



УДК 631.37

ОЦІНКА КЕРОВАНОСТІ РУХУ ШИРОКОКОЛІЙНИХ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАСОБІВ МЕХАНІЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА

Надикто В. Т., д.т.н.,

Кувачов В. П., к.т.н.

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел.: 0619-42-12-65

Анотація - у статті наведені результати теоретичних досліджень плоско-паралельного руху спеціалізованих ширококолієних енерготехнологічних засобів механізації сільськогосподарського виробництва у поздовжньо-горизонтальній площині при кінематичному і силовому способів їх керування.

Ключові слова - Ширококолієний засіб механізації, енергозасіб, керованість, функціонування динамічних систем.

Постановка проблеми. Аналізом перспективності впровадження колійної та мостової систем землеробства встановлено, що ширококолієні енерготехнологічні агрозасоби (або «мостові трактори» (Wide Span Tractor)), які є основним автономним мобільним енерготехнологічним комплексом, характеризуються високими потенційними технологічними властивостями [1, 2].

Дослідження і вивчення керованості руху агрозасобів такого типу є предметом особливої уваги, оскільки траєкторні показники їх руху обмежені параметрами постійної технологічної колії. У зв'язку з цим, з позиції задовільної керованості їх руху виникають невирішені питання щодо вивчення умов, які накладаються на конструктивні та інші параметри ширококолієних агрозасобів. Тому проведення, в першу чергу, теоретичних досліджень руху ширококолієних агрозасобів, вибору найбільш раціональних їх схем, а також конструктивних і режимних параметрів, що дозволяють отримувати необхідну керованість руху, є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень. Математичні моделі функціонування традиційних машинно-тракторних агрегатів, розроблені свого часу Василенком П.М., Габаєм Є.В., Кутьковим Г.М., Надиктою В.Т. та ін., не можуть бути використаними для розв'язання зазначеної про-



блеми. Переважно з причини нетипової компоувальної схеми ширококолісного агрозасобу, специфіки його агрегування та умов функціонування.

Водночас, розроблені автором статті математичні моделі плоско-паралельного руху ширококолісного агрозасобу у поздовжньо-горизонтальній площині і проведені на їх основі дослідження щодо впливу параметрів і режимів роботи [3], виявилися ще не до кінця вивченими, оскільки обмежувалися лише кінематичним способом його керування (поворотом коліс).

Метою досліджень є розробка математичних моделей плоско-паралельного руху ширококолісних агрозасобів у поздовжньо-горизонтальній площині і оцінка на їх основі впливу схем, конструктивних параметрів та режимів роботи на керованість руху.

Результати досліджень. Вказаний ширококолісний агрозасіб є доволі складним об'єктом керування. Він може бути адаптований до ручного або автоматичного керування і побудований за кінематичним або силовим принципом здійснення повороту. Відомо, що при кінематичному повороті енергосасобів застосовуються схеми поворотом керованих коліс (передніх, задніх або одночасно і передніх і задніх) щодо остову машини, або зміною положення однієї частини мобільної машини відносно іншої в горизонтальній площині (шарнірно-зчленована рама). Силовий (бортовий) поворот реалізується за рахунок різної рушійної сили коліс лівого та правого бортів машини.

На даному етапі вивчення динаміки ширококолісного агрозасобу доцільно розглянути його спрощену схему у вигляді стаціонарної лінійної моделі. Такий підхід дозволив представити еквівалентні схеми динамічної системи руху ширококолісного агрозасобу у поздовжньо-горизонтальній площині при кінематичному та силовому способах його керування (рис. 1).

Для опису руху ширококолісного агрегату в горизонтальній площині використовували рівняння Лагранжу II роду [4], застосовуючи дві узагальнені координати: курсовий кут φ та переміщення абсциси X_s його центру мас S_T .

