

УДК 621.873

**МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ПІДЙОМУ ТА ОПУСКАННЯ ВАНТАЖУ**©**Ловейкін В. С., Голдун В. А.***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; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус №11, вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна.

**Голдун Василь Анатолійович:** ORCID: 0000-0003-0779-4918; goldun1984@mail.ru; аспірант кафедри конструювання машин; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус №11, вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна.

Проведено моделювання режимів підйому та опускання вантажу на транспортний засіб.

При проведенні моделювання прийнято, що частота та амплітуда напруги живлення приводного двигуна механізму підйому вантажу змінюються.

Встановлено, що зниження швидкості приводу, по відношенню до номінальної швидкості його руху, на етапах навантаження каната (підйом вантажу) та навантаження підвіски транспортного засобу (опускання вантажу) призводить до значного зниження динамічних навантажень у вказаних елементах.

Підвищення надійності механізму підйому вантажу та підвіски транспортного засобу, на який виконується посадка вантажу, забезпечується частотним керуванням двигуна механізму підйому вантажу при зміні частоти за оптимальними законами.

**Ключові слова:** вантаж; підйом; опускання; оптимізація; керування.

*Ловейкин В. С., Голдун В. А.* «Моделирование оптимальных режимов подъема и опускания груза».

Проведено моделирование режимов подъема и опускания груза на транспортное средство.

При проведении моделирования принято, что частота и амплитуда напряжения питания приводного двигателя механизма подъема груза изменяются.

Установлено, что снижение скорости привода, по отношению к номинальной скорости его движения, на этапах нагружения каната (подъем груза) и нагружения подвески транспортного средства (опускание груза) приводит к значительному снижению динамических нагрузок в указанных элементах.

Повышение надежности механизма подъема груза и подвески транспортного средства, на которое выполняется посадка груза, обеспечивается частотным управлением двигателя механизма подъема груза при изменении частоты по оптимальным законам.

**Ключевые слова:** груз; подъем; опускание; оптимизация; управление.

*Loveikin V., Holdun V.* “Lifting and lowering optimal modes simulation”.

The simulation of lifting and lowering of cargo on a vehicle has been carried out.

It is assumed that the frequency and the amplitude of the voltage of a mechanism lifting drive were changed.

## **Піднімально-транспортні машини**

---

It has been established the speed reduction reason, with respect to its nominal speed of movement in steps of loading a rope (cargo lifting), and the loading of the vehicle suspension (cargo lowering) leads to a considerable reduction in the dynamic loads of these elements.

Improving the reliability of cargo lifting mechanism and suspension of the vehicle is provided by frequency control of the cargo lifting mechanism engine. The frequency has variable by the optimal laws.

**Keywords:** load; lifting; lowering; optimization; control.

### **1. Постановка проблеми**

При експлуатації транспортного засобу, на який виконується навантаження різного роду вантажів, у його підвісці виникають динамічні зусилля. При підйомі вантажу з транспортного засобу значні динамічні зусилля діють у канаті та крановому мості. Ці навантаження носять коливний характер і тому необхідно обирати такі режими роботи механізму підйому вантажу, щоб вони були мінімізовані або взагалі зникли. Досягти такої мети можливо за допомогою реалізації оптимальних способів керування приводним двигуном механізму підйому вантажу. Перед використанням оптимальних законів на практиці необхідно виконати моделювання режимів руху при підйомі та опусканні вантажу. Це дасть змогу виявити ефективність застосування оптимальних законів на практиці.

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

В роботі [1] Р. П. Герасимяка і В. А. Лещева проведені дослідження дво- та тримасових електромеханічних систем, якими можна моделювати механізм підйому вантажу. На основі проведених досліджень авторами встановлено оптимальне значення жорсткості механічної характеристики електроприводу, за якої відбувається максимальне демпфування пружних коливань у системі. Для реалізації отриманих результатів пропонується використати корегуючий зворотній зв'язок за різницею швидкостей обох мас.

У праці [2] Г. В. Шумілова за інтегральним оптимізаційним критерієм знайдено закон руху механізму підйому вантажу баштового крана для випадку руху вантажу „з вісу”. Для знаходження оптимального закону руху було використано варіаційне числення.

У роботі [3] В. С. Ловейкіна та Ю. О. Ромасевича за аналогічним критерієм знайдено закон руху, який мінімізує середнє значення квадрату пружного зусилля у гнучкому підвісі вантажу. Для розв'язування задачі був використаний прямий варіаційний метод, який описаний у монографії [4]. Цей же метод дав змогу розв'язати задачу оптимального керування механізмом підйому вантажу [5]. Постановка задачі аналогічна, однак використано інший критерій – середнє значення квадрату приводного зусилля.

