

УДК 62-83

Р. П. Герасимьяк, д-р техн. наук,
Е. В. Найденко, канд. техн. наук

ДВУХМАССОВАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С ЛЮФТОМ В ПЕРЕДАЧЕ В РЕЖИМЕ ТОРМОЖЕНИЯ

Аннотация. Рассмотрены динамические нагрузки в кинематических передачах двухмассовой электромеханической системы в режиме торможения при мгновенном изменении задающего воздействия с учетом люфта. Представлены результаты моделирования.

Ключевые слова: двухмассовая электромеханическая система, кинематическая передача, динамические нагрузки, момент инерции, упругая связь

R. Gerasymiak, ScD.,
E. Naydenko, PhD.

THE KINEMATIC TRANSMISSION LOADS OF TWO-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH GEAR DURING BRAKING

Abstract. The dynamic load kinematic gears two-mass electromechanical system during braking when an instantaneous change in the reference variable with the backlash is considered. The results of the simulation are demonstrated.

Keywords: two-mass electromechanical system, kinematic transmission, dynamic loads, moment of inertia, elastic connection

Р. П. Герасимьяк, д-р техн. наук,
О. В. Найденко, канд. техн. наук

ДВОМАСОВА ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНА СИСТЕМА З ЛЮФТОМ В ПЕРЕДАЧАХ В РЕЖИМІ ГАЛЬМУВАННЯ

Анотація. Розглянуто динамічні навантаження в кінематичних передачах двомасової електромеханічної системи з урахуванням люфту в режимі гальмування при миттєвій зміні завдання. Представлені результати моделювання.

Ключові слова: двомасова електромеханічна система, кінематична передача, динамічні навантаження, момент інерції, пружний зв'язок

Введение. Рассмотрим работу реального механизма, когда за время разгона и торможения он (например, поворотная платформа крана или экскаватора) проходит требуемый угол поворота, после чего необходима его остановка [1]. Здесь рассматривается случай, когда двигатель, работавший в двигательном режиме с моментом M_c , мгновенно переходит в тормозной режим, развивая момент $-M_m$ (рис. 1).

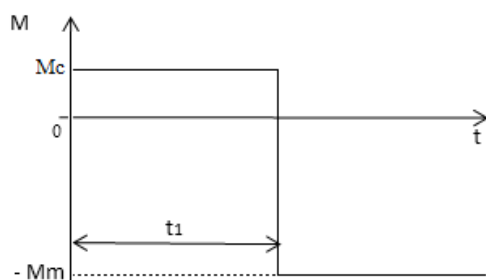


Рис. 1. Диаграмма момента $M(t)$

Для учёта влияния скачкообразного закона изменения усилия на нагрузки в звеньях кинематической передачи целесообразно рассматривать двухмассовую электромеханическую систему (ДЭМС), в которой упругая (податливая) связь между двигателем и поворотной платформой обладает конечным значением

жёсткости C_y кроме того, имеется зазор δ . Расчетная схема такой ДЭМС после приведения всех звеньев к валу двигателя приведена на рис. 2.

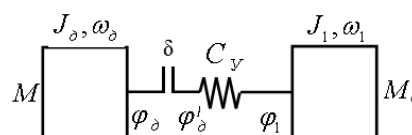


Рис. 2. Расчетная схема ДЭМС

Здесь ротор двигателя с моментом инерции J_d ; механизм поворота с моментом инерции J_1 ; M – момент двигателя; M_c – момент нагрузки; ω_d и ω_1 – угловые скорости вращения двигателя и рабочего органа соответственно; $M_y = C_y(\varphi_d - \varphi_1)$ – момент упругой деформации между двигателем и механизмом.

В публикациях последних лет представлены материалы, свидетельствующие о повышенном интересе к исследованиям многомассовых ЭМС. Так, в работе [5] представлены практические результаты ограничения динамических нагрузок в ДЭМС за счёт демпфирующего эффекта электропривода, а в [6] приведены соотношения, учитывающие потери на диссипацию.