У диференціальній формі математична модель функціонування вказаного агрозасобу, як динамічної системи, має наступний вид:

- для силового (бортового) способу його керування (керуючим впливом є рушійна сила коліс одного із бортів $P_{дл}$ або $P_{дп}$, причому $P_{дл}=P_{дл1}+P_{дл2} = P_{кл1}-P_{фл1}+P_{кл2}-P_{фл2}$, $P_{дп}=P_{дп1}+P_{дп2} = P_{кп1}-P_{фп1}+P_{кп2}-P_{фп2}$, тут $P_{кл1}$, $P_{кп2}$ та $P_{фл1}$, $P_{фп2}$ – дотичні сили тяги та опору коченню і-го колеса) (рис. 1а)

$$\begin{cases} A_{11} \cdot \ddot{X}_s + A_{12} \cdot \dot{X}_s + A_{13} \cdot \dot{\varphi} + A_{14} \cdot \varphi = R'' \\ A_{21} \cdot \ddot{\varphi} + A_{22} \cdot \dot{\varphi} + A_{23} \cdot \varphi + A_{24} \cdot \dot{X}_s = M_R - R''(l_m + a) - (K - b) \cdot P_{дп} + b \cdot P_{дл}, \end{cases} \quad (1)$$

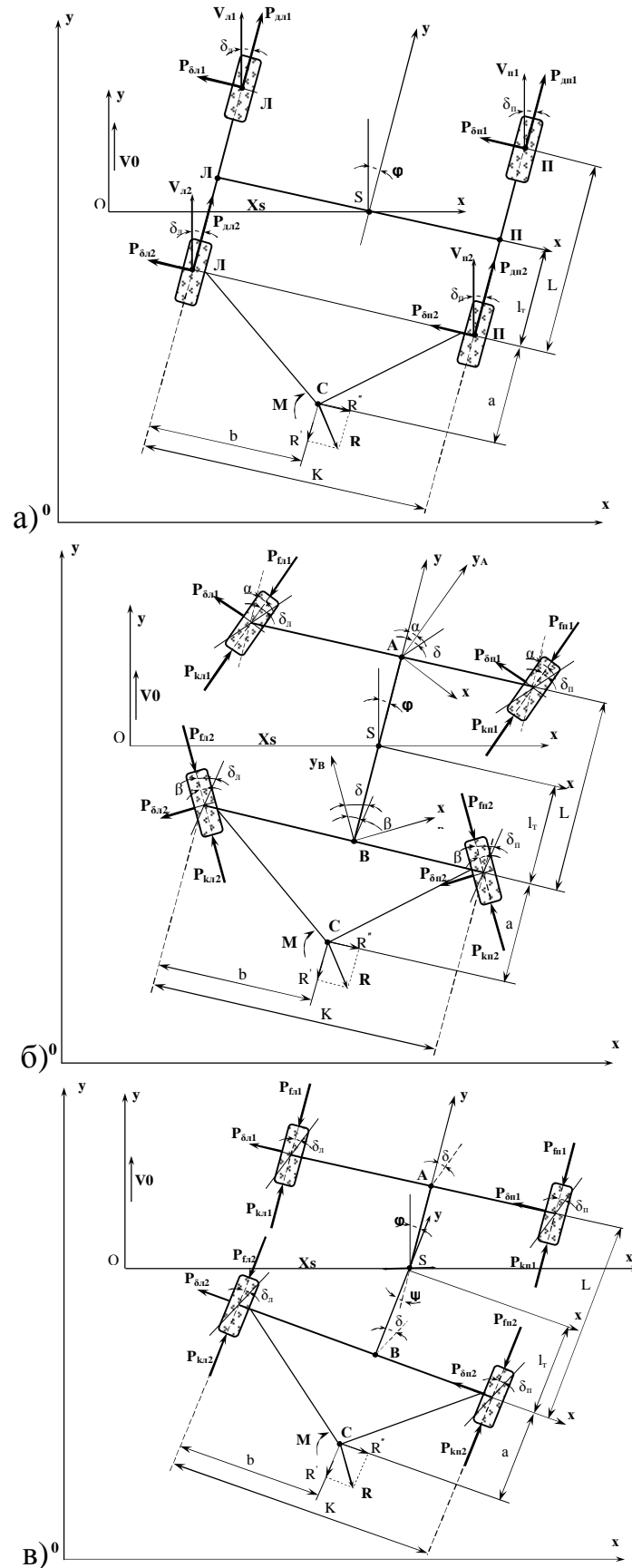


Рис. 1. Схеми еквівалентних динамічних систем руху агрозасобу у по-
здовжньо-горизонтальній площині при бортовому (а), кінематичному
(поворот коліс) (б) і поворот напіврам (в) способів його керування.



