

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕМІЩЕННЯ ВАНТАЖОПІДЙОМНОЇ МАШИНИ ЗА ОПТИМАЛЬНИМ ЗАКОНОМ

***В.С. Ловейкін, доктор технічних наук
Ю.О. Ромасевич, кандидат технічних наук***

В статті проведено моделювання руху мостового крана при оптимальному керуванні. Керування рухом крана змодельоване за допомогою частотного перетворювача скалярного типу. Досліджено вплив параметрів налаштування частотного перетворювача на динамічні, енергетичні та кінематичні показники руху крана.

Оптимальне керування, мостовий кран, частотний перетворювач, асинхронний електропривод.

Постановка проблеми. Мостові крани широко використовуються у різних сферах виробництва, які пов'язані із переміщенням вантажів. Досить часто робота мостового крана є „вузьким місцем” всього виробничого процесу, тому бажано, щоб експлуатація крана проходила із найменшими динамічними навантаженнями, які призводять до зниження надійності та продуктивності крана.

Більшість мостових кранів, які експлуатуються у даний час, обладнані застарілими електро-релейними системами керування. Таке керування характеризується низькою енергоефективністю.

Однією з проблем, які знижують продуктивність роботи мостових кранів, є розгойдування вантажу на гнучкому підвісі. Застосування оптимальних законів руху крана, за якими коливання вантажу усуваються протягом перехідних процесів, дозволяє усунути вказану проблему. Однак, перед тим, як проводити практичну реалізацію оптимальних законів руху необхідно здійснити моделювання щоб вказати основні налаштування частотно-керованого кранового приводу.

Аналіз останніх досліджень. Дослідженню динаміки руху мостових кранів присвячені роботи [1-10]. У деяких із цих робіт [4, 6-10] також вирішуються завдання оптимального керування кранами прольотного типу. Однак, синтезовані у вказаних роботах оптимальні закони руху крана збільшують динамічні навантаження у кранових елементах за рахунок зменшення тривалості перехідних процесів руху крана.

Практична реалізація оптимальних керувань, звичайно, вносить свої корективи у закони оптимального руху крана. Вказане питання досліджувалось у роботі [6].

Однак, необхідно досить детально проводити моделювання оптимального керування краном із застосуванням частотно-керованого приводу.

Метою досліджень є дослідження оптимального закону руху механізму переміщення вантажопідйомного крана, що обладнаний частотно-керованим асинхронним приводом.

У відповідності до мети ставляться такі задачі: провести моделювання руху механізму переміщення крана при частотному керуванні; проаналізувати отримані результати; на основі проведеного аналізу вказати раціональні налаштування частотного приводу для реалізації оптимального керування.

Результати досліджень. Для проведення дослідження використаємо динамічну модель руху мостового крана, яка показана на рис. 1.

