakov V. M., Gorbovy A. Y. Theory of motion flax harvesters: monograph. Lviv: Publishing LvTsNTI, 2006. 115 p.
7. Tractors. Theory: textbook / V. V. Gus'kov, N. N. Veleev, Yu. E. Atamanov [and others]. M.: Mechanical Engineering, 1988. 376 p.
8. Timofeev A. I. Analysis of the energy mode tractor unit during acceleration. *Agricultural mechanics: a collection of works*. / VASHNIL; ed. V. A. Zheligovsky. M.: Mechanical Engineering, 1965. T. 5. P. 391–405.
9. Kutkov G. M. Tractors and cars. The theory and technological properties: textbook. Moscow: Kolos, 2004. 504 p.
10. Nadykto V. T. Basics of modular aggregation of energy resources: monograph. Melitopol': KP "MMD", 2003. 240 p.
11. Study plane-parallel motion movement combined seeding unit / V. Adamchuk, I. Petrychenko, M. Korenko, H. Beloev, B. Borisov. *Agricultural machines. Research and testing. New machine designs: proceedings of the III International scientific and technical congress "Agricultural Machinery" (Varna, Bulgaria 22–25.06.2015)*. Vol. 1. Sofia, Bulgaria, 2015. P. 7–10.
12. Solodovnikov V. V., Plotnikov V. N., Yakovlev A. V. Fundamentals of the theory and elements of systems of automatic regulation: a textbook for high schools. M.: Mechanical Engineering, 1985. 536 p.
13. Gabay E. V. Mathematical model and analysis of the control quality of the direction of movement of the MTA with active wheels dispersed in the width of the grip. *Scientific foundations for the creation of mobile energy technology means (MES): a collection*. / NATI. Moscow, 1983. P. 38–42.
14. Iofinov S. A., Babenko E. P., Zuev Yu. A. Handbook on the operation of the machine-tractor park. M.: Agropromizdat, 1986. 272 p.

### Bibliography