

УДК 62-83

Найденко Е. В., канд. техн. наук,

Бойко А. А., д-р техн. наук

Коняхина О. С.

### СНИЖЕНИЕ НАГРУЗОК В КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧАХ ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ЛЮФТОМ

**Аннотация.** Рассмотрено управление, снижающее динамические нагрузки в кинематических передачах двухмассовой электромеханической системы с люфтом в режиме пуск-торможение(реверс) при различных начальных значениях зазора при пуске. Перед основным циклом работы производится пуск двигателя с пониженным моментом для выбора зазора, и реверс для определения реальной величины зазора. Представлены результаты моделирования.

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

Naydenko E., PhD,

Boyko A., ScD

Konjahina O.

### REDUCE THE LOAD IN THE KINEMATIC TRANSMISSION DUAL-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEMS WITH BACKLASH

**Abstract.** Consider running, reducing the dynamic loads in the kinematic transmissions two-mass electromechanical system with backlash in a mode start-braking (reverse) at different initial values of clearance at the start. Before the main work cycle is carried out with reduced motor start point for the selection of the gap, and the reverse to determine the actual size of the gap. The results of the simulation.

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

Е. В. Найденко, канд. техн. наук,

А. О.Бойко, д-р техн. наук

О. С.Коняхіна

### ЗНИЖЕННЯ НАВАНТАЖЕНЬ В КІНЕМАТИЧНИХ ПЕРЕДАЧАХ ДВОМАСОВОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З ЛЮФТОМ

**Анотація.** Розглянуто керування, що знижує динамічні навантаження в кінематичних передачах двомасової електромеханічної системи з люфтом в режимі пуск-гальмування (реверс) при різних початкових значеннях зазору при пуску. Перед основним циклом роботи проводиться пуск двигуна з низьким моментом для вибору зазору, і реверс для визначення реальної величини зазору. Представлені результати моделювання.

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

**Введение.** Известно, что для оптимального управления механизмом, обеспечивающим быстрые переходные процессы и одновременно гашение колебаний груза, требуются мгновенные приложения максимального момента [3].

Рассмотрим работу механизма горизонтального перемещения, когда двигатель, разгонявший механизм с постоянным моментом  $M_m$ , мгновенно переходит в тормозной режим, развивая момент  $-M_m$ .

Для учёта влияния скачкообразного закона изменения усилия на нагрузки в

звеньях кинематической передачи целесообразно рассматривать двухмассовую электромеханическую систему (ДЭМС), расчётная схема которой после приведения всех элементов к валу двигателя приведена на рис. 1.

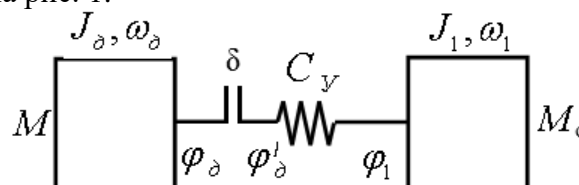


Рис.1. Расчетная схема ДЭМС

Здесь ротор двигателя с моментом инерции  $J_\delta$ , механизм поворота с моментом инерции  $J_1$ ,  $M$  - момент (усилие) двигателя,  $\omega_\delta$  и  $\omega_1$  – угловые скорости вращения двигателя и рабочего органа соответственно,  $M_y = C_y(\varphi_\delta - \varphi_1)$  – момент упругой деформации между двигателем и механизмом; именно этот момент нагружает кинематическую передачу механизма;  $\delta$  – эквивалентный зазор в передаче.

В публикациях последних лет представлены материалы, свидетельствующие о повышенном интересе к исследованиям многомассовых ЭМС. Так, в работах [3-7, 9] рассмотрены динамические нагрузки в ДЭМС в режиме пуска и торможения, в работе [8] приведены соотношения, учитывающие потери на диссипацию.

**Целью работы** является снижение динамических нагрузок в ДЭМС с зазором в механических передачах в режиме пуск – торможение.