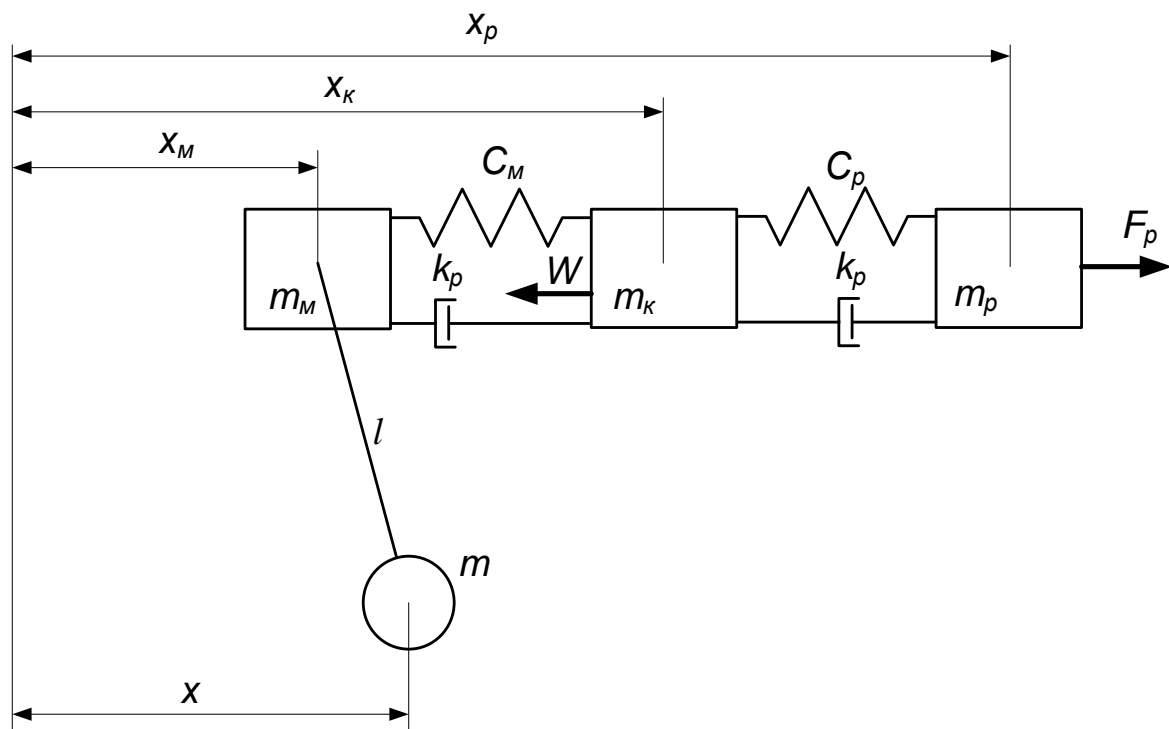


Рис. 1. Чотиримасова динамічна модель руху мостового крана із вантажем на гнучкому підвісі.

Динаміка руху крана із врахуванням збурюючої дії від асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором описується такою системою диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{1\alpha}}{dt} = \frac{1}{\delta L_1} (u_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1 + k_r e_{2\alpha}); \\ \frac{di_{1\beta}}{dt} = \frac{1}{\delta L_1} (u_{1\beta} - i_{1\beta} R_1 - k_r e_{2\beta}); \\ \frac{di_{2\alpha}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_2} ((u_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1) k_s + e_{2\alpha}); \\ \frac{di_{2\beta}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_2} ((u_{1\beta} - i_{1\beta} R_1) k_s - e_{2\beta}); \\ 3pL_{12} (i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}) \frac{u \eta_{пер}}{r_{кол}} = m_p \ddot{x}_p + c_p (x_p - x_k) + k_p (\dot{x}_p - \dot{x}_k); \\ m_k \ddot{x}_k = c_p (x_p - x_k) + k_p (\dot{x}_p - \dot{x}_k) - c_m (x_k - x_m) - k_m (\dot{x}_k - \dot{x}_m) - W \text{sign}(\dot{x}_k); \\ m_m \ddot{x}_m = c_m (x_k - x_m) + k_m (\dot{x}_k - \dot{x}_m) - \frac{mg}{l} (x_m - x); \\ \ddot{x} = \frac{g}{l} (x_m - x), \end{array} \right. \quad (1)$$

де u – передаточне число механізму переміщення крана; $r_{кол}$ – радіус приводного колеса крана; $\eta_{пер}$ – ККД передач приводу крана; W – опір переміщенню мостового крана, прикладений до коліс кінцевих балок; l – довжина гнучкого підвісу вантажу; g – прискорення вільного падіння; $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ – проекції узагальненого вектора струму статора на нерухомі координатні осі α і β ; $i_{2\alpha}$, $i_{2\beta}$ – проекції узагальненого вектора струму ротора на нерухомі координатні осі α і β ; L_1 , L_2 – індуктивності статорної та роторної обмоток; L_{12} – взаємоіндукція; k_r і k_s – коефіцієнти магнітного зв'язку ротора та статора відповідно ($k_r = \frac{L_{12}}{L_2}$; $k_s = \frac{L_{12}}{L_1}$); M – електромагнітний момент двигуна; p – кількість пар полюсів електричної машини; $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$ – проекції узагальненого вектора напруги статора на координатні осі α і β ($u_{1\alpha} = U_{max} \cos(2\pi \int f dt)$, $u_{1\beta} = U_{max} \sin(2\pi \int f dt)$); U_{max} – амплітуда фазної напруги живлення двигуна; f – частота напруги живлення двигуна; $e_{2\beta}$, $e_{2\alpha}$ – ЕРС, що індукуються потокозчепленнями ротора по осях α і β відповідно ($e_{2\alpha} = p\omega_{\delta\beta} (L_2 i_{2\beta} + L_{12} i_{1\beta}) + i_{2\alpha} R_2$, $e_{2\beta} = p\omega_{\delta\alpha} (L_2 i_{2\alpha} + L_{12} i_{1\alpha}) - i_{2\beta} R_2$); R_1 – активний опір статорної обмотки; R_2 – приведений до статора активний опір роторної обмотки; δ – коефіцієнт розсіювання ($\delta = 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{X_1}{2\pi f L_{12}}\right) \left(1 + \frac{X_2}{2\pi f L_{12}}\right)}$); X_1 – індуктивний опір статорної обмотки; X_2 – приведений до статора індуктивний опір роторної обмотки; m_p , m_k , m_m , m – приведені до

