

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПОВОРОТА СТРЕЛОВОГО КРАНА

Вячеслав Ловейкин, Вячеслав Мельниченко

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

Украина, г. Киев, ул. Героев Оборонь, 15

Vyacheslav Loveykin, Vyacheslav Melnichenko

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Heroiv Oborony Str., 15, Kiev, Ukraine

Аннотация. Применен способ уменьшения колебаний груза на гибком подвесе при работе механизма поворота стрелового крана во время переходных процессов путем оптимизации режимов пуска и торможения приводного механизма по динамическому критерию, представляющего собой среднее значение динамической составляющей мощности привода за время движения.

Ключевые слова: стреловой кран, динамическая модель, математическая модель, интегральный критерий, оптимальный режим, энергия ускорений, пуск, торможение, динамическая составляющая мощности привода.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Гибкий подвес груза существенно влияет на управление стреловым краном во время поворота, при котором намного увеличивается период движения, быстро утомляется крановщик, что нередко создает аварийные ситуации [1]. Угол отклонения гибкого подвеса стрелового крана от вертикали в обычных условиях работы крана не превышает 8° , но известны случаи, когда он достигает 17° [2]. Это явление зависит от многих факторов, но прежде всего от динамических характеристик привода и фазового положения груза относительно точки подвеса перед началом разгона или торможения [3,4]. Как правило, в реальных условиях эксплуатации стреловых кранов необходима высокая точность позиционирования груза, поэтому его раскачивание не должно превышать 50...100 мм [5].

Опытные крановщики успешно гасят колебания груза в заданном месте путем чередования команд привода на торможение и разгон крана при повороте. Однако при ручном управлении не удастся свести до мини-

муму потери времени на успокоение груза и точное его позиционирование [6, 7].

Задача синтеза оптимальных режимов управления движением груза на гибком подвесе и реализация их механизмом поворота стрелового крана при помощи автоматических средств есть достаточно актуальной. В общем виде эта задача формируется следующим образом: необходимо получить режим управления движением механизма поворота стрелового крана, при котором груз переместится в заданное положение без колебаний после завершения цикла за заданное время или за минимальное время при соблюдении заданных ограничений на кинематические характеристики движения, силовые нагрузки или энергетические затраты [8, 9, 10].

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проблеме устранения колебаниями груза на гибком подвесе уже несколько десятков лет. Последние исследования, посвященные данной проблеме, основанные на использовании математических теорий оптимальных процессов (принцип максимума, вариационное исчисление). Заметим, что современные способы устранения колебаний груза предлагается реализовывать с помощью определенного управляющего воздействия на механизм поворота во время переходных режимов движения (разгон, торможение).

В работах [11, 12, 13, 14] за управляющий параметр выбрано силовое воздействие на приводной механизм: для устранения колебаний груза необходимо управлять моментом на валу электродвигателя механизма поворота. Управляющее действие имеет релейный характер, что приводит к дополнительным динамическим нагрузкам на кран. Этот подход неприемлем с точки зрения воз-

никновения значительных динамических нагрузок.

Посредством использования теории вариационного исчисления, как это сделано в работе [15], можно обеспечить плавное изменение кинематических характеристик механизма поворота и устранить колебания груза на гибком подвесе.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы заключается в уменьшении колебаний груза на гибком подвесе во время поворота стрелового крана путем оптимизации режима движения приводного механизма по интегральному динамическому критерию.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При оптимизации режимов движения механизма поворота стрелового крана с гибким подвесом груза необходимо выбирать динамическую модель таким образом, чтобы были учтены координаты основного движения и колебаний груза [16]. Поэтому выбрана динамическая модель, схема которой изображена на рис. 1 [17].

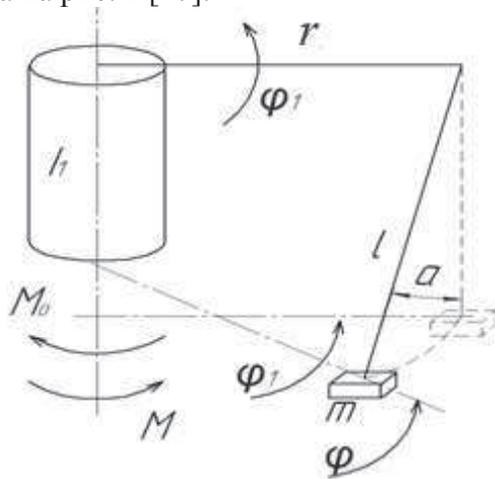


Рис. 1. Расчетная модель системы «колонна-груз»

Fig. 1. Calculation model of system is "column-load"

В этой модели в качестве обобщенных координат выбраны независимые угловые координаты стрелы φ_1 и груза φ .

