УДК 62-83

РЕАЛИЗАЦИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Е. В. Найденко
Одесский национальный политехнический университет

Аннотация. *Рассмотрено управление векторным электроприводом механизма горизонтального перемещения с подвешенным грузом, обеспечивающее минимальное время динамических режимов и гашение колебаний груза в конце переходного процесса. Исследованы возможные динамические нагрузки в элементах трехмассовой электромеханической системы с учетом зазора в механической передаче, приведены снижающие их способы управления пуском двигателя. Представлены результаты моделирования.*

Ключевые слова: *трехмассовая электромеханическая система, кинематическая передача, динамические нагрузки, векторных электропривод, упругая связь.*

Введение

Для повышения производительности механизмов горизонтального перемещения, значительную долю цикла работающих в переходных режимах, требуется снижение времени разгона и торможения с одновременным решением проблемы раскачивания груза. Ранее с целью оптимизации переходного процесса был использован принцип максимума Понтрягина [2], с помощью которого реализовано управление электроприводом механизмами горизонтального перемещения, обеспечивающее минимальное время динамических режимов и гашение колебаний груза. Полученный релейный закон изменения усилия F(t) на трех этапах приведен на рис.1, где продолжительность каждого этапа определяется следующими соотношениями:

$$t_1 = t_3, t = t_1 + t_2 + t_3 = T_p + 2t_2 \qquad (1)$$

а время t_2 может быть найдено решением следующего уравнения:

$$\sin\Omega\left(t_2 + \frac{T_p}{2}\right) = 2\sin\frac{\Omega t_2}{2}, \qquad (2)$$

где постоянная величина

$$T_p = \frac{V_{1з}}{F_m} m$$

− это время разгона до заданной скорости $V_{1з}$ массы $m = m_1 + m_2$ при отсутствии раскачивания груза и действии постоянной силы F_m [2].

Цель работы - разработка управляющего воздействия, снижающего ударные нагрузки; возможность его реализации векторным асинхронным электроприводом.

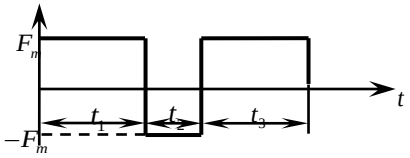

Рис. 1. Диаграмма изменения управляющего воздействия

1. Динамические нагрузки в трехмассовой электромеханической системе

Мгновенное изменение управляющего воздействия приводит к значительным нагрузкам в кинематических передачах механизма. С целью учёта этого влияния целесообразно рассмотреть трехмассовую электромеханическую систему с упругой связью между двигателем и тележкой (поворотной платформой), обладающей конечным значением жёсткости C_{12}. Расчётная схема такой ЭМС приведена на рис. 2.

Рис.2. Расчетная схема механизма передвижения с грузом

Здесь ротор двигателя с расположенными на его валу инерционными элементами массой m_1, тележка массой m_2, подвешенный груз массой m_3, суммарный зазор в кинематических передачах (редукторе, кинематической связи вал-шестерня и т.д.) δ, результирующая жесткость упругих элементов между двигателем и механизмом C_{12}, эквивалентная жесткость, соответствующая раскачиванию подвешенного груза C_{23}.

Трехмассовая электромеханическая система, если пренебречь вязким трением и зазорами,

© Найденко Е. В., 2018

описывается следующей системой исходных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} m_1 \dfrac{dV_1}{dt} = F - C_{12}(S_1 - S_2) \\ m_2 \dfrac{dV_2}{dt} = C_{12}(S_1 - S_2) - F_{23} \cdot \alpha - F_c \\ m_3 \dfrac{dV_3}{dt} = F_{23} \cdot \alpha \\ \alpha = \dfrac{S_2 - S_3}{l} \\ F_{23} = m_3 g \end{cases}$$

Структурная схема механизма приведена на рис.3.