поступального руху маси приводного механізму, кінцевих балок, моста і вантажу відповідно; x_p, x_k, x_m, x – узагальнені координати, які відповідають масам m_p, m_k, m_m и m ; c_p, c_k, c_m – приведені жорсткості привода, кінцевих балок і моста крана відповідно; k_p, k_m – приведені коефіцієнти дисипації в приводі і крановому мості відповідно. Крапка над символом означає диференціювання за часом.

У роботі [7] синтезовано оптимальний закон руху крана з вантажем на гнучкому підвісі, що дозволяє усунути коливання вантажу на гнучкому підвісі, причому використана двомасова динамічна модель. Оптимальний закон руху представляється у вигляді кусочно-неперервної функції:

$$\dot{x}_1 = \begin{cases} v \frac{t^3(6t^2 - 15tT_1 + 10T_1^2)}{2T_1^5}, \text{ при } t \in [0; T_1]; \\ v/2, \text{ при } t \in [T_1; T_1 + \Delta T]; \\ \frac{v}{2T_1^5} (6t^5 - 30T_1^5 - 120T_1^4 \Delta T - 180T_1^3 \Delta T^2 - 130T_1^2 \Delta T^3 - 45T_1 \Delta T^4 - 6\Delta T^5 + 30t \times \\ \times (T_1 + \Delta T)^2 (2T_1 + \Delta T)^2 - 15t^4 (3T_1 + 2\Delta T) - 30t^2 (T_1 + \Delta T)(2T_1 + \Delta T)(3T_1 + 2\Delta T) + \\ + 10t^3 (13T_1^2 + 18T_1 + 6\Delta T^2)), \text{ при } t \in [T_1 + \Delta T; 2T_1 + \Delta T]; \end{cases} \quad (2)$$

де T_1 – тривалість розгону до проміжної швидкості, яка рівна половині усталеної; ΔT – тривалість руху на проміжній швидкості (загальна тривалість перехідного процесу дорівнює $2T_1 + \Delta T$). Зазначимо, що функція (2) має цінну властивість – її реалізація не пов'язана із зміною знаку динамічної складової приводного зусилля крана, що, у свою чергу, знижує рівень динамічної завантаженості елементів крана.

Функція (2) доставляє абсолютні мінімуми термінальним критеріям:

$$\begin{cases} F_{\text{дин}}^2(0) \rightarrow \text{abs min}; \quad \dot{F}_{\text{дин}}^2(0) \rightarrow \text{abs min}; \\ \dot{F}_{\text{дин}}^2(T_1) \rightarrow \text{abs min}; \\ \dot{F}_{\text{дин}}^2(T_1 + \Delta T) \rightarrow \text{abs min}; \\ F_{\text{дин}}^2(2T_1 + \Delta T) \rightarrow \text{abs min}; \quad \dot{F}_{\text{дин}}^2(2T_1 + \Delta T) \rightarrow \text{abs min}, \end{cases} \quad (3)$$

де $F_{\text{дин}}$ – динамічна складова приводного зусилля для двомасової моделі руху крана із вантажем на гнучкому підвісі:

$$F_{\text{дин}} = m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2, \quad (4)$$

де m_1, m_2 – приведені до поступального руху маси крана та вантажу відповідно; x_1, x_2 – координати центрів відповідних мас.

