

Scientometrics, international database of education quality evaluation, Hirsch index, impact factor, research, integration, information space.

УДК 631.316

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІКИ ВЗАЄМОДІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ НА ПРУЖНІЙ ПІДВІСЦІ З ҐРУНТОМ

*Д. Г. Войтюк, кандидат технічних наук,
член-кореспондент НААН*

Ю. В. Човнюк, Ю. О. Гуменюк, кандидати технічних наук

Запропоновано концепцію дослідження механіки та механізмів взаємодії робочих органів на пружній підвісці з ґрунтом.

Концепція, дослідження, механіка, механізми, взаємодія, пружна підвіска, ґрунт.

Постановка проблеми. Відомо [1], що одним із шляхів підвищення якості роботи ґрунтообробних знарядь і зниження енергоємності обробітку ґрунту є створення конструкцій пружних механізмів, які встановлюються між робочим органом і рамою машини (пружні механізми - пружні підвіски). Такі механізми сприяють появі самозбуджуючих коливань робочих органів, що, в свою чергу, покращує очищення робочих органів від навислих рослинних залишків і ґрунту, а також знижує тяговий опір. Ефект самозбудження коливань може знайти широке застосування в багатьох технологічних процесах землеробської механіки. В даний час виробники ґрунтообробної техніки широко використовують цю ідею. Однак на сьогодні немає достатньо глибокого аналізу і методу розрахунку таких механізмів. Більшість конструкторів подібні механічні системи розглядають виключно як запобіжні пристрої, а не як джерело самозбудження періодичних нелінійних коливань.

Метою досліджень є розробка концепцію дослідження механіки та механізмів взаємодії робочих органів на пружній підвісці з ґрунтом.

Аналіз останніх досліджень. Пружні механізми використовуються зазвичай в трьох варіантах: 1) триланковий механізм з однією пружною ланкою; 2) п'ятиланковий з однією пружною ланкою; 3) пружна стійка або пружні елементи підвіски.

© Д. Г. Войтюк, Ю. В. Човнюк, Ю. О. Гуменюк, 2015

Аналіз таких пружні механізмів показує [1], що, незважаючи на широкий спектр конструктивних рішень, всі вони мають нелінійну жорсткість (у літературі їх називають суттєво-нелінійними механічними системами [2]).

Дослідження характеристики жорсткості [3, 4] показали, що графіки силових характеристик всіх перерахованих вище систем мають нелінійний характер залежності нелінійної пружної сили F_q від узагальненої координати q ($q \equiv x$ – для одновимірних задач) (рис. 1).

