

УДК 621.873

**ЗНИЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ  
ВАНТАЖОПІДЙОМНОГО КРАНА ПРИ КВАЗІОПТИМАЛЬНОМУ  
ЗА ШВИДКОДІЄЮ КЕРУВАННІ ЙОГО РУХОМ. Частина I**

**©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.

Побудовано квазіоптимальне за швидкодією керування рухом крана із вантажем на гнучкому підвісі.

На основі аналізу недоліків оптимального за швидкодією керування запропоновано функцію, яка дозволяє квазіоптимально виконувати керування рухом крана із вантажем на гнучкому підвісі. При переході до нової функції керування встановлено, що кінцеві умови руху системи будуть відхилятися від заданих. Запропоновано корекцію максимальної величини функції керування, яка полягає у рівності імпульсів при оптимальному та квазіоптимальному керуванні рухом.

За допомогою показників відносного відхилення швидкості руху крана у кінці розгону від усталеного (заданого) значення та амплітуди залишкових коливань вантажу досліджено якість досягнення заданого кінцевого стану системи та вплив на ці показники тривалості наростання (спадання) функції керування від нуля до максимального (мінімального) значення.

**Ключові слова:** оптимізація; динаміка; вантаж; керування.

*Ловейкин В. С., Ромасевич Ю. А.* «Снижение динамической нагруженности элементов грузоподъемных кранов при квазиоптимальном по быстродействию управлению его движением. Часть I».

Построено квазиоптимальное по быстродействию управление движением крана с грузом на гибком подвесе.

На основе анализа недостатков оптимального по быстродействию управления предложена функция, которая позволяет квазиоптимально выполнять управление движением крана с грузом на гибком подвесе. При переходе к новой функции управления установлено, что конечные условия движения системы будут отклоняться от заданных. Предложена коррекция максимальной величины функции управления, которая заключается в равенстве импульсов при оптимальном и квазиоптимальном управлении движением.

С помощью показателей относительного отклонения скорости движения крана в конце разгона от устоявшегося (заданного) значения и амплитуды остаточных колебаний

груза исследовано качество достижения заданного конечного состояния системы и влияние на эти показатели продолжительности нарастания (убывания) функции управления от нуля до максимального (минимального) значения.

**Ключевые слова:** оптимизация; динамика; груз; управление.

*Loveikin V., Romasevych Y.* “Decrease of dynamic loaded in the hoisting cranes elements during quasioptimality time control of its movement. Part I”.

The quasioptimal movement speed control of the crane with cargo on a flexible suspension have been built.

Based on the gap analysis of optimal control have been suggested function that allows to perform quasioptimal motion control crane with a load on a flexible suspension. In the transition to the new control have been found that the final system’s motion terms will deviate from the set. A correction of the maximum value of the control function which is equal pulses with optimal and quasioptimal control have been suggested.

With the help of relative deviation of the crane speed movement at the end of the acceleration from an established (determined) value, and the amplitude of the residual load fluctuations have been investigated the quality of the system to achieve a given end state and impact on the duration of these indicators increase (decrease) control function from zero to the maximum (minimum) value.

**Key words:** optimization; dynamic; cargo; control.

## **1. Постановка проблеми**

Значна частина вантажопідійомних кранів працюють в умовах інтенсивного вантажопотоку. До таких кранів можна віднести портові перевантажувачі. Звичайно, зменшення тривалості циклу переміщення вантажів є бажаним. Тому для керування рухом такими кранами доцільно використовувати оптимальне за швидкодією керування, яке, як відомо, має релейну характеристику. Це зумовлює додаткові динамічні навантаження і, як наслідок, знижує надійність вантажопідійомної машини. Для зниження динамічних зусиль при одночасній високій продуктивності роботи крана необхідно виконати синтез квазіоптимального керування його рухом.