Дослідження оптимальних законів руху механізму підйому вантажу приведено у монографії В. С. Ловейкіна, Ю. В. Човнюка, М. Г. Діктерука та С. І. Пастушенка [6]. На відміну від попередніх праць у цій роботі автори знайшли оптимальне керування при врахуванні розподілених параметрів вантажного канату.

У роботі [7] автори знайшли оптимальне керування механізмом підйому вантажу, яке досліджується у подальшому викладі матеріалу.

**3. Виклад основного матеріалу**

Моделювання руху досліджуваної динамічної системи виконаємо при умові, що практична реалізація оптимальних законів керування буде виконуватись шляхом використання частотно-керованого асинхронного електроприводу [8, 9]. Для того, щоб виконати моделювання оптимального керування рухом механізму підйому вантажу при частотному керуванні приводом задамо закон зміни частоти напруги живлення двигуна:

$$f_d = \frac{v_n}{v_{ном}} f_{ном}, \quad (1)$$

де  $f_{ном}$  – номінальна частота напруги живлення приводного двигуна;  $v_{ном}$  – номінальна швидкість руху механізму підйому вантажу;  $v_n$  – поточна швидкість руху механізму підйому вантажу.

При зміні частоти напруги живлення за законом (1) необхідно забезпечити переважувальну здатність двигуна, для чого напруга живлення двигуна змінюється за таким законом:

$$U_d = \frac{f_d}{f_{ном}} U_{ном}, \quad (2)$$

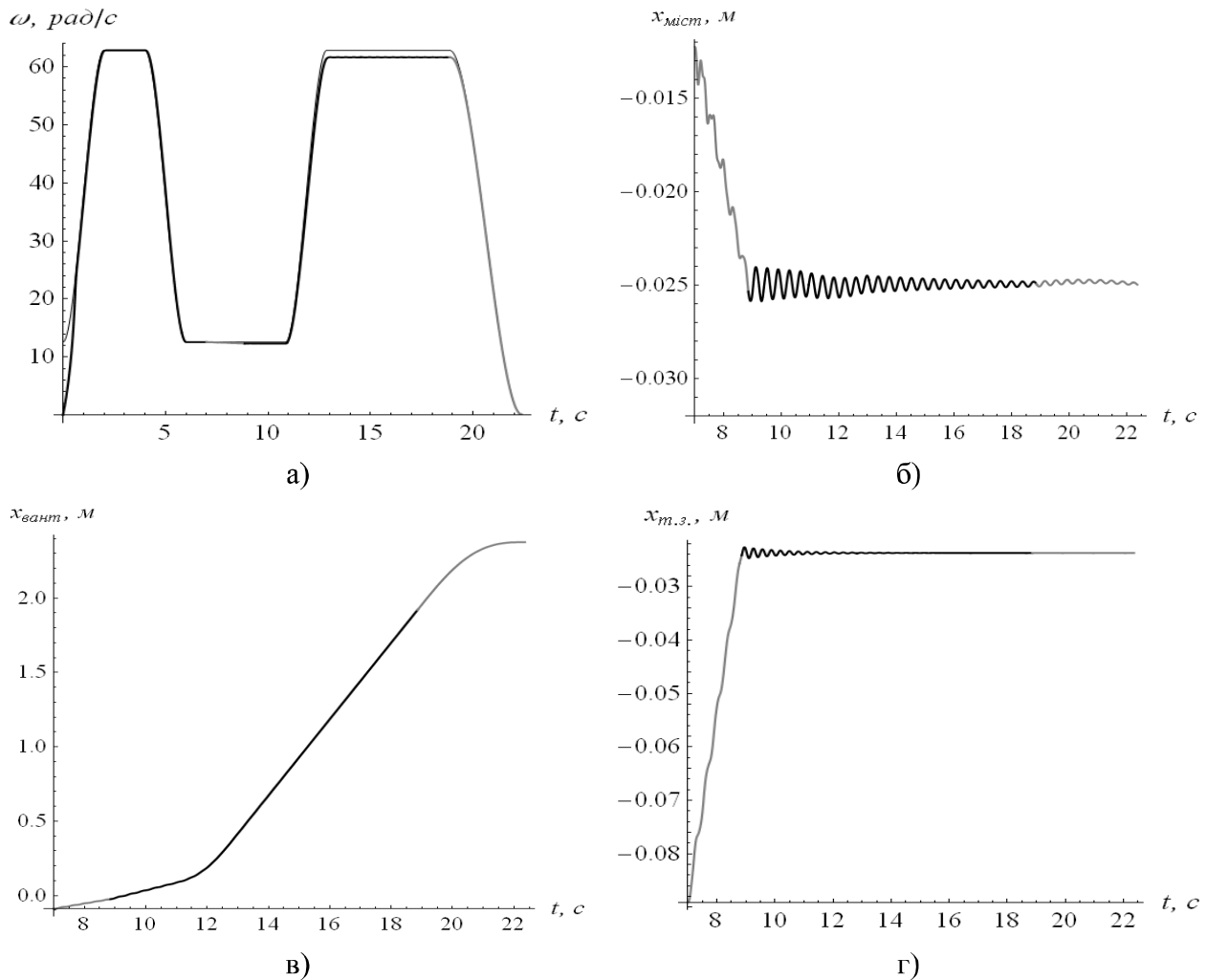
де  $U_{ном}$  – номінальна напруга живлення приводного двигуна. Використання закону зміни напруги живлення двигуна (2) забезпечує сталість максимального електромагнітного моменту двигуна при зміні частоти його живлення.

