

УДК 62-83

С.В.КОРНИЕНКО

Государственное высшее учебное заведение  
«Донбасская государственная машиностроительная академия»  
[Ket@dgma.donetsk.ua](mailto:Ket@dgma.donetsk.ua)

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОДЪЁМА ГРУЗА БАШЕННЫМ КРАНОМ

*Представлено математическое описание электромеханической системы механизма подъёма башенного крана с учётом динамических особенностей металлоконструкции крана и поднимаемого груза. Данная модель позволяет более точно определить динамические нагрузки, возникающие при подъёме груза башенным краном, необходимые для расчёта электромеханической системы механизма подъёма, учитывая жёсткость металлоконструкции крана. Получены графики, отображающие поведения элементов крана и груза при работе механизма подъёма, учитывая упругую связь груза с металлоконструкцией крана.*

**Ключевые слова:** электромеханическая система, башенный кран, механизм подъёма, груз, двухмассовая система, электропривод, математическая модель, жёсткость, динамические нагрузки, сила инерции, сила натяжения, колебания.

Задача неуклонного повышения эксплуатационной эффективности промышленного производства, в настоящее время, решается путём увеличения единичных мощностей машин и применения высокопроизводительной техники, что ведет к увеличению динамических нагрузок, снижению эксплуатационной надежности кранов, качества строительно-монтажных работ [1, 4]. Кроме того, парк кранового оборудования сильно изношен и требует либо модернизации, либо замены.

Повышение технических требований к современным подъёмно-транспортным машинам и использованным в них электроприводам проявляет взаимное влияние электропривода как переменного, так и постоянного тока, и механической части крана. Показатели качества регулирования определяются не только техническими возможностями электропривода, но и степенью такого влияния, потому что в реальных условиях эксплуатации пренебрежение данным влиянием ограничивает работоспособность крана. Поэтому становится необходимым рассматривать электрическую и механическую части машины как единое целое - электромеханическую систему (ЭМС), обеспечивающую выполнение заданных технологических операций. Изучение динамических нагрузок в электромеханических системах описано в работах В.И. Ключева [2], Ю.А. Борцова [6], для подъёмно-транспортных машин теория электромеханических систем описана в работах М.С. Комарова [3], Р.П. Герасимьяка [4], Л.Б. Масандилова [5], и др. Влияние металлоконструкции крана здесь рассматривается в виде дополнительной массы, т.е. предлагается трёхмассовая электромеханическая система [4], что усложняет расчёты всей электромеханической системы, либо расчёты ограничиваются лишь учётом жёсткости подъёмного каната [5] и не учитывается динамика конструкции крана.

**Целью работы** является разработка математической модели электромеханической системы (ЭМС) механизма подъёма башенного крана с учётом динамических особенностей металлоконструкции крана и поднимаемого груза, а также расчет при помощи этой модели переходных процессов в исследуемой системе при подъёме груза с подхватом.

**Материал и результаты исследования.** Как показывают исследования [1], наиболее неблагоприятными режимами работы крановых механизмов подъёма являются режимы подъёма груза, лежащего на полу, и стопорного торможения груза, опускающегося с номинальной скоростью или скоростью, существенно превышающей номинальную. В период разгона и торможения помимо статических нагрузок должны быть приложены дополнительные усилия для преодоления сил инерции вращающихся частей лебёдки и подвешенного груза. Так как грузовой канат и несущие конструкции крана не являются абсолютно жёсткими, приложение усилий приводит к колебаниям. Малые веса конструкций, большие высоты и скорости подъёма, характерные для башенных кранов, являются причинами того, что на практике колебательный характер разгона и торможения явно ощутим. Это приводит к значительному возрастанию динамических нагрузок и в ряде случаев является причиной поломки и аварий [5].