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

У роботах Григорова О. В. [1, 2] за допомогою використання принципу максимуму отримані закони керування рухом крана (двомасова модель), який має мінімальне число перемикань керувань (постійних зусиль), при якому кран з вантажем переміщується на задану відстань з повним усуненням коливань вантажу. При цьому враховуються обмеження по величині приводного зусилля, швидкості та прискорення крана, відхилення канату з вантажем від вертикалі. Для визначення моментів перемикання керування (переходу від максимального керування до мінімального) у роботах [1, 2] проаналізовано фазові траєкторії, які описують коливний рух вантажу на гнучкому підвісі.

Широке використання принцип максимуму для усунення коливань крана отримав в працях Герасимяка Р. П. [3] та його учнів [4, 5]. Тут для визначення моментів перемикання керування розв’язані трансцендентні алгебраїчні рівняння.

## Піднімально-транспортні машини

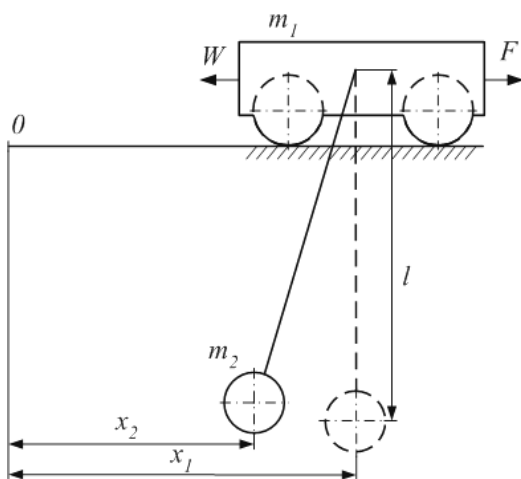
У роботі [4] досліджено динамічні навантаження, які виникають у пружних елементах механізму повороту баштового вантажопідйомного крана при реалізації оптимального за швидкістю розгону системи. На основі проведених досліджень запропоновано змінювати керуючу функцію (привідний момент) за експонентою та встановлено вплив постійної часу експоненти на коефіцієнт динамічності механізму. Такий підхід дозволяє значно знизити динамічні навантаження. Однак, недослідженим залишається вплив модифікації функції керування на якість досягнення системою заданих кінцевих умов її руху.

### 3. Постановка мети та завдань дослідження

Метою першої частини роботи є побудова та дослідження квазіоптимального за швидкістю керування рухом крана із вантажем на гнучкому підвісі. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: 1) виконати синтез квазіоптимального за швидкістю керування рухом крана із вантажем на гнучкому підвісі; 2) дослідити вплив квазіоптимального за швидкістю керування на якість досягнення заданого кінцевого стану системи „кран-вантаж”.

### 4. Виклад основного матеріалу

Для проведення досліджень спочатку приймемо двомасову динамічну модель крана із вантажем на гнучкому підвісі, яка зображена на рис. 1. Оскільки високочастотні коливання елементів металоконструкції крана та його приводу не мають впливу на низькочастотні коливання вантажу на гнучкому підвісі, то модель, яка зображена на рис. 1, досить часто використовується у розрахунках [1-3, 5].



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

Динамічна модель, яка показана на рис. 1, описується системою диференціальних рівнянь:

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

де  $m_1$  – приведена маса приводного механізму і крана;  $m_2$  – маса вантажу;  $x_1$ ,  $x_2$  – координати центрів мас відповідно крана і вантажу;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $l$  – довжина гнучкого підвісу,  $F$  – сумарне тягове або гальмівне зусилля, що діє на кран;  $W$  – приведена сила опору переміщенню крана. Будемо вважати, що при переміщенні крана протягом розгону (гальмування)

він не змінює знак своєї швидкості, тобто  $\operatorname{sign} \dot{x}_1 = 1$ .

