Установлены условия возникновения диссипативных солитонов сверхвысокочастотного (СВЧ) и крайне высокочастотного (КВЧ) диапазонов при существовании гиперзвуковых акустоэлектромагнитных резонансов кластерных структур клеток высших растений.

Физико-механическое моделирование, локализованные нарушения, конформации, мембраны, клетки, высшие растения, диссипативные солитоны, сверхвысокочастотный (СВЧ) и крайне высокочастотный (КВЧ) диапазоны, гиперзвуковые акусто-электромагнитные резонансы, кластерные структуры клеток растений.

The paper has proposed a physical-mechanical model of localized disturbances of conformation of the cell membranes in high plants, as well as the conditions for the formation of dissipative solitons, ultra-high frequency (UHF) and extremely high frequency (EHF) range with the existence of hypersonic acoustic and electromagnetic resonances cluster structures of the cells of higher plants.

Physico-mechanical modeling, localized disorders, conformation, membrane, cells, high plants, dissipative solitons, ultra high frequency (UHF) range, extremely high frequency (EHF) range, hypersonic acoustic and electromagnetic resonances, cluster structures of plant cells.

УДК 621.87

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕЖИМУ РУХУ МЕХАНІЗМУ ПОВОРОТУ СТРІЛОВОГО КРАНА З УРАХУВАННЯМ КОЛИВАНЬ ВАНТАЖУ

В.С. Ловейкін, доктор технічних наук
В.В. Мельніченко, аспірант*

В статті розглянуто спосіб усунення коливань вантажу під час роботи механізму повороту стрілових кранів. Оптимізація режиму пуску механізму повороту крана проводиться за допомогою методів варіаційного числення. В роботі використано інтегральний комплексний критерій у вигляді лінійної згортки двох одиничних критеріїв, що відображають енергетичні втрати та дію динамічних навантажень.

*Науковий керівник – доктор технічних наук В.С. Ловейкін

© В.С. Ловейкін, В.В. Мельніченко, 2013

Коливання вантажу, оптимізація, перехідний режим руху.

Постановка проблеми. Під час роботи механізму повороту стрілового крана [5] виникають небажані коливання окремих ланок, зокрема вантажу. Особливо це явище проявляється під час перехідних процесів (пуск, гальмування). Наявність коливань приводить до зниження якості та продуктивності виконання монтажних операцій, зниження рівня надійності стрілового крана та збільшення енергетичних витрат. Надлишкове споживання енергії механізмом повороту крана приводить, крім того, до втомного руйнування окремих елементів і крана в цілому. Тому мінімізація енергетичних витрат при роботі механізму повороту крана є досить актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень. Проблемі усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі вже декілька десятків років. Останні дослідження, присвячені даній проблемі, ґрунтуються на використанні математичних теорій оптимальних процесів (принцип максимуму, варіаційне числення). Зауважимо, що сучасні способи усунення коливань вантажу пропонується реалізовувати з допомогою певної керуючої дії на механізм повороту під час перехідних режимів руху (розгін, гальмування).

В роботах [1, 2, 8] за керуючий параметр обрано силову дію на привідний механізм: для усунення коливань вантажу необхідно керувати моментом на валу електродвигуна механізму повороту. Керуюча дія має релейний характер, що призводить до додаткових динамічних навантажень на кран. Цей підхід є неприйнятним з точки зору виникнення значних динамічних навантажень.

За допомогою використання теорії варіаційного числення, як це зроблено в роботах [6, 7], можна забезпечити плавну зміну кінематичних характеристик механізму повороту і усунути коливання вантажу на гнучкому підвісі.

Мета досліджень. Мета роботи полягає в мінімізації енергетичних витрат і коливань вантажу на гнучкому підвісі під час перехідних процесів механізму повороту стрілового крана. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі: 1) обрати динамічну модель механізму повороту стрілового крана і на її основі побудувати математичну модель; 2) обрати критерій оптимізації режиму повороту крана та встановити умови його мінімуму; 3) визначити оптимальний режим розгону механізму повороту і провести аналіз отриманих результатів.

