

УДК 631.312.32:001.57

МЕТОДИКА ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ГРУНТООБРОБНИХ ЗНАРЯДЬ З КОРПУСАМИ, ЩО КОЛИВАЮТЬСЯ

Дюжаєв В.П., к.т.н.

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел.(0619)-42-11-72

Анотація – в роботі розглянуто питання поведінки механічної коливальної системи з нелінійною кубічною характеристикою пружності та представлено методику та результати статистичного моделювання нелінійних динамічних систем взаємодії корпусів ґрунтообробних знарядь з ґрунтом.

Ключові слова – імітаційне моделювання, нелінійні диференціальні рівняння, ґрунтообробні знаряддя.

Постановка проблеми. Значний інтерес дослідників викликають спроби зниження тягового опору і покращення якості обробки ґрунту за допомогою пружного закріплення робочих органів. Аналіз цих досліджень показав що енергетично вигідно використання знарядь з пружним закріпленням робочих органів, джерелом виникнення яких є нерівномірність опору ґрунту. У розроблених конструкціях жорсткість пружного елемента підбиралась, як правило, експериментальними методами, що не дає можливості налаштувати підвіску на оптимальний режим роботи в різноманітних умовах. Тому дослідження роботи корпусу плуга на пружній підвісці раціонально виконувати методом математичного моделювання. Дослідження цих процесів методами класичної теоретичної механіки дає результати, що суперечать даним експерименту. Використання методів нелінійної механіки підвищує точність моделювання ґрунтообробних машин. У випадку рішення нелінійних стохастичних задач динаміки можливості аналітичних методів визначення параметрів коливальної системи на основі аналізу її руху можуть застосовуватися для простих систем, тому їх можливості достатньо обмежені. Тому рішення зворотної задачі статистичної динаміки раціонально виконувати шляхом імітаційного моделювання.

Аналіз останніх досліджень. Відомо [1], що багато елементів машин, конструкцій, деякі пружні системи виявляють властивості систем з жорсткою кубічною нелінійною характеристикою пружності, в механічних системах з періодичним збудженням можуть бути стрибки змінення амплітуди

вимушених коливань [2]. Виникає питання як будуть вести себе системи з жорсткою кубічною нелінійною характеристикою пружності у випадку випадкового характеру вимушеної сили.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є розробка математичної моделі динаміки взаємодії робочого органу на пружній підвісці з ґрунтом, яка найбільш точно описує процес обробітку ґрунту та визначення параметрів динамічної системи «робочий орган - ґрунт» за допомогою метода імітаційного моделювання.

Основна частина. Рішення рівнянь у часткових похідних дає рівняння типу

$$\ddot{x} + 2\alpha\dot{x} + \omega^2(x + \gamma x^3) = y(t), \quad (1)$$

де α, γ – позитивні постійні, $y(t)$ – стаціонарний гаусовський випадковий процес.

В роботі [1] показано, що при стаціонарному випадковому збудженні в системі повинен встановитися деякий стаціонарний режим у якому будуть спостерігатися нерегулярні перескоки з меж одного стійкого стану в межу другого стійкого стану. Дослідження таких коливальних систем нелокальними методами марковських процесів мають значні труднощі, аналітичне рішення такого рівняння утруднено. Тому багато дослідників рекомендують у такому випадку використовувати для дослідження нелінійних коливальних систем з випадковим збудженням метод статистичного (імітаційного) моделювання.

Основу методу імітаційного моделювання [3] становить закон великих чисел, який полягає в тому, що результат усереднення, що відноситься до випадкового фактору, обчислений за n його реалізаціям, при $n \rightarrow \infty$ перестає бути випадковим і може розглядатися в якості оцінки відповідної характеристики розглянутого фактора. Стосовно до апріорно аналізу точності стохастичних систем метод імітаційного моделювання полягає в проведенні на ЕОМ статистичних експериментів, що імітують функціонування системи при дії випадкових факторів, і в подальшій обробці отриманих у цих експериментах результатів за допомогою методів математичної статистики для визначення відповідних статистичних характеристик. На першому етапі з'ясовується можливість використання канонічних розкладань випадкових процесів, діючих на досліджувану систему. Якщо в число збурень входять випадкові процеси, для яких канонічні розкладання не відомі, рівняння що описують динамічну систему зводяться до системи стохастичних диференціальних рівнянь у нормальній формі Коші

$$\dot{q} = f(q, \lambda, t) + (q, \lambda, t) \cdot \eta(t), \quad (2)$$

де λ - вектор випадкових параметрів системи,
 $\eta(t)$ - векторний білий шум.