У данному дослідженні для модифікації приймемо керування, яке знайдено у роботі [1]. Сутність керування рухом системою „кран-вантаж” [1], полягає у тому, що функція керування має розриви – стрибкоподібні переходи від максимального до мінімального значення і навпаки. Це спричиняє виникнення навантажень у елементах крана (у валах, муфтах,

**Піднімально-транспортні машини**

металоконструкції) та викликає підвищені енерговитрати. Для того, щоб зменшити небажані показники при оптимальному за швидкодією керуванні виконують його модифікацію [4], тобто переходять до квазіоптимального керування. Однак, при цьому не усуваються розриви другого роду функції керування, що відображається у тому, що у елементах крана виникають все ж таки значні динамічні навантаження. Очевидно, що для зменшення динамічних зусиль необхідно для керування рухом крана використовувати більш плавну функцію. Для цього оптимальну за швидкодією функції керування рухом крана із вантажем на гнучкому підвісі:

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

де  $t_1, t_2, t_3$  – тривалість першого, другого та третього етапів розгону крана відповідно;  $F_{\text{max}}$  – максимальне значення приводного зусилля, яке діє на кран (у даному дослідженні прийнято припущення симетричності граничних значень керування, тобто максимальне керування рівне мінімальному, взятому з протилежним знаком); модифікуємо, тобто перейдемо до неперервно-диференційованої функції, яка є квазіоптимальним за швидкодією керуванням руху системи „кран-вантаж”:

$$F_{\text{opt}}^* = \begin{cases} -\frac{F_{\text{max}} t(t-2\Delta t)}{\Delta t^2}, & 0 \leq t < \Delta t; \\ F_{\text{max}}, & \Delta t \leq t < t_1 - \Delta t; \\ -\frac{F_{\text{max}} (t-t_1)(t-t_1+2\Delta t)}{\Delta t^2}, & t_1 - \Delta t \leq t < t_1; \\ \frac{F_{\text{max}} (t-t_1)(t-t_1-2\Delta t)}{\Delta t^2}, & t_1 \leq t < t_1 + \Delta t; \\ -F_{\text{max}}, & t_1 + \Delta t \leq t < t_1 + t_2 - \Delta t; \\ \frac{F_{\text{max}} (t-t_1-t_2)(t-t_1-t_2+2\Delta t)}{\Delta t^2}, & t_1 + t_2 - \Delta t \leq t < t_1 + t_2; \\ -\frac{F_{\text{max}} (t-t_1-t_2)(t-t_1-t_2-2\Delta t)}{\Delta t^2}, & t_1 + t_2 \leq t < t_1 + t_2 + \Delta t; \\ F_{\text{max}}, & t_1 + t_2 + \Delta t \leq t < t_1 + t_2 + t_3 - \Delta t; \\ -\frac{F_{\text{max}} (t-t_1-t_2-t_3)(t-t_1-t_2-t_3+2\Delta t)}{\Delta t^2}, & t_1 + t_2 + t_3 - \Delta t \leq t < t_1 + t_2 + t_3, \end{cases} \quad (3)$$

де  $\Delta t$  – тривалість переходів від максимального значення  $F_{\text{max}}$  до нуля, яка може змінюватись в залежності від вимог плавності зміни керування: при збільшенні плавності зміни функції  $F_{\text{opt}}^*$  величина  $\Delta t$  зростає.

