Список літератури
1. Методика та приклади розв'язування задач з теоретичної механіки / *Каплунова А.В., Михайловський В.А., Сірош І.П., Станкевич В.І., Фельдман А.А*. // Держсільгоспвидав УРСР.: К. – 1961. 390 с.
2. *Бухгольц Н.Н.* Основной курс теоретической механики / Н.Н. Бухгольц – М.: Наука, 1972, ч.1, 467 с.
3. Теоретична механіка (Навчальний посібник) / [*С. І. Кучеренко, В. В. Бурлака, Л. М. Тіщенко та ін.*]; за ред. С. І. Кучеренка. – Харків: 2012. − 568 с.
4. *Гурницкий П.Г.* Новая сялка для безрядкового посева зерновых культур. Сб. «Прогрессивные способы посева зерновых культур». – М: 1959 г.
5. Ногтиков А.А., Глотов А.Л., Сазонов Д.С. Сошник для внутрипочвенно-разбросного посева // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – *1996. - №2. – С.29-30.*
6. *Павельчук Ю.Ф.* Обгрунтування параметрів сошників для сівби зернових культур підгрунтово-розкидним способом: дис. … канд. техн. наук: 05.05.11/ *Павельчук Юрій Федорович.* – Камянець-Подільський, 2009. – 245 с.

Определены статистические характеристики угла бокового отклонения траекторий полета семян в вертикальных плоскостях по отношению к центральной (теоретической) плоскости после косого удара семян о плоскую поверхность.

Косой удар, траектория полета семян, угол бокового отклонения, статистические характеристики, коэффициент вариации.

Identified the statistical characteristics of a lateral deviation angle trajectories seeds in vertical planes relative to the center (theoretical) after the oblique hitting a flat surface of the seed.

Oblique impact, trajectory of seed, angle of lateral deviation, statistical characteristics, coefficient of variation.

УДК 534.1

ЗАСТОСУВАННЯ СПОСОБУ ПРЯМОЇ ЛІНЕАРИЗАЦІЇ ДЛЯ АНАЛІЗУ РЕЖИМІВ ВИМУШЕНИХ (СУБ-/СУПЕРГАРМОНІЧНИХ) КОЛИВАНЬ ВІБРОУДАРНИХ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

В.С. Ловейкін, доктор технічних нуак
М.Г. Діктерук, Ю.В. Човнюк, кандидати технічних наук

Запропонований метод прямої лінеаризації Я.Г. Пановка для аналізу режимів вимушених супер- та субгармонічних коливань у

віброударних системах. Отримана замкнена форма розв'язку при дії довільної періодичної сили.

Фізико-механічне моделювання, математичне та інформаційно-аналітичне забезпечення, системи автоматизованого проектування (САПР), віброударні механічні системи, спосіб, пряма лінеаризація, аналіз, режими, вимушені коливання, супер- та субгармонічні режими, замкнена форма розв'язку, дія, періодична сила.

Постановка проблеми. Сучасні системи віброзахисту та вібротехніки, як правило, є суттєво нелінійними, тобто такими, у котрих не лінійності відновлюючих сил не є малими.

Аналіз великої кількості точних розв'язків у нелінійних неавтономних коливних системах дозволяє стверджувати, що основні нелінійні ефекти у цих системах є проявом внутрішніх коливних властивостей системи, тобто вільних коливань. Саме такий підхід передбачає, що у системах визначальну роль при коливаннях відіграють пружні відновлюючі сили. Тому з'являється можливість на основі аналізу вільних коливань системи й параметрів вимушеної сили передбачати можливість тих чи інших нелінійних ефектів без звичайних математичних перетворень. При цьому у роботі відшукуються наближені до точних періодичні розв'язки вимушених коливань (суб- та супергармонійних) у системах з типовими кусково-лінійними пружними характеристиками. Оскільки механічні коливні системи найчастіше є грубими системами, то наявність таких наближених розв'язків та побудова карт областей, які притягують періодичні режими, для систем з різними типовими нелінійними характеристиками дозволяють досить впевнено прогнозувати поведінку систем з іншими близькими нелінійностями, точні розв'язки для котрих невідомі.