Результати досліджень. Одним із способів усунення коливань вантажу при роботі механізму повороту стрілового крана є вибір режиму його руху, при якому споживання енергії було б мінімальним.

Для вибору режиму руху механізму повороту крана необхідно сформулювати критерій, який відображає енергетичні витрати за час руху. Таким критерієм може бути середнє значення кінетичної енергії механізму повороту з гнучким підвісом вантажу за час руху, яке представляється у вигляді інтегрального функціоналу[6]:

$$T_{ср} = \frac{1}{t_1}\int_0^{t_1} T dt, \qquad (1)$$

де t – час; t_1 – тривалість руху механізму повороту; T – кінематична енергія механізму повороту крана.

Оскільки витрати енергії є небажаними, то критерій (1) необхідно мінімізувати. Для оптимізації режиму руху механізму повороту крана необхідно вбрати динамічну модель таким чином, щоб були враховані координати ланок, які здійснюють основний рух, а також координата коливань вантажу. Такою динамічною моделлю може бути динамічна модель механізму повороту крана [4] з двома ступенями вільності (рис. 1).

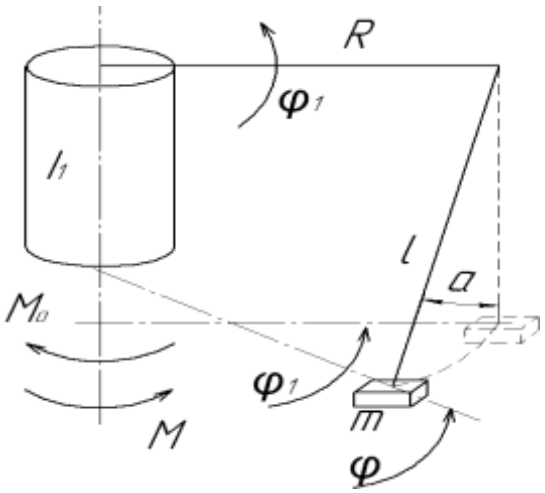


Рис. 1. Розрахункова модель системи «колона-вантаж».

Приведена розрахункова схема (рис. 1) описується системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} I_1\ddot{\varphi}_1 + \dfrac{mR^2}{l} g\left(\varphi_1 - \varphi\right) = M - M_0; \\ \ddot{\varphi} - \dfrac{g}{l}\left(\varphi_1 - \varphi\right) = 0, \end{cases} \qquad (2)$$

де I_1 – момент інерції приводного механізму поворотної колони і стріли, зведений до вісі повороту крана; φ і φ_1 – узагальнені кутові координати зведених мас відповідно вантажу та колони; m – маса вантажу; R – виліт стріли; l – довжина гнучкого підвісу вантажу; g – прискорення вільного падіння; M_0 – статичний момент сил опору,

зведений до осі повороту колони; M – рушійний момент на валу електродвигуна, зведений до осі повороту колони; α – кут відхилення вантажного канату від вертикалі.

З урахуванням впливу коливального руху вантажу на основний рух стріли, який визначається з диференціальних рівнянь руху прийнятої динамічної моделі маємо:

$$\varphi_1 = \varphi + \frac{l}{g}\ddot{\varphi};\ \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi} + \frac{l}{g}\dddot{\varphi};\ \ddot{\varphi}_1 = \ddot{\varphi} + \frac{l}{g}\overset{IV}{\varphi}. \tag{3}$$

Тоді кінематичну енергію розглядуваної системи з урахуванням виразів (3) можна записати в такому виді:

$$T = \frac{1}{2}I_1(\dot{\varphi} + \frac{l}{g}\dddot{\varphi})^2 + \frac{1}{2}mR^2\dot{\varphi}^2. \tag{4}$$

Умовою мінімуму критерію (1) є рівняння Ейлера-Лагранжа [9], яке для виразу кінематичної енергії (4) має вигляд:

$$\overset{VI}{\varphi} + 2k^2\overset{IV}{\varphi} + \left(1 + \frac{mR^2}{I_1}\right)k^4\ddot{\varphi} = 0, \tag{5}$$

де $k = \sqrt{l/g}$ - частота власних коливань вантажу на гнучкому підвісі.