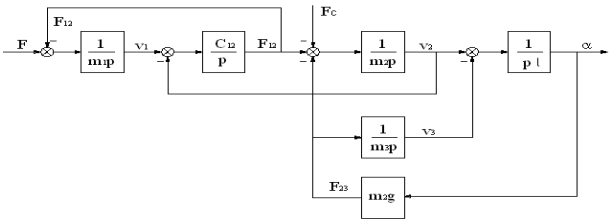

Рис.3. Структурная схема механизма передвижения с грузом

Наибольшие нагрузки в передачах над средней характеризуются коэффициентом динамичности K_∂. Коэффициент динамичности – важный показатель условий работы механического оборудования, его желательно по возможности снижать, создавая щадящий режим для этого оборудования [2]

$$K_\partial = \frac{F_{12\max}}{F_{12cp}},$$

где F_{12cp} определяется как

$$F_{12cp} = \frac{m_2 + m_3}{m_1 + m_2 + m_3} \cdot (F_m - F_c) + F_c.$$

Существенного снижения динамических нагрузок без наличия люфта или при небольшом его значении (0,5 рад) можно добиться подачей управляющего воздействия (момента) не скачком, а по экспоненте [2, 3].

Для моделирования использовался асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии 4MTKF(H)112LB6, $P_н$=3,7 кВт, $n_н$=870 об/мин, $I_н$=10,6 А; массы тележки и груза 5т и 15т соответственно.

Графики переходного процесса в трехмассовой электромеханической системе при экспоненциальном изменении управляющего воздействия приведены на рис.4.

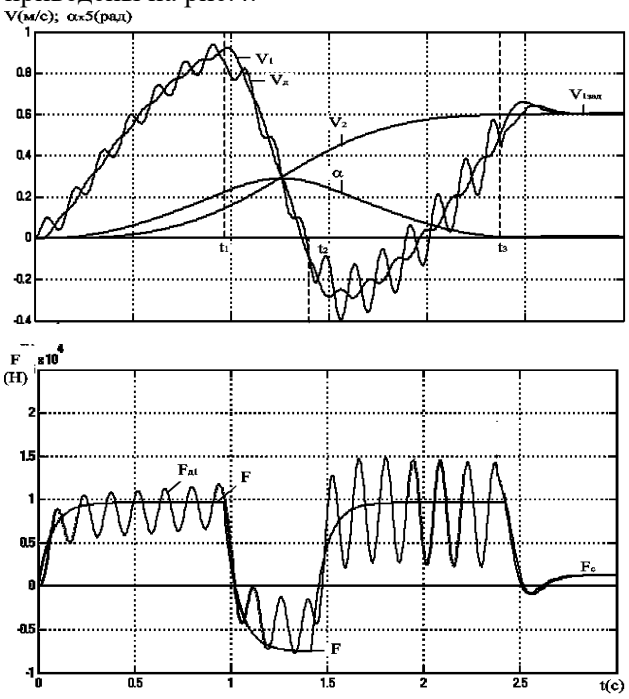

Рис. 4. Переходные процессы трехмассовой ЭМС при изменении силы F по экспоненциальному закону

Коэффициенты динамичности двухмассовой и трехмассовой электромеханической систем, полученные в результате моделирования, приведены соответственно в табл.1 и табл.2.

Таблица 1

Коэффициенты динамичности двухмассовой электромеханической системы

	Скачок	Экспонента τ=0,5T
$K_{\partial 1}$	2	1,304
$K_{\partial 2}$	2,04	1,109
$K_{\partial 3}$	3,47	1,744

Таблица 2

Коэффициенты динамичности трехмассовой электромеханической системы

	Скачок	Экспонента		
		τ=0,25T	τ=0,5T	τ=0,75T
$K_{\partial 1}$	1,9	1,48	1,263	1,185
$K_{\partial 2}$	1,67	1,17	0,874	0,754
$K_{\partial 3}$	3,20	2,16	1,612	1,415

В трехмассовой системе коэффициенты динамичности несколько меньше, чем в двухмассовой, и снижаются с увеличением τ.