- для кінематичного способу його керування шляхом повороту коліс (керуючим впливом є кут повороту α передніх коліс) (рис. 1б)

$$\begin{cases} A_{11} \cdot \ddot{X}_s + A_{12} \cdot \dot{X}_s + A_{13} \cdot \dot{\varphi} + A_{14} \cdot \varphi = \\ \quad = f_{11} \cdot \alpha + f_{12} \cdot \beta + R'', \\ A_{21} \cdot \ddot{\varphi} + A_{22} \cdot \dot{\varphi} + A_{23} \cdot \varphi + A_{24} \cdot \dot{X}_s = \\ \quad = f_{21} \cdot \alpha + f_{22} \cdot \beta - R''(l_m + a) + M_R - (K - b) \cdot P_{дп} + b \cdot P_{дл}, \end{cases} \quad (2)$$

- для кінематичного способу його керування шляхом повороту напіврам (керуючим впливом є кут повороту напіврам ψ) (рис. 1в)

$$\begin{cases} A_{11} \cdot \ddot{X}_s + A_{12} \cdot \dot{X}_s + A_{13} \cdot \dot{\psi} + A_{14} \cdot \psi = \\ \quad = f_{11}^* \cdot \psi + f_{12}^* \cdot \psi + R'', \\ A_{21} \cdot \ddot{\psi} + A_{22} \cdot \dot{\psi} + A_{23} \cdot \psi + A_{24} \cdot \dot{X}_s = \\ \quad = f_{21}^* \cdot \psi + f_{22}^* \cdot \psi - R''(l_m + a) + M_R - (K - b) \cdot P_{дп} + b \cdot P_{дл}, \end{cases} \quad (3)$$

де $A_{11} = M_T$;

$$A_{12} = (k_{л1} + k_{л2} + k_{п1} + k_{п2}) / V_0;$$

$$A_{13} = ((k_{л1} + k_{п1}) \cdot (L - l_T) - (k_{л2} + k_{п2}) \cdot l_T) / V_0;$$

$$A_{14} = - (k_{л1} + k_{л2} + k_{п1} + k_{п2});$$

$$A_{21} = J_T;$$

$$A_{22} = ((k_{л1} - k_{п1}) \cdot (L - l_T)^2 + (k_{л2} - k_{п2}) \cdot l_T^2) / V_0;$$

$$A_{23} = -(k_{л1} + k_{п1}) \cdot (L - l_T) + (k_{л2} + k_{п2}) \cdot l_T;$$

$$A_{24} = (k_{л1} + k_{п1}) \cdot (L - l_T) - (k_{л2} + k_{п2}) \cdot l_T / V_0;$$

$$f_{11} = (P_{кл1} - P_{фл1} + P_{кп1} - P_{фп1}) + k_{л1} + k_{п1};$$

$$f_{11}^* = (k_{л2} + k_{п2}) \cdot l_T / V_0;$$

$$f_{12} = k_{л2} + k_{п2} - (P_{кл2} - P_{фл2} + P_{кп2} - P_{фп2});$$

$$f_{12}^* = (k_{л2} + k_{п2}) + (P_{кл2} - P_{фл2} + P_{кп2} - P_{фп2}) - R';$$

$$f_{21} = (L - l_T) \cdot ((P_{кл1} - P_{фл1}) + (P_{кп1} - P_{фп1}) + k_{л1} + k_{п1});$$

$$f_{21}^* = -l_T \cdot (k_{л2} + k_{п2});$$

$$f_{22} = l_T \cdot ((P_{кл2} - P_{фл2}) - (P_{кп2} - P_{фп2}) - k_{л2} - k_{п2});$$

$$f_{22}^* = -l_T \cdot ((k_{л2} + k_{п2}) + (P_{кл2} - P_{фл2}) - (P_{кп2} - P_{фп2})) + R'(l_T + a).$$

У цих рівняннях $M_T, J_{ст}$ – маса і момент інерції агрозасобу відносно його центру мас; V_s – лінійна швидкість його центру мас відносно площини X_1OY_1 ; $k_{л1}, k_{л2}$ і $k_{п1}, k_{п2}$ – коефіцієнти опору уводу коліс лівого і правого бортів агрозасобу; K, b, a, L і l_m – конструктивні параметри природа яких зрозуміла з рис. 1.