Дослідимо, чи можливо використати закон руху (2) для оптимізації керування рухом чотиримасовою моделлю крана. Для цього в оптимальному законі руху необхідно покласти:

$m_1 = m_p + m_k + m_m$, $m_2 = m$, $x_1 = x_p$. Крім того, врахуємо також характер зміни частоти напруги живлення двигуна при реалізації оптимального керування рухом крана.

Для того, щоб „відпрацювати” нестандартний (не записаний у частотний перетворювач) закон зміни частоти напруги живлення, необхідно перетворити неперервний закон у дискретну форму. Процес керування швидкістю руху кранового двигуна буде полягати у „відправці” на частотний перетворювач дискретних значень частоти, а перехід між сусідніми значеннями частоти буде відбуватись за лінійним законом. Описані нюанси враховують при проведенні моделювання руху крана з частотно-керуваним приводом.

Оцінка ефективності використання оптимального керування рухом мостового крана проведена за енергетичними, електричними, динамічними та кінематичними показниками. Розрахункові експерименти проведено при умові, що довжина гнучкого підвісу змінюється з часом: зменшується при розгоні крана та збільшується при його гальмуванні.

Для того, щоб робота мостового крана мала високу продуктивність необхідно, щоб тривалість перехідних процесів була незначною. Для цього поставимо умову – тривалість перехідного процесу (розгін та гальмування) крана повинна бути на 10% меншою, ніж період вільних коливань вантажу на гнучкому підвісі для двомасової динамічної системи крана, який знаходиться із такого виразу:

$$T_{nep} = 2\pi \sqrt{\frac{m_1}{m_1 + m_2} \frac{l}{g}}. \quad (5)$$

Поставлена умова у математичному вигляді записується так:

$$T_1 + \pi \sqrt{\frac{l}{g}} = 0,9 \cdot 2\pi \sqrt{\frac{m_1}{m_1 + m_2} \frac{l}{g}}. \quad (6)$$

Можемо знайти тривалість розгону до проміжної швидкості T_1 :

$$T_1 = \sqrt{\frac{l}{g}} \left(0,9 \cdot 2\pi \sqrt{\frac{m_1}{m_1 + m_2}} - \pi \right). \quad (7)$$

Незалежними факторами у дослідженнях є: початкова довжина гнучкого підвісу вантажу l_0 , початкова напруга живлення кранових приводних двигунів U_0 . Кожен незалежний фактор варіюється на трьох рівнях.

Необхідно сказати, що показник U_0 є функцією частоти напруги живлення приводних кранових двигунів:

$$U_{живл} = U_0 + (U_{ном} - U_0) \frac{f}{f_{ном}}, \quad (8)$$

де U_0 – початкове значення напруги живлення; $U_{НОМ}$ – номінальна напруга живлення двигуна ($U_{НОМ}=380$ В); $f_{НОМ}$ – номінальна частота напруги живлення двигуна ($f_{НОМ}=50$ Гц).

У таблиці 1 представлені показники, які отримані за допомогою проведення розрахункових експериментів. Три значення в кожній комірці таблиці відповідають трьом значенням початкової напруги живлення $0, 0,1U_{НОМ}$ та $0,3U_{НОМ}$ [11].

1. Показники руху мостового крана за оптимальним законом.

Показники	Початкова довжина гнучкого підвісу вантажу		
	2,5 м	7,5 м	14,5 м
1	2	3	4
Витрати енергії E , Дж	516918	439361	414643
	472103	417675	375978
	432262	342407	179121
Втрати енергії ΔE , Дж	361499	287180	272794
	314152	265944	228112
	271518	179348	19436
	69,93	65,36	65,79
Відносні втрати енергії \tilde{E} , %	66,54	63,67	60,67
	62,81	52,37	10,85
Максимальний електромагнітний момент двигуна M_{\max} , Нм	150	150	150
	199	149	150
	197	149	100
Кратність максимального моменту двигуна, \tilde{M}_{\max}	2,69	2,69	2,68
	3,57	2,67	2,68
	3,52	2,67	1,80
	243	245	243
Максимальний струм двигуна I_{\max} , А	244	242	242
	247	243	63
Кратність максимального струму двигуна, \tilde{I}_{\max}	6,00	6,05	6,00
	6,01	5,97	5,97
	6,08	5,99	1,55
Максимальний момент у швидкохідному валу привода $M_{л.\max}$, Нм	423	425	370
	451	368	357
	384	317	80
Максимальне приведенне зусилля у мості $R_{м.\max}$, Н	52534	34660	29814
	68954	32771	32002
	54231	47982	24883
Максимальне відхилення канату з вантажем від вертикалі, Δx_{\max} , м	0,330	0,362	1,083
	0,396	0,538	1,028
	0,246	0,834	0,725
Максимальний кут відхилення канату з вантажем від вертикалі, $\Delta \varphi_{\max}$, рад	0,110	0,045	0,072
	0,132	0,067	0,068
	0,082	0,104	0,048