Аналіз останніх досліджень. Існує багато точних та наближених методів дослідження вказаних систем [1, 2]. Проте відсутні обґрунтовані методи аналізу суб- та супергармонічних коливань суттєво нелінійних (віброударних) систем, які б були засновані на аналітичних підходах без застосування ПЕОМ.

Мета досліджень. Дослідити режими вимушених (суб-/супергармонійних) коливань у суттєво нелінійних системах з в'язким тертям методом прямої лінеаризації Я.Г. Пановка [1]. При цьому можна отримати замкнену форму розв'язку при дії довільної періодичної сили [3].

Результат досліджень. Об'єкт дослідження. Рівняння руху коливної системи з одним ступенем свободи руху.

При вивченні коливних процесів, які виникають у машинах та механізмах будівельної індустрії (і, зокрема, виробництва будівельних матеріалів, сумішей та ін.), як правило, вдається виділити три групи сил, котрі визначають поведінку динамічної системи: 1) пружні відновлюючі; 2) дисипативні; 3) вимушені сили. При такому підході рівняння руху коливної системи з одним ступенем свободи можна записати у вигляді:

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

де $x-$узагальнена (лінійна) координата; $m-$маса; $f(x)-$пружна відновлююча сила (пружна характеристика); $R(x,\dot{x})-$ дисипативна сила (дисипативна характеристика); $H(t)-$періодична зовнішня сила (вимушена сила) періоду Т.

У тих випадках, коли система (1) є лінійною (або здійснена її лінеаризація методом Я.Г. Пановка [1]), $f(x) = \tilde{p}^2 x,$ а $R(x,\dot{x}) = 2\tilde{n}x,$ й у ній встановлюються періодичні коливання певного періоду (зокрема, кратні періоду вимушеної сили H(t)).

Процедура прямої лінеаризації (за Я.Г. Пановком [1]) для систем з аналітичними пружними характеристиками.

У роботі [2] отримані точні співвідношення для частоти вільних коливань нелінійної системи (p). Однак, існує досить багато наближених методів відшукання частот вільних коливань у подібних системах, заснованих на лінеаризації пружних характеристик. У цьому пункті роботи розглянутий спосіб прямої лінеаризації, запропонований Я.Г. Пановком [1]. Цей спосіб визначення залежності $p(a)$ (де $a-$амплітуда вільних коливань) за значної простоти має, крім того, ще й високу точність. У ряді випадків точність способу прямої лінеаризації перевищує точність найбільш розповсюдженого методу гармонічної лінеаризації [4, 5].

Згідно способу прямої лінеаризації [1], частота вільних коливань для симетричної системи (тобто $f(x) \equiv -f(-x)$) визначається з виразу:

$$p^2 = \frac{5}{a^5}\int_0^a f(x)\cdot x^3 dx; \tag{2}$$

для несиметричної (тобто $f(x) \neq -f(-x)$) визначається з виразу:

$$p^2 = \frac{5}{2a^5}\int_{-a}^{a} f(x_1 - \Delta a)\cdot {x_1}^3 dx_1,$$

(3)

де

$$\Delta a = (a_2 - a_1)/2, \;\; a = (a_1 + a_2)/2. \tag{4}$$

Тут $a_{1,2} = \max \;\; a;$ $a_1 = \max \;\; a$ при $x > 0;$ $a_2 = \max \;\; a$ при $x < 0.$

Розглянемо декілька прикладів визначення частоти вільних коливань для зазначених нижче пружних характеристик $f(x).$

А. Система з білінійною пружною характеристикою.

Пружна характеристика має вигляд:

$$f(x) = \begin{cases} p_1{}^2 x, \quad x \le \Delta, \\ p_2{}^2 x - (p_2{}^2 - p_1{}^2) \cdot \Delta, \quad x > \Delta. \end{cases} \tag{5}$$

Б. Система з несиметричною трьохланцюговою пружною характеристикою.

Пружна характеристика має вигляд:

$$f(x) = \begin{cases} p_2{}^2 x - (p_2{}^2 - p_1{}^2) \cdot \Delta_1, \quad x \ge \Delta_1, \\ p_1{}^2 x, \quad -\Delta_2 \le x \le \Delta_1, \\ p_3{}^2 x + (p_3{}^2 - p_1{}^2) \cdot \Delta_2, \quad x \le \Delta_2. \end{cases} \tag{6}$$

(Зокрема, може бути $p_3{}^2 = p_2{}^2$).