Для подальшого аналізу системи рівнянь (1-3) представимо в операторній формі запису. Для чого здійснимо перетворення Лапласа. В результаті маємо:

- для силового (бортового) способу керування агрозасобом



$$\begin{cases} K_{11} \cdot X_S(s) + K_{12} \cdot \varphi(s) = N_{11} \cdot P_{ДЛ} + N_{12} \cdot R'' + N_{13} \cdot M_R + N_{14}, \\ K_{21} \cdot X_S(s) + K_{22} \cdot \varphi(s) = N_{21} \cdot P_{ДЛ} + N_{22} \cdot R'' + N_{23} \cdot M_R + N_{24}, \end{cases} \quad (4)$$

- для кінематичного способу його керування шляхом повороту коліс

$$\begin{cases} K_{11} \cdot X_S(s) + K_{12} \cdot \varphi(s) = F_{11} \cdot \alpha + F_{12} \cdot R'' + F_{13} \cdot M_R + F_{14}, \\ K_{21} \cdot X_S(s) + K_{22} \cdot \varphi(s) = F_{21} \cdot \alpha + F_{22} \cdot R'' + F_{23} \cdot M_R + F_{24}, \end{cases} \quad (5)$$

- для кінематичного способу його керування шляхом повороту напіврам

$$\begin{cases} K_{11} \cdot X_S(s) + K_{12} \cdot \varphi(s) = Y_{11} \cdot \psi(s) + Y_{12} \cdot R'' + Y_{13} \cdot M_R + Y_{14}, \\ K_{21} \cdot X_S(s) + K_{22} \cdot \varphi(s) = Y_{21} \cdot \psi(s) + Y_{22} \cdot R'' + Y_{23} \cdot M_R + Y_{24}, \end{cases} \quad (6)$$

де

$$\begin{aligned} K_{11} &= A_{11} \cdot s^2 + A_{12} \cdot s; & K_{21} &= A_{24} \cdot s; \\ K_{12} &= A_{13} \cdot s + A_{14}; & K_{22} &= A_{21} \cdot s^2 + A_{22} \cdot s + A_{23}; \\ N_{11} &= F_{11} = F_{12} = 0; & N_{21} &= F_{11} = F_{12} = b; \\ N_{12} &= F_{15} = 1; & N_{22} &= F_{25} = -(l_T + a); \\ N_{13} &= F_{16} = 0; & N_{23} &= F_{26} = 1; \\ N_{14} &= F_{13} \cdot P_{ДЛ1} + F_{14} \cdot P_{ДЛ2} = 0; & N_{24} &= F_{23} \cdot P_{ДЛ1} + F_{24} \cdot P_{ДЛ2} = -(K - b) \cdot P_{ДЛ}; \\ F_{11} &= f_{11}; & F_{21} &= f_{21}; \\ F_{12} &= 1; & F_{22} &= -(l_T + a); \\ F_{13} &= 0; & F_{23} &= 1; \\ F_{14} &= 0; & & \\ F_{24} &= -(K - b) \cdot (P_{кп1} - P_{фп1} + P_{кп2} - P_{фп2}) + b \cdot (P_{кп1} - P_{фп1} + P_{кп2} - P_{фп2}); \\ Y_{11} &= f_{11} \cdot s + f_{12}; & Y_{21} &= f_{21} \cdot s + f_{22}; \\ Y_{12} &= 1; & Y_{22} &= -(l_T + a); \\ Y_{13} &= 0; & Y_{23} &= 1; \\ Y_{14} &= 0; & & \\ Y_{24} &= -(K - b) \cdot (P_{кп1} - P_{фп1} + P_{кп2} - P_{фп2}) + b \cdot (P_{кп1} - P_{фп1} + P_{кп2} - P_{фп2}); \end{aligned}$$

$s = d/dt$ – оператор диференціювання.

Керованість руху ширококолісного агрозасобу, як слідкуючої динамічної системи, оцінювали за допомогою амплітудних (АЧХ) та фазових (ФЧХ) частотних характеристик відпрацювання ними вхідного керуючого впливу [5]. Бажана керованість руху ширококолісного агрозасобу при кінематичному способі його керування матиме місце тоді, коли амплітуда його курсового кута (φ) без запізнення у часі буде дорівнювати амплітуді кута повороту його керованих коліс (α , див. рис. 1б) або напіврам (ψ , див. рис. 1в). Тобто, АЧХ відпрацювання агрегатом керуючого впливу в діапазоні робочих частот має дорівнювати 1, а ФЧХ – 0. При силовому способі керування агрозасобом (див.