Принятой динамической модели механизма поворота стрелового крана соответ-

ствуют дифференциальные уравнения движения, которые имеют вид:

$$\begin{cases} I\ddot{\varphi}_1 = M - \frac{mr^2}{l}g(\varphi_1 - \varphi) - M_c; \\ \ddot{\varphi} = \frac{g}{l}(\varphi - \varphi_1), \end{cases} \quad (1)$$

где: I – момент инерции привода, поворотной платформы и стрелы, сведенный к оси поворота крана; M, M_c – соответственно движущий момент приводного механизма и момент сил сопротивления, сведенные к оси поворота крана; m – масса груза; r – длина стрелы от оси поворота крана до точки подвеса груза; l – длина гибкого подвеса груза; g – ускорение свободного падения.

Критерием оптимизации режима движения механизма поворота стрелового крана с гибким подвесом груза выбран интегральный критерий, который представляется в виде интегрального функционала и отображает среднее значение динамической составляющей мощности приводного механизма за время движения [18]:

$$\dot{I} = \int_0^{t_1} V dt \rightarrow \min,$$

где: t – время; t_1 – продолжительность цикла движения механизма поворота стрелового крана; V – «энергия» ускорений [19] механизма поворота стрелового крана с гибким подвесом груза.

Для механизма поворота стрелового крана с гибким подвесом груза функция «энергии» ускорений имеет вид:

$$\dot{I} = \int_0^{t_1} V dt \rightarrow \min, \quad (2)$$

Со второго уравнения системы (1) найдем соотношения между угловыми перемещениями, скоростями и ускорения стрелы и груза:

$$V = \frac{1}{2}I_1\dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2}mr^2\dot{\varphi}^2. \quad (3)$$

После подстановки последней зависимости системы (4) в выражение функции «энергии» ускорений (3) получим:

$$\varphi_1 = \varphi + \frac{l}{g}\ddot{\varphi}; \quad \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi} + \frac{l}{g}\ddot{\varphi}; \quad \ddot{\varphi}_1 = \ddot{\varphi} + \frac{l}{g}\ddot{\varphi}. \quad (4)$$

Условием минимума интегрального критерия (2) является уравнение Эйлера Пуассона [20]:

$$V = \frac{1}{2} I_1 \left(\ddot{\varphi} + \frac{l}{g} \overset{IV}{\varphi} \right)^2 + \frac{1}{2} m r^2 \ddot{\varphi}^2. \quad (5)$$

Подставив выражение (5) «энергии» ускорений в уравнение (6), получим:

$$\frac{\partial V}{\partial \varphi} - \frac{d}{dt} \frac{\partial V}{\partial \dot{\varphi}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial V}{\partial \ddot{\varphi}} - \frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial V}{\partial \overset{IV}{\varphi}} + \frac{d^4}{dt^4} \frac{\partial V}{\partial \overset{IV}{\varphi}} = 0. \quad (6)$$

Разделим уравнение (7) на коэффициент возле старшей производной, в результате чего будем иметь:

$$I_1 \frac{l^2}{g^2} \overset{VIII}{\varphi} + 2 I_1 \frac{l}{g} \overset{VI}{\varphi} + (I_1 + m r^2) \overset{IV}{\varphi} = 0. \quad (7)$$

В уравнение (8) сделаем замену:

$$\overset{VIII}{\varphi} + 2 \frac{g}{l} \overset{VI}{\varphi} + \left(1 + \frac{m r^2}{I_1} \right) \frac{g^2}{l^2} \overset{IV}{\varphi} = 0. \quad (8)$$

где: k – частота собственных колебаний груза на гибком подвесе.