Целью работы является определение возможной динамической нагрузки в элементах ЭМС с учетом зазора при резком торможении механизма, характеризуемого большим моментом инерции.

Материалы исследования. Для режима торможения или реверса, когда двигатель развивает тормозной момент, мгновенно достигающий значения – M_m , получено дифференциальное уравнение для двухмассовой ЭМС после выбора зазора δ без учёта потерь на диссипацию [3]:

$$T^2 \frac{d^2 M_y}{dt^2} + M_y = M_{ycp} - 2M_m \frac{J_1}{J}, \quad (1)$$

здесь $J = J_o + J_1$, а среднее значение упругого момента определяется [3]

$$M_{ycp} = (M - M_c) \frac{J_1}{J} + M_c,$$

где M – момент двигателя на основном участке переходного процесса; M_c – статический момент, который можно считать постоянным. Как показали предварительные исследования [6], учёт диссипации в крановых механизмах снижает пиковые нагрузки на 6 – 10 %.

Общее решение этого уравнения можно получить в виде

$$M_y = M_{ycp} - 2M \frac{J_1}{J} + A \sin \Omega t + B \cos \Omega t, \quad (2)$$

где A и B – постоянные интегрирования.

Корни характеристического уравнения в этом случае чисто мнимые, а частота собственных колебаний

$$\Omega = \sqrt{C_y \frac{J_o + J_1}{J_o J_1}}.$$

В работе [4] приведено решение этого уравнения, когда двигатель разгоняет рабочий орган, в этом случае начальные условия, а значит и постоянные интегрирования (2) определяются собственно моментом переключения. В настоящей работе рассматривается вариант, когда переходный момент торможения осуществляется при работе двигателя в установившемся режиме со скоростью w_{o1} . Тогда

$$M_{yнач} = M_c, \quad \frac{dM_{yнач}}{dt} = C_y \sqrt{\frac{2M_m \delta}{J_o}}. \quad (3)$$

Скорость рабочего органа w_1 в момент после переключения остаётся неизменной, в то время как w_{o1} уменьшается на величину, зависящую от значения зазора в передаче.

Окончательно

$$M_y = M_c \cos \Omega t + (M_{ycp} - \frac{2M_m J_1}{J})(1 - \cos \Omega t) + \sqrt{\frac{2C_y M_m J_1 \delta}{J}} \sin \Omega t. \quad (4)$$

Коэффициент динамичности [1,4] можно найти по формуле:

$$K_o = \left| 1 - 2 \frac{M_m J_1}{M_{ycp} J} \right| + \sqrt{\frac{2C_y M_m \delta J_1}{M_{ycp}^2 J} + \left(\frac{M_c}{M_{ycp}} + \frac{2M_m J_1}{M_{ycp} J} - 1 \right)^2}. \quad (5)$$

При этом скорости после переключения изменяются по следующим законам: двигателя

$$w_o = w_{o1} - \sqrt{\frac{2\delta M_m}{J_1}} - \sqrt{\frac{2\delta M_m}{J_1}} (1 - \cos \Omega t) - \varepsilon_{cp} t + \frac{\varepsilon_{cp} J_1}{\Omega J_o} \sin \Omega t, \quad (6)$$

рабочего органа

$$w_1 = w_{11} - \frac{\sqrt{2\delta M_m J_o}}{J} (1 - \cos \Omega t) - \varepsilon_{cp} t + \frac{2M_c}{J} t + \frac{\varepsilon_{cp}}{\Omega} \sin \Omega t + \frac{2M_c}{J\Omega} \sin \Omega t. \quad (7)$$

В последних выражениях ε_{cp} – ускорение абсолютно жёсткой двухмассовой ЭМС.