Закінчення табл. 1

1	2	3	4
Лінійна амплітуда залишкових коливань канату з вантажем після зупинки крана, $\Delta x_{\max.}(t > T)$, м	0,254	0,253	0,372
Кутова амплітуда залишкових коливань канату з вантажем після зупинки крана, $\Delta \varphi_{\max.}(t > T)$, рад	0,095	0,372	0,029
	0,084	0,031	0,024
	0,051	0,033	0,027
	0,031	0,046	0,001

Проаналізуємо дані, які представлені у табл. 1. Порівнюючи між собою енергетичні показники приходимо до висновку, що збільшення довжини гнучкого підвісу та початкової напруги живлення двигунів підвищує енергоефективність роботи крана.

Особливу увагу необхідно звернути на розрахунковий експеримент при таких параметрах: $l_0=14,5$ м, $U_0=0,3 U_{\text{НОМ}}$, оскільки при цьому коливання вантажу практично повністю усуваються, а робота елементів крана не супроводжується значними динамічними навантаженнями. Аналіз кінематичних показників руху крана із вантажем на гнучкому підвісі показує наявність залишкових коливань вантажу, максимальна амплітуда залишкових коливань дорівнює $4,8^\circ$. Причиною виникнення залишкових коливань вантажу є неякісна реалізація оптимального руху крана. Із рис. 2 стає зрозумілим, що зміна швидкості руху крана, що отримана у результаті розрахункового експерименту, не відповідає заданій (оптимальній) швидкості його руху.

На рис. 2 графік заданої швидкості руху крана показаний лінією сірого кольору, а графік швидкості, що отримана у результаті розрахункового експерименту – чорною.

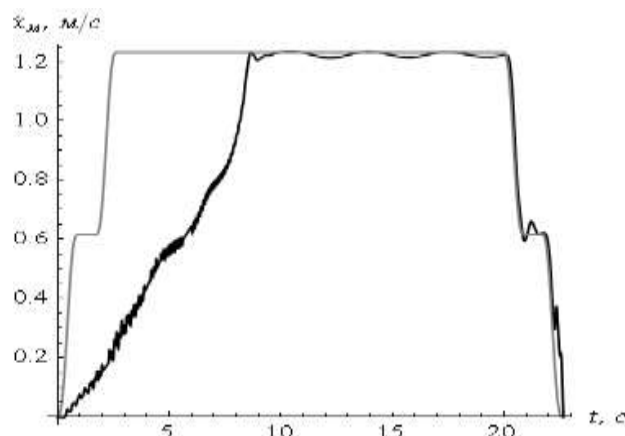


Рис. 2. Графіки зміни швидкості руху кранового моста при наступних параметрах: $l_0=2,5$ м, $U_0=0,1 U_{\text{НОМ}}$.

Висновок. У результаті проведених досліджень встановлено, що використовувати оптимальний закон руху мостового крана, що

представлений виразом (2), доцільно лише при значній довжині гнучкого підвісу вантажу, при цьому необхідно встановлювати максимальне значення початкової напруги живлення приводних кранових двигунів. У інших випадках реалізація оптимального закону руху крана (2) не повністю усуває коливання вантажу на гнучкому підвісі, а сам процес руху крана супроводжується значними динамічними навантаженнями моста та приводу крана. Реалізація оптимального керування покладається на мехатронну кранову систему.