2. Реализация оптимального управления механизмом горизонтального перемещения

Предложенное оптимальное управление электроприводом механизма горизонтального перемещения может быть реализовано на базе современного преобразователя частоты с векторным управлением и микроконтроллера. Для управления без существенных перегрузок звеньев требуется определенным образом формировать момент асинхронного двигателя, а также изменять его знак в переходных режимах, т. е. необходимо иметь возможность быстрого непосредственного управления моментом электродвигателя.

Асинхронные короткозамкнутые двигатели с частотным преобразователем (ПЧ-АД) позволяют реализовать абсолютно мягкую механическую характеристику двигателя с регулируемой частотой момента.

Мгновенные трехфазные токи преобразовываются к синхронной системе координат d-q, вращающейся со скоростью, которая соответствует частоте напряжения Ω_1. Тогда с помощью проекции вектора тока статора на продольную ось можно управлять потокосцеплением ротора, причем передаточная функция этого канала – инерционное звено с электромагнитной постоянной времени цепи ротора, а с помощью проекции вектора тока статора на поперечную ось оказывается возможным независимо и практически безынерционно управлять частотой тока ротора Ω_2. Тогда мгновенное значение электромагнитного момента примет вид:

$$\mathrm{m} = \frac{3p}{2R_2}\Psi_{2d}^2\Omega_2$$

где частота ротора Ω_2 при заданном потокосцеплении ротора Ψ_{2d} определяет момент двигателя, R_2 – активное сопротивление цепи ротора, p – число пар полюсов двигателя [2].

Таким образом, при постоянстве потокосцепления и частоты ротора электромагнитный момент также величина постоянная. При изменении скорости двигателя частоту токов статора необходимо менять так, чтобы

$$\Omega_1 = p\omega_1 \pm \Omega_2 = const$$

Для задания момента двигателя необходимо соответствующим образом ограничивать поперечную составляющую тока статора, тогда двигатель с векторным управлением обладает абсолютно мягкой механической характеристикой.

Для проверки этих положений была использована модель асинхронного частотно-управляемого электропривода с векторным управлением в пакете математического моделирования Matlab. Переходные процессы при работе электропривода ПЧ-АД и мгновенном изменении управляющего воздействия представлены на рис.5.

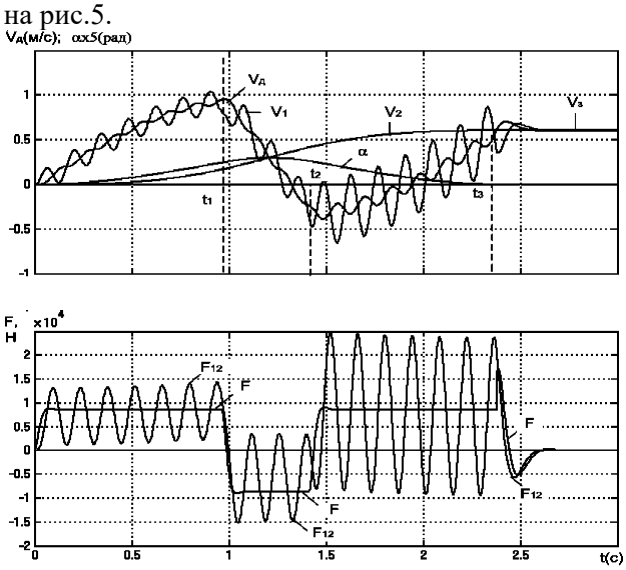

Рис. 5. Расчетные графики процесса пуска

Управление электроприводом механизма горизонтального перемещения, при котором используется асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и преобразователь частоты с векторным управлением, позволяет реализовать поставленную задачу и изменять момент двигателя по определенному закону. При этом момент двигателя реально изменяется по экспоненциальному закону из-за магнитной инерционности цепи ротора, коэффициент динамичности на первом этапе уменьшается, что облегчает работу механического оборудования.

