
УДК 631.3

Надикто В., д.т.н., чл.-кор. НААНУ, Кюрчев В., д.т.н. (Таврійський державний агротехнологічний університет)

Оцінка керованості руху машинно-тракторних агрегатів

Розглянуто особливості методики оцінювання керованості руху машинно-тракторних агрегатів. Показано переваги і практичну зручність використання амплітудних і фазових частотних характеристик у теоретичному аналізі цього процесу. Як «практичний» критерій оцінювання керованості руху МТА запропоновано взаємну кореляційну функцію, яка відображає тісноту кореляційного зв'язку між керувальним впливом (входом) і виходом динамічної системи слідування.

Ключові слова: машинно-тракторний агрегат, динамічна система, керувальний вплив, керованість, амплітудна і фазова частотні характеристики, взаємна кореляційна функція.

Суть проблеми. Якісне виконання машинно-тракторним агрегатом тієї чи іншої технологічної операції неможливе без задовільної стійкості і керованості його руху у горизонтальній площині. У реальній ситуації між цими двома, по суті своїй різними динамічними процесами, існує певний взаємозв'язок. Так, керований МТА є, як правило, стійким. Водночас, стійкий агрегат може не завжди мати задовільну (а іноді і будь-яку) керованість руху. У зв'язку з цим для обґрунтування його схеми та конструкційно-технологічних параметрів дуже важливо знати вплив останніх на обидва процеси окремо.

Розв'язання цієї задачі можливе шляхом використання методу суперпозиції, який правомірно застосовувати у дослідженні лінійних математичних моделей МТА. Методика такого підходу щодо аналізу та оцінювання стійкості руху машинно-тракторних агрегатів досить ґрунтовно викладена у роботі [1].

Слід підкреслити, що порівняно зі стійкістю процесу керованості руху машинно-тракторного агрегату дослідники приділяли і нині приділяють значно менше уваги. Не витрачаючи зусиль на з'ясування причин цього явища, зауважимо, що це відчувається навіть на понятійному рівні. Якщо «стійкість» руху МТА, як показано в [1-3], має цілком чіткі визначення, то поняття «керованість» – ні.

На думку переважної більшості дослідників *керованість руху агрегата – це його властивість переходити із сталого напрямку переміщення у той, який заданий дією керування*.

І тут виникає питання, а як порівняти між собою керованість двох МТА, виходячи із такого визначення? Більше того, що означає вираз «сталий напрямок переміщення»? Особливо тоді, коли рух того чи іншого МТА упродовж певного часу, як підкреслювалося вище, може бути сталим, але некерованим.

Навіть коли сказати простіше, що *керованість машинно-тракторного агрегата – це його здатність відтворювати керувальний вплив*, то без методики кількісного оцінювання це визначення теж залишиться малозрозумілим і неконкретним.

Як бачимо, алгоритм оцінювання керованості руху будь-якої динамічної системи має включати ті чи інші кількісні показники. У цій статті пропонується один із таких варіантів вирішення означеної проблеми.

Основна частина. Для прикладу розглянемо таку динамічну систему як комбінований жнивально-луцильний МТА у складі орно-просапного трактора фронтальної валкової жнивarki і дискової борони. Причому, в одному із варіантів агрегата трактор налаштований на реверсивний (рис. 1а), а у другому – на прямий (рис. 1б) хід.

Під час поступального руху МТА зі швидкістю V_0 у горизонтальній площині XOY на нього діють такі сили:

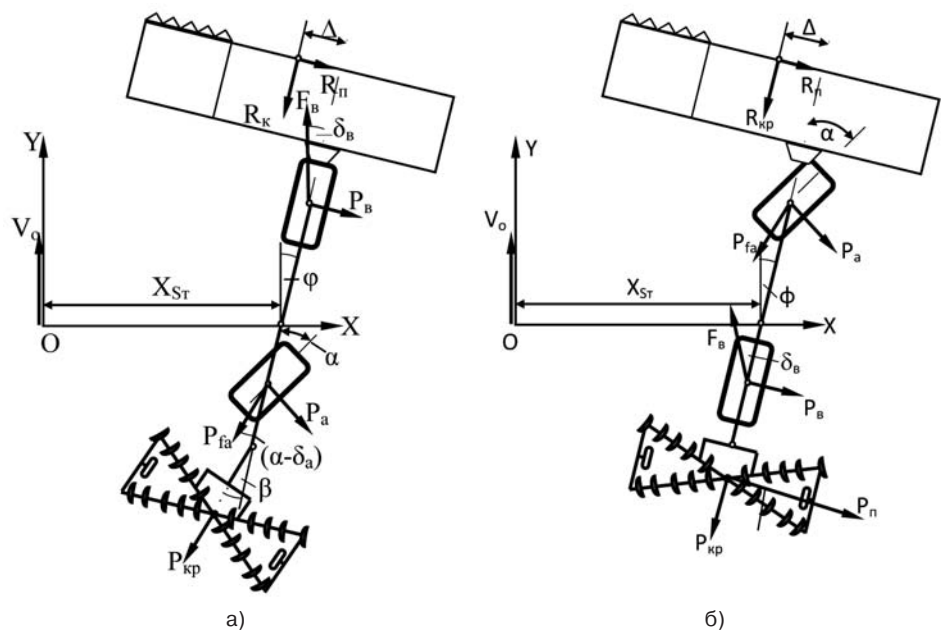


Рис. 1 – Еквівалентні схеми жнивально-луцильного МТА у реверсивному (а) і прямому (б) налаштуванні трактора

поздовжня (R_k) і поперечна (R_n) складові тягового опору валкової жнивarki; рушійна сила тягового (F_B) і сила опору кочення веденого (P_{fa}) моста трактора; бокові сили P_a і P_b , які обумовлюють кути відведення δ_a і δ_b шин відповідних мостів енергетичного засобу; сила тягового опору дискової борони P_{kp} (рис. 1а) або її складові P_n і P_k (рис. 1б).

Методика розроблення математичної моделі цих агрегатів досить ґрунтовно викладена у роботах [4, 5]. У диференціальній формі запису вона (модель) є такою:

$$\left. \begin{aligned} A_{11} \cdot \ddot{X}_{ST} + A_{12} \cdot \dot{X}_{ST} + A_{13} \cdot \dot{\varphi} + A_{14} \cdot \varphi + \\ + A_{15} \cdot \beta = f_{11} \cdot \alpha + f_{12}; \\ A_{21} \cdot \ddot{\varphi} + A_{22} \cdot \dot{\varphi} + A_{23} \cdot \varphi + A_{24} \cdot \dot{X}_{ST} + \\ + A_{25} \cdot \beta = f_{21} \cdot \alpha + f_{22}; \\ A_{31} \cdot \ddot{\beta} + A_{32} \cdot \dot{\beta} + A_{33} \cdot \beta + A_{34} \cdot \dot{\varphi} + \\ + A_{35} \cdot \varphi + A_{36} \cdot \dot{X}_{ST} = f_{32}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Коефіцієнти $A_{11} - A_{15}$, $A_{21} - A_{25}$, $A_{31} - A_{36}$, f_{11} , f_{12} , f_{21} , f_{22} і f_{32} , які входять до системи рівнянь (1), є функціями конструкційно-технологічних параметрів комбінованого агрегата. Для подальшого аналізу у цій статті вони не потрібні, а тому їх розшифрування не подається.

Підкреслимо, що дослідження керованості руху динамічної системи можливе лише за умови наявності керувального впливу. У даному випадку таким є кут повороту передніх коліс енергетичного засобу – α . Вихідними параметрами динамічної системи (1) є координата поперечного зміщення центру мас агрегата X_{ST} , курсовий кут трактора φ і кут повороту дискової борони у горизонтальній площині β (рис. 1а).