В. Система з трьохланцюговою пружною симетричною характеристикою.

Пружна характеристика має вигляд:

$$f(x) = \begin{cases} p_1{}^2 x, \quad |x| \le \Delta, \\ p_2{}^2 x - (p_2{}^2 - p_1{}^2) \cdot \Delta \cdot sign x, \quad |x| \ge \Delta. \end{cases} \tag{7}$$

Для системи (6) при $p_3{}^2 = p_2{}^2$ та для системи (7) при $a \ge \Delta$ у [2] отримані розв'язки, які зводяться до наступних:

$$(6) \Rightarrow p^2 = p_2{}^2 + \frac{\left(p_2{}^2 - p_1{}^2\right)}{8} \cdot \left\{(\gamma_1 - \gamma)^5 - (\gamma_2 - \gamma)^5 - 5(\gamma_1 - \gamma_5)\right\},$$

(6*)

де

$$\gamma = \frac{\Delta a}{a} = \frac{a_2 - a_1}{2a}; \gamma_1 = \frac{\Delta_1}{a}; \gamma_2 = \frac{\Delta_2}{a}; a = \frac{(a_1 + a_2)}{2}. \tag{8}$$

$$(7) \Rightarrow p^2 = p_2{}^2 + \frac{1}{4} \cdot \left(p_2{}^2 - p_1{}^2\right) \cdot \left(\frac{\Delta^5}{a^5} - 5 \cdot \frac{\Delta}{a}\right). \tag{9}$$

Для $f(x)$ (5) та $f(x)$ (6) (при $p_3{}^2 \ne p_2{}^2$) вирази для p отримані нижче.

$$\Rightarrow p^2 = \frac{\left(p_1{}^2 + p_2{}^2\right)}{2} + \frac{\Delta^5}{2a^5} \cdot \left(p_1{}^2 - p_2{}^2\right) + \frac{5}{2a^5} \times \times \left\{ \begin{aligned} & \frac{p_1{}^2 \cdot \Delta a}{4} \cdot \left(a^4 - \Delta^4\right) - \frac{p_2{}^2 \cdot a^4}{4} \cdot (\Delta a + \Delta) + \\ & + \frac{p_1{}^2 \cdot \Delta \cdot a^4}{4} + \frac{p_2{}^2 \cdot \Delta a \cdot \Delta^4}{4} + \frac{\left(p_2{}^2 - p_1{}^2\right) \cdot \Delta^5}{4} \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

$$(6) \Rightarrow p^2 = \frac{5}{2a^5} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \frac{p_1{}^2 \cdot \left(\Delta_1{}^5 + \Delta_2{}^5\right)}{5} - \frac{p_1{}^2 \cdot \Delta a}{4} \cdot \left(\Delta_1{}^4 - \Delta_2{}^4\right) + \frac{p_2{}^2 \cdot \left(a^5 - \Delta_1{}^5\right)}{5} - \frac{p_2{}^2 \cdot (\Delta a) \cdot \left(a^4 - \Delta_1{}^4\right)}{4} + \\ & + \frac{\left(p_1{}^2 - p_2{}^2\right) \cdot \Delta_1 \cdot \left(a^4 - \Delta_1{}^4\right)}{4} + \frac{p_3{}^2 \cdot \left(-\Delta_2{}^5 + a^5\right)}{5} - \frac{p_3{}^2 \cdot \Delta a \cdot \left(\Delta_2{}^4 - a^4\right)}{4} + \\ & + \left(p_3{}^2 - p_1{}^2\right) \cdot \Delta_2 \cdot \frac{\left(\Delta_2{}^4 - a^4\right)}{4} \end{aligned} \right\}. \tag{11}$$

У (11) вважаємо, що $p_3{}^2 \ne p_2{}^2$.

3. Замкнена форма розв'язку при дії довільної періодичної сили.