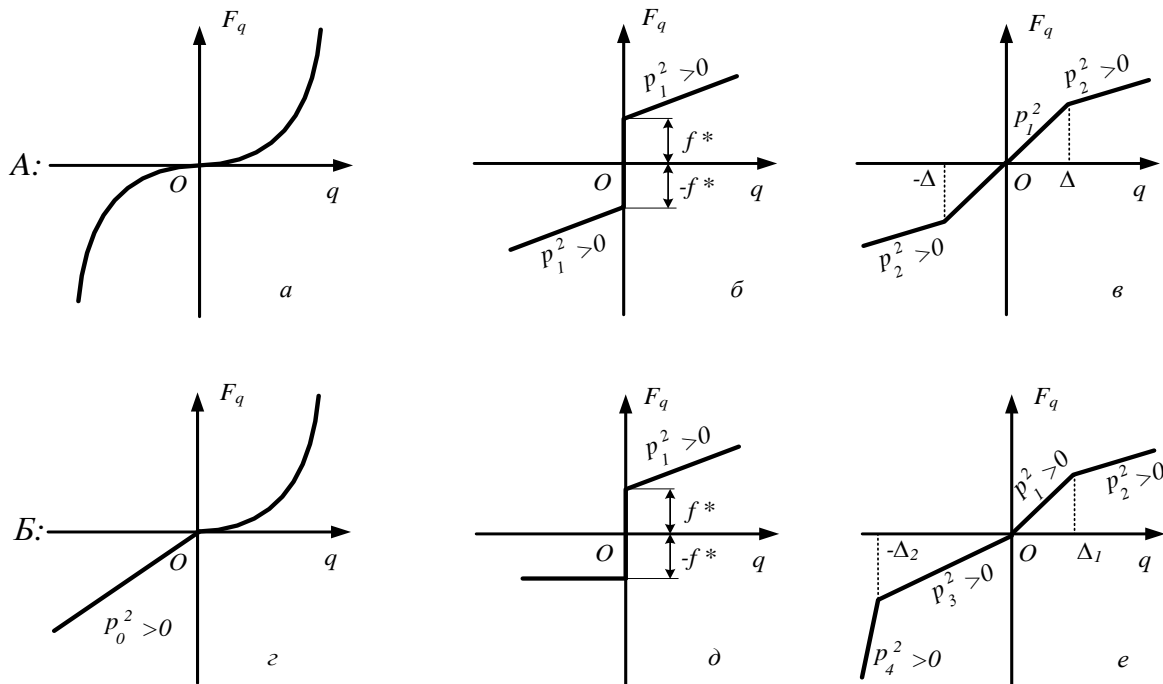


Рис. 1. Деякі варіанти нелінійної характеристики відновлюючої сили $F_q = f(q)$: А – симетричні – а) поліноміальна; б) кусочно-лінійна (з натягом); в) кусочно-лінійна пружна. Б – несиметрична – г) поліноміальна; д) з натягом; е) кусочно-лінійна пружна.

На рис. 1: $\Delta_i, i = \overline{(1,2)}$ – зміщення (вправо і вліво від положення рівноваги); $p_j^2, j = \overline{(1,4)}$ – жорсткість системи на j -й ділянці; $\pm f^*$ – величина натягу; p_0^2 – лінійна жорсткість.

Однак на цьому не закінчуються джерела нелінійності в постановці задач механіки взаємодії робочих органів на пружній підвісці з оброблюваним середовищем. Існують ще й наступні джерела нелінійності: 1) приєднана до робочого органу маса ґрунту (змінна в часі t); 2) нелінійне тертя (в'язкість) середовища (рис. 2); 3) особливості конструкції самого навішування.

Всі ці причини вносять труднощі в постановку задач механіки та аналізу механізмів (фізичних) взаємодії робочих органів з пружною підвіскою з ґрунтом. Власні нелінійні коливання володіють ши-

роким спектром специфічних механічних явищ і ефектів, використання яких у технологічних процесах передбачає значну технологічну та енергетичну ефективності.

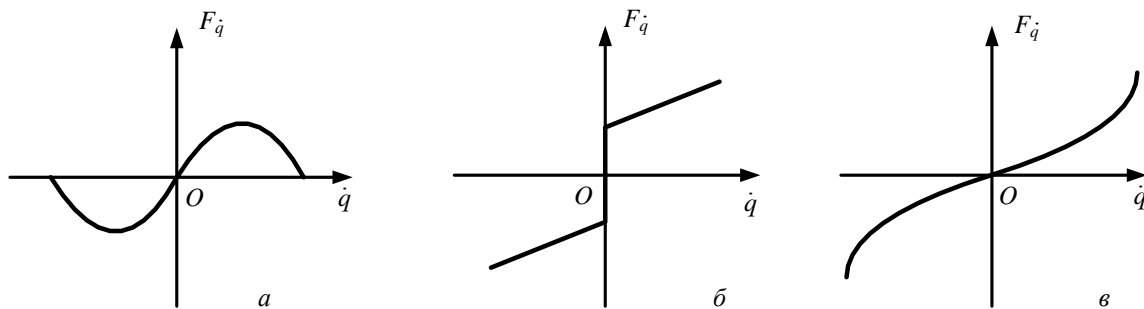


Рис. 2. Деякі варіанти нелінійної характеристики в'язкості (тертя) – дисипативної сили $R(x, \dot{x})$ для випадку $F_q = f(\dot{q}), \dot{q} \equiv \frac{dq}{dt}$: а) типу синусоїдальної; б) кусочно-лінійна з натягом; в) поліноміального типу.

