УДК 621.873
Ромасевич Ю.О., д.т.н.; Ловейкін В.С., д.т.н.
Національний університет біоресурсів і природокористування України

СИНТЕЗ КВАЗІОПТИМАЛЬНОГО ЗА ШВИДКОДІЄЮ КЕРУВАННЯ РУХОМ ВАНТАЖОПІДЙОМНОГО КРАНА. ЧАСТИНА 1

Анотація. *В роботі наведено розв'язок задачі квазіоптимального за швидкодією керування рухом крана із вантажем на гнучкому підвісі на основі її зведення до задачі математичного програмування. Для різних величин частоти власних коливань вантажу на гнучкому підвісі виконано моделювання руху крана та встановлено вплив цього параметра на тривалість руху крана. Встановлено зменшення термінальних та інтегральних небажаних динамічних показників крана при переході від оптимального до квазіоптимального за швидкодією керування його рухом.*

Ключові слова: *вантажопідйомний кран, квазіоптимальльне керування, динамічні навантаження, швидкодія.*

Аннотация. *В работе приведено решение задачи квазиоптимального по быстродействию управления движением крана с грузом на гибком подвесе на основании ее сведения к задаче математического программирования. Для разных величин частоты собственных колебаний груза на гибком подвесе выполнено моделирование движения крана и установлено влияние этого параметра на длительность движения крана. Установлено уменьшение терминальных и интегральных нежелательных динамических показателей крана при переходе от оптимального к квазиоптимальному по быстродействию управлению его движением.*

Ключевые слова*: грузоподъемный кран, квазиоптимальное управление, динамические нагрузки, быстродействие.*

Abstrakt. *Das Papier zeigt die Lösung des Problems der quasi-optimalen Zeitsteuerung durch den Kran mit Ladungsbewegung auf einer flexiblen Aufhängung auf der Grundlage seiner Aufmerksamkeit auf das Problem der mathematischen Programmierung. Für verschiedene Werte der Frequenz der Eigenschwingungen der Last auf einer flexiblen Aufhängung simuliert Kranbewegungen und dem Einfluß dieser Parameter auf die Länge des Kranbewegung gesetzt. Der Rückgang unerwünschte Terminal und integrierte dynamische Leistung des Krans während des Übergangs von optimal auf seine quasi-optimale Performance Motion Control.*

Stichwort: *Kran, quasi eine optimale Steuerung, dynamische Last, Geschwindigkeit.*

Постановка проблеми.

Велика кількість вантажопідйомних кранів працюють в умовах інтенсивних вантажопотоків. До таких кранів, наприклад, можна віднести портові перевантажувачі. Зменшення тривалості циклу переміщення вантажів для таких кранів є бажаним. Тому для керування рухом кранами доцільно використовувати оптимальне за швидкодією керування, яке, як відомо, має релейний вигляд. Це викликає додаткові динамічні навантаження і, як наслідок, знижує надійність вантажопідйомної машини. Для зменшення динамічних зусиль при одночасно високій продуктивності роботи крана необхідно синтезувати квазіоптимальне керування його рухом.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Для знаходження оптимального за швидкодією керування рухом крана з вантажем на гнучкому підвісі широке використання отримав принцип максимуму [1-6], який дає лише якісну інформацію про вид функції керування. Для визначення моментів перемикання керуючого впливу (переходу від максимального керування до мінімального) в роботах Герасіміяка Р.П. [1] та його учнів [2-4] розв'язані системи трансцендентних алгебраїчних рівнянь. В роботі Григорова О.В. [5], крім того, враховано обмеження на швидкість і прискорення крана, а також відхилення каната з вантажем від вертикалі. Для визначення моментів перемикання керування в роботі [5] проведено аналіз фазових траєкторій, що описують коливний рух вантажу на канаті.

В роботі [7] досліджено динамічні навантаження, що виникають в пружних елементах механізму повороту баштового вантажопідйомного крана при реалізації оптимального за швидкодією розгону системи. На основі проведених досліджень запропоновано змінювати керуючу функцію (приводний момент) по експоненті і встановлено вплив постійної часу експоненти на коефіцієнт динамічності механізму. Такий підхід дозволяє значно знизити динамічні навантаження в кранових механізмах.