У результаті чисельного інтегрування математичної моделі руху механізму підйому вантажу отримаємо графічні залежності (рис. 1) кінематичних функцій руху системи (для наочності графіки окремих етапів руху елементів динамічної системи побудовані різними кольорами: сірим – ділянки графіків, які відповідають парним етапам руху, а чорним – ділянки графіків для непарних етапів руху).

Аналіз графіків на рис. 1 показує, що кінематичні функції руху окремих мас мають коливний характер. Однак амплітуда цих коливань є незначною і вони швидко затухають. З рис. 1 (а) видно, що кутова швидкість двигуна протягом третього етапу менша ніж швидкість ідеального холостого ходу, що вказує на завантаженість двигуна силою ваги вантажу та збільшення його ковзання.

Для того, щоб оцінити величину динамічних зусиль необхідно побудувати графіки їх функцій. На рис. 2 показані основні динамічні функції руху системи „механізм підйому вантажу – вантаж – транспортний засіб”.

Аналіз функції електромагнітного моменту двигуна показує, що протягом усього режиму підйому вантажу він змінює свій знак два рази. Протягом другого етапу руху системи у функції електромагнітного моменту двигуна з'являється коливна складова, яка досить швидко затухає.

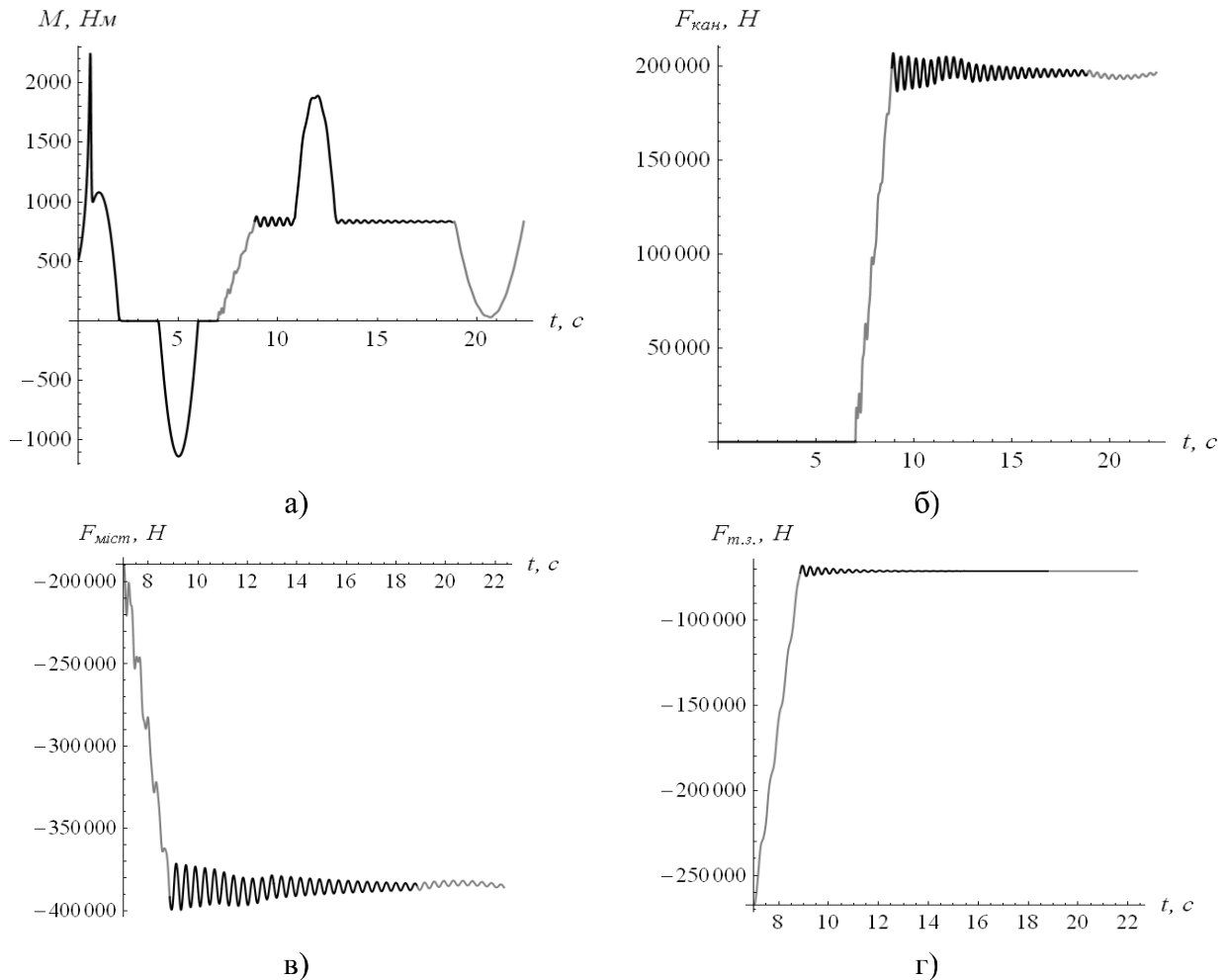