Отримане рівняння (5) являє собою однорідне диференціальне рівняння шостого порядку з постійними коефіцієнтами, яке має аналітичний розв’язок. Для його розв'язку достатньо шести крайових умов руху системи «стріла-вантаж». Разом з тим, для реального переміщення стріли з гнучким підвісом вантажу з початкового положення в кінцеве необхідно забезпечити вісім крайових умов:

$$t = 0: \varphi_1 = \varphi = 0, \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi} = 0;\ t = t_1: \varphi = \Delta\varphi, \dot{\varphi}_1 = \ddot{\varphi} = \dddot{\varphi} = 0. \tag{6}$$

З урахуванням залежностей (3) ці крайові умови записуються в наступному вигляді:

$$t = 0: \varphi = \dot{\varphi} = \ddot{\varphi} = \dddot{\varphi} = 0;\ t = t_1: \dot{\varphi} = \Delta\varphi, \ddot{\varphi} = 0, \dot{\varphi} = \ddot{\varphi} = \dddot{\varphi} = 0. \tag{7}$$

Таким чином, в поставленому вигляді оптимізаційна задача кутового переміщення стріли з гнучким підвісом вантажу не може розв’язана, оскільки в цій задачі з необхідних восьми крайових умов руху можуть бути забезпечені тільки шість умов.

Для забезпечення усіх восьми крайових умов руху стріли з гнучким вантажу (7) в оптимізаційній задачі необхідно сформулювати інший критерій у вигляді лінійної згортки [6]:

$$K = \int_0^{t_1}\left[\delta V/\tilde{I}_V + (1-\delta)\,T/\tilde{I}_T\right]dt, \tag{8}$$

де T,V – відповідно кінетична енергія і енергія прискорень системи «стріла-вантаж»; $\tilde{I}_V, \tilde{I}_T$ – відповідно мінімально можливі значення кінетичної енергії-часу та динамічної складової потужності

приводного механізму, необхідні для кутового переміщення стріли з гнучким підвісом вантажу з одного крайнього положення в інше; δ – безрозмірний ваговий коефіцієнт, який змінюється від нуля до одиниці і відображає долю динамічної складової потужності приводу.

Кінематична енергія системи «стріла-вантаж» визначається за виразом (4), а енергія прискорень описується залежністю:

$$V = \frac{1}{2} I_1 (\ddot{\varphi} + \frac{l}{g} \overset{IV}{\varphi})^2 + \frac{1}{2} mR^2 \ddot{\varphi}^2. \qquad (9)$$

Мінімально можливі затрати кінетичної енергії-часу та динамічної складової потужності приводу системи «стріла-вантаж» без врахування коливань вантажу відповідно визначаються залежностями [6]:

$$\tilde{I}_T = \frac{1}{2}\left(I_1 + mR^2\right) \Big/ t_1 ; \tilde{I}_V = 6\left(I_1 + mR^2\right) \Big/ t_1^3. \qquad (10)$$

Використавши залежності (4), (9) та (10), визначимо підінтегральну функцію критерію (8):

$$f = \delta V \Big/ \tilde{I}_V + (1-\delta)\, T \Big/ \tilde{I}_T = \frac{t_1}{12\left(I_1 + mR^2\right)\Delta\varphi^2} \times$$
$$\times \{\delta [I_1 (\ddot{\varphi} + \frac{l}{g} \overset{IV}{\varphi})^2 + mR^2 \ddot{\varphi}^2] t_1^2 + 12(1-\delta)[I_1 (\dot{\varphi} + \frac{l}{g} \ddot{\varphi})^2 + mR^2 \dot{\varphi}^2]\}. \qquad (11)$$

Умовою мінімуму критерію (8) є рівняння Ейлера-Пуассона [9], яке з урахуванням виразу підінтегральної функції (11) має вигляд:

$$\overset{VIII}{\varphi} + (2k^2 - k_\delta) \overset{VI}{\varphi} + k_I k^2 (k^2 - k_\delta) \overset{IV}{\varphi} - k_I k_\delta k^4 \ddot{\varphi} = 0, \qquad (12)$$