Якщо врахувати в’язкий опір, то основне рівняння вимушених коливань прийме вид:

$$\ddot{x}+\frac{2\tilde{n}}{m}\cdot\dot{x}+\frac{\tilde{p}^2}{m}\cdot x=\frac{H(t)}{m}. \qquad (12)$$

Введемо позначення:

$$\frac{2\tilde{n}}{m}=2n;\ \frac{\tilde{p}^2}{m}=p^2. \qquad (13)$$

Використаємо підхід [3] й визначимо $x(t)$ для рівняння (12), яке справедливе на проміжку часу $0<t<T,$ де $T-$ період дії вимушеної сили $H(t)$ з довільним законом зміни у часі $t.$ Маємо наступну структуру розв’язку:

$$x(t)=\frac{\exp(-nt)}{mp_*}\cdot\left\{\frac{C\cdot\left[e^{nT}\sin p_*(t+T)-\sin p_*t\right]-S\cdot\left[e^{nT}\cos p_*(t+T)-\cos p_*t\right]}{1-2e^{nT}\cos p_*T+e^{2nT}}+\right.$$

$$\left.+\int_0^t H(\tau)e^{nT}\sin p_*(t-\tau)d\tau\right\},\ 0<t<T,\ \ p_*=\sqrt{p^2-n^2},C=\int_0^T H(\tau)e^{n\tau}\sin p_*\tau d\tau,$$

$$S=\int_0^T H(\tau)e^{n\tau}\sin p_*\tau d\tau. \qquad (14)$$

У випадку суперрезонансних режимів, коли виконується умова:

$$T=r\cdot T_*=\frac{2\pi\cdot r}{p_*},\ \ r\in N,\ \ \omega=\frac{p_*}{r},\ \ p_*=\omega\cdot r,\quad \omega=\frac{2\pi}{T}. \qquad (15)$$

За умов (15) $\sin p_*T=0;\cos p_*T=1,$ тоді з (14) маємо:

$$x(t)=\frac{\exp(-nt)}{m\cdot\omega\cdot r}\cdot\left\{\frac{C\left[e^{nT}-1\right]\cdot\sin(p_*t)-S\left[e^{nT}-1\right]\cdot\cos(p_*t)}{\left(e^{nT}-1\right)^2}+\int_0^t H(\tau)e^{nT}\sin p_*(t-\tau)d\tau\ \right\}=$$

$$=\frac{e^{-nt}}{m\omega r}\left\{\frac{C\sin(p_*t)-S\cos(p_*t)}{e^{nT}-1}+\int_0^t H(\tau)e^{nT}\sin\{p_*(t-\tau\}d\tau\right\}. \qquad (16)$$

З (16) випливає, що амплітуда $x(t)$ у випадку „суперрезонансних умов” (15) зменшується при зростанні $r.$

У випадку субрезонансних режимів виконується умова:

$$T=\frac{T_*}{\tilde{m}}=\frac{2\pi}{p_*\tilde{m}};\frac{\omega}{\tilde{m}}=p_*,\tilde{m}\in N,p_*T=\frac{2\pi}{\tilde{m}}. \qquad (17)$$

З (14) за умов (17) випливає:

$$x(t)=\frac{e^{-nt}\cdot\tilde{m}}{m\cdot\omega}\cdot\left\{\frac{C\left[e^{nT}\sin p_*(t+T)-\sin p_*t\right]-S\left[e^{nT}\cos p_*(t+T)-\cos p_*t\right]}{1-2e^{nT}\cos\left(\frac{2\pi}{\tilde{m}}\right)+e^{2nT}}+\int_0^t H(\tau)e^{nT}\sin p_*(t-\tau)d\tau\right\}. \qquad (18)$$

З (18) видно, що амплітуда $x(t)$ у випадку „субрезонансних умов” (17) зростає при зростанні $\tilde{m}.$

Якщо існує резонанс $\frac{r}{\tilde{m}}-$порядку, тобто:

$$p_* = \frac{\omega \cdot r}{\widetilde{m}}, \qquad (19)$$

тоді для $x(t)$ маємо:

$$x(t) = \frac{e^{-nt} \cdot \widetilde{m}}{m \cdot \omega \cdot r} \cdot \left\{ \frac{C\left[e^{nT} \sin p_*(t+T) - \sin p_* t\right] - S\left[e^{nT} \cos p_*(t+T) - \cos p_* t\right]}{1 - 2e^{nT} \cos\left(\frac{2\pi \cdot r}{\widetilde{m}}\right) + e^{2nT}} + \right.$$

$$\left. + \int_0^t H(\tau) \cdot e^{nT} \cdot \sin\{p_*(t-\tau) d\tau\} \right\}. \qquad (20)$$

Отже, за наявності резонансу $\frac{r}{\widetilde{m}}$ – порядку, амплітуда $x(t)$ буде $\sim \frac{\widetilde{m}}{r}$.