**Піднімально-транспортні машини**

**Рис. 1** – Графіки кінематичних функцій руху системи: а) кутова швидкість двигуна (тонка лінія відповідає швидкості ідеального холостого ходу); б) переміщення кранового моста; в) переміщення вантажу; г) переміщення транспортного засобу у вертикальній площині

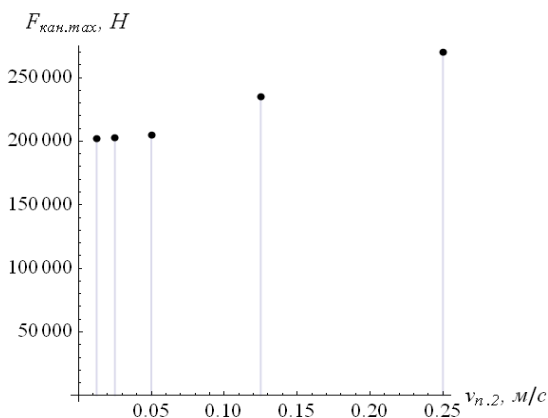
Що стосується зусиль у канаті, підвісці транспортного засобу та зусилля, яке діє на приведену масу кранового моста, то всі вони характеризуються коливаннями, які мають незначну амплітуду і швидко згасають. У порівнянні з рухом приводу на природній механічній характеристиці зусилля у елементах крана та транспортного засобу зменшилися: на 31,7 % – у канаті; на 25,1 % – у крановому мості.

Максимальне зусилля у підвісці транспортного засобу не змінилось. Зазначимо, що зменшення зусиль отримано при зменшенні швидкості канатного барабану у 5 разів.

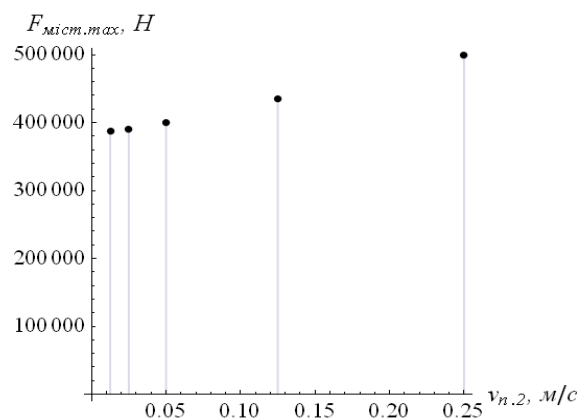
Для того, щоб отримати більш повну динамічну картину процесу підйому вантажу бажано встановити залежність максимальних значень зусиль у крановому мості та канаті від швидкості руху приводу на етапі натягу канату  $v_{n.2}$ . Такі залежності показані на рис. 3 та на рис. 4. Із приведених графіків видно, що вже при  $v_{n.2}=0,05$  м/с відбувається значне зниження максимальних значень зусиль у канаті та мості крана, тому подальше зниження швидкості  $v_{n.2}$  є недоцільним.