де $k_\delta = 12(1-\delta)/(\delta t_1^2)$ – відносне значення вагового коефіцієнта, $k_I = 1 + \frac{mR^2}{I_1}$ – відносний момент інерції системи;

Рівняння (12) являє собою однорідне диференціальне рівняння восьмого порядку з постійними коефіцієнтами, для розв'язку якого достатньо восьми крайових умов руху системи «стріла-вантаж» (7). Отже, в поставленому вигляді оптимізаційна задача кутового переміщення стріли з гнучким підвісом вантажу може бути розв'язана.

Для розв'язування отриманого диференціального рівняння (12) з урахуванням крайових умов (7) зручно використати програму Wolfram Mathematica v.8, яка дозволяє шукати символьні розв'язки диференціальних рівнянь [3].

Розв'яжемо цю задачу при наступних вихідних даних: I_1=7200 *кг·м*^{2}; *m*=600*кг*; *R*=2,5*м*; l=4*м*; *g*=9,8*м/с*^{2}; M_o=570*Нм*; $\Delta\varphi = \pi$, t_1=10с. В результаті розв'язку поставленої задачі побудовані графіки

кінематичних характеристик пуску колони і вантажу (рис.2), при різних значеннях коефіцієнта δ=(0,1; 0,9). Штриховими лініями зображені кінематичні характеристики пуску при δ=0,9, а суцільними лініями при δ=0,1.

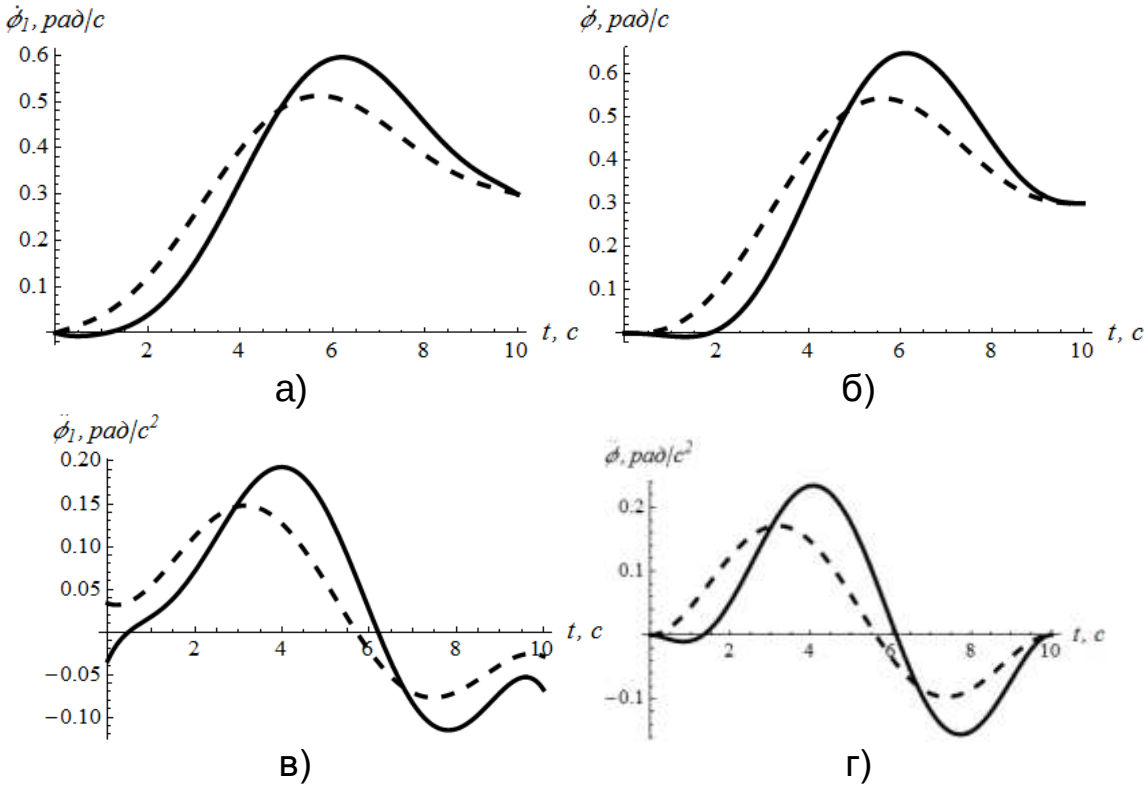
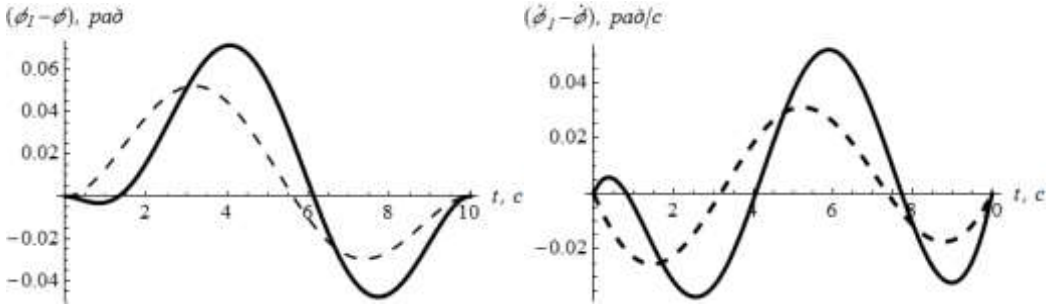