Висновки

1. Застосування способу прямої лінеаризації Я.Г. Пановка дозволяє визначити власні частоти коливань суттєво нелінійних систем, які мають білінійну та триланцюгову (симетричну/несиметричну) пружну характеристику.

2. Встановлені закони руху системи $x(t)$ за умов суб- та супергармонійних резонансів у лінійних системах з в'язким тертям та довільною періодичною (з періодом T) вимушеною силою. Амплітуди резонансів $\frac{r}{\widetilde{m}}$ – порядку прямо пропорційні $\frac{\widetilde{m}}{r}$.

3. Наведені у роботі аналітичні співвідношення можуть бути використані у подальших вдосконаленнях інженерних методів розрахунку подібних систем, які доволі широко застосовуються у сучасних вібраційних (віброударних) технологіях виготовлення будівельних матеріалів, сумішей (зокрема, для ущільнення порошкових матеріалів).

Список літератури

1. *Пановко Я.Г.* Основы прикладной теории упругих колебаний / *Я.Г. Пановко*. – М.: Машиностроение, 1967. – 316 с.
2. *Закржевский М.В.* Колебания существенно-нелинейных механических систем / *М.В.Закржевский*. – Рига: Зинатне, 1980. – 190 с.
3. *Пановко Я.Г.* Основы прикладной теории колебаний и удара / *Я.Г.Пановко*. – Л.: Политехника, 1990. – 272 с.
4. *Боголюбов Н.Н.* Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / *Н.Н. Боголюбов, Ю.А. Митропольский*. – М.: Физматгиз, 1963. – 410 с.
5. *Вульфсон И.И.* Нелинейные задачи динамики машин / *И.И.Вульфсон, М.З. Коловский*. – Л.: Машиностроение, 1968. – 382 с.

Предложенный метод прямой линеаризации Я.Г. Пановко для анализа режимов вынужденных супер-и субгармоничних колебаний

в виброударных системах. Полученная замкнутая форма решения при действии произвольной периодической силы.

Физико-механическое моделирование, математическое и информационно-аналитическое обеспечение, системы автоматизированного проектирования (САПР), виброударные механические системы, способ, прямая линеаризация, анализ, режимы, вынужденные колебания, супер-и субгармоничны режимы, замкнутая форма решения, действие, периодическая сила.

The method of direct linearization (so called Y.G. Panovko's method) for analysis of regimes of forced super- and sub-harmonic oscillations of vibro-impact systems is proposed. The closed form of solution for the action of arbitrary periodic force is received.

Physical and mechanical modeling, mathematical and informational supply, systems of automatic projecting (SAPR), vibro-impact mechanical systems, method, direct linearization, analysis, regimes, forced oscillations, super- and sub-harmonic regimes of oscillations, closed form of solution, action, periodic force.

УДК 371.13

ПРАЦЕОХОРОННІ ЗАСАДИ У НАВЧАЛЬНО-ВИХОВНОМУ ПРОЦЕСІ АГРАРНИХ ВИЩИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ

О.В. Войналович, кандидат технічних наук
Національний університет біоресурсів і природокористування України
М.П. Барсуков, доктор медичних наук
Є.М Кірдань, кандидат технічних наук
ПФ НУБіП України «Кримський агротехнологічний університет»

Для поліпшення стану охорони праці в аграрних ВНЗ необхідно забезпечити належний рівень викладання працеохоронних дисциплін з дотриманням встановлених обсягів викладання, дотримуватися нормативів щорічних відрахувань на впровадження заходів з охорони праці з усіх джерел фінансування ВНЗ. Умовою проведення практичного навчання у НДГ чи на інших