Подъём груза исследуется для двух этапов движения. На первом этапе груз покоится на основании, а подъёмный двигатель натягивает канаты до того момента, пока усилие в подъёмном канате не будет равно весу груза. Во втором этапе груз отрывается от основания и в известной мере "поддёргивается" натянутым канатом. Напуск канатов полиспаста может быть такой, что работа механизма подъёма в течение второго этапа протекает при полной номинальной скорости подъёма. Этот случай соответствует подъёму груза с "подхватом", являющийся запрещённым правилами технической эксплуатации грузоподъёмных кранов, и являющийся аварийным [1, 5].

Математическое описание механической части электропривода составим на основании представления объекта регулирования в виде двухмассовой системы.

На рис. 1. приведена расчётная кинематическая схема механизма подъема башенного крана (а) и продемонстрированы деформации стрелы и башни крана в процессе подъема груза (б).

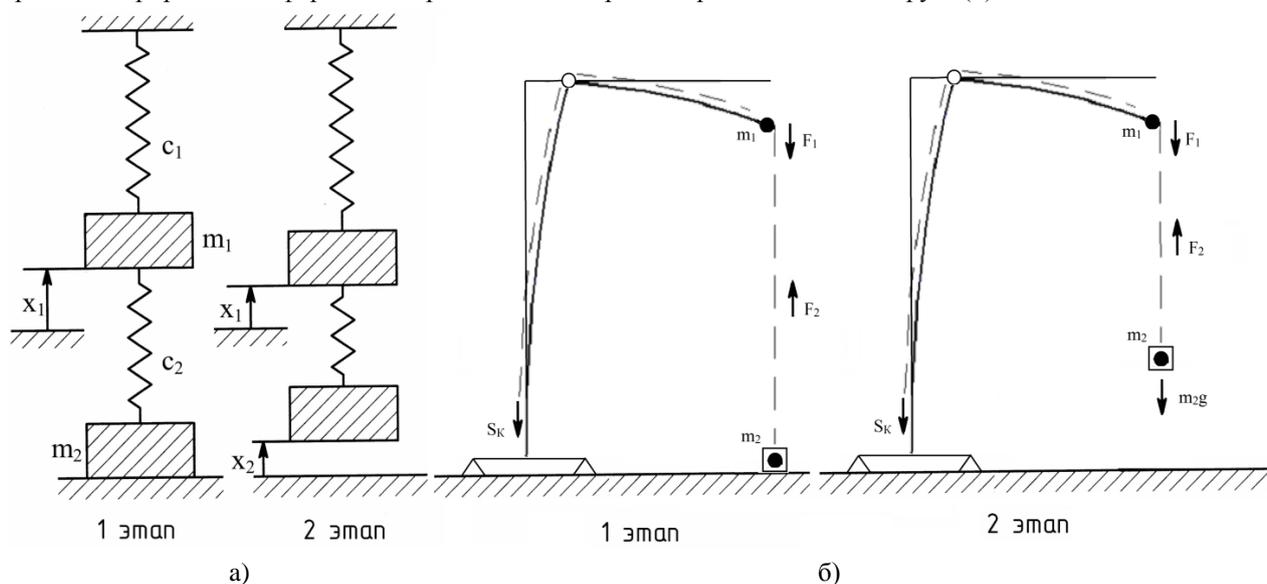


Рисунок 1 – Расчётные схемы башенного крана

На схемах обозначены:  $m_1$  - приведенная масса металлоконструкции стрелы;  $m_2$  - приведённая масса груза и крюковой подвески;  $c_1$ ,  $c_2$  - коэффициенты жёсткости металлоконструкции крана и канатов полиспаста соответственно;  $x_1$  - координата перемещения массы металлоконструкции;  $x_2$  - координата перемещения груза;  $F_1$  - сила инерции металлоконструкции крана;  $F_2$  - усилие в канате;  $S_k$  - перемещение подъёмного каната, наматываемого на барабан.

Сила инерции металлоконструкции крана и усилие в канате определяются выражениями (1) и (2).

$$F_1 = -c_1 x_1; \quad (1)$$

$$F_2 = c_2 (S_k + x_1). \quad (2)$$

Согласно расчётной схеме башенного крана на первом этапе подъёма (в доотрывной стадии) движение масс запишем в виде дифференциального уравнения (3).