Список літератури

1. Комаров М.С. Динамика грузоподъемных машин / М.С. Комаров. – М.: Машиностроение, 1969. – 206 с.
2. Казак С.А. Динамика мостовых кранов / С.А. Казак. – М.: Машиностроение, 1968. – 331 с.
3. Грузоподъемные краны. Кн. 2 / М. Шеффлер, Х. Дресиг, Ф. Курт; [пер. с немецкого М.М. Рунов, В.Н. Федосеев]; под ред. М.П. Александрова. – М.: Машиностроение, 1981. – 287 с.
4. Будиков Л.Я. Многопараметрический анализ динамики грузоподъемных кранов мостового типа / Л.Я. Будиков. – Луганск: Издательство ВУГУ, 1997. – 210 с.
5. Лобов Н.А. Динамика грузоподъемных кранов / Н.А. Лобов. – М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.
6. Герасимьяк Р.П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р.П. Герасимьяк, В.А. Лещёв. – Одесса.: СМІЛ, 2008. – 192 с.
7. Ловейкін В.С. Аналіз та синтез режимів руху механізмів вантажопідйомних машин / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич. – К.: ЦП „КОМПРІНТ”, 2012. – 298 с.
8. Григоров О.В. Совершенствование рабочих характеристик крановых механизмов: дисс. на соиск. степ. доктора техн. наук: 05.05.05 / Григоров Отто Владимирович. – Х., 1995. – 386 с.
9. Мельникова Л.В. Автоматизация технологического процесса перемещения механизма с подвешенным грузом средствами микропроцессорного управления: дисс. на соиск. степ. Канд. техн. наук: 05.09.03 / Мельникова Любовь Васильевна. – Одесса, 2000. – 116 с.
10. Базил Ш. Управление электроприводом циклически работающих механизмов горизонтального перемещения: дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук: 05.09.03 / Базил Шафик. - Одесса, - 1993. – 186 с.
11. Преобразователи частоты FR-E7: руководство по эксплуатации: артикул 212650. Версия В. Mitsubishi Electric Industrial Automation. – 2008. – 512 с.

В статье проведено моделирование движения мостового крана при оптимальном управлении. Управление движением крана смоделировано с помощью частотного преобразователя скалярного типа. Исследовано влияние параметров настройки частотного преобразователя на динамические, энергетические и кинематические показатели движения крана.

Оптимальное управление, мостовой кран, частотный преобразователь, асинхронный электропривод.

Modeling of bridge crane movement with optimal control has been carried out in the article. Bridge crane movement has been modeled by mean inverter scalar kind. Influence of inverter's setting parameters has been researched on dynamic, energetic and kinematical indexes of crane movement.

Optimal control, bridge crane, inverter, asynchronous drive.

УДК 534.1

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ СУБ- ТА СУПЕРГАРМОНІЧНИХ КОЛИВАНЬ ВІБРОУДАРНИХ СУТТЄВО НЕЛІНІЙНИХ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

***В.С. Ловейкін, доктор технічних наук
Ю.В. Човнюк, кандидат технічних наук***

Наведена фізико-механічна модель, яка використана у інформаційному та аналітичному забезпеченні САПР віброударних механічних систем. Запропонований вдосконалений метод аналізу суб- та супергармонічних коливань.

Фізико-механічне моделювання, математичне забезпечення, субгармонічні та супергармонічні коливання.

Постановка проблеми. При дослідженні динаміки машин та механізмів, створенні фізико-механічних моделей, математичному та інформаційно-аналітичному забезпеченні САПР віброударних (суттєво нелінійних) механічних систем, як правило, слід мати справу з нелінійними коливними системами. Це пояснюється тим, що без врахування існуючих фізичних та геометричних нелінійностей не завжди можна визначити динамічні характеристики машини й правильно оцінити її міцність та надійність. Не лінійність пружних характеристик зустрічається у багатьох механізмах. Вона є причиною виникнення суб- та супергармонійних коливань, великих амплітуд коливань у нелінійних резонансних зонах при стаціонарних та перехідних режимах, багаторежимності на одній частоті вимушеної сили, віброударних режимів, паразитних нелінійних просторових коливань. У зв'язку з цим актуальним є прогнозування появи цих небажаних нелінійних режимів, котрі є небезпечними для машин і механізмів особливо у зв'язку зі значним зростанням їх швидкостей. З іншого боку, саме використання нелінійних ефектів,

© В.С. Ловейкін, Ю.В. Човнюк, 2013