В результате чего будем иметь:

$$k = \sqrt{g/l}, \quad (9)$$

Для процесса пуска граничные условия имеют вид:

$$\overset{VIII}{\varphi} + 2k \overset{VI}{\varphi} + \left(1 + \frac{m r^2}{I_1} \right) k^4 \overset{IV}{\varphi} = 0. \quad (10)$$

где: ω_y – установившееся скорость поворота стрелы.

$$\begin{cases} t = 0 : \varphi_1 = \varphi = 0, \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi} = 0; \\ t = t_1 : \varphi_1 = \varphi, \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi} = \omega_y, \ddot{\varphi}_1 = \ddot{\varphi}, \end{cases} \quad (11)$$

Учитывая зависимости (4), выразим граничные условия координаты φ_1 и ее производных через координату φ и ее производные. В результате чего, будем иметь:

$$\begin{cases} t = 0 : \varphi = 0, \dot{\varphi} = 0, \ddot{\varphi} = 0, \overset{IV}{\varphi} = 0; \\ t = t_1 : \dot{\varphi} = \omega_y, \ddot{\varphi} = 0, \overset{IV}{\varphi} = 0, \varphi = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Соответственно для процесса торможения граничные условия имеют вид:

$$\begin{cases} t = 0 : \varphi_1 = \varphi = 0, \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi} = \omega_y; \\ t = t_1 : \varphi_1 = \varphi, \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi} = 0, \ddot{\varphi}_1 = \ddot{\varphi}. \end{cases} \quad (13)$$

Аналогично, выразим граничные условия координаты φ_1 и ее производных через ко-

ординату φ и ее производные. В результате чего, будем иметь:

$$\begin{cases} t = 0 : \varphi = 0, \dot{\varphi} = \omega_y, \ddot{\varphi} = 0, \overset{IV}{\varphi} = 0; \\ t = t_1 : \dot{\varphi} = 0, \ddot{\varphi} = 0, \overset{IV}{\varphi} = 0, \varphi = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Для решения полученного дифференциального уравнения (10) с учетом граничных условий (10, 14) удобно использовать программу Wolfram Mathematica v.7, которая позволяет искать символьные решения дифференциальных уравнений [21].

В результате решения дифференциального уравнения (10) для граничных условий пуска механизма поворота (10, 14) и его конструктивных, кинематических и динамических параметров: $I = 500000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $m = 9000 \text{ кг}$; $r = 8 \text{ м}$; $l = 5 \text{ м}$; $g = 9.8 \text{ м/с}^2$; $M_o = 58000 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $\omega_y = 0,3 \text{ рад/с}$; $t_1 = 3,25 \text{ с}$ – время пуска, равное периоду собственных колебаний груза на гибком подвесе, построены графики кинематических характеристик пуска и торможения колонны и груза (рис.2). Сплошными линиями изображены кинематические характеристики движения груза. Штриховыми линиями изображены кинематические характеристики движения колонны крана. Проанализируем полученные графики кинематических характеристик. Из графиков угловых скоростей (рис.2, а и 2, в) можно увидеть, что изменение скорости поворота колонны достаточно плавное как в первом, так и во втором случаях, и не превышает $0,3 \text{ рад/с}$. При сравнении ускорений поворота стрелы и груза (рис.2, б и 2, г) очевидно, что ускорение стрелы как при разгоне, так и при торможении изменяются довольно плавно и их максимальные значения не превышают $0,4 \text{ рад/с}^2$.

В обоих случаях ускорения колонны принимают как положительные, так и отрицательные значения (имеет место процесс торможения колонны). С графиков движущего момента (рис.3, а и 3,б) очевидно, что движущий момент изменяется плавно, и есть непрерывным, что в свою очередь упрощает возможное мехатронное управление таким приводом [21].