Більшість робіт закордонних дослідників, у яких розв'язані задачі синтезу оптимального керування рухом механізмів вантажопідйомних кранів, використовують методи синтезу лінійно-квадратичних регуляторів [8-10]. Суть такого підходу полягає в тому, що систему "кран-вантаж" представляють у вигляді об'єкта регулювання, в якому необхідно забезпечити відсутність коливань вантажу відносно точки його підвісу. Ці дослідження дозволили отримати оптимальні закони регулювання руху механізму пересування крана.

У розглянутих роботах відсутній розв'язок задачі синтезу квазіоптимального програмного керування, при якому вдається досягти значної швидкості руху системи "кран-вантаж" з одночасним зменшенням динамічних навантажень в елементах крана.

Постановка мети і задач дослідження.

Метою дослідження є синтез та дослідження квазіотимального за швидкодією керування рухом крана з вантажем на гнучкому підвісі. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі: 1) виконати синтез квазіоптимального за швидкодією керування рухом крана з вантажем на гнучкому підвісі; 2) дослідити динаміку руху крана з вантажем на гнучкому підвісі при реалізації квазіоптимального за швидкодією керування.

Виклад основного матеріалу.

Для досліджень приймемо двомасову динамічну модель крана з вантажем на гнучкому підвісі, яка зображена на рис. 1.

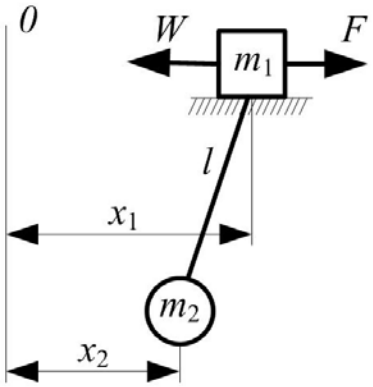


Рисунок 1 – Динамічна двомасова модель системи "кран-вантаж"

Модель вибрана через те, що дозволяє провести дослідження низькочастотних коливань вантажу на гнучкому підвісі без врахування високочастотних коливань кранової металоконструкції і його привода. Модель, яка зображена на рис. 1, часто використовується в динамічних розрахунках кранів.

Після лінеаризації диференціальних рівнянь руху динамічної системи, яка зображена на рис. 1, вони набудуть такого вигляду:

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1 + m_2\ddot{x}_2 = F - W sign\dot{x}_1; \\ \ddot{x}_2 + \dfrac{g}{l}(x_2 - x_1) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де m_1 – приведена до поступального руху маса крана і його приводу; m_2 – маса вантажу; x_1, x_2 – координати центрів мас відповідно крана і вантажу; g – прискорення вільного падіння; l – довжина гнучкого підвісу, F – тягове або гальмівне зусилля, що діє на кран; W – приведена сила опору переміщенню крана. Будемо вважати, що при переміщенні крана протягом розгону (гальмування) швидкість крана не змінює свій знак, тобто $sign\dot{x}_1 = 1$.

Для подальшого розгляду приймемо оптимальне за швидкодією керування рухом крана, яке знайдено в роботах [1, 3, 5, 6]:

$$F_{\text{opt}} = \begin{cases} F_{\max}, \ 0 \le t < \tilde{t}_1; \\ F_{\min}, \ \tilde{t}_1 \le t < \tilde{t}_1 + \tilde{t}_2; \\ F_{\max}, \ \tilde{t}_1 + \tilde{t}_2 \le t < \tilde{t}_1 + \tilde{t}_2 + \tilde{t}_3, \end{cases} \quad (2)$$

де $\tilde{t}_1$, $\tilde{t}_2$, $\tilde{t}_3$ – тривалість відповідно першого, другого і третього етапів розгону крана при оптимальному керуванні; F_{max} та F_{min} – максимальне та мінімальне значення приводного зусилля, яке визначається перевантажувальною здатністю електроприводу та характеристиками силового частотного перетворювача, що виступає у ролі джерела його живлення.

Сутність керування рухом системою "кран-вантаж" полягає у тому, що функція керування (2) має розриви – стрибкоподібні переходи від максимального до мінімального значення і навпаки. Це призводить до виникнення навантажень у елементах крана (валах, муфтах, металоконструкції) і викликає підвищенні енергозатрати. Крім того, оскільки значення $F_{\min}$ є від'ємним, то на другому етапі розгону системи напрямок потоку енергії змінюється на протилежний – механічна енергія системи перетворюється у електричну і віддається у мережу. Для практичної реалізації цієї можливості сучасні керовані електричні приводи обладнують зворотнім інвертором, який ускладнює електропривод крана та підвищує його вартість.