Рис. 2. Графіки функцій кутової швидкості колони (а) та вантажу (б) і кутового прискорення колони (в) та вантажу (г) при різному значенні коефіцієнта δ.

Проаналізуємо отримані графіки кінематичних характеристик при різному значенні коефіцієнта δ. З графіків функцій кутової швидкості колони і вантажу (рис. 2,а і 2,б) видно, що при значенні коефіцієнта δ=0,1 швидкість повороту колони досягає більших максимальних значень, ніж при значенні коефіцієнта δ=0,9. При цьому, максимальне відхилення координат φ_1-φ (рис. 3,а) при δ=0,1 становить 0,07 *рад*, а при δ=0,9 відповідно 0,05 *рад*. Зміна різниці кутової швидкості (рис. 3,б) також вказує на перевагу значення коефіцієнта δ=0,9.

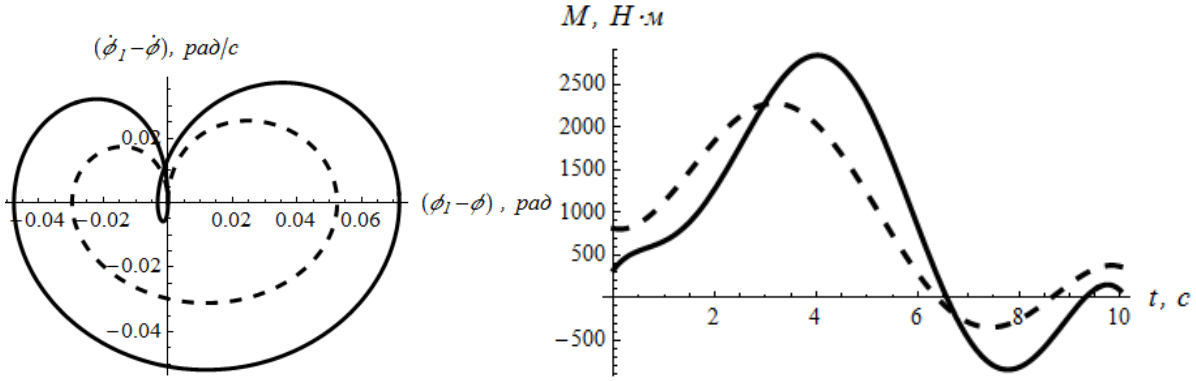
Зміна кутового прискорення (рис. 2,в і 2,г) приймає як додатні так і від'ємні значення (має місце процес гальмування колони), при значенні коефіцієнта δ=0,9 максимальне значення прискорення колони менша і становить 0,15 *рад/с*^{2}, тоді як при δ=0,1 цей показник зростає до 0,2 *рад/с*^{2}. Це дало можливість зменшити максимальне значення рушійного моменту (рис.4, б) M_{max}=2300 *Нм* при δ=0,9 в порівнянні з δ=0,1, де M_{max}=2700 *Нм*. В обох випадках

рушійний момент має коливальний характер зміни, що ускладнює його реалізацію мехатронними засобами.