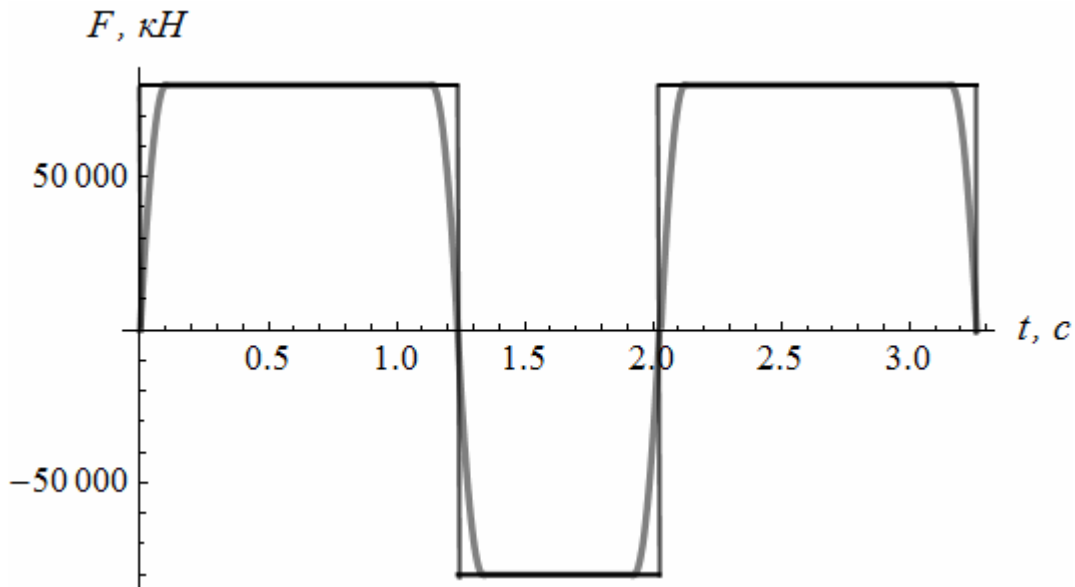
Вкажемо деякі математичні властивості функції (3), які впливають на динаміку руху системи. Однією з бажаних властивостей функції (3) є те, що вона доставляє абсолютні мінімуми декільком функціоналам:

**Піднімально-транспортні машини**

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_0^{t_1+t_2+t_3} (\ddot{F}_{opt}^*)^2 dt = abs \min = 0; \\ \int_{\Delta t}^{t_1-\Delta t} (\dot{F}_{opt}^*)^2 dt + \int_{t_1+\Delta t}^{t_1+t_2-\Delta t} (\dot{F}_{opt}^*)^2 dt + \int_{t_1+t_2+\Delta t}^{t_1+t_2+t_3-\Delta t} (\dot{F}_{opt}^*)^2 dt = abs \min = 0; \\ (\dot{F}_{opt}^*(\Delta t))^2 = (\dot{F}_{opt}^*(t_1-\Delta t))^2 = (\dot{F}_{opt}^*(t_1+\Delta t))^2 = (\dot{F}_{opt}^*(t_1+t_2-\Delta t))^2 = \\ = (\dot{F}_{opt}^*(t_1+t_2+\Delta t))^2 = (\dot{F}_{opt}^*(t_1+t_2+t_3-\Delta t))^2 = abs \min = 0. \end{array} \right. \quad (4)$$

Наведені вирази (4) характеризують плавну зміну зусилля при реалізації квазіоптимального керування рухом крана із вантажем на гнучкому підвісі, що безперечно, зменшує динамічні навантаження у елементах крана (цей вплив досліджено у другій частині статті).

Для оцінки різниці між функціями (2) та (3) наведемо їх графіки (рис. 2), які відповідають умові розгону крана з усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі при таких параметрах:  $l=15$  м,  $m_1=50$  т;  $m_2=25$  т;  $F_{max}=80$  кН;  $v_{ном}=1,8$  м/с;  $\Delta t=0,1$  с.



**Рис. 2** – Графіки оптимального (чорна лінія) та квазіоптимального (сіра лінія) за швидкодією керування рухом крана із вантажем на гнучкому підвісі

Аналіз графіків, які зображені на рис. 2, показує, що квазіоптимальне керування рухом крана представляється плавною функцією, яка не має розривів першого та другого роду. З аналізу графіків, які показані на рис. 2, випливає також, що справедливою є наступна залежність:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} F_{opt}^* = F_{opt} \quad (5)$$

Оцінимо вплив квазіоптимального керування на динаміку руху крана із вантажем на гнучкому підвісі. Для цього знайдемо розв'язки системи рівнянь (1) при  $F=F_{opt}$  та при  $F=F_{opt}^*$ . Не будемо наводити вказані розрахунки, оскільки вони мають значний об'єм. Оцінку виконаємо за допомогою побудови графіків функцій (рис. 3).