3. Управления механизмом горизонтального перемещения, сжижающее динамические нагрузки в механических передачах

Из-за наличия люфтов дифференциальные уравнения реальных электромеханических систем являются нелинейными. Наличие зазора в механической части может приводить к недопустимым ударным динамическим нагрузкам при его выборе.

Известно, что коэффициент динамичности при выборе зазоров во время пуска в двухмассовой ЭМС может определяться по следующей формуле, когда M_m = const [2]:

$$K_д = 1 + \sqrt{1 + \frac{2\delta C_{12} J_2}{J_1 + J_2} \cdot \frac{M_m}{M_{12cp}^2}} \qquad (3)$$

При разгоне коэффициент динамичности всегда больше 2 и тем выше, чем больше зазор и коэффициент жесткости.

Реально величина зазора в худшем случае может доходить до одного оборота двигателя, т.е. составлять 5,5 – 6,0 рад. В табл.3 приведены наибольшие коэффициенты динамичности при указанных параметрах ЭМС для трех этапов разгона при различных наиболее распространенных значениях люфта при мгновенном изменении управляющего воздействия (колонка 1) и управляющем воздействии, изменяющемся по экспоненциальному закону (колонка 2).

Таблица 3

Коэффициент динамичности при различных управляющих воздействиях и различных значениях зазора

δ, рад	0		3		5	
	1	2	1	2	1	2
$K_{\partial 1}$	2,0	1,2	7,7	5,8	8,4	7,3
$K_{\partial 2}$	3,5	1,0	11,0	6,9	13,6	8,3
$K_{\partial 3}$	5,6	1,4	15,5	8,8	19,1	10,8

Зависимость коэффициентов динамичности от величины зазора при различных управляющих воздействиях приведена на рис.6.

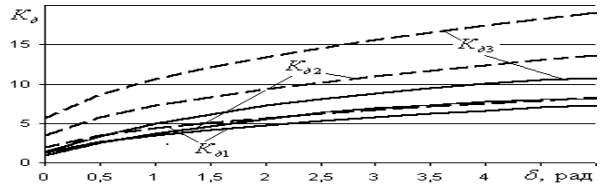

Рис.6. Зависимость коэффициентов динамичности от величины зазора при различных управляющих воздействиях: — при экспоненциальном, — — при скачкообразном

На рис. 7 изображена зависимость момента упругой связи от времени при пуске ДЭМС, где t_z – время выбора зазора. Времена достижения упругим моментом экстремальных значений

$$t_{max} = \frac{1}{\Omega}\left[\pi - \mathrm{arctg}\frac{C_{12}}{M_{12ср}\Omega}\sqrt{\frac{2\delta M_m}{J_1}}\right],$$

$$t_{min} = \frac{1}{\Omega}\left[2\pi - \mathrm{arctg}\frac{C_{12}}{M_{12ср}\Omega}\sqrt{\frac{2\delta M_m}{J_1}}\right].$$

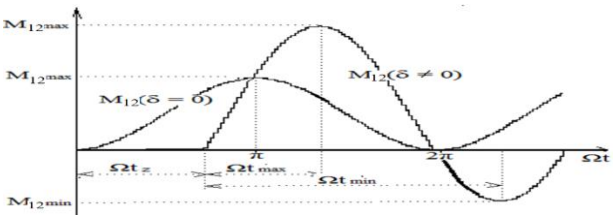

Рис.7. Зависимость момента упругой связи от времени при пуске

Расчетные графики переходных процессов пуска при δ = 3 рад и мгновенном изменении управляющего воздействия приведены на рис.8.