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + c_1 x_1 + F_2 = 0. \quad (3)$$

Первый этап подъёма груза заканчивается, когда усилие в канате  $F_2$  будет равно весу груза. На втором этапе подъёма кран и груз совершают колебания как система с двумя степенями свободы. На кран происходит воздействие силы инерции в соответствии с уравнением (1), только вот уже усилие в грузовом канате будет определяться с учётом перемещения груза (4).

$$F_2 = c_2 (S_k + x_1 - x_2). \quad (4)$$

Усилие в канате  $F_2$  создаёт крутящий момент на валу двигателя, который определяется по выражению (5).

$$M = \frac{F_2 D_6}{2\alpha \eta_n \eta_m u_m}, \quad (5)$$

где  $D_6$  - диаметр барабана подъёмной лебёдки;  $\alpha$  - кратность полиспаста;  $\eta_n$ ,  $\eta_m$  - КПД полиспаста и механизма подъёма соответственно;  $u_m$  - передаточное число механизма.

Окончательно уравнения движения при подъёме груза башенным краном можно записать в виде системы дифференциальных уравнений (6).

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + x_1 (c_1 + c_2) - x_2 c_2 = -S_k c_2; \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} - x_1 c_2 + x_2 c_2 = S_k c_2 - m_2 g. \end{cases} \quad (6)$$

Согласно (6) была разработана и построена математическая модель подъёма груза башенным краном в MATLAB-Simulink. Для моделирования был взят башенный кран серии КБ - 100.1АС грузоподъёмностью 5 тонн. В качестве электродвигателя механизма подъёма использовался асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии 4МТКН132ЛВ6 мощностью 7,5 кВт, управляемый по системе ПЧ-АД. Также было принято допущение, что слабина каната уже выбрана, и разгон двигателя происходит с нуля. По

результатам моделювання отримані графіки перехідних процесів в ЕМС підйому башенного крана, характеризуючі поведінку як самого вантажу, так і металоконструкції стріли крана, представлені на рис. 2.