З рис. 3 видно, що у випадку дії квазіоптимального керування, кран у кінці розгону не досягає заданої усталеної швидкості 1,8 м/с. Крім того, у кінці розгону присутні невеликі

**Піднімально-транспортні машини**

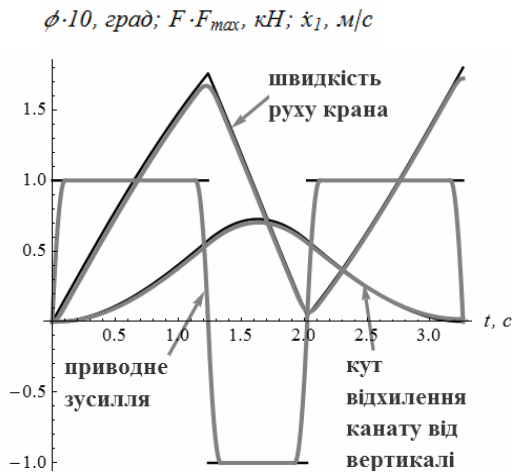
залишкові коливання вантажу, амплітуда яких рівна 0,2 град. Очевидно, що відхилення динамічної системи від заданого кінцевого стану виникає в результаті переходу від оптимального керування до квазіоптимального. Ключову роль тут відіграє величина  $\Delta t$ , що впливає з виразу (5). Для оцінки впливу величини  $\Delta t$  на вказане відхилення наведемо графіки (рис. 4). На рис. 4, а зображено поверхню, яка описує зміну показника  $\Delta v$ , що позначає

відносне відхилення швидкості руху крана у кінці розгону від усталеного (заданого) значення:

$$\Delta v = \frac{\dot{x}_1(t_1 + t_2 + t_3) - v_{уст}}{v_{уст}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

де  $v_{уст}$  – усталене (задане) значення швидкості руху крана.

Аналіз графічних залежностей, які представлені на рис. 4, показує, що величина  $\Delta t$  має значний вплив на якість досягнення заданого кінцевого стану системи „кран-вантаж”. Постає закономірне питання: яким чином забезпечити прийнятну якість досягнення кінцевих умов руху системи „кран-вантаж”? Одним із способів зменшення показника  $\Delta v$  та кінцевої амплітуди коливань

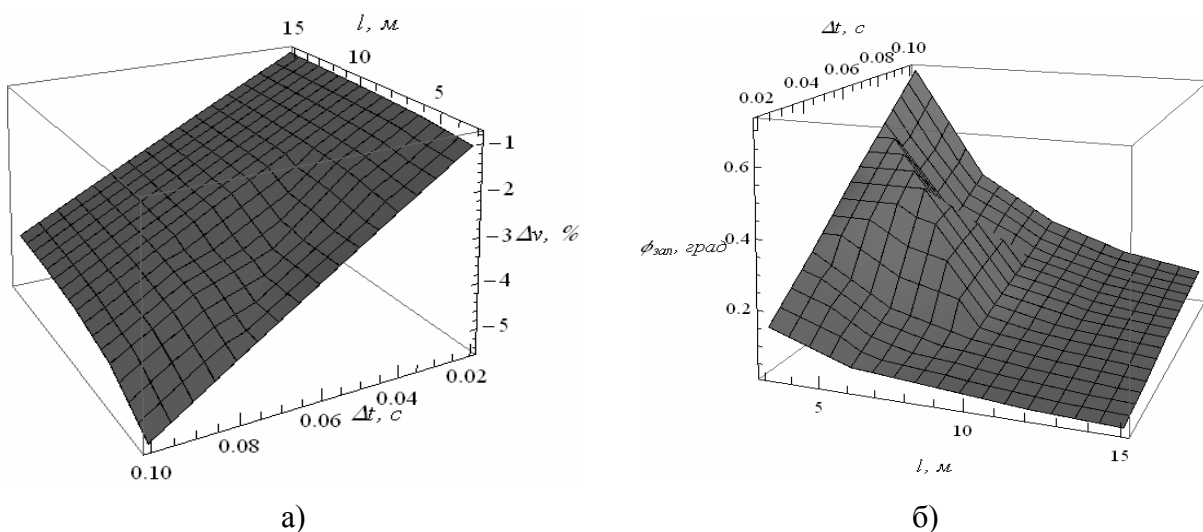


**Рис. 3** – Графіки, які відповідають оптимальну (чорна лінія) та квазіоптимальному (сіра лінія) за швидкодією керування рухом крана із вантажем на гнучкому підвісі