Для усунення цього недоліку перейдемо до квазіоптимального за швидкодією керування, яке описується наступною залежністю:

$$F_{\text{quasi-opt}} = \begin{cases} F_{\max}, \ 0 \le t < t_1; \\ 0, \ t_1 \le t < t_1 + t_2; \\ F_{\max}, \ t_1 + t_2 \le t < t_1 + t_2 + t_3, \end{cases} \quad (3)$$

де t_1, t_2 та t_3 – тривалість відповідно першого, другого і третього етапів розгону крана при квазіоптимальному керуванні. Запропоноване керування не має вказаного недоліку: на другому етапі розгону системи електродвигун вимкнений.

Квазіоптимальне керування рухом крана повинно усувати коливання вантажу на гнучкому підвісі в момент виходу крана на номінальну швидкість, що відповідає наступним рівнянням:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t_1 + t_2 + t_3) = v_{ном}; \\ \ddot{x}_2(t_1 + t_2 + t_3) = \dddot{x}_2(t_1 + t_2 + t_3) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

де $v_{ном}$ – номінальна швидкість руху крана з вантажем в кінці розгону. Для знаходження швидкості руху крана, а також прискорення і ривка вантажу в момент часу $t_1+t_2+t_3$ необхідно три рази проінтегрувати систему диференціальних рівнянь (1) для кожного "куска" функції $F_{\text{quasi-opt}}$. При цьому початкові умови для першого етапу руху системи "кран-вантаж", який відповідає першому "куску" функції $F_{\text{quasi-opt}}$,

приймаються рівними нулю (розглядається рух системи "кран-вантаж" зі стану спокою). В загальному випадку для всіх трьох етапів руху динамічної системи "кран-вантаж" початкові умови руху мас поточного етапу є кінцевими умовами руху мас на попередньому етапі. Не будемо наводити результати описаних розрахунків оскільки вони мають значний об'єм.

В результаті проведених розрахунків отримані вирази швидкості руху крана, а також прискорення і ривка вантажу в момент часу $t_1+t_2+t_3$ і сформована система рівнянь (4). Таким чином, знайшовши невідомі значення t_1, t_2 і t_3 з системи трансцендентних рівнянь (4), можна забезпечити усунення коливань вантажу у кінці розгону крана. Однак, з поміж усіх розв'язків необхідно вибрати один – той, що забезпечує мінімальну тривалість розгону крана. У результаті ми прийшли до задачі математичного програмування – необхідно знайти мінімум функції:

$$\sum_{i=1}^{3} t_i \to \min \tag{5}$$

при виконанні обмежень у вигляді рівностей (4) та нерівностей:

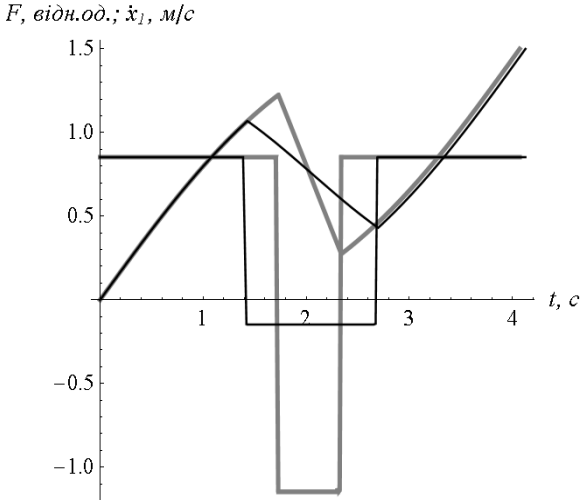
$$t_i \geq 0,\ i = 1,\ 2,\ 3. \tag{6}$$

Зазначимо, що цю задачу на умовний мінімум можна звести до задачі дослідження на мінімум наступної функції:

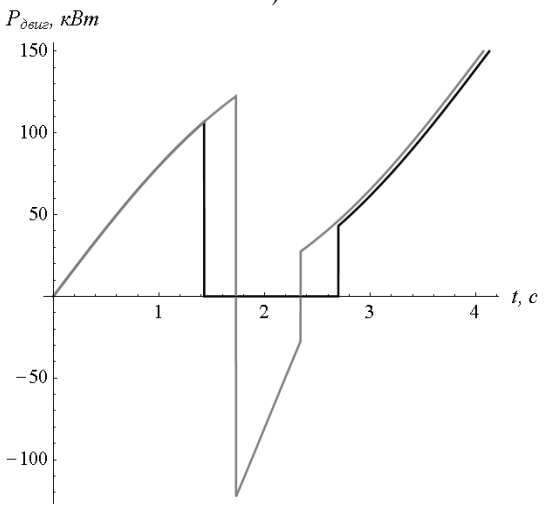
$$\sum_{i=1}^{3} t_i^2 + (\dot{x}_1(t_1+t_2+t_3) - v_{ном})^2 + \ddot{x}^2(t_1+t_2+t_3) + \dddot{x}_2^2(t_1+t_2+t_3) \to \min. \tag{7}$$

без врахування обмежень (4). Задачу (4)-(6) або (7) зручно розв'язати за допомогою методу рою часточок [11], оскільки він дозволяє знайти глобальний екстремум функції при врахуванні обмежень.

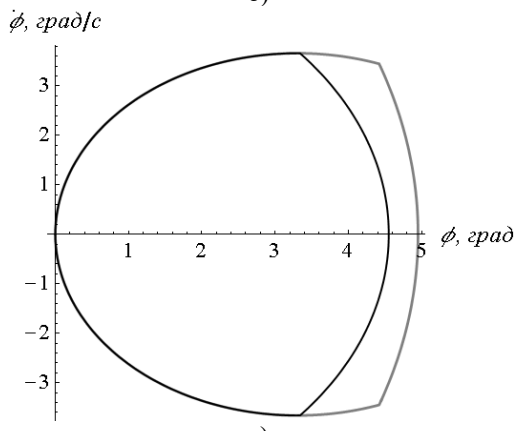
Для ілюстрації динаміки руху системи протягом розгону наведемо графіки функцій (рис. 2), які були отримані в результаті розв'язання задачі (4)-(6) при наступних параметрах: m_1=100000 кг; m_2=50000 кг; l=12 м; $v_{ном}$=1,5 м/с; W=14700 Н; $F_{\max}$=100000 Н. На рис. 2 графіки сірого кольору відповідають відомому оптимальному за швидкодією керуванню, а чорного – знайденому квазіоптимальному керуванню рухом крана. Динамічна складова зусилля, що діє на кран, на рис. 2 показано у одиницях від $F_{\max}$. З рис. 2 випливає, що на другому етапі руху системи на кран діє лише зусилля W (двигун при цьому вимкнений). Однією з переваг квазіоптимального керування є відсутність зміни знака функції потужності (рис. 2, б). Це дозволяє «пом'якшити» динамічну на енергетичну напруженість роботи системи протягом пуску (або гальмування). З рис. 2, в випливає і те, що максимальне відхилення канату з вантажем від вертикалі при квазіоптимальному керуванні зменшується.



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Графіки руху системи: а) швидкість та динамічна складова рушійного зусилля, що діє на кран; б) фазовий портрет коливань вантажу на гнучкому підвісі; в) потужність приводного двигуна

З рис. 2, а видно, що квазіоптимальне керування викликає незначне збільшення тривалості розгону. Для впливу головного параметра системи – частоти власних коливань вантажу на гнучкому підвісі λ – на збільшення тривалості перехідного процесу руху крана ΔT були проведені чисельні розрахунки, результати яких подані у вигляді графіка (рис. 3).