Моделирование проводилось известным методом [3 – 4] по структурной схеме ДЭМС. При моделировании использовались данные реального порталного крана, у которого $C_y = 3621,9$ Н·м. Поворотная платформа приводится в движение двумя асинхронными двигателями МТКФ 411-6, номинальная мощность каждого из них $P_n = 30$ кВт. Принят максимальный пусковой (тормозной) момент $M_m = 2,5M_n = 367,68$ Н·м, момент инерции двух двигателей $J_o = 1,15$ кг·м². Момент инерции поворотной платформы составляет $13 J_o = 14,92$ кг·м².

Расчёты и моделирование проводились для ДЭМС с различным значением зазора в передачах: $\delta = 0,5$ рад; 1 рад; 3 рад и с моментом инерции реальной поворотной платформы ($J_1 = 13 J_o$).

Полученные по расчетным формулам и моделированием основные данные и значения коэффициента динамичности в режиме торможения ДЭМС и мгновенном изменении задающего воздействия (рис. 1) при отсутствии статического момента и реальном значении статической нагрузки механизма поворота ($M_c = 0,15 M_m$) приведены в таблицах 1 и 2.

1. $M_c = 0$; $J_1/J_o = 13$

δ , рад	Моделирование			Формула
	M_{ycp} , Н·м	$M_{y \max}$, Н·м	K_o	K_o
0	341,42	683	2,00	2,00
0,5	341,42	1505	4,41	4,41
1,0	341,42	1935	5,70	5,70
3,0	341,42	3087	9,04	9,04

2. $M_c = 0,15 M_m$; $J_1/J_o = 13$

δ , рад	Моделирование			Формула
	M_{ycp} , Н·м	$M_{y \max}$, Н·м	K_o	K_o
0	337,48	731	1,63	1,52
0,5	337,48	1511	3,37	3,09
1,0	337,48	1965	4,39	4,16
3,0	337,48	3109	6,94	6,72

Изменение динамических нагрузок с увеличением зазора в ДЭМС с соотношением моментов инерции $J_1/J_o = 13$ при отсутствии статического момента и при $M_c = 0,15 M_m$ представлено на рис. 3.

Процессы торможения в ДЭМС при соотношении моментов инерции $J_1/J_0 = 13$ и значений зазора $\delta = 0,5$ рад в передачах при мгновенном изменении задающего воздействия (рис. 1) в случае отсутствия статического момента и при $M_c = 0,15 M_m$, полученные при моделировании, представлены на рисунках 4 и 5.

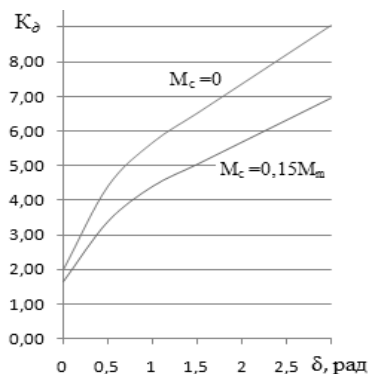


Рис. 3. Зависимость динамических нагрузок от величины зазора ДЭМС при соотношении моментов инерции $J_1/J_0 = 13$

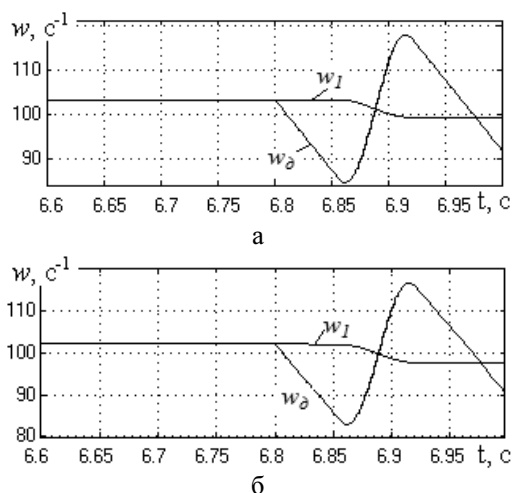


Рис. 4. Графики скоростей при $\delta = 0,5$ рад:
 (а) – $M_c = 0$; (б) – $M_c = 0,15 M_m$