За сучасного рівня програмного забезпечення класичне рішення системи рівнянь (1) не створює значних труднощів, але й не надає особливих переваг. По-перше, дослідник повинен задати закон зміни керу-

вального впливу (у цьому випадку – кута α). Реальна його природа на практиці проявляється у вигляді випадкового процесу. Широко застосовуване представлення керувального впливу залежністю типу $A_{\sin}(\omega \cdot t + \varphi)$ (де A , ω , φ – амплітуда, частота і фаза керувального впливу, а t – час) у дійсності дуже мало відповідає істині.

По-друге, навіть отримавши рішення у вигляді реалізації вихідних параметрів динамічної системи як функцій часу, виникає питання: за яким критерієм їх слід (чи можна) порівнювати між собою?. І якщо цей алгоритм відсутній, то аналіз впливу параметрів і режиму роботи МТА на керованість його руху здійснити досить проблематично (а то і неможливо).

Одним із варіантів розв'язання такої задачі є застосування методів теорії автоматичного регулювання динамічних систем слідування. Для цього математичну модель руху МТА слід представити в операторній формі. У розглядуваному нами прикладі вона є такою:

$$\left. \begin{aligned} K_{11} \cdot X_{sT}(p) + K_{12} \cdot \varphi(p) + K_{13} \cdot \beta(p) &= F_{11} \cdot \alpha(p) + F_{12} \cdot R_{\Pi}(p); \\ K_{21} \cdot X_{sT}(p) + K_{22} \cdot \varphi(p) + K_{23} \cdot \beta(p) &= F_{21} \cdot \alpha(p) + F_{22} \cdot f_{22}(p); \\ K_{31} \cdot X_{sT}(p) + K_{32} \cdot \varphi(p) + K_{33} \cdot \beta(p) &= F_{32}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де $p = d/dt$ – оператор диференціювання.

Коефіцієнти $K_{11} - K_{13}$, $K_{21} - K_{23}$, $K_{31} - K_{33}$, F_{11} , F_{12} , F_{11} , F_{21} , F_{22} і F_{32} є функціями коефіцієнтів $A_{11} - A_{15}$, $A_{21} - A_{25}$, $A_{31} - A_{36}$, f_{11} , f_{12} , f_{22} і f_{32} системи (1). Для подальших міркувань їхні конкретні значення нам не потрібні.

На основі системи рівнянь (2) складається передатна функція відпрацювання МТА як динамічна система керувального впливу. У цьому випадку, як уже підкреслювалося вище, ним є кут повороту керованих коліс трактора α . За вихідний параметр приймемо курсовий кут трактора φ . З методикою складання використовуваної нами і інших передатних функцій читач досить предметно може познайомитися у роботах [2, 4].

Для розглядуваного нами прикладу передатна функція $W(p)$, яка відображає процес коливання курсового кута трактора φ при зміні вхідного впливу – кута α , є такою:

$$W(p) = \frac{\begin{vmatrix} K_{11} & F_{11} & K_{13} \\ K_{21} & F_{12} & K_{23} \\ K_{31} & 0 & K_{33} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{vmatrix}}$$

На основі розробленої передатної функції за загальновідомим алгоритмом [6] розраховуються амплітудні (АЧХ) і фазові (ФЧХ) частотні характеристики відпрацювання динамічною системою керувального впливу. Перша із цих характеристик репрезентує рівень підсилення динамічною системою амплітуди вхідного сигналу, а друга – величину запізнення її реакції на керівний вплив.

Із теорії автоматичного регулюван-

ня відомо [2, 3], що ідеальна АЧХ відтворення динамічною системою слідування керівного впливу в робочому діапазоні частот його коливань повинна дорівнювати **одиниці**, а ФЧХ – **нулю**:

$$\left. \begin{aligned} \text{АЧХ} &= 1; \\ \text{ФЧХ} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Цілком зрозуміло, що в реальних умовах ідеальні частотні характеристики зазвичай недосяжні. Тобто, дійсні АЧХ і ФЧХ досліджуваної динамічної системи можуть не відповідати вимогам (3). Проте, в процесі математичного моделювання її схему та конструкційно-технологічні параметри можна підібрати такими, які забезпечать найкращу наближеність дійсних вказаних частотних характеристик до ідеальних.