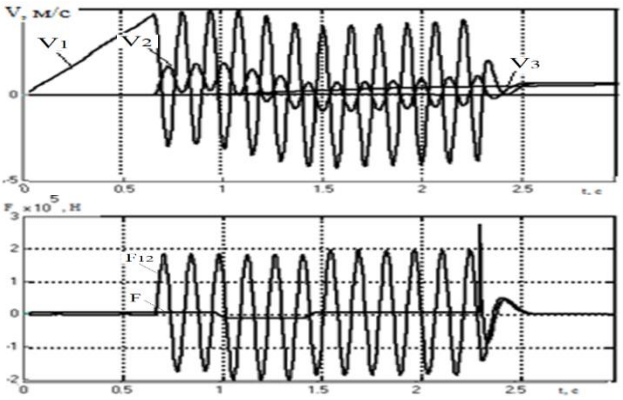

Рис.8. Расчетные графики переходных процессов пуска при δ = 3 рад и мгновенном изменении управляющего воздействия

Для снижения ударных нагрузок управляющий сигнал формируется таким образом, чтобы при пуске момент двигателя M_1 был достаточным только для разгона двигателя и достигал максимального значения M_m в момент выбора зазора t_z (рис.9).

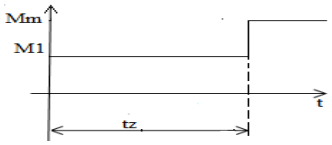

Рис. 9. Диаграмма изменения управляющего воздействия при выборе зазора

Значение момента при пуске определяется исходя из допустимого коэффициента динамичности K_∂

$$M_1 = \frac{K_\partial(K_\partial - 2)}{2\delta C_{12}} M_m^2 \qquad (4)$$

Расчетные графики переходных процессов пуска при выборе зазора на пониженной скорости приведены на рис.10.

Для снижения скорости двигателя к моменту выбора зазора управляющий сигнал формируется в соответствии с диаграммой, приведенной на рис.10. Времена переключений определяются из условия равенства нулю скорости двигателя к моменту выбора зазора

$$t_1 = t_2 = \sqrt{\frac{\delta J_1}{2M}}$$

Расчетные графики переходных процессов пуска снижении скорости к моменту выбора зазора приведены на рис.11.

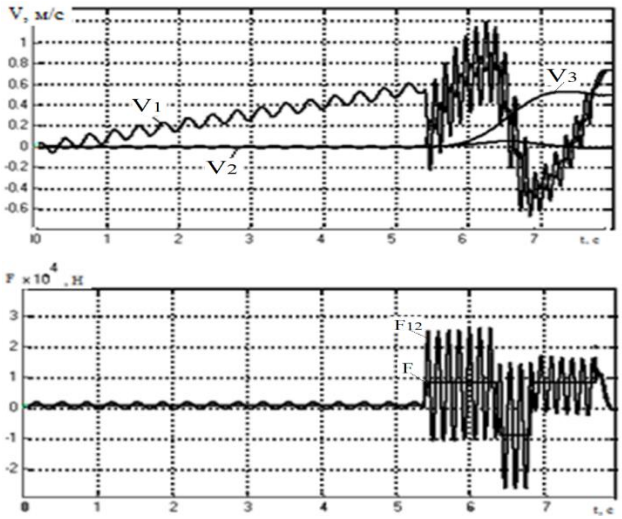

Рис.9. Расчетные графики переходных процессов пуска при выборе зазора на пониженной скорости (δ = 3 рад)