вантажу є використання у розрахунках умови:

$$\int_0^{t_1+t_2+t_3} F_{opt}^* dt = \int_0^{t_1+t_2+t_3} F_{opt} dt, \quad (7)$$

яка визначає рівність імпульсів, що надані динамічній системі при оптимальному та квазіоптимальному керуванні під час розгону динамічної системи.



**Рис. 4** – Поверхні, які відповідають квазіоптимальному керуванню рухом крана: а) відносне відхилення швидкості руху крана; б) амплітуда залишкових коливань вантажу

**Піднімально-транспортні машини**

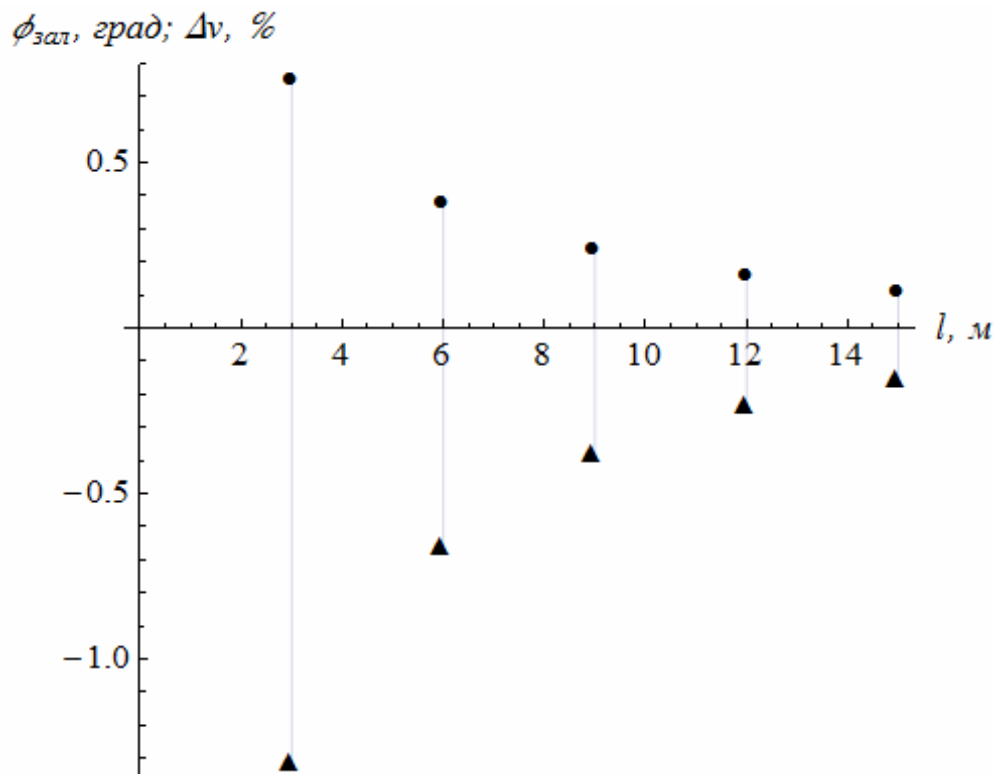
Виконання умови (7) можливе за рахунок зміни величини максимального зусилля  $F_{\max}$ , тобто для функції  $F_{\text{opt}}^*$  будемо використовувати максимальне значення зусилля  $F_{\max}^*$ . Отже, умова (7) представляється алгебраїчним рівнянням у згорнутому вигляді. Розв'язок рівняння (7) відносно величини  $F_{\max}^*$  записується у такому виді:

$$F_{\max}^* = \frac{3F_{\max}(t_1 - t_2 + t_3)}{3t_1 - 3t_2 + 3t_3 - 2\Delta t}. \quad (8)$$