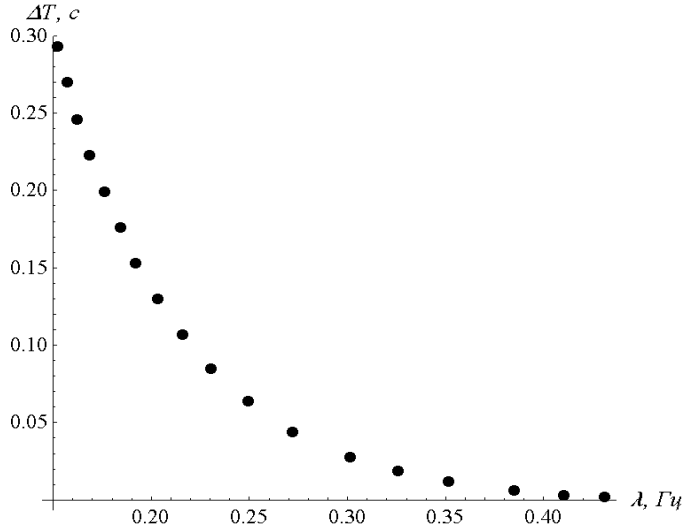


Рисунок 3 – Графік залежності ΔT від λ

З рис. 3 випливає, що при значних λ різниця між тривалістю розгону при оптимальному та квазіоптимальному керуванні практично відсутня. Наприклад, при параметрах системи m_1=100000 кг, m_2=50000 кг та l=2 м велична ΔT рівна лише 0,002 с. Однак, зі зменшенням λ тривалість руху системи при квазіоптимальному керуванні зростає.

Для оцінки динамічної навантаженості металоконструкції крана при дії квазіоптимального за швидкодією керування використаємо у дослідженні тримасову динамічну модель крана, яка враховує пружні поперечні коливання мостових балок крана (рис. 4).

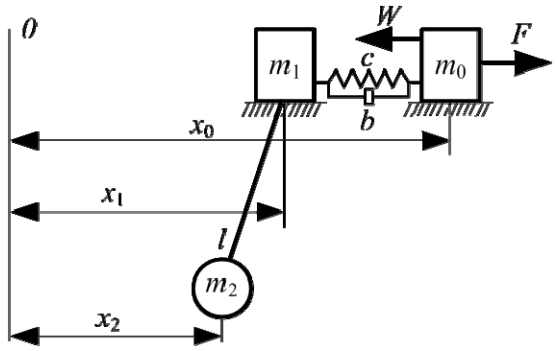


Рисунок 4 – Динамічна тримасова модель системи "кран-вантаж"

На рис. 4 введені наступні позначення: c – зведене значення пружності кранових балок в поперечному напрямку; b – зведене значення коефіцієнта дисипації кранових балок в поперечному напрямку; m_0, m_1, m_2 – зведені до поступального руху маси крана, кранового візка і вантажу відповідно; x_0, x_1, x_2 – узагальнені координати відповідних мас. Інші позначення аналогічні прийнятим на рис. 1. Рух динамічної моделі, яка зображена на рис. 4, описується системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} m_0\ddot{x}_0 + c(x_0 - x_1) + b(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) = F - Wsign\dot{x}_0; \\ m_1\ddot{x}_1 + m_2\dfrac{g}{l}(x_1 - x_2) = c(x_0 - x_1) + b(\dot{x}_0 - \dot{x}_1); \\ \ddot{x}_2 + \dfrac{g}{l}(x_2 - x_1) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Розв’язок системи диференціальних рівнянь (8) при нульових початкових умовах та за умови, що $F=F_{\text{quasi-opt}}$ дозволив побудувати графіки функцій зусиль у кранових балках. Графіки, що зображені на рис. 5, побудований при тих же параметрах, що і графіки на рис. 2. Інші параметри прийнятими такими: b=1,1·10^4 Н·с/м, c=6,9·10^7 Н/м, m_0=3·10^4 кг, m_1=7·10^4 кг. Графік сірого кольору відповідає оптимальному керуванню (2), а чорного – квазіоптимальному керуванню (3).

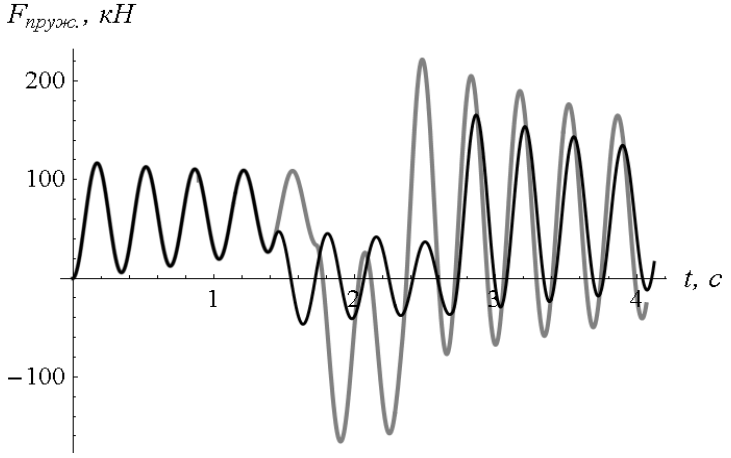


Рисунок 5 – Графіки зусиль у кранових балках при оптимальному та квазіоптимальному за швидкодією керуванні