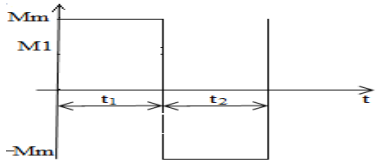

Рис. 10. Диаграмма изменения управляющего воздействия при выборе зазора

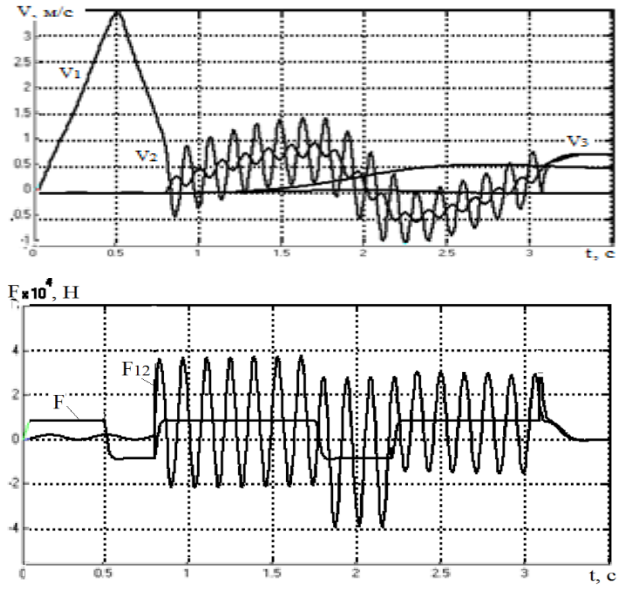

Рис.11. Расчетные графики переходных процессов пуска снижении скорости к моменту выбора зазора

При расчетах и моделировании процесса пуска величина зазора принимается условно равной половине реального значения зазора. Поэтому целесообразно перед основным циклом работы произвести пуск и реверс двигателя с пониженным моментом M_1 для определения времени выбора зазора

$$t_z = \frac{\omega_{1z}}{\varepsilon_z},$$

где ε_z – ускорение при выборе зазора;

ω_{1z} – скорость двигателя при выборе зазора. Скорость двигателя обычно измеряется достаточно точно датчиками, установленными на его валу.

Выводы

Показана необходимость и целесообразность использования асинхронного векторного электропривода для реализации оптимального управления механизмом горизонтального перемещения, обеспечивающего минимальное время динамических режимов и гашение колебаний груза в конце переходного процесса.

Разгон на пониженной скорости перед основным циклом переключений управляющего воздействия (рис.1) позволяет ограничивать динамические нагрузки допустимыми значениями, однако время переходного процесса существенно увеличивается.

При снижении скорости к моменту выбора зазора значение коэффициента динамичности снижается до 3,3, время переходного увеличивается незначительно.

Коррекция изменяющегося в ходе работы значения зазора в программе управления электроприводом может быть проведена с помощью выражения (4). Разработка алгоритма оптимального управления электроприводом механизма горизонтального перемещения, реализуемого с помощью современных промышленных контроллеров, представляет собой этап дальнейшего исследования.

Список использованной литературы

1. Ключев, В. И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов [Текст] / В. И. Ключев, В. М. Терехов. – М.: Энергия, 1980. − 360 с.

2. Герасимяк, Р. П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем [Текст] / Р. П. Герасимяк, В. А. Лещёв. – Одесса: СМИЛ, 2008. − 192 с.

3. Герасимяк, Р. П. Нагрузки в кинематических передачах двухмассовой электромеханической системы в режиме торможения [Текст] / Р. П. Герасимяк, Е. В. Найденко // Электротехнические и компьютерные системы. – Киев: – 2015. – Вып. 17(93). – С.15–22.

4. Герасимяк, Р. П. Двухмассовая электромеханическая система с люфтом в передаче в режиме торможения [Текст] / Р. П. Герасимяк, Е. В. Найденко //. Электротехнические и компьютерные