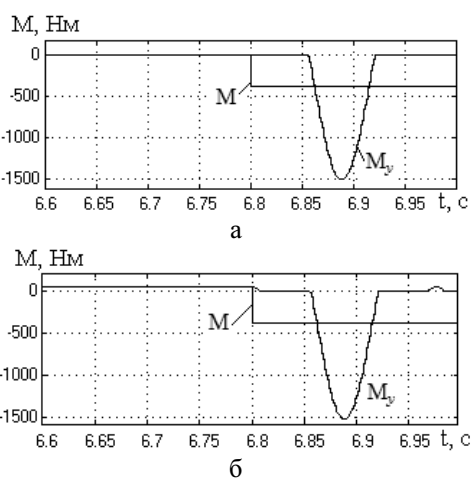


Рис. 5. Графики моментов при $\delta = 0,5$ рад:
 (а) – $M_c = 0$; (б) – $M_c = 0,15 M_m$

Выводы. Учёт зазора в кинематических передачах, естественно, приводит к значительному возрастанию динамических нагрузок, наличие статического момента – существенно их снижает. Характерно, что увеличение J_1/J_0 повышает коэффициент динамичности, однако принятое реальное значение момента инерции механизма близко к максимальному значению этого коэффициента.

Можно отметить, что в ДЭМС, особенно с малым значением момента инерции J_1 при увеличении зазора возрастает различие между расчетными и экспериментальными значениями коэффициента динамичности.

Список использованной литературы

1. Ключев В. И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов / В. И. Ключев, В. М. Терехов. – М. : Энергия, 1980. – 360 с.
2. Комаров М. С. Динамика грузоподъемных машин / М. С. Комаров – М. : Машгиз, 1962. – 268 с.
3. Герасимьяк Р. П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р. П. Герасимьяк, В. А. Лещёв. – 2008. – Одесса : СМІЛ. – 192 с.
4. Герасимьяк Р. П. Нагрузки в кинематических передачах двухмассовой электромеханической системы в режиме торможения / Р. П. Герасимьяк, Е. В. Найденко // *Электротехнические и компьютерные системы*. – К. : Техника. – 2015. – № 17 (93). – С. 15–22.
5. Задорожня И. Н. Исследование влияния степени электромеханической связи на демпфирующее действие электропривода с упругими связями / И. Н. Задорожня, Н. А. Задорожний // *Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика*. – К. : Техника. – 2014. – № 15 (91). – С. 99–103.
6. Герасимьяк Р. П. Улучшение качества переходных процессов при выборе зазора в электромеханических системах / Р. П. Герасимьяк, В. В. Субботин // *Электротехнические и компьютерные системы*. – К. : Техника. – 2013. – № 10 (86). – С. 27–32.
7. Герасимьяк Р. П. Управление асинхронным электроприводом механизмов поворота, обеспечивающее снижение динамических нагрузок / Р. П. Герасимьяк, Е. В. Найденко // *Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика*. – Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2008. – № 30. – С. 111–112.
8. Здрозис К. П. Повышение качества электромеханических систем с асинхронным электроприводом / К. П. Здрозис // *Електромашинобудування та електрообладнання*. – К. : Техника. – 2000. – Техніка. – Вип. 55. – С. 36–41.
9. Smolyaninov D., Palis F., Horn P., and Grigorov O.W., (2002), Stand der Forschungen zur Pendeldämpfung bei Drehkränen, *Kranfachtung Universität Magdeburg*.
10. Smolyaninov D., Horn P., Krause F., and Palis F., (2003), Ergebnisse der Untersuchungen zur Pendeldämpfung bei Drehkränen, *Kranfachtung Technische Universität Dresden*.