рис. 1а) в теоретичних дослідженнях складно позначити ідеальні АЧХ. Характер останніх обумовлений ефективністю керування (автоматичного, дистанційного або ручного) і може оцінюватися тим, наскільки повно виконуються вимоги, яким воно повинно відповідати. Для їх максимуму дія керуючого впливу повинна здійснюватися за певною закономірністю, що описує алгоритм керування. Точне математичне описання такого алгоритму є доволі складною задачею. На даному етапі теоретичних досліджень, з точки зору створення ефективної системи силового керування ширококолісного агрозасобу, достатньо визначити такі властивості динамічної системи його руху у поздовжньо-горизонтальній площині, які здійснюють найбільший вплив на характер АЧХ і ФЧХ.

Фізичним об'єктом теоретичних досліджень був дослідний зразок ширококолісного агрозасобу, розроблений в Таврійському державному агротехнологічному університеті (рис. 2).

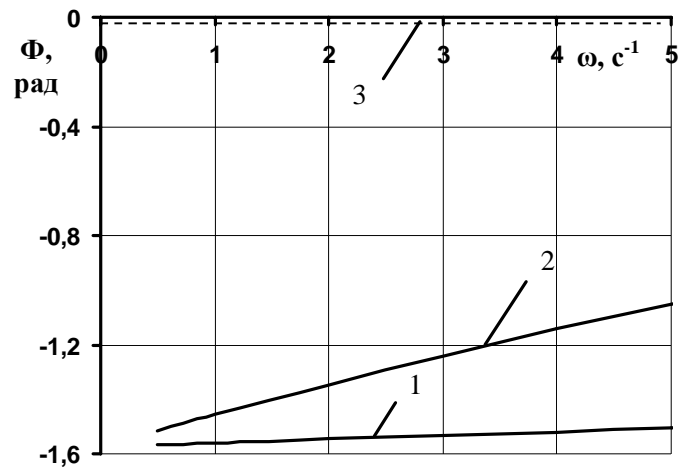
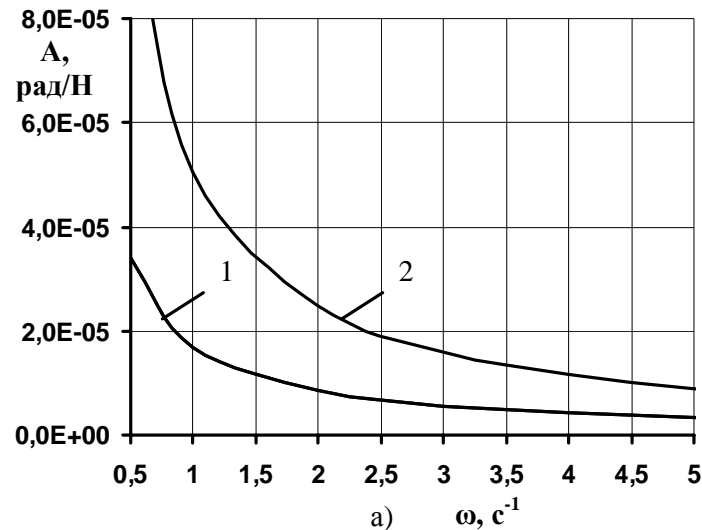
Розрахунок АЧХ і ФЧХ (рис. 3-5) здійснювався при наступних конструктивно-технологічних параметрах фізичного об'єкту досліджень: $M_T=1000$ кг, $J_T=1125$ кг·м², $K=3$ м, $L=2,3$ м, $l_T=1,15$ м, $a=1$ м, $b=1,5$ м, $V_0=2$ м/с.



Рис. 2. Спеціалізований енерготехнологічний агрозасіб для колійної системи землеробства, розроблений науковцями Таврійського державного агротехнологічного університету (ТДАТУ, м. Мелітополь).