Результати досліджень. При вивченні коливальних процесів, що виникають у робочих органах на пружній підвісці, які взаємодіють з ґрунтом, можна поділити три основні групи сил, які визначають поведінку даної динамічної системи: 1) пружні відновлювальні; 2) дисипативні; 3) збурюючі сили. За такого підходу рівняння руху коливальної системи з одним ступенем вільності можна записати у вигляді:

$$m\ddot{x} + f(x) + R(x, \dot{x}) = H(t), \quad (1)$$

де: x – узагальнена координата (наприклад, лінійна чи кутова); m – маса або момент інерції; $f(x)$ – пружна відновлююча сила (пружна характеристика); $R(x, \dot{x})$ – дисипативна сила (дисипативна характеристика) (рис. 2); $H(t)$ – періодична зовнішня дія (вимушена сила) періоду T .

Всі сили в рівнянні (1) є узагальненими сили. Якщо узагальнена координата є кутовою, тоді доданки в (1) є моментами.

У системі з нелінійною пружною характеристикою відновлювальної сили спостерігається складна динаміка. Залежно від початкових умов при одних і тих же параметрах системи (1) можливо кілька стійких різних періодичних режимів як з періодом змушує сили (T), так і с кратними періодами. Саме ця багаторежимність і є основною властивістю нелінійних систем. Вона, як і інші прояви нелінійності, визначається, насамперед, видом пружною характеристикою $f(x)$ в (1). У даній роботі розглядаються не квазілінійні системи [5], а суттєво-нелінійні [2] в тому сенсі, що нелінійна пружна характеристика відновлюючої сили може бути будь-якою кусочно-безперервною функцією змінної x . У нелінійній системі, в порівнянні з лінійною, разом з

розширенням кількості періодичних режимів можлива поява більшого числа резонансних частотних діапазонів, в яких розвиваються коливання з частотою вимушеної сили, а також з іншими більш високими або низькими частотами.

Відзначимо ще дві властивості систем з нелінійними пружними характеристиками: 1) можливість самозбудження періодичного режиму, період якого відмінний від періоду збурюючої сили $H(t)$, тобто від T , причому стійкий режим з періодом збурюючої сили може бути відсутнім; 2) поява за певних умов специфічної стохастичності в поведінці системи, незважаючи на детермінований характер вихідного рівняння (т. зв. динамічний хаос).

Отже, для нелінійних систем, на відміну від лінійних, характерні такі особливості: а) багаторежимність основних і субгармонічних режимів; б) додаткові резонансні частотні діапазони; в) самозбудження періодичних коливань; г) специфічні стохастичні коливання (динамічний хаос, при якому система стає некерованою ззовні).

Роль окремих сил в рівнянні (1) і початкових умов при формуванні періодичних режимів в системі, що розглядається з нелінійними відновлювальними силами розглянута нижче.

Спочатку перерахуємо основні фактори, що впливають на формування періодичних режимів: 1) внутрішні коливальні властивості; 2) зовнішні збурюючі сили; 3) сили непружного опору (дисипативні сили); 4) початкові умови.

Внутрішні коливальні властивості. Нелінійні ефекти в коливальних системах є проявом внутрішніх коливальних властивостей системи. Залежно від параметрів зовнішнього впливу і дисипативних сил внутрішні коливальні властивості, обумовлені пружними відновлюючими силами, можуть проявлятися сильніше або слабше, але основні особливості коливальних процесів в нелінійній системі (1) визначаються її основною частиною, тобто автономною недисипативною системою при її вільних коливаннях:

$$\ddot{x} + f(x) = 0. \quad (2)$$

Саме вільні коливання характеризують внутрішні коливальні властивості нелінійної системи, для якої період і спектральний склад вільних коливань залежать від початкових умов. Вільні нелінійні коливання є негармонічними, і внесок окремих гармонік при розкладанні вільних коливань в ряд Фур'є для різних пружних характеристик $f(x)$ може суттєво відрізнятись.