З рис. 5, видно, що дія квазіоптимального керування дозволяє зменшити максимальні зусилля у кранових балках у 1,34 рази, а для від’ємних значень кранових балок у 3,55 рази. Крім того, було визначено показник відношень середньоквадратичних значень зусиль у балках при різних керуваннях:

$$I = \sqrt{\frac{\frac{1}{\tilde{t}_1+\tilde{t}_2+\tilde{t}_3}\int_0^{\tilde{t}_1+\tilde{t}_2+\tilde{t}_3}(F_{бал}^{optimal})^2\,dt}{\frac{1}{t_1+t_2+t_3}\int_0^{t_1+t_2+t_3}(F_{бал}^{quasi-optimal})^2\,dt}}, \quad (9)$$

де $F_{бал}^{optimal}$ и $F_{бал}^{quasi\text{-}optimal}$ – функції, які описують зміну зусиль в кранових балках при оптимальному (2) та квазіоптимальному керуванні (3) відповідно. Показник (9) для динамічної системи, яка використана у рамках даного дослідження, рівний 1,94. Ці данні підтверджують попередньо зроблений висновок стосовно значного зниження рівня динамічної навантаженості кранової металоконструкції при дії квазіоптимального за швидкодією керуванні рухом крана.

Висновки

В роботі синтезовано квазіоптимальний за швидкодією закон керування рухом крана із вантажем на гнучкому підвісі, який дозволяє у 1,34-3,55 рази зменшити динамічні навантаження, які виникають у крановій металоконструкції. При цьому потужність при реалізації квазіоптимального керування не змінює свій знак. Тривалість розгону крана при знайденому керуванні рухом крана лише на 0,002-0,293 с більша, ніж при оптимальному керуванні (при зміні частоти власних коливань вантажу відносно точки підвісу у межах 0,15-0,43 Гц). Знайдені результати доцільно використовувати для розробки систем керування рухом мостових та козлових кранів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Герасимяк Р.П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р.П. Герасимяк, В.А. Лещёв. – О .: СМИЛ, 2008. – 192 с.
2. Логвиненко К.С. Підвищення якості перехідних процесів складних електромеханічних систем кранових механізмів: автореф дис. на здоб. ступ. канд. техн. наук: спец. 05.09.03 „Електротехнічні комплекси та системи” / К.С. Логвиненко. – О., 2003. – 24 с.
3. 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. – О., 2000. – 116 с.
4. Бушер В.В. Асинхронный електропривод подъемно-транспортных механизмов с микропроцессорым управлением: автореф. дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук: спец. 05.09.03

„Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование” / В.В. Бушер. – О., 1993. – 16 с.
5. 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.
6. Смехов А.А. Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами / А.А. Смехов, Н.И. Ерофеев. – М.: Машиностроение, 1975. – 239 с.
7. Найденко Е.В. Управление асинхронным электроприводом механизма поворота с подвешенным грузом: 05.09.03 / Найденко Елена Валерьевна. – О., 2009. – 149 с.
8. Ahmad M.A. Optimal tracking with sway suppression control for a gantry crane system / M.A. Ahmad, R.M.T. Raja Ismail, M.S. Ramli, N.M. Abdul Ghani, M.A. Zawawi // European journal of scientific research. – 2009. – №.4. – Vol. 33. – P. 630-641.
9. Miyata N. Development of feedforward anti-sway control for highly efficient and safety crane operation / N. Miyata, T. Ukita, M. Nishioka, T. Monzen, T. Toyohara. // Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review. – 2001. – Vol. 38 –№ 2. – P. 73-77.
10. Yoshiaki O. Development of vibration control system on container crane girder / O. Yoshiaki, S. Kono, K. Uchida, T. Fujii, T. Monzen. // Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review. – 1997. – Vol. 34. – № 3. – pp. 105-109.
11. Kennedy J. Particle swarm optimization / J. Kennedy, R.C. Eberhart // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. – 1995. – P. 1942–1948.