**Піднімально-транспортні машини**

**Рис. 2** – Графіки динамічних функцій руху системи: а) момент приводу механізму підйому вантажу; б) зусилля натягу канатів; в) пружно-в'язке зусилля деформації кранового моста у вертикальному напрямку; г) зусилля у підвісці транспортного засобу

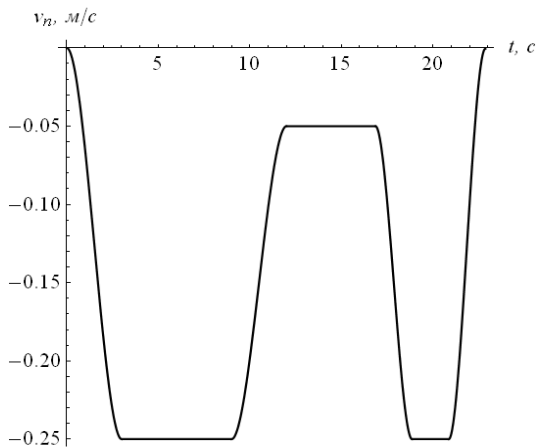


**Рис. 3** – Графік залежності величини максимального зусилля у канаті  $F_{кан.мах}$  від швидкості руху приведеної маси приводу  $v_{н.2}$  на етапі натягу канату



**Рис. 4** – Графік залежності величини максимального зусилля у крановому мості  $F_{міст.мах}$  від швидкості руху приведеної маси приводу  $v_{н.2}$  на етапі натягу канату

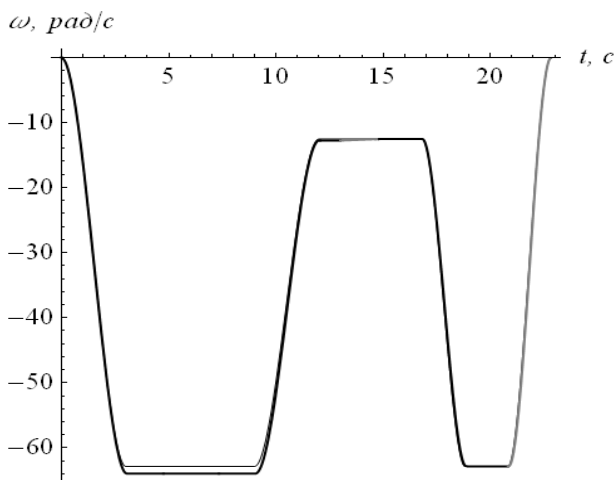
Різниця між режимами підйому та опускання полягає у тому, що при опусканні вантажу швидкість руху приводу має від'ємні значення. На рис. 5 показано графік швидкості руху приведеної маси приводу.

**Піднімально-транспортні машини**

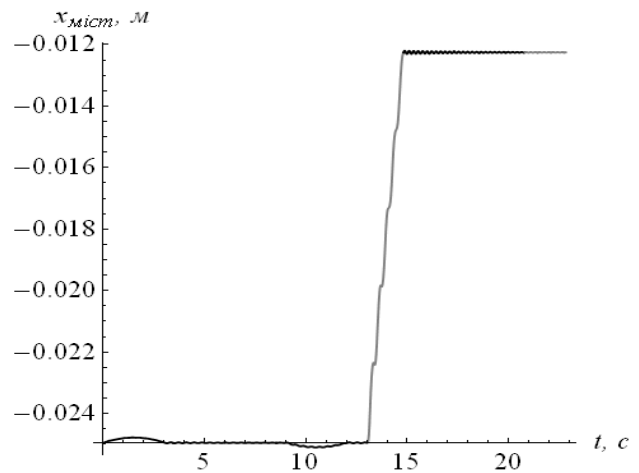
**Рис. 5** – Графік зміни швидкості приведеної маси приводу механізму підйому вантажу

Проведемо моделювання руху динамічної системи. Моделювання виконаємо при умові, що частота напруги живлення змінюється за законом (1) а напруга живлення за законом (2).

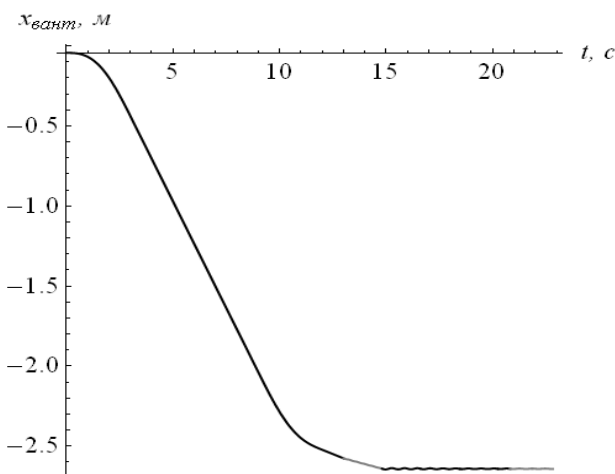
На рис. 6 показані кінематичні функції руху системи.