На другому етапі проводиться чисельне інтегрування системи диференціальних рівнянь (2) разом з рівняннями формуючого фільтра впливу при заданій реалізації білого шуму. Чисельне інтегрування здійснюється за допомогою стандартного алгоритму Рунге-Кутта четвертого порядку [4]. Якщо поведінка механічної системи описується нелінійним стохастичним рівнянням у нормальній формі Коші

$$x'(t) = f[t, x(t), y(t)], \quad (3)$$

де $y(t)$, $x(t)$ - відповідно вектори випадкових впливів і змінних стану, а f - нелінійна вектор-функція, то значення вектора $x(t)$ в точці, де h - крок інтегрування, обчислюється за формулою:

$$x(t_{i+1}) = x(t_i) + \frac{1}{6}(K_{1i} + 2K_{2i} + 2K_{3i} + K_{4i}), \quad (4)$$

тут

$$K_{1i} = hf[t_i, x(t_i), y(t_i)]$$

$$K_{2i} = hf\left[t_i + \frac{1}{2}h, x(t_i) + \frac{1}{2}K_{1i}, y(t_i) + \frac{1}{2}h\right], \quad (5)$$

$$K_{3i} = hf\left[t_i + \frac{1}{2}h, x(t_i) + \frac{1}{2}K_{2i}, y(t_i) + \frac{1}{2}h\right],$$

$$K_{4i} = hf[t_i + h, x(t_i) + K_{3i}, y(t_i) + h]$$

Наведений алгоритм дає рішення стохастичного диференціального рівняння, що розуміється в сенсі Стратоновича. На наступному етапі виконується статистична обробка отриманих реалізацією рішення. Вичерпна інформація про статистичні властивості випадкового ергодичної процесу міститься в двох перших моментних функціях цього процесу. Перший момент $m_x(t)$ - математичне очікування процесу. Другий момент $K_x(\tau)$ - кореляційна функція, яка характеризує ступінь статистичного зв'язку між значеннями процесу в два моменти часу, зрушені один щодо іншого на величину τ , причому $R_x(\tau) \rightarrow 0$ при $\tau \rightarrow \pm \infty$,

$$m_x(t) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) dt, \quad (6)$$

$$K_x(\tau) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \dot{x}(t)\dot{x}(t+\tau)dt, \quad (7)$$

$$K_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \dot{x}(t)\dot{y}(t+\tau)dt \quad (8)$$

Додаткову інформацію про процес дає спектральна щільність $S(\omega)$, яка характеризує розподіл енергії процесу по його компонентам з різними частотами. Кореляційна функція $R_x(\tau)$ і спектральна щільність $S(\omega)$ пов'язані перетворенням Фур'є:

$$S_x(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} K_x(\tau) \cos \omega \tau d\tau, \quad (9)$$

Для реалізацій стаціонарних випадкових процесів $x(t)$ і $y(t)$ взаємна спектральна щільність $S_{xy}(\omega)$ визначається як пряме перетворення Фур'є взаємної кореляційної функції:

$$S_{xy}(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} K_{xy}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad (10)$$

Метод імітаційного моделювання містить в собі проведення на ЕОМ статистичних експериментів, що імітують функціонування системи при дії випадкових факторів, і в подальшій обробки результатів для визначення відповідних статистичних характеристик. Тому що в число збурень входять випадкові процеси, для яких канонічні розклади невідомі, рівняння зведені до системи стохастичних диференціальних рівнянь у нормальній формі Коши, які чисельно інтегруються по методу Рунге – Кутта четвертого порядку.

Математична модель уявлена як динамічна система характеристик процесу з вхідною функцією – опором ґрунту та вихідною функцією – тяговим опором робочого органу. Рішення моделі полягає у визначенні параметрів системи, відповідних екстремуму цільової функції з урахуванням обмежень, що накладаються на перемінні системи.