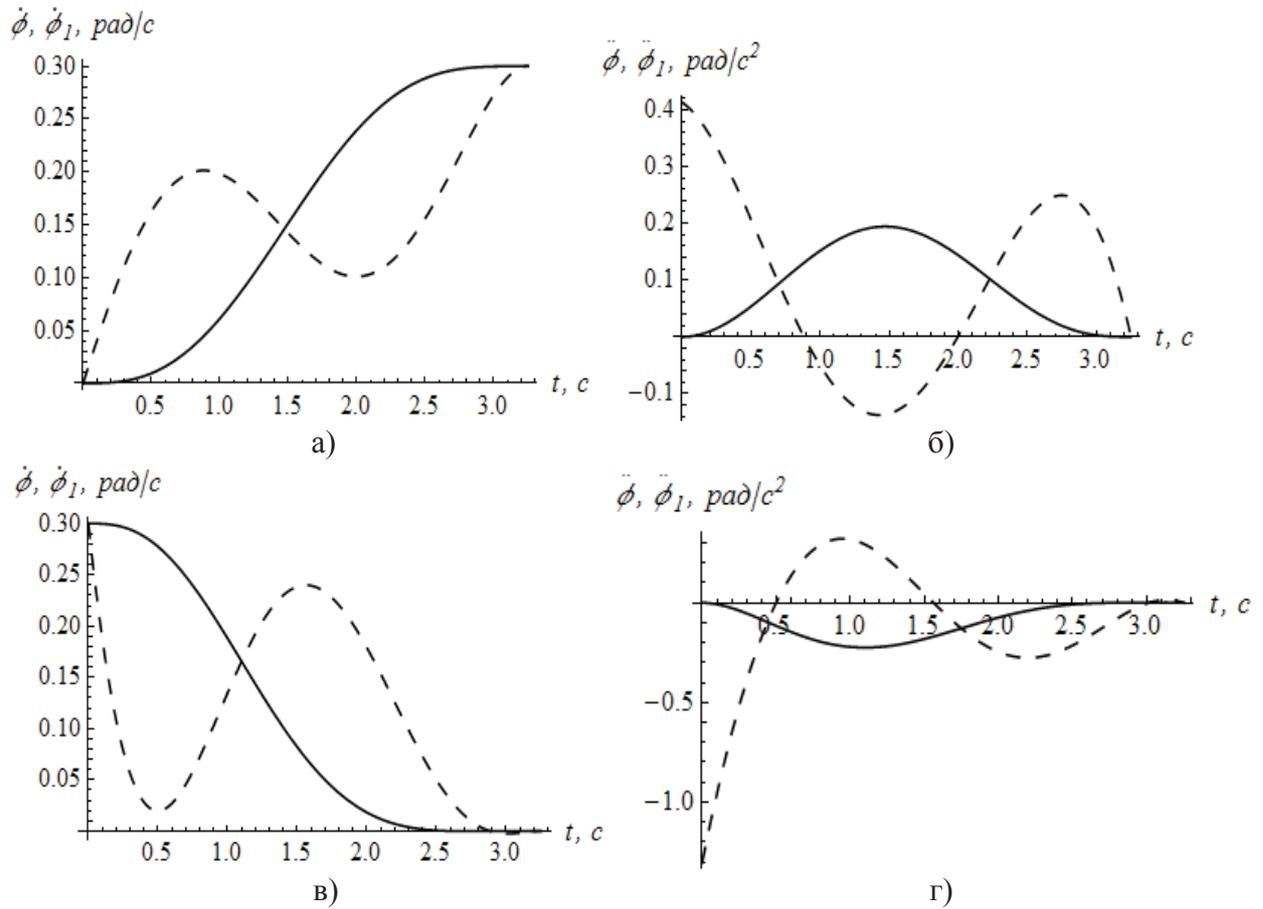


Рис. 2. Графики функций скорости (а) и углового ускорения (б) колонны и груза при разгоне, и соответственно (в) и (г) при торможении
Fig. 2. Charts of functions of speed (а) and angular acceleration (б) of column and load at an acceleration, and accordingly (в) and (г) at braking

Стоит заметить, что в случае торможения (рис.3, б) движущий момент принимает как отрицательные, так и положительные значения, что негативно влияет на работу электропривода.

Таким образом, использование интегрального критерия, который представляется в виде интегрального функционала и отображает среднее значение динамической составляющей мощности приводного механизма за время движения, позволяет значительно уменьшить воздействие динамических нагрузок и энергетических затрат.

Из полученных фазовых портретов оптимальных режимов разгона (рис.4, а) и торможения (рис.4, б) видно, что в первом и втором случаях, до начала установившегося движения и после торможения, колебания груза устраняются.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

- решения задачи устранения колебаний на гибком подвесе путем использования вариационного исчисления оправдано, поскольку найдено управляющее воздействие на механизм поворота, которое удовлетворяет условиям поставленной задачи;
- использование выбранного критерия оптимальности движения механизма поворота позволяет получить законы управления, обеспечивающие устранение колебаний груза и улучшающие переходные режимы его движения;
- для осуществления управления системой «колонна-груз» избрано приводное усилие, на которое накладываются определенные ограничения;