Враховуючи вищевикладене, система (3) – це той вектор, у напрямку якого слід рухатися під час проведення математичного моделювання. І головне те, що знання закону зміни керувального впливу при цьому не потрібне. Єдиною і достатньою інформацією є робочий діапазон частот його коливань.

Розглянемо конкретний приклад проведення аналізу керованості руху вищевказаного комбінованого МТА з використанням амплітудних і фазових частотних характеристик. Розрахунками встановлено, що під час налаштування трактора на прямий хід у складі жнивально-луцильного агрегата керівний вплив відпрацюється ним краще. Дійсна АЧХ при цьому (крива 2, рис. 2а) розташована значно ближче до ідеальної характеристики (крива 3), ніж амплітудно-частотна характеристика, яка репрезентує коефіцієнт підсилення керувального впливу (кут α) агрегатом з реверсивним налаштуванням трактора (крива 1). **Числове** значення цього коефіцієнта залежить від частоти коливань керувального впливу і може бути легко визначене із АЧХ.

МТА за реверсивною схемою значно пізніше відгукується на вхідний корисний сигнал. З частотою коливань останнього, близькою до нуля, фазовий зсув (тобто ФЧХ) становить 180° (крива 1, рис. 2б). Практично це означає, що трактор повністю реагує на керувальний вплив тільки через 3 с. Рухаючись зі швидкістю хоча б 2 м/с, він за цей час за небажаною траєкторією встигне пройти значний шлях, який дорівнює 6 м.

Натомість, комбінований МТА з налаштуванням трактора на прямий хід швидше реагує на вхідний

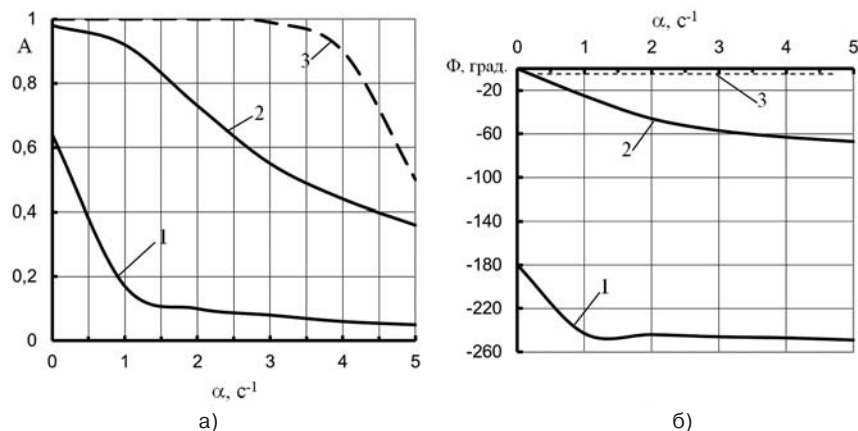


Рис. 2 – Амплітудні (а) та фазові (б) частотні характеристики відпрацювання агрегатом керувального впливу під час налаштування трактора на реверсивний (1) та прямий (2) рух: 3 – ідеальні АЧХ і ФЧХ

керувальний вплив, оскільки його ФЧХ (крива 2, рис. 2б) розташована ближче до ідеальної (лінія 3).

Із наведеного вище прикладу амплітудо-фазово-частотного аналізу з урахуванням вимог системи (3) випливає однозначний висновок: керованість руху жнивально-лушильного агрегата із трактором, налаштованим на прямий хід, є кращою, а тому така схема комбінованого МТА має перевагу.

Використовуючи такий метод математичного моделювання, можна здійснити обґрунтований вибір схеми та конструкційно-технологічних параметрів будь-якого іншого агрегата. При цьому в аналізі керованості його руху керувальним впливом може бути не тільки кут повороту керованих коліс енергетичного засобу, а й інший параметр. Іноді дослідники використовують величину поперечного зміщення керованих рушіїв трактора [4]. Вихідним параметром при цьому вибирають поперечне зміщення траєкторії заданої контрольованої точки агрегата.