Діюче на систему випадкове збурення моделюється як результат проходження процесу типу білого шуму через деяку лінійну систему з постійними параметрами, що має назву – формуючий фільтр дії, який може бути у вигляді диференціального рівняння першого або другого порядку.

Задача оптимізації зведена до визначення коефіцієнтів диференціального рівняння силового зв'язку коли забезпечується мінімум

тягового опору робочого органу, що досягається при збігу частоти впливу з періодом сколу ґрунту. Спектральна щільність тягового опору плугу характеризує частотний состав опору ґрунту деформації та зруйнуванню при взаємодії з робочим органом, вона досягає максимуму при збігу параметру ω з частотою дії β , при цьому відбувається сплеск спектральної щільності, аналогічний резонансу, тому у якості цільової функції обрано максимум спектральної щільності тягового опору корпусу плуга $S_{\eta}(\omega) \rightarrow \max$.

Наведена методика використовувалась для моделювання динамічної системи «корпус плуга на пружній підвісці - ґрунт» [5]. Моделювання проводилось при наступних параметрах: $b=0,084$, $\gamma=0,173 \cdot 10^{-3}$, $\alpha=0,29$ м⁻¹, $\sigma_y=252$ Н, шаг інтегрування складає 0,01 с, шаг дискретизації дії $h=0,005$ с. Розрахунок жорсткості пружного елемента виконувався для ґрунтів твердістю від 1,0 до 8,0 МПа, з шагом 0,5 МПа и при швидкості руху агрегату V_0 від 1,5 м/с до 2,25 м/с з шагом 0,25 м/с.

Таблиця 1 - Результати визначення оптимальної жорсткості пружного елемента корпусу плуга

Твердість ґрунту по Ревякіну, МПа	Жорсткість пружного елемента С, Н/м			
	V=1,5 м/с	V=1,75 м/с	V=2,0 м/с	V=2,25 м/с
1,0	45000	60000	75000	90000
1,5	75000	90000	115000	130000
2,0	100000	120000	140000	160000
2,5	125000	150000	170000	185000
3,0	155000	175000	200000	220000
3,5	175000	200000	225000	245000
4,0	200000	225000	250000	270000
4,5	225000	245000	265000	290000
5,0	245000	265000	285000	315000
5,5	265000	288000	315000	340000
6,0	280000	305000	330000	355000
6,5	290000	320000	345000	370000
7,0	305000	335000	360000	380000
7,5	320000	350000	375000	390000
8,0	330000	360000	385000	405000

По результатам дослідження побудовано нормовані кореляційні функції $K(\tau)$ і нормовані спектральні щільності $S(\omega)$ тягового опору корпуса

плуга на пружній підвісці з кінчною пружиною (рисунок 1) та повздовжньою твердістю ґрунту (рисунок 2). Графіки кореляційних функцій усіх процесів підтверджують гіпотезу про ергодичність процесів, тому що $K(\tau)$ прагнуть до нуля при $\tau \rightarrow \infty$.

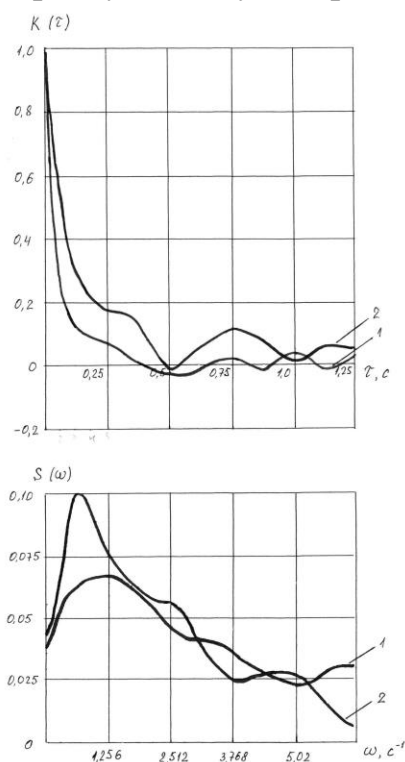


Рисунок 1 – Кореляційна функція $K_x(\tau)$ і спектральна щільність $S_x(\omega)$ тягового опору корпусу плуга на пружній підвісці