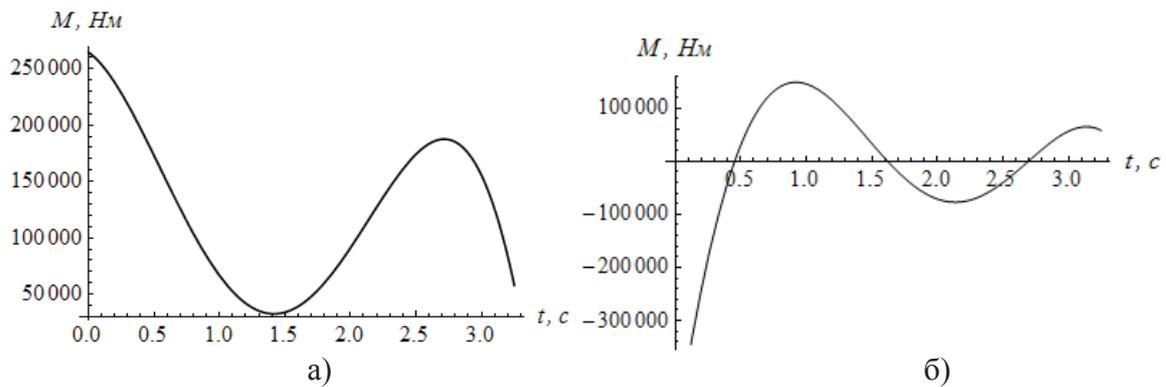


Рис. 3. Графики движущего момента при разгоне (а) и торможении (б)
Fig. 3. Charts of motive moment at an acceleration (a) and braking (б)

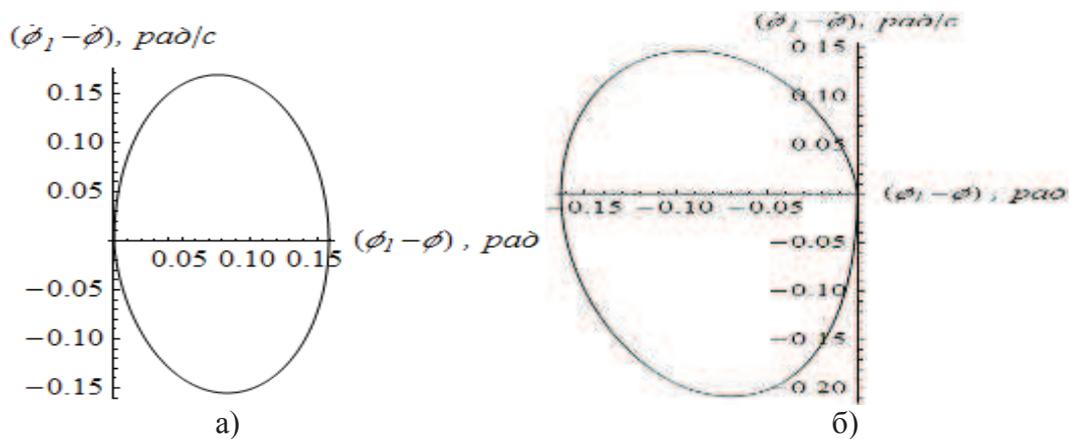


Рис. 4. Фазовый динамический портрет системы «колонна-груз», при ускорении (а) и торможении (б)
Fig. 4. Phase dynamic portrait of the system "column-load", at acceleration (a) and braking (б)

- полученные оптимальные законы реализуются путем использования автоматизированной системы управления механизмом поворота крана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gaydamaka V.F. 1988: Rabota gruzopodyemnykh mashin pri besstupenchatom tormozhenii / Gaydamaka V.F. – Kh.: Vishcha shkola. – 141.
2. Gerasimyak R.P. 1970: Elektroprivody kranovykh mekhanizmov / Gerasimyak R.P., Parail V.A. – M.: Energiya. – 136.
3. Geryasimyak R.P. 1999: Optimalnoye upravleniye yelektroprivodom mekhanizma povorota / Geryasimyak R.P., Melnikova L.V. // Avtomatika. Avtomatizatsiya. Elektromekhanicheskiye komplekсы i sistemy: nauchn. tekhn. zhurnal. – №1. – 87-94.
4. Grigorov O.V. 2006: Vantazhopidyomni mashini: navch. posibnik / O.V. Grigorov, N.O. Petrenko. – Kh.: NTU „KhPI”. – 304.
5. Grigorov O.V. 1997: Optimalne keruvannya rukhom mekhanizmiv vantazhopidyomnikh mashin / O.V. Grigorov, V.S. Loveykin. – K.: Vipol. – 264.
6. Dyakonov V. P. 2004: Mathematica 4.1/4.2/5.0 v matematicheskikh i nauchno-tekhnicheskikh raschetakh / Dyakonov V. P. – M.: SOLON - Press. –696.
7. Zaretskiy A.A. 1969: Optimizatsiya upravleniya mekhanizmami gruzopodyemnykh kranov v perekhodnykh rezhimakh / A.A. Zaretskiy, N.I. Portnoy // Vestnik mashinostroyeniya. – №8. – 14-18.
8. Komarov M.S. 1953: Dinamika gruzopodyemnykh mashin / Komarov M.S. – M.: Mashinostroyeniye. – 187.