Якщо тепер до основної системи (2) прикласти невелику періодичну збурюючу силу $H(t)$ і невелику дисипативну силу $R(x, \dot{x})$, то в такій системі можуть спостерігатись один або декілька стійких періодичних режимів. Однак всі ці режими, як правило, виявляються близькими до відповідних вільних коливань основної системи.

В свою чергу, параметри вільних коливань системи (2) визначаються пружною або квазіпружною характеристикою $f(x)$ відновлюючої сили. Відомо, що пружні характеристики $f(x)$ при відповідному масштабі виражають залежність між відновлювальною силою і змінної x , а основною характеристикою вільних коливань є її амплітудно-частотна залежність, графічне зображення якої називають «скелетною кривою». На рис. 3 наведені три пружні характеристики $f(x)$ та їх скелетні криві (суцільна лінія) відповідних систем з одним ступенем вільності. Для симетричних пружних характеристик $f(x) = -f(-x)$. Для несиметричних $f(x)$ максимальне відхилення за вільних коливань, як правило, відрізняється, тому скелетна крива для максимальних зміщень $a_1(a_1 > 0)$ і $a_2(a_2 < 0)$ будується по обидва боки від осі абсцис. При невеликих періодичних збуджуючих силах амплітудно-частотні криві (амплітудно-частотні характеристики), відмічені пунктирними лініями на рис. 3, близькі до скелетних кривим, чим і пояснюється назва останніх.

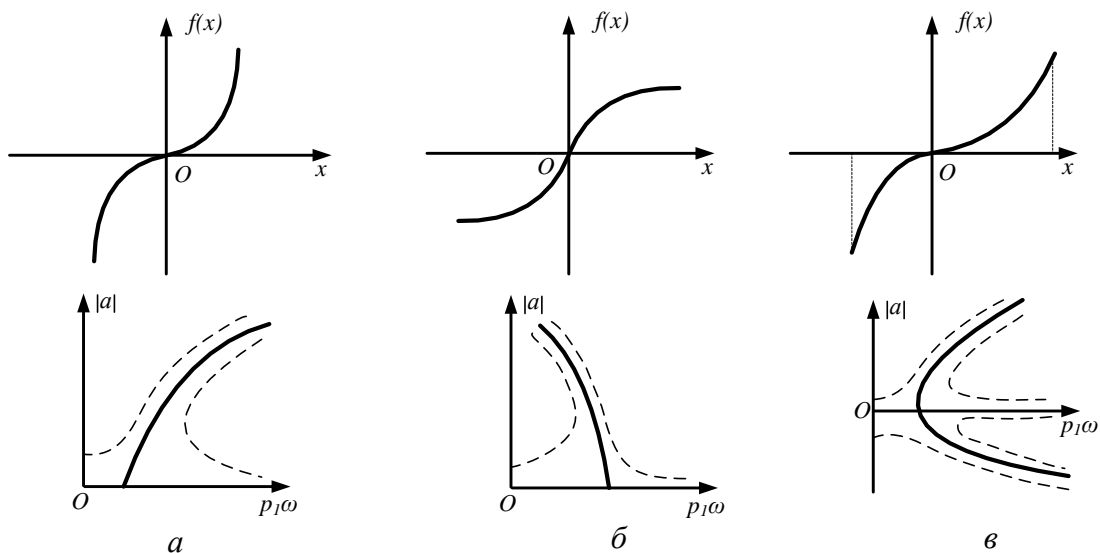


Рис. 3. Пружні характеристики $f(x)$ і скелетні криві систем з одним ступенем вільності: а), б) симетричні $f(x)$; в) несиметрична.

Зовнішні збуджуючі сили. Основна роль зовнішніх збуджуючих сил (періодичних або імпульсів) при формуванні періодичних режимів в нелінійних системах полягає в підтримці вільних коливань системи з періодом, рівним, кратним, дробовим періоду змушують сил.

