

УДК 621.873

**ЗНИЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ  
ВАНТАЖОПІДЙОМНОГО КРАНА ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО  
ЗА ШВИДКОДІЄЮ КЕРУВАННЯ. Частина II**

**©Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О.**

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

**Інформація про авторів:**

**Ловейкін Вячеслав Сергійович:** ORCID: 0000-0003-4259-3900; vloveykin@mail.ru; доктор технічних наук; завідувач кафедри конструювання машин і обладнання; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус №11, вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна.

**Ромасевич Юрій Олександрович:** ORCID: 0000-0001-5069-5929; d.um@mail.ru; доктор технічних наук; доцент кафедри конструювання машин і обладнання; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус №11, вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна.

У статті досліджено вплив параметрів функції квазіоптимального керування та параметрів динамічної системи „кран-вантаж” на динамічні навантаження у елементах крана.

Використано тримасову динамічну модель, яка дозволила визначити навантаження у металоконструкції крана при реалізації оптимального та квазіоптимального за швидкодією керування його рухом. Оцінка динаміки руху проведена за показником максимального значення зусилля у крановій металоконструкції.

Встановлено, що зменшення максимального навантаження у металоконструкції відбувається під час другої зміни знака функції керування. Значний вплив на зменшення динамічних навантажень має тривалість переходу від максимального значення керування до нуля.

На основі проведених досліджень визначено, що раціональне значення тривалості зміни зусилля від максимального значення до нуля знаходиться на рівні 0,1 секунд.

**Ключові слова:** кран; моделювання; динаміка; керування; рух.

*Ловейкин В. С., Ромасевич Ю. А.* «Обоснование положений концепции динамической оптимизации режимов движения грузоподъемных и транспортирующих машин».

В статье исследовано влияние параметров функции квазиоптимального управления и параметров динамической системы „кран-груз” на динамические нагрузки в элементах крана.

Использована тримассовая динамическую модель, которая позволила определить нагрузки в металлоконструкции крана при реализации оптимального и квазиоптимального по быстродействию управления его движением. Оценка динамики движения проведена по показателю максимального значения усилия в крановой металлоконструкции.

Установлено, что уменьшение максимальной нагрузки в металлоконструкции происходит во время второй смены знака функции управления. Значительное влияние на уменьшение динамических нагрузок имеет продолжительность перехода от максимального значения управления к нулю.

На основе проведенных исследований установлено, что рациональное значение продолжительности изменения усилия от максимального значения до нуля находится на уровне 0,1 секунд.

**Ключевые слова:** кран; моделирование; динамика; управление; движение.

*Loveikin V., Romasevych Y.* “The concept points substantiation of lifting and conveying machines dynamic driving modes optimization”.

The paper studied the effect of quasioptimal control function parameters and parameters of the dynamic system „crane-cargo” on the dynamic loads in the crane elements.

The three-mass dynamic model has been used. It allowed determine the load in the metalware during the realization of optimal and quasioptimal control of its movement. The estimation of dynamics carried out in terms of maximum effort in crane metalware.

It has been found that the decrease in the maximum metalware loading occurs during the second sign change of control function. The duration of the transition from the maximum control value to zero significant impact on the dynamic loads decreasing.

Based on these studies have been found rational value of changes duration from a maximum force to zero. The duration is at a level of 0,1 seconds.

**Key words:** crane; simulation; dynamic; control; movement.

### **1. Постановка проблеми**

Одним із способів підвищення енергоефективності, довговічності та продуктивності роботи вантажопідйомних кранів є оптимізація його роботи. Динаміка роботи крана у значній мірі залежить від того, який оптимізаційний критерій обрано у розрахунках. У випадку використання критерію швидкодії у елементах крана виникають значні динамічні навантаження. Знайдений у першій частині роботи квазіоптимальний закон руху крана шляхом збільшення плавності зміни функції керування не супроводжується значними динамічними навантаженнями. Однак, недослідженим залишається вплив параметрів функції керування на виникнення та еволюцію динамічних процесів у елементах вантажопідйомного крана.