9. Lobov N. A. 1987: Dinamika gruzopodyemnykh kranov / Lobov N. A. – M.: Mashinostroyeniye. – 160.
10. Loveykin V. S., Romasevich Yu.A. 2012: Optimizatsiya rezhima razgona odnomassovoy dinamicheskoy sistemy s integralnymi ogranicheniyami / V.S. Loveykin, Yu.A. Romasevich // Motrol. – Vol 14. – № 3. – 158-163.
11. Loveykin V. S. 1990: Raschety optimalnykh rezhimov dvizheniya mekhanizmov stroitelnykh mashin / Loveykin V. S. – K.: UMK VO. – 168.
12. Loveykin V. S. 2007: Optimizatsiya perekhidnykh rezhimiv rukhu mekhanizma peresuvannya vizka vantazhopidyomnykh mashin / Loveykin V. S., Yaroshenko V.F., Romasevich Yu. O. // Visnik Kharkivskogo natsionalnogo tekhnichnogo universitetu silskogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka. – №59, tom 2. – 452-460.
13. Loveykin V.S. 2008: Zmenschennya rozgoiyduvannya vantazhiv na gnuchkomu pidvishuvanni / V.S. Loveykin, V.F. Yaroshenko, Yu.O. Romasevich // Mekhanizatsiya ta yelektifikatsiya silskogo gospodarstva. – № 92. – 524-529.
14. Modelyuvannya 2004: Modelyuvannya dinamiki mekhanizmiv vantazhopidyomnykh mashin / [Loveykin V.S., Chovnyuk Yu.V., Dikteruk M.G., Pastushenko S.I.]. – K.-Mikolaïv: RVV MDAU. – 286.
15. Naydenko Ye.V. 2007: Upravleniye elektroprivodom mekhanizmov gorizontalnogo peremeshcheniya s podveshennym gruzom / Naydenko Ye.V. // Yelektromashbud. Ta yelektroobldan. – Vip.69. – 17-22.
16. Romasevich Yu.O. 2011: Optimizatsiya rezhimu zmini vilotu vantazhu bashtovogo krana za odinichnimi kinematichnimi kriteriyami / Romasevich Yu.O., Shumilov G.V. // Motrol. – Tom 13 B. – 167-173.
17. Rudakov V.V. 1987: Asinkhronnyye elektroprivody s vektornym upravleniyem / Rudakov V.V., Stolyarov I.M., Dartau V.A. – L.: Energoatomizdat. – 136.
18. Sakharov E.O. 1970: Nekotoryye voprosy dempfirovaniya kolebaniy gruzha na gibkom podvese / E.O. Sakharov // Issledvaniye dinamiki gruzopodyemnykh kranov. – №5(100). – 30-39.
19. Sirotskiy V.F. 1953: Kratkiye itogi izucheniya raboty peredovikh kranovshchikov portalnykh kranov / V.F. Sirotskiy // Morskoy i rechnoy flot. – №8. – 4-7.
20. Smekhov A. A. 1975: Optimalnoye upravleniye podyemno-transportnymi mashinami / Smekhov A. A., Yerofeyev N. I. – M.: Mashinostroyeniye. – 239.
21. Elsgolts L. E. 1969: Differentsialnyye uravneniya i variatsionnoye ischisleniye / Elsgolts L. E. – M.: Nauka. – 424.

OPTIMIZING THE DYNAMIC MODES OF SLEWING JIB CRANE

Summary. The method of cargo oscillation reduction, during the lifting machines operation, has been considered in the article. The start-up mode of the crane swinging mechanism optimization has been carried out by means of variational calculation.

The criterion which is the average value of the dynamic component of the drive power of the move. has been used. And this criterion has been subject to minimization. The torque moment of the driving mechanism, acting towards the crane swinging mechanism, has been selected as a control parameter.

Key words: jib crane, dynamic model, mathematical model, integral criterion, optimal mode, energy of acceleration, starting, braking, dynamic component of drive power