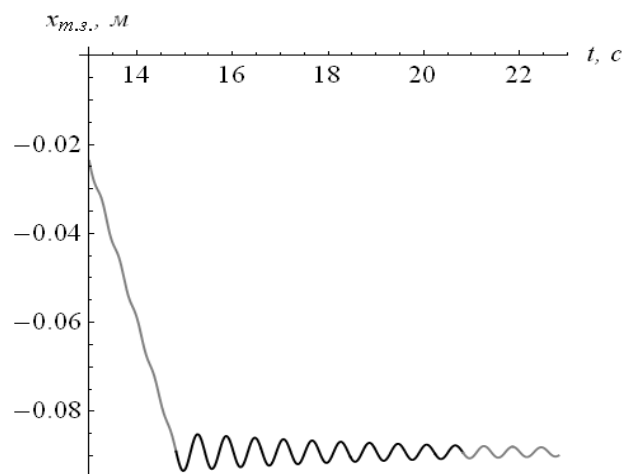
а)



б)



в)



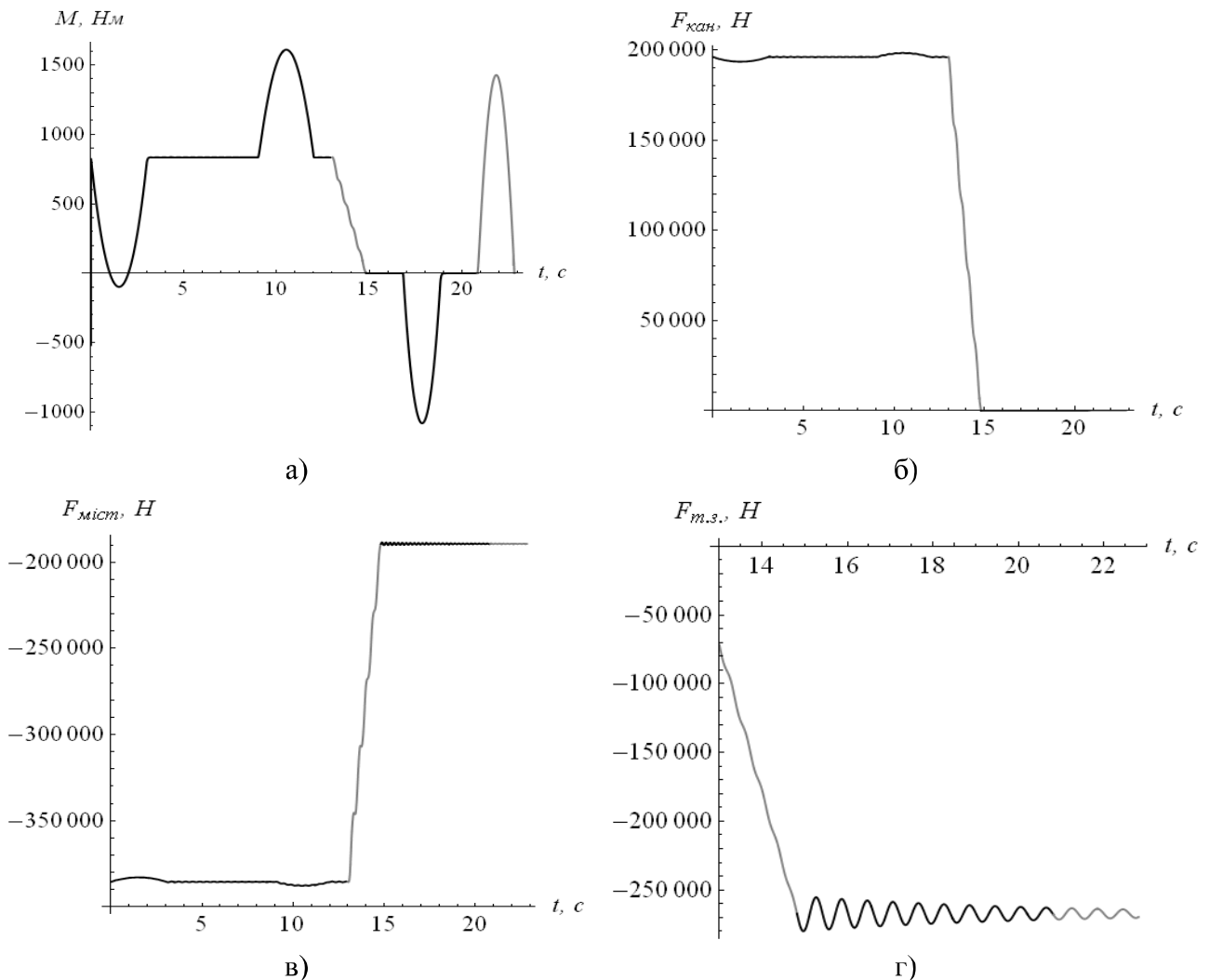
г)