системы. – Киев: – 2015. – Вып. 18(94). – С.62–68.
5. Герасимяк, Р. П. Управление асинхронным электроприводом механизмов поворота, обеспечивающее снижение динамических нагрузок [Текст] / Р. П. Герасимяк, Е. В. Найденко // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Вісник НТУ «ХПІ» – Харків: – 2008. – Вып. 30.– С. 111– 112.
6. Бушер, В. В. Учебный програмно–аппаратный макет для исследования двухмассовой электромеханической системы [Текст] / В. В. Бушер, Е. В. Найденко //. Электротехнические и компьютерные системы. – Киев: – 2015. – Вып. 20(96). – С.16–22.
7. Фираго, Б. И. Применение устройств плавного пуска и торможения асинхронных двигателей в электроприводах крановых механизмов передвижения [Текст] / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев // Электротехнические и компьютерные системы. – Киев: – 2011. – Вып. 4.(80). – С.30–38.
8. Smolyaninov, D. Stand der Forschungen zur Pendeldampfung bei Drehkranen / Smolyaninov D., Palis F., Horn P., Grigorov O. W. – Kranfachtangung Universität Magdeburg, 2002, pp. 113 – 128.
9. Smolyaninov, D. Ergebnisse der Untersuchungen zur Pendeldampfung bei Drehkranen. / Smolyaninov D., Horn P., Krause F., Palis F. – Kranfachtangung Technische Universität Dresden, 2003, pp 107 – 116.

References

1. Klyuchev, V. I., and Terekhov, V. M. (1980), *Electric Motor and Automation of General–Purpose Machinery [Elektroprivod i avtomatizatsiya ob–shchepromyshlennykh mekhanizmov],* Moskow, Russian Federation, *Energy,* 360 p. (In Russian).
2. Gerasimyak, R. P., and Leshchev, V. A. (2008), *Analysis and Synthesis of Crane Electromechanical Systems [Analiz i sintez kranovih elektromehanicheskih system],* Odessa, Ukraine, *SMIL,* 192 p. (In Russian).
3. Gerasimyak, R. P., and Naydenko, E. V. (2015), Loads in Kinematic Transfers Two–mass Electromechanical System During Braking [Nagruzki v kinematicheskih peredachah dvuhmassovoy elektromehanicheskoy sistemi v regime tormogenija]. *Electro–technical and computer systems*, Kiev, Ukraine, Vol. 1(93), pp. 15–22 (in Russian).
4. Gerasimyak, R. P., and Naydenko, E. V. (2015), The kinematic transmission loads of two–mass electromechanical system with gear during braking [Dvuhmassovaja electromehanicheskaja sistema s luftom v peredache v regime tormogenija]. *Electro–technical and computer systems*, Kiev, Ukraine, Vol.18(94), pp. 62–68 (in Russian).
5. Gerasimyak, R. P., and Naydenko, E. V. (2008), Management of asynchronous electric motor mechanisms pivot provides a reduction of dynamic loads [Upravlenie asinhrpnnim electroprivodom mehanismjv povorota, obespechivayuchee snigenie dinamicheskih nagrusok]. *Problems of Automated Electric. . Theory and Practice*. – Kharkiv, Ukraine, Vol. 30, pp 111– 112 (In Russian).
6. Busher, V. V., and Naydenko, E. V. (2015), Educational hardware and software layout for research two–mass electromechanical system [Uchebniy programno–apparatniy maket dlja issledovanija dvuhmassovoy electromehanicheskoy sistemi]. *Electro–technical and computer systems*, Kiev, Ukraine, Vol. 20 (96), pp.16–22 (in Russian).
7. Firago, B. I., and Vasilyev, D. S. (2011), The use of soft starters and braking asynchronous motors in electric crane mechanisms of movement [Primenenie ustrojstv plavnogo puska i tormogenija asinhronnih dvigatelej v elektroprivodah kranovih mehanizmov peredvigenija]. *Electrical and Computer Systems*, Kiev, Ukraine, Vol. 4(80), pp.30–38 (in Russian).
8. Smolyaninov, D., Palis, F., Horn, P., and Grigorov, O. W. (2002), Prior research of oscillation damping in cranes. *Kranfachtangung Universität Magdeburg*, pp. 113—128 (in Germany).
9. Smolyaninov, D., Horn, P., Krause, F., and Palis, F. (2003), Results of investigations of oscillation damping in cranes. *Crane Symposium Technical University Dresden*, pp 107–116 (in Germany).