а) б)

Рис. 3. Графіки кута відхилення гнучкого підвісу вантажу від вертикалі (а) та зміна різниці кутової швидкості (б) при різному значенні коефіцієнта δ.



а) б)

Рис. 4. Фазовий динамічний портрет системи «колона-вантаж» (а) та графік зміни рушійного (б) при різному значенні коефіцієнта δ.

З отриманих фазових портретів (рис.4,а) видно, що при різному значенні коефіцієнта δ, до початку усталеного руху коливання вантажу усуваються. Однак в першому випадку (δ=0,1) мають місце значно більші відхилення швидкостей та прискорень повороту колони та вантажу в порівнянні з значенням коефіцієнта δ=0,9.

Висновки

Результати проведених досліджень дають змогу зробити наступні висновки:

– проведено моделювання механізму повороту стрілового крана і на його основі побудовано математичну модель;

– обрано комплексний оптимізаційний інтегральний критерій, який дозволяє мінімізувати небажані показники руху механізму повороту;

– проаналізовано вплив вагового коефіцієнта, який входить в структуру оптимізаційного критерію, на динаміку руху механізму повороту при оптимальному керуванні.

– отримані оптимальні закони реалізуються шляхом використання автоматизованої системи керування механізмом повороту.

Список літератури

1. *Герасимяк Р.П.* Электроприводы крановых механизмов / *Герасимяк Р.П., Параил В.А*. – М.: Энергия, 1970. – 136 с.
2. *Григоров О.В*. Вантажопідйомні машини: навч. посібник / *О.В. Григоров, Н.О. Петренко.* – Х.: НТУ „ХПІ”, 2006. – 304 с.
3. *Дьяконов В.П*. Mathematica 4.1/4.2/5.0 в математических и научно-технических расчетах / *Дьяконов В. П.* – М.: СОЛОН - Пресс, 2004. – 696 с.
4. *Комаров М.С.* Динамика грузоподъемных машин / *М.С. Комаров.* – М.: Машиностроение, 1953. – 187 с.
5. *Лобов Н. А.* Динамика грузоподъемных кранов / *Н. А*. *Лобов.* – М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.
6. *Ловейкин В. С.* Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин / *Ловейкин В. С*. – К.: УМК ВО, 1990. – 168 с.
7. *Ловейкін В. С*. Оптимізація перехідних режимів руху механізму пересування візка вантажопідйомних машин / *Ловейкін В. С., Ярошенко В.Ф., Ромасевич Ю. О.* // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2007. – №59, том 2. – С. 452-460.
8. *Смехов А. А.* Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами / Смехов А. А., Ерофеев Н. И. – М.: Машиностроение, 1975. – 239 с.
9. *Эльсгольц Л. Э.* Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / *Эльсгольц Л. Э*. – М.: Наука, 1969. – 424 с.

В статье рассмотрены способы устранения колебаний груза при работе подъемно-транспортных машин. Оптимизация режима пуска механизма поворота крана производится с помощью вариационного исчисления. В работе использован интегральный комплексный критерий в виде линейной свертки двух единичных критериев, отражающих энергетические потери и действие динамических нагрузок..

Колебания груза, оптимизация, переходный режим движения.

The method of cargo oscillation reduction, during the lifting machines operation, has been considered in the article. The start-up mode of the crane swinging mechanism optimization has been carried out by means of variation calculation. This paper uses an integrated complex criterion as a linear convolution of two single criterion that show on the energy loss and effect of dynamic loads.

Fluctuations of the cargo, optimization, connecting mode of motion.