**Рис. 6** – Графіки кінематичних функцій руху системи: а) кутова швидкість двигуна (тонка лінія відповідає швидкості ідеального холостого ходу); б) переміщення кранового моста; в) переміщення вантажу; г) переміщення транспортного засобу

**Піднімально-транспортні машини**

Аналіз графіка кутової швидкості двигуна на рис. 6 (а) показує, що її відхилення від швидкості ідеального холостого ходу спостерігається лише протягом першого етапу, коли двигун навантажений силою ваги вантажу. Загалом всі кінематичні функції мають коливний характер зміни, однак коливання мають незначну амплітуду і швидко затухають.

Для оцінки зусиль, які діють у елементах досліджуваної системи приведемо їх графічні залежності (рис. 7).



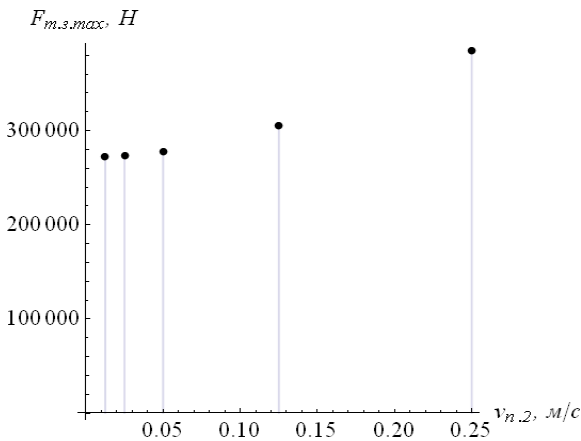
**Рис. 7** – Графіки динамічних функцій руху системи: а) момент приводу механізму підйому вантажу; б) зусилля натягу канатів; в) пружно-в'язке зусилля деформації кранового моста у вертикальному напрямку; г) зусилля у підвісці транспортного засобу

З рис. 7 (а) видно, що двигун запускається при від'ємному крутному моменті, однак надалі знак моменту змінюється на протилежний оскільки двигун переходить у режим генератора. При цьому потенціальна енергія вантажу перетворюється у кінетичну, а вона у свою чергу, в електричну.

Аналізуючи графіки на рис. 7 (б) та рис. 7 (в) приходимо до висновку, що канат та міст не зазнають значних динамічних навантажень, чого не можна сказати про підвіску транспортного засобу. Для того, щоб визначити вплив швидкості руху приводу  $v_{n.2}$  на етапі натягу канату на величину максимального зусилля у підвісці транспортного засобу  $F_{m.z.max}$

## Піднімально-транспортні машини

необхідно декілька разів проінтегрувати рівняння руху системи, кожний раз змінюючи параметр  $v_{n,2}$ . На рис. 8 показана така залежність з якої видно, що вже при п'ятикратному зменшенні швидкості руху приводу  $v_{n,2}$ , по відношенню до його номінальної швидкості, спостерігається значне зменшення величини  $F_{m,з.max}$ .



**Рис. 8** – Графік залежності величини максимального зусилля у підвісці транспортного засобу  $F_{m,з.max}$  від швидкості руху приведеної маси приводу  $v_{n,2}$  на етапі натягу канату

## Висновки

Проведено моделювання руху системи „механізм підйому вантажу – вантаж – транспортний засіб” при заданні оптимального закону зміни швидкості руху її приводу. Знайдено залежності максимальних значень динамічних зусиль у підвісці транспортного засобу, канаті та зусилля, що діє на крановий міст від швидкості руху приводу для режимів підйому та опускання вантажу. Встановлено, що зниження швидкості приводу, по відношенню до номінальної швидкості його руху, на етапах навантаження каната (підйом вантажу) та навантаження підвіски транспортного засобу (опускання вантажу) призводить до

значного зниження динамічних навантажень у вказаних елементах.