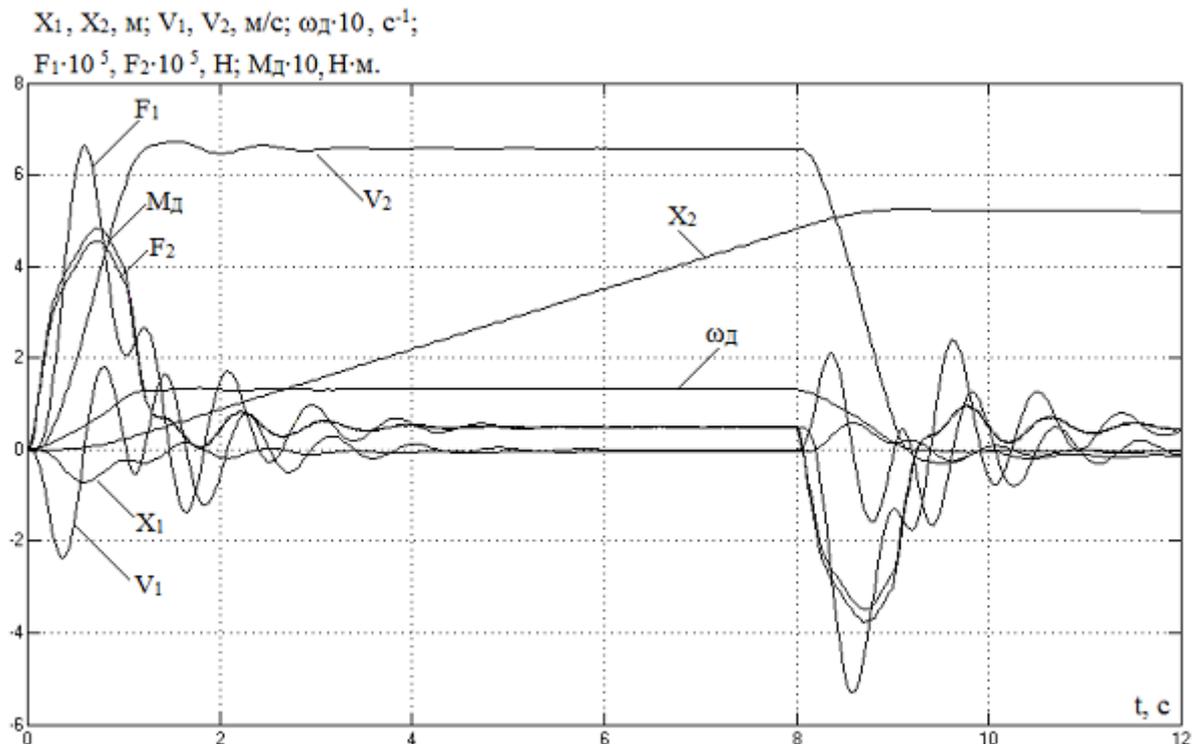


Рисунок 2 – Перехідні характеристики роботи механізму підйому

Перехідні характеристики представляють собою графічну інтерпретацію поведінки елементів механічної підсистеми, входять в двомасову ЕМС підйому башенного крана, таких як: переміщення першої і другої мас ( $x_1, x_2$ ); швидкості цих мас ( $v_1, v_2$ ); сили, що діють на металоконструкцію крана і вантаж ( $F_1, F_2$ ); момент і швидкість двигателя механізму підйому ( $M_d, \omega_d$ ).

В закінчення зауважимо, що визначення динамічних навантажень для підйому вантажу з "підхватом" і без нього є найбільш складним процесом, так як на їх формування впливають багато факторів: спосіб управління двигателем (послідовність операцій управління); тип контролера механізму підйому; вид основи, з якої піднімається вантаж; форма і вид вантажу; якість строповки вантажу; зміна рушійної сили двигателя при зміні натягнення канатів; зміна жорсткості підвеса вантажу в процесі натягнення канатів [4].

**Висновки.** По отриманим графікам видно, що при підйомі вантажу з "підхватом" башенним краном спостерігаються коливання, як металоконструкції крана, так і самого вантажу в післяотривній періоді руху вантажу. Дані коливання є низькочастотними, що найбільш несприятливо з точки зору підвищення динамічних навантажень в елементах кранових металоконструкцій, приводящих до зниження точності заданих переміщень і монтажних операцій. При розрахунках ЕМС підйому для башенних кранів раціонально в якості розрахункової моделі застосовувати систему з двома степенями свободи, розрахункові схеми якої представлені на рис. 1 і описані диференціальними рівняннями (3) і (6) для зображення більш чіткої картини підйому вантажу.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шеффлер М. Грузопідйомні крани: в 2-х кн. Кн. 2 / М. Шеффлер, Х. Дресиг, Ф. Курт; пер. з нем. - М.: Машинобудування, 1981. - 287 с.
2. Ключев В. І. Ограничення динамічних навантажень електропривода / В. І. Ключев. - М.: "Енергія", 1971. - 320 с.
3. Комаров М. С. Динаміка грузопідйомних машин / М. С. Комаров. - М.: Машгиз, 1962. - 268 с.
4. Герасим'як Р. П. Аналіз і синтез кранових електромеханічних систем / Р. П. Герасим'як, А. А. Лещев. - Одеса: СМІЛ, 2008. - 192 с.
5. Масандилов Л. Б. Електропривод підйомних кранів / Л. Б. Масандилов. - М.: Изд-во МЭИ, 1998. - 100 с.
6. Борцов Ю. А. Автоматизований електропривод з еластичними зв'язками / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовський. - СПб.: Енергоатомиздат, 1992. - 288 с.