Аналіз розрахункових АЧХ і ФЧХ при силовому (бортовому) способі керування ширококолісного агрозасобу показав, що його керованість суттєво залежить від величини колії K (див. рис. 3). Підсилення керуючого впливу зростає із збільшенням величини колії агрозасобу (рис. 3а). Найбільш відчутно цей процес проявляється на частотах коливання рушійної сили близьких до нуля. Значно меншим при

цьому є і запізнення реакції МТА на вхідний сигнал, що є бажаним, оскільки із збільшенням величини колії агрозасобу ФЧХ наближаються до ідеальних (рис. 3б). Такий характер впливу конструктивної величини колії агрозасобу на частотні характеристики його керованості можна пояснити збільшенням його інерційності (моменту інерції), що підсилює реакцію динамічної системи на вхідне збурювання.



б)

Рис. 3. АЧХ (а) і ФЧХ (б) коливань курсового кута φ агрозасобу при відпрацюванні ним керуючого впливу (рушійна сила коліс одного із бортів $P_{дп}$) при силовому способу його керування і різних значеннях величини колії K : 1 – 3м; 2 – 9м; 3 – ідеальна характеристика.

Аналіз розрахункових АЧХ і ФЧХ при кінематичному способі керування агрозасобом показав (рис. 4), що його керованість суттєво залежить від швидкості руху. При малих швидкостях руху ($V_0=1\text{м/с}$) маємо суттєве недорегулювання в динамічній системі (крива 1, рис. 4а). При цьому бажана частота коливань кута повороту α передніх коліс

знаходиться на рівні $0,5 \text{ с}^{-1}$, де значення коефіцієнту підсилення вхідного керуючого впливу наближається до 1.

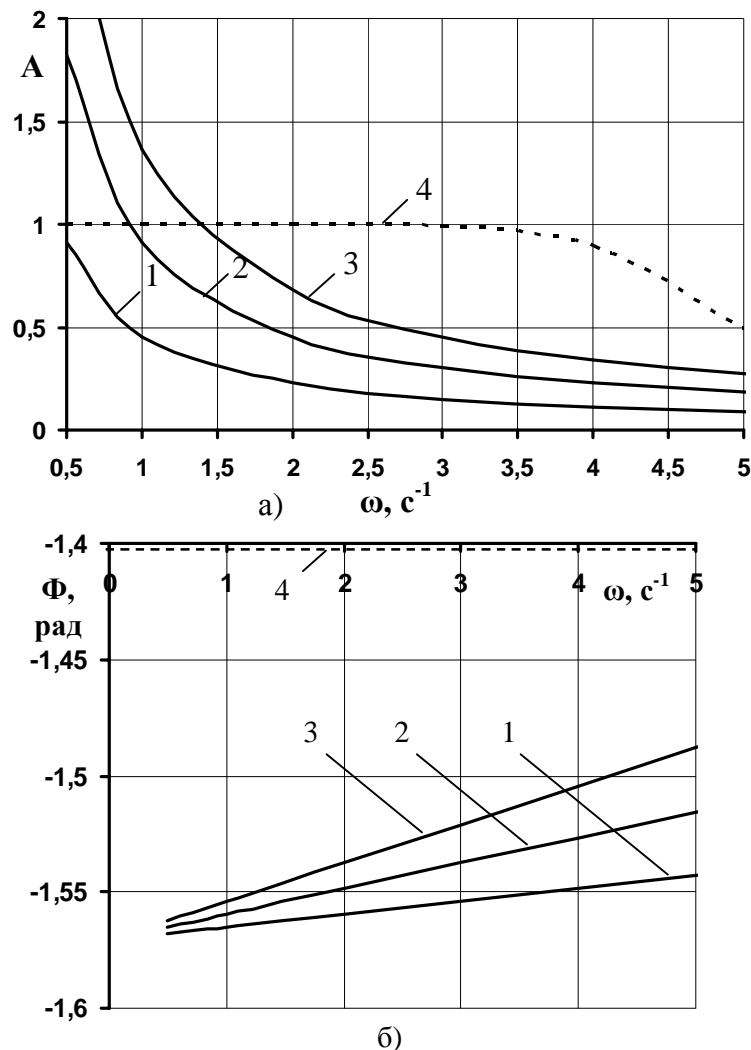


Рис. 4. АЧХ (а) і ФЧХ (б) коливань курсового кута φ агрозасобу при відпрацюванні ним керуючого впливу (кута повороту α передніх коліс) при кінематичному способі його керування і різних швидкостях руху: 1 – 1м/с; 2 – 2м/с; 3 – 3м/с; 4 – ідеальні характеристики.