Отже, для підвищення надійності механізму підйому вантажу та підвіски транспортного засобу, на який виконується посадка вантажу, необхідно використовувати частотне керування двигуном механізму підйому вантажу. Зміну частоти необхідно виконувати за оптимальними законами.

### Список використаних джерел:

1. Герасимьяк Р. П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р. П. Герасимьяк, В. А. Лещёв. – Одесса.: СМІЛ, 2008. – 192 с.
2. Шумілов Г. В. Оптимізація режиму зміни вильоту і підйому вантажу баштового крану: автореф дис. на здобуття наук. ступення канд. техн. наук: спец. 05.05.05 „Піднімально-транспортні машини” / Г. В. Шумілов. – Київ, 2013. – 20 с.
3. Ловейкін В. С. Комплексний синтез оптимального керування рухом вантажопідйомного крана / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2011. – № 45. – С. 385–399.
4. Ловейкін В. С. Оптимізація перехідних режимів руху механічних систем прямим варіаційним методом / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич. – Київ; Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М., 2010. – 184 с.
5. Ловейкін В. С. Оптимізація вертикальних переміщень вантажу протягом розгону візка / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич // Підйомно-транспортна техніка. – 2010. – № 1. – С. 90–95.
6. Моделювання динаміки механізмів вантажопідйомних машин / [Ловейкін В. С., Човнюк Ю. В., Діктерук М. Г., Пастушенко С. І.]. – Київ; Миколаїв: РВВ МДАУ, 2004. – 286 с.
7. Ловейкін В.С. Оптимізація режиму підйому вантажу з транспортного засобу / В.С. Ловейкін, В. А. Голдун // Збірник тез доповідей 75 науково-практичної конференції Київського національного університету будівництва і архітектури (15-18 квітня 2014 року) / Кафедра основ професійного навчання Київського національного університету будівництва і архітектури. – Київ, 2014. – С. 28-30.
8. Герасимова Т.Г. Дайте крану вторую жизнь / Т. Г. Герасимова // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2007. – №3 – С. 12-13.
9. Радимов С. Н. Применение энерго- и ресурсосберегающего частотного электропривода на механизмах подъемно-транспортных машин / С. Н. Радимов // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2007. – №8 – С. 30-32.



**References**

1. Gerasimyak, R & Leshchev, V 2008, *Analiz i sintez kranovykh elektromekhanicheskikh sistem*, SMIL, Odessa.
2. Shumilov, H 2013, 'Optimizatsiia rezhymu zminy vylotu i pidiomu vantazhu bashtovoho kranu', *Kand.tekh.n. abstract*, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv.
3. Loveikin, V & Romasevych, Yu 2011, 'Kompleksnyi syntez optimalnoho keruvannia rukhom vantazhopidomnoho kрана', *Avtomatyzatsiia vyrobnychyykh protsesiv u mashynobuduvanni ta prylobuduvanni*, no. 45, pp. 385-399.
4. Loveikin, V & Romasevych, Yu 2010, *Optimizatsiia perekhidnykh rezhymiv rukhu mekhanichnykh system priamym variatsiynym metodom*, PP Lysenko M, Nizhyn.
5. Loveikin, V & Romasevych, Yu 2010, 'Optimizatsiia vertykalnykh peremishchen vantazhu protiahom rozghonu vizka', *Pidiomno-transportna tekhnika*, no. 1, pp. 90-95.
6. Loveikin, V, Chovniuk, Yu, Dikteruk, M & Pastushenko, S 2004, *Modeliuvannia dynamiky mekhanizmiv vantazhopidomnykh mashyn*, RVV MDAU, Mykolaiv.
7. Loveikin, V & Holdun, V 2014, 'Optimizatsiia rezhymu pidiomu vantazhu z transportnoho zasobu', *Zbirnyk tez dopovidei 75 naukovo-praktychnoi konferentsii Kyivskoho natsionalnoho universytetu budivnytstva i arkhitektury, Kafedra osnov profesiinoho navchannia Kyivskoho natsionalnoho universytetu budivnytstva i arkhitektury*, Kyiv, pp. 28-30.
8. Gerasimova, T 2007, 'Dayte kranu vtoruyu zhizn', *Podemnye sooruzheniya. Spetsialnaya tekhnika*, no. 3, pp. 12-13.
9. Radimov, S 2007, 'Primenenie energo- i resursoberegayushchego chastotnogo elektroprivoda na mekhanizмах podemno-transportnykh mashin', *Podemnye sooruzheniya. Spetsialnaya tekhnika*, no. 8, pp. 30-32.

Стаття надійшла до редакції 20 липня 2014 р.