## REFERENCES

1. Scheffler M., Dresig H., Kurth F. *Gruzopodjemnye crany* [Load-lifting cranes]. Moscow: Mashinostroenie, 1981. 287 p.
2. Kluchev V.I. *Ogranichenie dinamicheskikh nagruzok electropivoda* [Limitation of dynamic loads electric drive]. Moscow: "Energiya", 1971. 320 p.
3. Komarov M.S. *Dinamica gruzopodjemnyh mashin* [Dynamics of load-lifting machines]. Moscow: Mashgiz, 1962. 268 p.
4. Gerasimyak R.P. Leshchev A.A. *Analiz i sintez kranovih elektromehanihtskih sistem* [Analysis and synthesis of crane electromechanical systems]. Odessa: SMIL, 2008. 192 p.
5. Masandilov L.V. *Electropivod podzemnyh kranov* [Electric drive of lifting cranes]. Moscow: MEI, 1998. 100 p.
6. Borcov U.A. Sokolovsyi G.G. *Avtomatizirovannyi electropivod s uprugimi svyuzami* [Automated electric drive with elastic links]. Saint-Petersburg: Energoatomizdat, 1992. 288 p.

Надійшла до редакції 06.03.2013

Рецензент: О.І. Толочко

С. В. КОРНІЄНКО

Державний вищий навчальний заклад «Донбаська державна машинобудівна академія»

**Математичний опис електромеханічної системи підйому вантажу баштовим краном.** Представлено математичний опис електромеханічної системи механізму підйому баштового крана з урахуванням динамічних особливостей металокопструкції крана і вантажу, що підіймається. Дана модель дозволяє більш точно визначити динамічні навантаження, що виникають при підйомі вантажу баштовим краном, необхідні для розрахунку електромеханічної системи механізму підйому, враховуючи жорсткість металокопструкції крана. Отримано графіки, що відображають поведінку елементів крана і вантажу при роботі механізму підйому враховуючи пружний зв'язок вантажу з металокопструкцією крана.

**Ключові слова:** електромеханічна система, баштовий кран, механізм підйому, вантаж, двомасова система, електропривод, математична модель, жорсткість, динамічні навантаження, сила інерції, сила натягнення, коливання.

S. KORNIENKO

State Institution of Higher Education "Donbass State Engineering Academy"

**Mathematical Description of the Cargo Lifting Electromechanical System by Tower Crane.** In the paper a mathematical description of the electromechanical system cargo lifting mechanism of a tower crane is proposed. The mutual influence of the electrical and mechanical subsystems as a unified system of the electric drive of the mechanism of lifting of cargo it is shown. The mechanical subsystem of lifting of cargo should be considered very carefully. Cargo lifting when lifting from the base is considered. Cargo lifting for the two stages of the movement is studied. At the first stage the cargo rests on the basis of, and the motor accelerates up to rated speed. The second stage begins at the moment when the force in the rope will be equal to the weight of cargo. At the second stage, the cargo is torn off from the base and jumps up, causing the emergency loads on the crane. In the paper the process of lifting of cargo two mass settlement scheme is presented. The estimated dynamic scheme of a tower crane and its corresponding equations of lifting of cargo are given. The formula for determining the forces of inertia of metal structures of crane and the efforts of the hoisting rope are given. The force of the winch rope creates a torque on the shaft of the motor. According to the proposed equations is constructed mathematical model and the graphics of transients. Charts show the behavior of all elements of the crane with lifting the cargo. For the research we used induction motor series 4MTKH132LB6. The graphs show oscillation metal structures of crane and cargo. Dynamic loads and vibrations of cargo arise due to the fact that the elements of metal structures of crane and lifting rope are not absolutely rigid. In the calculation of the electromechanical system of lifting of cargo for a tower crane the application of the mathematical model is recommended.

**Key words:** electromechanical system, tower crane, lifting mechanism, cargo, two mass system, electric drive, mathematical model, rigidity, dynamic load, the power of inertia force, strain, fluctuations.