Аналіз розв'язку (8) показує, що величина  $F_{\max}^*$  при  $\Delta t=0,1$  с лише на 4,1 % більша  $F_{\max}$ , а при  $\Delta t=0,15$  с на 6,3 % більша, ніж  $F_{\max}$ . Таким чином, за рахунок збільшення плавності руху крана (що досягається збільшенням величини  $\Delta t$ ) необхідно збільшувати величину максимального зусилля, що діє на кран під час його розгону/гальмування.

Якщо ж умова неперевищення величини  $F_{\max}$  є жорсткою, то при розрахунку класичного оптимального керування [1] величину  $F_{\max}$  необхідно зменшити на 4-7 %. Це дасть „запас” по величині керування, який буде використано при переході до функції  $F_{\text{opt}}^*$ .

Дослідимо, як змінюється якість досягнення кінцевого стану системи при переході від  $F_{\max}$  до  $F_{\max}^*$ . Для цього побудуємо графіки функцій (рис. 5).



**Рис 5.** – Графіки показників амплітуди залишкових коливань вантажу  $\phi_{\text{зал}}$  (точки) та відносного відхилення швидкості руху крана від заданого значення  $\Delta v$  (трикутники)

З рис. 5 видно, що при збільшенні довжини гнучкого підвісу (або при зменшенні частоти власних коливань вантажу на гнучкому підвісі) зменшуються оціночні показники  $\phi_{\text{зал}}$  та  $\Delta v$ , тобто підвищується якість досягнення динамічною системою заданого кінцевого стану.

**Висновки**

Таким чином, для зменшення динамічних зусиль у елементах вантажопідійомного крана необхідно від оптимального за швидкодією керування переходити до квазіоптимального керування, яке характеризується плавністю зміни функції рушійного зусилля. Для дослідження впливу параметрів квазіоптимальної функції, зокрема величини  $\Delta t$ , на динамічні навантаження у елементах крана необхідно проводити додаткові дослідження. Крім того, необхідно уточнити величини  $t_1$ ,  $t_2$  та  $t_3$ , що вимагає знаходження та аналіз розв'язків системи лінійних диференціальних рівнянь (1) при  $F = F_{\text{opt}}^*$ .

**Список використаних джерел:**

1. Григоров О. В. Вантажопідійомні машини / В. О. Григоров, Н. О. Петренко. – Харків : НТУ „ХПІ”, 2005. – 304 с.
2. Оптимальне керування підійомно-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 «ХПІ», 2013. – 240 с. – нім. мовою.
3. Герасимьяк Р. П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р. П. Герасимьяк, В. А. Лещёв. – Одесса : СМІЛ, 2008. – 192 с.
4. 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.
5. Мельникова Л. В. Автоматизация технологического процесса перемещения механизма с подвешенным грузом средствами микропроцессорного управления : дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Мельникова Любовь Васильевна. – Одесса, 2000. – 116 с.

**References**

1. Hryhorov, O 2005, *Vantazhopidiomni mashyny*, NTU “KhPI”, Kharkiv.
2. Hryhorov, O, Svirhun, V, Anishchenko, H, Stryzhak, V & Okun, A 2013, *Optymalne keruvannia pidiomno-transportnymy mashynamy (Optimale Steuerung für Hebe-und Fördermaschinen)*, NTU “KhPI”, Kharkiv.
3. Gerasimyak, R & Leshchev, V 2008 *Analiz i sintez kranovykh elektromekhanicheskikh system*, SMIL, Odessa.
4. Naydenko, E 2009, ‘Upravlenie asinkhronnym elektroprivodom mekhanizma povorota s podveshennym gruzom’, Kand.tekh.n. thesis, Odesskiy natsionalnyy politekhnicheskiiy universitet, Odessa.
5. 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.