Якісна поведінка нелінійних динамічних систем (тобто кількість і вид можливих періодичних режимів, що мають однакову основну частину (2) і перебувають під впливом різних імпульсних або безперервних зовнішніх сил $H(t)$, однакова, якщо різні види зовнішніх впливів мають однакові властивості симетрії, тобто належать до однієї з п'яти груп, наведених у [2]).

Сили непружного опору (дисипативні сили). Різні види дисипативних сил (рис. 2) в більшості розрахункових схем можуть вважатися істотно меншими, ніж пружні. При цьому їх якісний вплив на коливальний процес найчастіше однаковий. При малих силах непружного опору можливий їх кількісний облік на основі заміни еквівалентними лінеаризованими силами [6, 7]. У цьому випадку, коли дисипативні сили співвимірні з пружними, що пов'язане зі значним розсіюванням енергії в коливальній системі і, як правило, зі зростанням динамічних зусиль при стаціонарних режимах, характер цих сил має враховуватися більш повно. При цьому закони зміни координат системи можуть включати ділянки спокою (застою) та інші особливості, що залежать від виду дисипативних сил.

Роль дисипативних сил в формуванні періодичних коливань в нелінійних системах, як правило, полягає в тому, що вони в певній мірі «заглушають» появу внутрішніх коливальних властивостей системи. При зростанні дисипативних сил максимальні відхилення та динамічні навантаження в конструкціях можуть, як зменшуватися (у резонансних зонах), так і збільшуватися. Тому, коли постає питання про їх раціональний вибір, ці особливості повинні враховуватися.

У нерезонансних частотних діапазонах малі дисипативні сили не призводять до яких-небудь істотних кількісних змін в періодичних законах руху в порівнянні з законами руху в недисипативній системі. Малі дисипативні сили також, як правило, не зміщують резонансних частот. У зв'язку з цим при визначенні резонансних частотних діапазонів, так само як і при розрахунку коливань в нерезонансних зонах, ці сили можуть не враховуватися. Слід особливо зупинитися на впливі дисипативних сил на суб- і супергармонічні режими. Прийнято вважати, що невелика дисипація призводить до загибелі субгармонічних режимів. Однак це твердження є справедливим лише в тих випадках, коли субгармонічні режими мають малі області притягування і, отже, невеликий запас стійкості. Більшість субгармонічних режимів з великими областями притягування можливі при досить великій дисипації, а самозбуджуючі субгармонічні режими можуть існувати при досить більших дисипативних силах. У нелінійних системах дисипативні сили на супергармонічні режими впливають слабкіше, ніж на субгармонічні. Як правило, і при значній дисипації супергармонічний характер законів руху у відповідних резонансних зонах зберігається для систем як з одним, так і з декількома ступенями вільності.

Початкові умови. Внутрішні коливальні властивості і зовнішній вплив характеризують можливість прояву в нелінійних системах різних періодичних режимів. Який з цих режимів буде реалізований в дійсності, залежить від початкового стану системи. Для неавтономної системи з одним ступенем вільності початковий стан характери-

зується трьома числами x_0 , \dot{x}_0 і t_0 , які називаються початковими значеннями. Початковий стан може бути задано також початковими умовами $x(t_0) = x_0$ и $\dot{x}(t_0) = \dot{x}_0$.

У системи с n ступенями вільності початковий стан визначається $(2n + 1)$ – початковими значеннями, в число яких входять n – початкових значень фазових координат x_{n0} , n – початкових значень фазових швидкостей \dot{x}_{n0} і початкове значення часу t_0 . Таким чином, початковий стан системи можна характеризувати в розширеному фазовому просторі $(2n + 1)$ – мірним вектором $X_0(x_{n0}, \dot{x}_{n0}, t_0)$. Слід зазначити, що початкові значення тільки фазових координат і швидкостей не можуть однозначно визначити початковий стан системи, тобто при однакових значеннях x_0 і \dot{x}_0 і різних значеннях часу t_0 можлива реалізація різних режимів. Початкове значення фазової координати t_0 характеризує початкову фазу зовнішньої дії, і тому задання початкового значення t_0 є суттєвим.