Получено 28.05.2015

References

1. Klyuchev V.I., and Terekhov V.M. *Elektroprivod i avtomatizatsiya ob-shchepromyshlennykh mekhanizmov* [Electric Drive and Automation of General-Purpose Machinery], (1980), Moscow, Russian Federation, *Energy*, 360 p. (In Russian).

2. Komarov M.S. *Dinamika obshchepromishlennih mashin* [Dynamics of Lifting Equipment], (1962), Moscow, Russian Federation, *Mashgiz*, 268 p. (In Russian).

3. Gerasimyak R.P., and Leshchev V.A. *Analiz i sintez kranovih elektromekhanicheskikh system* [Analysis and Synthesis of Crane Electromechanical Systems], (2008), Odessa, Ukraine, *SMIL*, 192 p. (In Russian).

4. Gerasimyak R.P., and Naydenko E.V. *Nagruzki v kinematicheskikh peredachah dvumassovoy elektromekhanicheskoy sistemi v regime tormogeniya* [Loads in Key Nematic Transfers Two-mass Electromechanical-Mechanical System During Braking], (2015), Kiev, Ukraine, *Electrical and Computer Systems*, No. 17(93), pp. 15 – 22 (In Russian).

5. Zadorozhnyj N.A., and Ponomarev N.S. *Issledovanie mekhanicheskikh svoystv DEMS po amplitudno-chastotnim harakteristikam* [DEMS Study of the Dynamic Properties for the Amplitude-Frequency Characteristics], (2011), *Problems of Automated Electric. Theory and Practice*, Kiev, Ukraine, *Technical*, No. 3 (79), pp. 28 – 32 (In Russian).

6. Zadorozhnyaya I.N., and Zadorozhnii N.A. *Issledovanie vliyaniya stepeni elektromekhanicheskoy svyazi na dempfirovushchee dejstvie elektroprivoda s uprugimi svyazjami* [Investigation of the Influence Degree of Electromechanical Coupling in the Damping Effect of Actuator and Elastic Constraints], (2014), *Problems of Automated Electric. Theory and Practice*, Kiev, Ukraine, *Technical*, No. 15 (91), pp. 99 – 103 (In Russian).

7. Gerasimyak R.P., and Naydenko E.V. *Upravlenie asinhronnim elektroprivodom mekhanizmiv povorota, obespechivayuschee snigienie dinamicheskikh nagrusok* [Management of Asynchronous Electric Drive Mechanisms Pivot Provides a Reduction of Dynamic Loads], (2008), *Problems of Automated Electric. Theory and Practice*, Kharkiv, Ukraine, *NTU "KhPI"*, No. 30, pp. 111 – 112 (In Russian).

8. Zdrozis K.P. *Povishenie kachestva elektromekhanicheskikh system s asinhronnim elektroprivodom* [Improving the Quality of Electromechanical Systems with Asynchronous Electric], (2000), Kiev, Ukraine, *Electromashinobud i Elektroobl.*, Vol. 55, pp. 36 – 41 (In Russian).

9. Smolyaninov D., Palis F., Horn P., and Grigorov O.W., (2002), *Stand der Forschungen zur Pendeldampfung bei Drehkränen*, *Kranfachtung Universität Magdeburg* (In Germany).

10. Smolyaninov D., Horn P., Krause F., and Palis F., (2003), *Ergebnisse der Untersuchungen zur Pendeldampfung bei Drehkränen*, *Kranfachtung Technische Universität Dresden* (In Germany).



Герасимьяк
Ростислав Павлович,
д-р техн. наук, проф.,
проф. каф. электромеханических систем с компьютерным управлением Одесского нац. политехнического ун-та.
Тел. 048-705-8467.
E-mail: rosger@te.net.ua



Найденко
Елена Валерьевна,
к.т.н., доц. каф. электромеханических систем с компьютерным управлением Одесского нац. политехнического ун-та.
Тел. 048-705-8467.
E-mail: alena2808@ukr.net