Разом з цим, збільшення швидкості руху агрозасобу до 2 і 3 м/с на низьких частотах ($\omega < 1,3 \text{ с}^{-1}$) сприяє перерегулюванню динамічної системи (крива 2 і 3, рис. 4а), а на частотах $\omega > 1,3 \text{ с}^{-1}$ навпаки – наближає характеристики до ідеальних. Що стосується фазового зсуву відпрацювання динамічною системою керуючого впливу, то при збільшенні робочих швидкостей руху агрозасобу до 3 м/с (крива 3, рис. 4б) ФЧХ найбільш близька до ідеальної.

Аналіз розрахункових АЧХ і ФЧХ при кінематичному способі керування агрозасобом шляхом зміщення його напіврам (рис. 5) показав, що керованість суттєво залежить від величини його колісної бази l . При $l = 4\text{м}$ маємо суттєве недорегулювання в динамічній системі керу-

ючого впливу (кутового зміщення напіврам ψ) (крива 3, рис. 5а). Разом з тим, зменшення колісної бази до $l = 2,4\text{ м}$ на низьких частотах ($\omega < 1,7\text{ с}^{-1}$) сприяє перерегулюванню динамічної системи (крива 2 і 3, рис. 5а), а на частотах $\omega > 1,7\text{ с}^{-1}$ навпаки - наближає характеристики до ідеальної. При цьому бажана частота коливань кутового зміщення напіврам ψ знаходиться на рівні $1,7\text{ с}^{-1}$, де значення коефіцієнту підсилення вхідного керуючого впливу дорівнює 1. Також слід відзначити, що при зменшенні колісної бази агрозасобу $l < 2\text{ м}$ розглядувана динамічна система на всьому частотному діапазоні має коефіцієнт підсилення вхідного керуючого впливу меншим за 1, що не є бажаним.