Висновки

У системі з нелінійною пружною характеристикою відновлювальної сили спостерігається складна динаміка. Залежно від початкових умов при одних і тих же параметрах системи (1) можливо кілька стійких різних періодичних режимів як з періодом змушує сили (T), так і с кратними періодами. Саме ця багаторежимність і є основною властивістю нелінійних систем. Вона, як і інші прояви нелінійності, визначається, насамперед, видом пружною характеристики $f(x)$.

У нелінійної системі, в порівнянні з лінійною, разом з розширенням кількості періодичних режимів можлива поява більшого числа резонансних частотних діапазонів, в яких розвиваються коливання з частотою вимушеної сили, а також з іншими більш високими або низькими частотами.

Для нелінійних систем, на відміну від лінійних, характерні такі особливості: а) багаторежимність основних і субгармонічних режимів; б) додаткові резонансні частотні діапазони; в) самозбудження періодичних коливань; г) специфічні стохастичні коливання (динамічний хаос, при якому система стає некерованою ззовні).

Результати роботи можуть бути використані для уточнення і удосконалення існуючих методів інженерних розрахунків коливних механічних систем.

Список літератури

1. Кушнарєв А. Механика взаимодействия рабочих органов на упругой подвеске с почвой / А. Кушнарєв, И. Шевченко, В. Дюжаєв, С. Кушнарєв // Техника АПК. – 2008. – №8. – С. 22–\$25.
2. Закржевский М. В. Колебания существенно-нелинейных механических систем / М. В. Закржевский. – Рига: Зинатне, 1980. – 190 с.

3. Шевченко И. А. Экспериментально-теоретическое обоснование параметров рабочих органов с упругими стойками культиваторов для предпосевной обработки почвы: Дис.... канд. техн. наук. – М., 1988. – 176 с.
4. Кушнарєв С. А. Обоснование энергосберегающих технологических процессов обработки почвы и параметров упругих рабочих органов для условий южной степной зоны Украины: Дис.... канд. техн. наук. – Глеваха, 1998. – 194 с.
5. Филиппов А. П. Колебания деформируемых систем / А. П. Филиппов. – М.: Машиностроение, 1970. – 736 с.
6. Вульфсон И. И. Нелинейные задачи динамики машин / И. И. Вульфсон, М. З. Козловский. – Л.: Машиностроение, 1968. – 382 с.
7. Пановко Я. Г. Основы прикладной теории упругих колебаний / Я. Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1967. – 316 с.

Предложена концепция исследования механики и механизмов взаимодействия рабочих органов на упругой подвеске с почвой.

Концепция, исследования, механика, механизмы, взаимодействие, упругая подвеска, почва.

In paper was proposed the concept of study the mechanics and mechanisms of interaction of vibrational tillage tools with the soil.

Concept, research, mechanical, mechanisms, interaction, elastic suspension, soil.

УДК 631.311:621.891

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗМІЦНЕННЯ І ВІДНОВЛЕННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН В УКРАЇНІ

***В. Д. Войтюк, доктор технічних наук
М. І. Денисенко, кандидат технічних наук
А. С. Опальчук, доктор технічних наук***

В статті дано аналітичний огляд існуючих методів зміцнення і відновлення робочих органів сільськогосподарських машин, наведені дані про типи зносу деталей і вузлів; запропоновано пропозиції виробництву.

Робочі органи ґрунтообробних машин, абразивне зношування, диск борони лапа культиватора, леміш плугу.

Постановка проблеми. Техніко-економічні показники багатьох сільськогосподарських машин все ще залишаються дуже низькими із-за малих термінів служби їх робочих органів та вимушених простоїв

© В. Д. Войтюк, М. І. Денисенко, А. С. Опальчук, 2015