Водночас, яким би якісним і достовірним не було математичне моделювання, у підсумку його результати потребують практичної перевірки. У польових умовах виключно керованість руху дослідного МТА оцінити досить проблематично. Практично усі відомі нині критерії для цього малопридатні. У першу чергу через те, що в реальних умовах експлуатації агрегату керувальний вплив (нехай це буде кут повороту коліс трактора) може бути обумовлений принаймні двома різними (хоча і певним чином взаємозв'язаними) обставинами.

Перша із них полягає у тому, що вплив механізатора на керовані колеса (через кермо, звісно) є його реакцією на поперечні зміщення тієї точки, траєкторія якої ним відслідковується. Нею, наприклад, може бути слід маркера або крайнього робочого органу агрегата. Зазначимо, що реакція машинно-тракторного агрегата на керувальний вплив у цьому випадку характеризуватиме **керovanість** його руху.

Друга обставина обумовлена реакцією механізатора на виправлення напрямку руху МТА, зміна якого викликана дією збурювального впливу. Зазвичай ним є розворотний момент збоку асиметрично приєднаної до трактора машини/знаряддя, вертикальні коливання профілю агрофону, коливання тягового опору технологічної частини агрегата тощо. У цьому випадку потреба подання керувального впливу механізатором на кермо трактора обумовлена проявом процесу **стійкості** руху МТА.

І якщо тепер в означених вище варіантах функціонування агрегата з допомогою того чи іншого вимірювального обладнання зареєструвати кут повороту керованих коліс, то як у отриманій реалізації цього параметра виділити ту частину даних, яка пов'язана виключно з керованістю, а яка – зі стійкістю його руху?

На наш погляд найкраще для цього підходить взаємна кореляційна функція, яка відображає тісноту кореляційного зв'язку між керувальним впливом (входом) і виходом динамічної системи слідкування.

У цілому ця функція може відобразитися у 4-х квадрантах. Якщо її максимум знаходиться у першому чи другому квадрантах, то між статистично випадковими процесами X і Y існує позитивний кореляційний зв'язок (рис. 3). Тобто, збільшення величин (ординат) одного із них обумовлює відповідне збільшення величин другого.

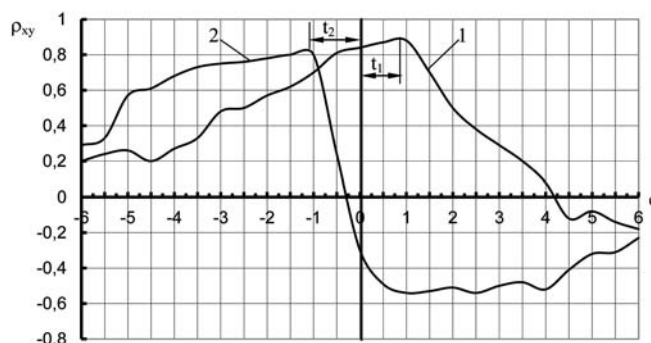


Рис. 3 – Взаємні нормовані кореляційні функції (ρ_{xy}) для позитивно корельованих випадкових процесів

Коли ж максимум функції розташований у третьому або четвертому квадрантах, то кореляційний зв'язок між двома процесами є від'ємним?

Тіснота кореляційного зв'язку оцінюється величиною максимуму взаємної кореляційної функції: чим вона більша – тим цей зв'язок тісніший. Так із рис. 3, для прикладу, бачимо, що максимальна величина взаємної кореляційної функції 1 становить 0,9, а функції 2 – тільки 0,82. Звідси випливає, що функція 1 репрезентує більш тісний кореляційний зв'язок між процесами X і Y , ніж функція 2.

Проміжок часу між нульовою позначкою осі абсцис і максимальною величиною взаємної нормованої кореляційної функції характеризує фазовий зсув (або час запізнення реакції) між випадковими процесами X і Y . На рис. 3 ці зсуви показано позначками t_1 і t_2 .