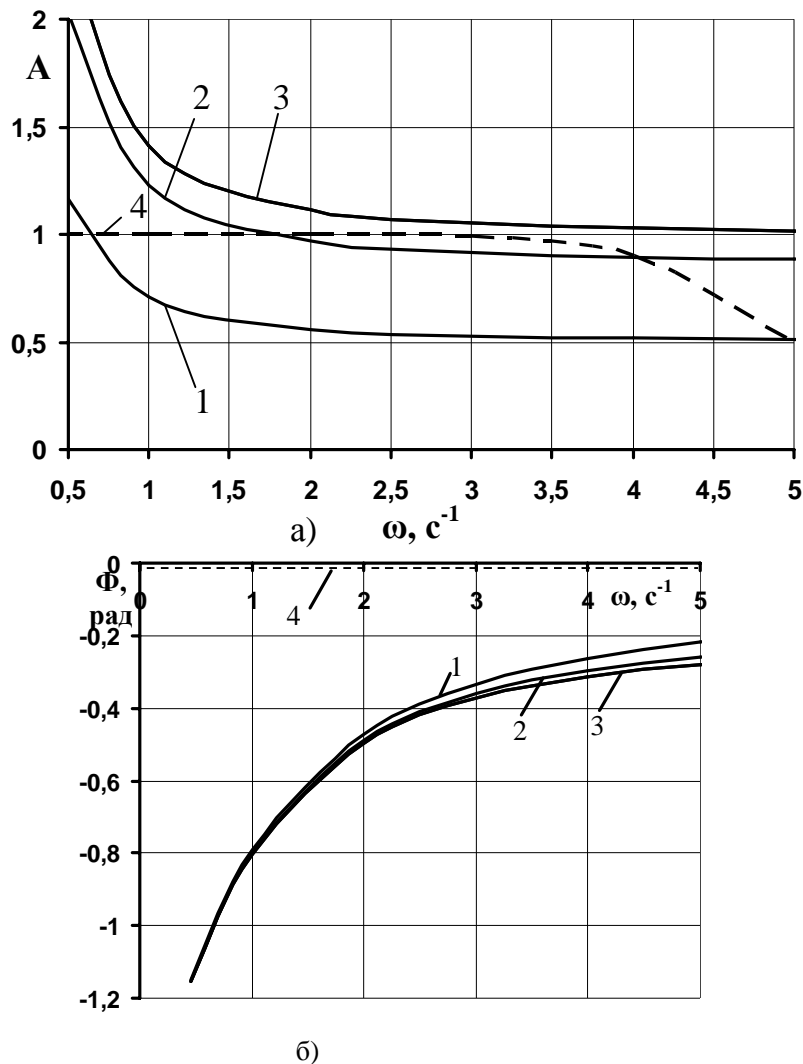


Рис. 5. Амплітудні (а) і фазові (б) частотні характеристики коливань курсового кута φ агрозасобу відпрацювання ним керуючого впливу (кутового зміщення напіврам ψ) при кінематичному способі його керування і різної колісної бази: 1 – $l = 4\text{ м}$; 2 – $l = 2,4\text{ м}$; 3 – $l = 2\text{ м}$; 4 – ідеальні характеристики.

Що стосується фазового зсуву відпрацювання динамічною системою керуючого впливу, то слід відзначити незначну різницю її пове-



дінки при зміні величини колісної бази агрозасобу від 2 до 4 м. Але ФЧХ найбільш близька до ідеальної при $l = 2$ м (крива 3, рис. 5б). Таку залежність керованості агрозасобу від конструктивної величини його колісної бази також можна пояснити підвищенням моменту інерції, що підсилює реакцію динамічної системи на вхідний вплив.

Висновок. Розроблені математичні моделі і отримані нові закономірності плоско-паралельного руху ширококолісного агрозасобу при кінематичному і силовому способах його керування, які дозволяють теоретично здійснювати обґрунтування нових схем, конструктивних параметрів і режимів його роботи із прийнятною керованістю руху.

Теоретичними дослідженнями встановлено, що колісна база агрозасобу та його швидкісний режим суттєво впливають на його керованість. Аналіз розрахункових АЧХ і ФЧХ показав, що для розглядуваного дослідного зразку агрозасобу із колією 3 м при кінематичному способу його керування збільшення або зменшення колісної бази відносно 2,4 м призводить до погіршення керування. Збільшення швидкісного режиму агрозасобу підсилює реакцію динамічної системи на керуючий вплив, що призводить до перерегулювання системи і навпаки.

При силовому способу керування агрозасобом збільшення величини колії останнього підсилює амплітуду керуючого впливу розглядуваної динамічної системи.

Література

1. *Надикто В.Т.* Колійна та мостова системи землеробства. Монографія / В.Т. Надикто, В.О. Улексін. – Мелітополь: ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2008. – 270 с.
2. *Pedersen Н.Н.* User requirements for a Wide Span Tractor for Controlled Traffic Farming [Електронний ресурс] / Н.Н. Pedersen. – 2013. – Режим доступу: <http://cigr.org/>.
3. *Кувачев В.* Моделирование плоскопараллельного движения в горизонтальной плоскости ширококолейного агросредства при кинематическом способе его управления / В. Кувачев // Motrol. – 2015. – Vol. 17, № 9. – с. 49–54.
4. *Пащенко В.Ф.* До методики побудови математичних моделей функціонування механічних систем / В.Ф. Пащенко // Вісті академії інженерних наук України. – 2006. – №1(28). – с.27-28.
5. *Нові мобільні енергетичні засоби України.* Теоретичні основи використання в землеробстві / В.Т. Надикто [та ін.]. – Мелітополь: ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2005. – 337 с.



**ОЦЕНКА УПРАВЛЯЕМОСТИ ДВИЖЕНИЯ
ШИРОКОКОЛЕЙНЫХ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
СРЕДСТВ МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО
ПРОИЗВОДСТВА**

Надикто В.Т., Кувачов В.Н.

Аннотация - в статье представлены результаты теоретических исследований плоскопараллельного движения специализированных ширококолейных энерготехнологических средств механизации сельскохозяйственного производства в продольно-горизонтальной плоскости при кинематическом и силовом способе их управления.

**ASSESSMENT OF MOTION WIDE SPAN TRACTOR
OF MECHANIZATION AGRICULTURAL PRODUCTION**

Nadykto V., Kuvachov V.

Summary

The article results of theoretical investigation of plane-parallel movement of Wide Span Tractor in the longitudinal-horizontal plane by kinematic and force their way of control is presents.