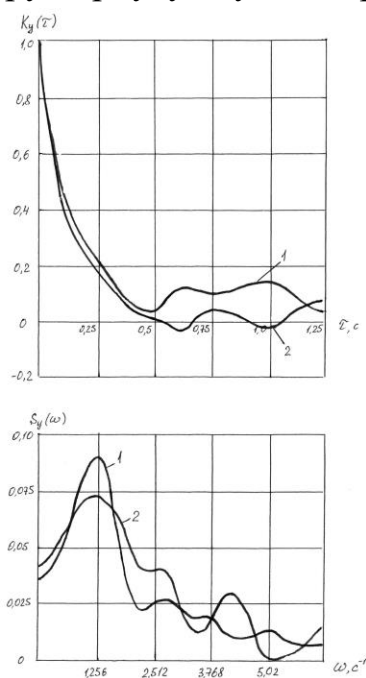


Рисунок 2 – Кореляційна функція $K_y(\tau)$ і спектральна щільність $S_y(\omega)$ повздовжньої твердості ґрунту

Аналіз графіків показав, що процес змінення тягового опору на пружній підвісці має однорідний, низькочастотний спектр дисперсії з частотою зрізу ω_c до $5,02 \text{ c}^{-1}$. Порівняння частоти ω_0 , що відповідає максимуму спектральної щільності $S_0(\omega)$ пружно закріпленого корпусу плуга з частотою ω_0 повздожньої твердості ґрунту показує, що ці частоти знаходяться у діапазоні $0,942\dots 1,57 \text{ c}^{-1}$, тому частота дії співпадає з власною частотою коливальної системи, що каже про роботу у режимі резонансу або у режимі биття. Це підтверджує гіпотезу, що в такому діапазоні частот існують стійки стаціонарні коливання корпусу плуга, і лише в інших діапазонах частот можливі нерегулярні перескоки з околиці одного стійкого становища в околицю другого стійкого становища.

Висновки.

1. Наведена методика імітаційного моделювання дозволяє виконувати оптимізацію параметрів ґрунтообробних машин з нелінійною характеристикою пружності, вирішувати задачі визначення кордонів зони наявності стрибків амплітуди коливань та оцінки динамічної міцності машин і конструкцій.
2. На прикладі моделювання динамічної системи «корпус плуга - ґрунт» змінюючи в широких межах параметри підвіски (в данном випадку жорсткість) і режими роботи плуга, у відповідності критерію оптимізації, визначено раціональний режим роботи плуга на ґрунтах різноманітної твердості.

Література.

1. Диментберг М.Ф. Нелинейные стохастические задачи механических колебаний [Текст] / М.Ф. Диментберг – М.: Наука, - 1980. – 368 с.
2. Стокер Дж. Нелинейные колебания [Текст]. /Дж.Стокер – М.: ИЛ,-1952.- 120 с.
3. Бусленко В.Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем [Текст] / В.Н.Бусленко – М: Наука, 1977.- 239 с.
4. Статистическая динамика и оптимизация управления летательных аппаратов [Текст]: Учебное пособие для авиационных специальностей ВУЗов/Лебедев А.А., Бобронников В.Т., Красильщиков В.В., Малышев В.В. – М.: Машиностроение, 1985. – 282 с.
5. Дюжаев В.П. Исследование математической модели динамической системы «корпус плуга на упругой подвеске - почва»././ Праці / ТДАТА.- Вип..27.- Мелітополь,2005.- С.97-101.

**МЕТОДИКА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ОРУДИЙ С КОЛЕБЛЮЩИМИСЯ
КОРПУСАМИ**

Дюжаев В.П., к.т.н.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы поведения механической колебательной системы с нелинейной кубической характеристике упругости и представлена методика и результаты статистического моделирования нелинейных динамических систем взаимодействия корпусов почвообрабатывающих орудий с почвой.

**METHOD SIMULATION MODELING TILLAGE TOOLS OF A BODY,
OSCILLATING**

V. Dyuzhayev

Summary

The paper deals with the mechanical behavior of an oscillating system with nonlinear cubic characteristics of elasticity and the technique and results of statistical modeling of nonlinear dynamic systems interaction buildings with soil tillage tools.