Більше того, знак фазового зсуву (позитивний чи від'ємний) вказує на те, який із двох досліджуваних процесів є входом, а який виходом. А саме: якщо фазовий зсув позитивний (t_1 , рис. 3), то вхідним є той процес, який таким і розглядався. Інакше, тобто з від'ємною величиною цього показника (t_2 , рис. 3) вхідним процесом є той, який передбачався вихідним.

Так, у розглядуваному нами вище прикладі вхідним параметром є керувальний вплив – кут повороту керованих коліс трактора α , а вихідним – його курсовий кут φ . Припустимо, що ми розраховали для цих процесів взаємну кореляційну функцію. Якщо її фазовий зсув позитивний (як у кривій 1, рис. 3, наприклад), то вхідним параметром динамічної системи є, як і передбачалося, кут α , а вихідним – кут φ . Величина фазового зсуву вказує при цьому час запізнення реакції МТА на керувальний вплив.

Якщо ж фазовий зсув взаємної нормованої кореляційної функції є від'ємним (як у кривій 2, рис. 3), то входом динамічної системи є курсовий кут трактора φ , а виходом – кут повороту його керованих коліс α . Тобто, зміна керувального впливу обумовлена не потребою відслідковування агрегатом траєкторії попереднього проходу, а зміною курсового кута трактора під впливом тих чи інших зовнішніх чинників – збурень.

Висновки. Керованість руху машинно-тракторних агрегатів у горизонтальній площині можна здійснювати лише за умов наявності керувального сигналу та алгоритму кількісного оцінювання його впливу на вихідний параметр.

Одним із найбільш ефективних методів синтезу схеми і конструкційно-технологічних параметрів МТА

при цьому є застосування амплітудних і фазових частотних характеристик відпрацювання динамічною системою вхідного керувального впливу.

За показник «практичної» керованості руху машинно-тракторного агрегата найдоцільніше брати взаємну кореляційну функцію, яка відображає тісноту кореляційного зв'язку між вхідним і вихідним сигналами (параметрами) динамічної системи слідування.

Список літератури

1. Надикто В. Оцінка стійкості руху машинно-тракторних агрегатів / В. Надикто // Техніка і технології АПК, 2015, №6.

2. Бородин И.Ф. Основы автоматизации производственных процессов / И.Ф. Бородин, Н.И. Кирилин. – М.: Колос, 1977. – 328 с.

3. Солодовников В.В. Основы теории и элементов систем автоматического регулирования / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.

4. Збирання зернових культур роздільним способом / В.Т. Надикто, В.М. Кюрчев [та ін.]. – Запоріжжя: Інтер-М, 20120 – .132 с.

5. Кюрчев В.М. Механіко-технологічні основи агрегування орно-просапних тракторів: автореф. дис. ... докт. техн. наук / Кюрчев В.М.; ННЦ «ІМЕСГ» НААН України. – Глеваха, 2015. – 40 с.

6. Лурье А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов / А.Б. Лурье. – Л.: Колос, 1970. – 376 с.

Аннотация. Рассмотрены особенности методики оценивания управляемости движения машинно-тракторных агрегатов. Показаны преимущества и практическая эффективность применения амплитудных и фазовых частотных характеристик при теоретическом анализе этого процесса. В качестве «практического» критерия оценивания управляемости движения МТА предложено использовать взаимную корреляционную функцию, отображающую тесноту корреляционной связи между управляющим воздействием (входом) и выходом следящей динамической системы.

Summary. Evaluation methodology the peculiarities of manageability traffic machine-and-tractor units. Showing the advantages and practical effectiveness of amplitude and phase frequency characteristics with theoretical analysis of this process. As a "practical" evaluation criterion controllability of MTU movement suggested that mutual correlation function, which displays the tight correlation between the impact (entry) and output tracking of dynamic system.

Стаття надійшла до редакції 4.02.2016 р.