IMPLEMENTATION OF OPTIMAL CONTROL OF THE MECHANISM OF HORIZONTAL MOVEMENT

O. V. Naidenko
Odessa National Polytechnic University

Abstract. *In order to increase the productivity of horizontal movement mechanisms, which play a significant part of the cycle in transient modes, it is necessary to reduce the time of acceleration and inhibition with a one-time solution to the problem of cargo rotation. Previously, in order to optimize the transition process, the principle of Pontryagin's maximum was used, with the help of which the control of the electric motor was implemented, which provides the minimum time of dynamic regimes and the extinction of the load of*

the cargo. An instantaneous change in control and the presence of a gap leads to significant loads in the kinematic gears of the mechanism when it is selected. The control of the electric motor, which uses an asynchronous motor with a short-circuit rotor and a vector-controlled frequency converter, allows you to reactivate the task and change the engine moment according to a certain law. The necessity and expediency of using an asynchronous vector electric motor for the realization control by the mechanism, which provides the minimum time of dynamic regimes and the suppression of cargo fluctuations at the end of the transition process is shown. Acceleration at a reduced speed before the main switching cycle of control influence allows you to limit the loads to allowable values, but the time of the transition process substantially collapses. When the speed is reduced to the time of the selection of the gap, the value of the dynamics decreases to 3, the transition time increases slightly. The development of the algorithm for controlling the electric motor implemented represents a stage of further research.

Keywords:. *three-mass electromechanical system, kinematic transmission, dynamic loads, vector electric motor, elastic coupling, suspended load.*

РЕАЛІЗАЦІЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ МЕХАНІЗМОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ

О. В. Найденко
Одеський національний політехнічний університет

Анотація. *Для підвищення продуктивності механізмів горизонтального переміщення, які значну частку циклу працюють в перехідних режимах, потрібно зниження часу розгону і гальмування з одночасним рішенням проблеми розгойдування вантажу. Раніше з метою оптимізації перехідного процесу був використаний принцип максимуму Понтрягіна, за допомогою якого реалізовано керування електроприводом, що забезпечує мінімальний час динамічних режимів і гасіння коливань вантажу. Миттєва зміна керуючого впливу та наявність зазору призводить до значних навантажень в кінематичних передачах механізму при його виборі. Управління електроприводом механізму горизонтального переміщення, при якому використовується асинхронний двигун з короткозамкненим ротором і перетворювач частоти з векторним керуванням, дозволяє реалізувати поставлену задачу і змінювати момент двигуна за певним законом. Показана необхідність і доцільність використання асинхронного векторного електроприводу для реалізації оптимального управління механізмом горизонтального переміщення, що забезпечує мінімальний час динамічних режимів і гасіння коливань вантажу в кінці перехідного процесу. Розгін на зниженій швидкості перед основним циклом перемикань керуючого впливу дозволяє обмежувати динамічні навантаження допустимими значеннями, однак час перехідного процесу істотно збільшується. При зниженні швидкості до моменту вибору зазору значення коефіцієнта динамічності знижується до 3,3, час перехідного збільшується незначно. Розробка алгоритму оптимального керування електроприводом механізму горизонтального переміщення, реалізованого за допомогою контролерів, являє собою етап подальшого дослідження.*

Ключові слова: *трьохмасова електромеханічна система, кінематична передача, динамічні навантаження, векторний електропривод, пружній зв'язок.*

Получено 28.10.2018

Найденко Елена Валерьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханических систем с компьютерным управлением Одесского национального политехнического университета. Просп. Шевченко, 1, Одесса, Украина, E-mail: alena2808@ukr.net, тел. +38-048-705-84-67

Elena Naydenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of electromechanical systems, computer-controlled, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, E-mail: alena2808@ukr.net, +38-048-705-84-67

ORCID ID: 0000-0001-5684-5617