### **2. Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Недоліком оптимального за швидкістю керування рухом крана із вантажем на гнучкому підвісі є розривність функції керування. Її реалізація, особливо для потужних електричних кранових двигунів, є складною задачею (свою роль тут відіграє електромагнітна інерційність приводу [1]).

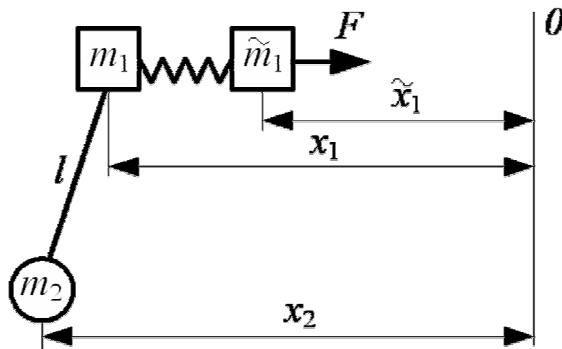
Для забезпечення реалізації керування на практиці переходять до квазіоптимального керування [2-4]. При цьому величина критерію оптимізації незначно відхиляється від екстремального значення. Квазіоптимальне керування дозволяє зменшити коефіцієнт динамічності елементів вантажопідйомного крана [5].

### **3. Постановка мети та завдань дослідження**

Метою другої частини роботи є дослідження динаміки руху крана при квазіоптимальному за швидкістю керуванні його рухом. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: 1) обрати для проведення досліджень математичну модель руху крана, яка б враховувала високочастотні коливання його елементів; 2) провести моделювання режиму розгону крана та визначити найбільші динамічні навантаження при різних параметрах функції квазіоптимального керування; 3) провести аналіз результатів та вказати подальші напрямки досліджень.

**Піднімально-транспортні машини****4. Виклад основного матеріалу**

Для проведення досліджень у другій частині роботи прийемо три масову динамічну модель крана із вантажем на гнучкому підвісі (рис. 1).



**Рис. 1** – Розрахункова тримасова модель системи „кран-вантаж”

Модель, яка зображена на рис. 1 знайшла поширення для досліджень динамічних процесів, які відбуваються у елементах крана [6]. Математична модель, яка відповідає динамічній моделі, що зображена на рис. 1, записується у такому вигляді:

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

де  $m_1$  – приведена маса, яка зосереджена у місці прикладання до конструкції ваги вантажу;  $\tilde{m}_1$  – приведена маса конструкції крана, яка не бере участі у коливальному процесі по відношенню до ходових частин крана (вважаємо її зосередженою в ходових частинах);  $m_2$  – маса вантажу;  $x_1, \tilde{x}_1, x_2$  – координати центрів відповідних мас;  $c$  – приведена жорсткість металоконструкції крана у горизонтальній площині;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $l$  – довжина гнучкого підвісу,  $F$  – тягове або гальмівне зусилля приводу;  $W$  – приведена сила опору переміщенню крана. Як і для першої частини дослідження, прийемо припущення, що при переміщенні крана протягом розгону він не змінює знак своєї швидкості, тобто  $\text{sign} \dot{\tilde{x}}_1 = 1$ .

Нагадаємо, що приводне зусилля  $F$  змінюється у відповідності до квазіоптимального за швидкодією закону руху крана, який знайдено у першій частині статті:

$$F_{\text{opt}}^* = \begin{cases} -\frac{F_{\text{max}} t(t - 2\Delta t)}{\Delta t^2}, & 0 \leq t < \Delta t; \\ F_{\text{max}}, & \Delta t \leq t < t_1 - \Delta t; \\ -\frac{F_{\text{max}} (t - t_1)(t - t_1 + 2\Delta t)}{\Delta t^2}, & t_1 - \Delta t \leq t < t_1; \\ \frac{F_{\text{max}} (t - t_1)(t - t_1 - 2\Delta t)}{\Delta t^2}, & t_1 \leq t < t_1 + \Delta t; \\ -F_{\text{max}}, & t_1 + \Delta t \leq t < t_1 + t_2 - \Delta t; \\ \frac{F_{\text{max}} (t - t_1 - t_2)(t - t_1 - t_2 + 2\Delta t)}{\Delta t^2}, & t_1 + t_2 - \Delta t \leq t < t_1 + t_2; \\ -\frac{F_{\text{max}} (t - t_1 - t_2)(t - t_1 - t_2 - 2\Delta t)}{\Delta t^2}, & t_1 + t_2 \leq t < t_1 + t_2 + \Delta t; \\ F_{\text{max}}, & t_1 + t_2 + \Delta t \leq t < t_1 + t_2 + t_3 - \Delta t; \\ -\frac{F_{\text{max}} (t - t_1 - t_2 - t_3)(t - t_1 - t_2 - t_3 + 2\Delta t)}{\Delta t^2}, & t_1 + t_2 + t_3 - \Delta t \leq t < t_1 + t_2 + t_3, \end{cases} \quad (2)$$

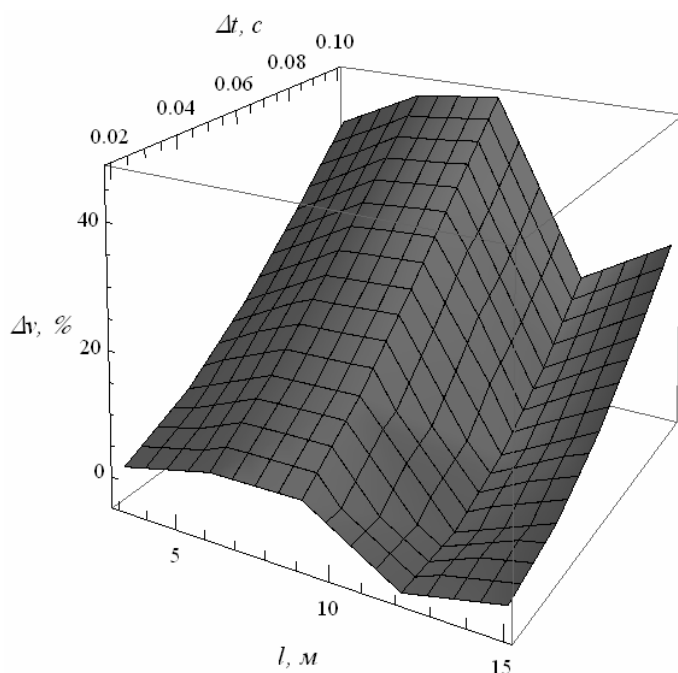
де  $\Delta t$  – тривалість переходів від максимального значення  $F_{\text{max}}$  до нуля.

Для оцінки динамічної навантаженості конструкції крана введемо у розгляд показник максимального пружного зусилля, яке визначається наступним чином:

**Піднімально-транспортні машини**

$$F_{\max}^{\text{пружн}} = \max(c(x_1 - \tilde{x}_1)). \quad (3)$$

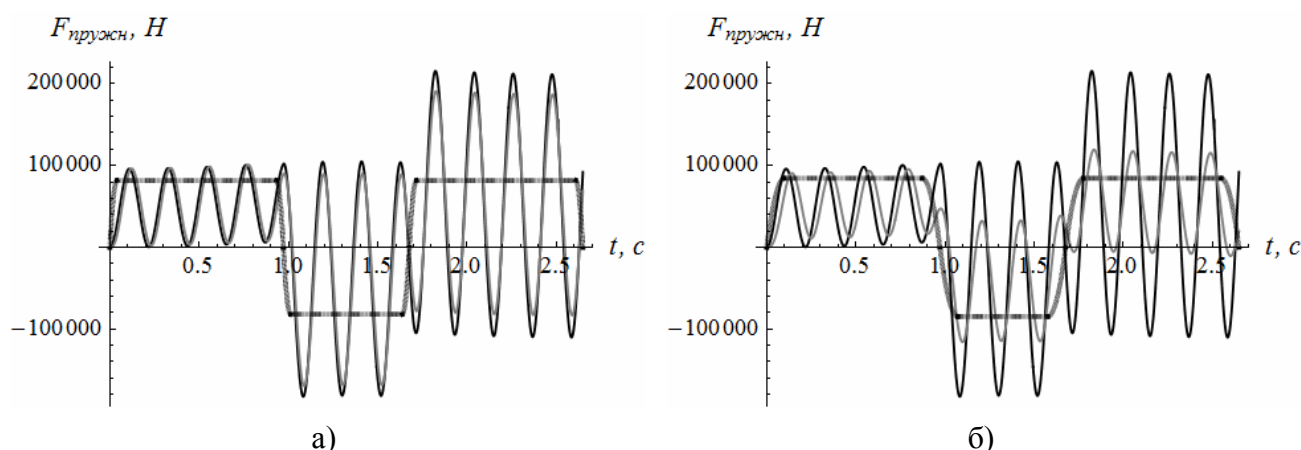
Для оцінки впливу значення  $\Delta t$  на величини  $F_{\max}^{\text{пружн}}$  при оптимальному [7] та квазіоптимальному (2) керуванні було проведено моделювання режиму пуску крана із вантажем на гнучкому підвісі. Моделювання було проведено для різних довжин гнучкого підвісу. У результаті отримано масив даних, який у графічному вигляді представлено на рис. 2.



**Рис. 2** – Поверхня, які відповідає процентному зменшенню показника  $F_{\max}^{\text{пружн}}$  при переході від оптимального до квазіоптимального керування рухом крана для різних значень величини  $\Delta t$  та довжини канату  $l$

З рис. 2 видно, що зі збільшенням величини  $\Delta t$  динамічні навантаження зменшуються. Крім того, значними вплив на величину  $F_{\max}^{\text{пружн}}$  має довжина гнучкого підвісу: вона визначає частоту власних коливань вантажу на гнучкому підвісі, яка, я у свою чергу, впливає на тривалість розгону та гальмування.

Для того, щоб оцінити еволюцію динамічних процесів у часі наведемо графічні залежності (рис. 3). На рис. 3 графік, що зображений сірою лінією, відповідає пружному зусиллю  $F_{\max}^{\text{пружн}}$  при оптимальному за швидкодією керуванню; сірий графік відповідає зусиллю  $F_{\max}^{\text{пружн}}$  при квазіоптимальному керуванні; сіра товста лінія зображає зусилля приводу при квазіоптимальному керуванні.



**Рис 3** – Графіки динаміки руху крана при оптимальному та квазіоптимальному керуванні для  $l=9$  м: а) при  $\Delta t=0,04$  с; б) при  $\Delta t=0,1$  с

Аналіз графіків, які показані на рис. 3 дає змогу встановити, що найбільше зменшення навантаження відбувається під час другої зміни знака функції керування, тобто при переході від від'ємного керування на другому етапі до додатного керування на третьому (останньому)

## Піднімально-транспортні машини

етапі розгону крана із вантажем на гнучкому підвісі. Крім того, незначна величина  $\Delta t$  практично не впливає на зменшення динамічних навантажень.

### Висновки

На основі проведених досліджень встановлено, що при збільшенні плавності функції керування значно зменшуються динамічні навантаження у крановій конструкції. Як показали попередні дослідження, при цьому незначно зростає максимальне зусилля приводу механізму переміщення крана. Наприклад, збільшення максимального приводного зусилля лише на 4,1 % дозволяє реалізувати квазіоптимальне керування рухом крана, при якому максимальне зусилля у конструкції крана зменшується на 17,7-47,6 %. Подальше збільшення величини  $\Delta t$  викликає зменшення динамічних навантажень. Однак, при цьому якість досягнення заданих кінцевих умов руху крана знижується (коливання вантажу не усуваються у повній мірі, кран не досягає заданої усталеної швидкості руху). Тому раціональне значення тривалості зміни зусилля від максимального значення до нуля (тобто величини  $\Delta t$ ) знаходиться на рівні 0,1 секунд.

### Список використаних джерел:

1. Рудаков В. В. Системы управления электроприводов. (Прямое управление моментом в электроприводе переменного тока) / В. В. Рудаков, А. Е. Козьярук. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. гос. горного ин-та, 2007. – 75 с.
2. Макаров С. В. Квазиоптимальное управление электроприводами порталного манипулятора : автореф. ... канд. техн. наук: спец. 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)» / С. В. Макаров. – Самара, 2008. – 23 с.
3. Нейдорф Р. А. Композиционный синтез квазиоптимальных по быстродействию систем управления высокого порядка / Р. А. Нейдорф, Н. Н.Чан // Вестник ДГТУ. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2007. – Т. 7. – № 4 (35).– С. 353-359.
4. Ловчаков В. И. Синтез квазиоптимальных по быстродействию систем управления высокого порядка / В. И. Ловчаков, А. М. Сапожников // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2012. – Вып 2. – С. 136-147.
5. Найденко Е. В. Управление асинхронным электроприводом механизма поворота с подвешенным грузом : дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Найденко Елена Валерьевна. – Одесса, 2009. – 149 с.
6. Гохберг М. М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин / М. М. Гохберг. – М. : Машиностроение, 1969. – 520 с.
7. Оптимальне керування підйомно-транспортними машинами (Optimale Steuerung für Hebe-und Fördermaschinen): навч. посіб / О. В. Григоров, В. П. Свіргун, Г. О. Аніщенко, В. В. Стрижак, А. О. Окунь. – Харків : НТУ «ХП», 2013. – 240 с. – нім. мовою.

### References

1. Rudakov, V & Kozyaruk, A 2007, *Sistemy upravleniya elektroprivodov. (Pryamoye upravleniye momentom v elektroprivode peremennogo toka)*, Izdatelstvovo Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo gornogo instituta, Sankt-Peterburg.
2. Makarov, S 2008, 'Kvaziopitmalnoye upravleniye elektroprivodami portalnogo manipulyatora', Kand.tekh.n. abstract, Samarskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet Samara.
3. Neydorf, R & Chan, N 2007, 'Kompozitsionnyy sintez kvaziopitmalnykh po bystrodeystviyu sistem upravleniya vysokogo poryadka', *Vestnik DGTU. Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, vol. 7, no. 4(35), pp. 353 – 359.
4. Lovchakov, V & Sapozhnikov, A 2012, 'Sintez kvaziopitmalnykh po bystrodeystviyu sistem upravleniya vysokogo poryadka', *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskkiye nauki*, iss. 2, pp. 136 – 147.
5. Naydenko, E 2009, 'Upravlenie asinkhronnym elektroprivodom mekhanizma povorota s podveshennym gruzom', Kand.tekh.n. thesis, Odesskiy natsionalnyy politekhnicheskiiy universitet, Odessa.
6. Gokhberg, M 1969, *Metallicheskkiye konstruktssii pod'yemno-transportnykh mashin*, Mashinostroyeniye, Moskva.
7. Melnikova L 2000, 'Avtomatizatsiya tekhnologicheskogo protsessa peremeshcheniya mekhanizma s podveshennym gruzom sredstvami mikroprotsessornogo upravleniya', Kand.tekh.n. thesis, Odesskiy natsionalnyy politekhnicheskiiy universitet, Odessa.

Стаття надійшла до редакції 7 листопада 2016 р.