**Материалы исследования.** Ранее [3] было получено выражение для определения максимального значения момента упругих колебаний при пуске

$$M_{y \max} = M_{y \text{cp}} + \sqrt{M_{y \text{cp}}^2 + \frac{C_y^2}{\Omega^2} \frac{2M_m \delta}{J_\delta}}, \quad (1)$$

наступающего при

$$t_{\max} = \frac{1}{\Omega} \left[ \pi - \arctg \frac{C_y}{M_{y \text{cp}} \Omega} \sqrt{\frac{2\delta M_m}{J_\delta}} \right], \quad (2)$$

и его минимального значения

$$M_{y \min} = M_{y \text{cp}} - \sqrt{M_{y \text{cp}}^2 + \frac{C_y^2}{\Omega^2} \frac{2M_m \delta}{J_\delta}} \quad (3)$$

в момент времени

$$t_{\min} = \frac{1}{\Omega} \left[ 2\pi - \arctg \frac{C_y}{M_{y \text{cp}} \Omega} \sqrt{\frac{2\delta M_m}{J_\delta}} \right]. \quad (4)$$

Для режима торможения, когда двигатель развивает тормозной момент, мгновенно достигающий значения  $-M_m$ , максимальное значение момента упругой деформации

$$M_{y \max} = \left| M_{y \text{cp}} - 2M \frac{J_1}{J} \right| + \sqrt{\left( M_{y \text{п}} - M_{y \text{cp}} + 2M \frac{J_1}{J} \right)^2 + \frac{2C_y \delta M J_1}{J}}. \quad (5)$$

Коэффициент динамичности  $K_\delta$  [1, 4], определяется из (5) и существенно зависит от момента упругих колебаний при переключении  $M_{y \text{п}}$ , определяемом предыдущим режимом работы ЭМС, а также реальной величиной зазора. Если допустимо считать  $M_c = 0$ , то величину зазора можно найти из (5)

$$\delta = \frac{M_{y \max}^2 - M_{y \text{п}}^2}{2C_y M} \cdot \frac{J_1}{J} - \frac{M_{y \max} - M_{y \text{п}}}{C_y} \quad (6)$$

Было показано [4], что при пуске целесообразно производить выбор зазора на пониженной скорости, определенной таким образом, чтобы ограничить динамические нагрузки допустимой величиной.

Из (1) получено выражение, отражающее зависимость максимального момента упругой связи при пуске ДЭМС с зазором в механических передачах от величины момента двигателя

$$M_1 = \frac{J}{2J_1} \cdot \frac{M_{y \max}^2}{M_{y \max} + C_y \delta}, \quad (7)$$

где  $M_1$  – момент двигателя при пуске.

При торможении (реверсе) было рекомендовано для снижения динамических нагрузок производить переключение в момент, кратный частоте колебаний, при  $t = n \cdot t_{\min}$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$  [4].

Поскольку при расчетах и моделировании процесса пуска величина зазора принимается условно равной половине реального значения зазора и ввиду возможной погрешности замера величины зазора значение  $\Omega t_z$ , а, следовательно, точность вычисления времен переключения для снижения динамических нагрузок нельзя гарантировать. Поэтому целесообразно перед основным циклом работы произвести следующие контрольные переключения с целью выбора зазора и определения времен переключения (рис.4):

1. Пуск двигателя с пониженным моментом  $M_1$  для выбора зазора, значение момента определяется с учетом допустимых динамических нагрузок (7).

2. Реверс с моментом  $-M_1$  при  $t = t_z + t_{\min}$  для определения реальной величины зазора по динамическим нагрузкам в передачах (6), где  $t_{\min} = t_{\max} + \pi/\Omega$ , а значения  $t_z$  и  $t_{\max}$

определяются с помощью регистрирующей и управляющей аппаратуры.

Далее, в соответствии с основным циклом работы (рис.2) разгон с максимальным моментом  $M_m$  при  $\Omega t = t_z + \Omega t_{max} + 2\pi$  и торможение (реверс) с максимальным моментом  $-M_m$  при  $\Omega t = t_z + \Omega t_{min} + 2\pi n$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$

Для подтверждения результатов расчёта по приведенным формулам проведено моделирование известным методом [4,9] по структурной схеме ДЭМС. При моделировании использовались данные реального порталного крана, у которого  $C_y = 3,6 \text{ кН}\cdot\text{м}$ , номинальная скорость  $\omega_n = 101,5 \text{ с}^{-1}$  принят максимальный пусковой (тормозной) момент  $M_m = 368 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , момент инерции двух двигателей  $J_d = 1,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , поворотной платформы –  $J_1 = 14,9 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $M_c = 0$ .

Динамические нагрузки, возникающие в механических передачах ДЭМС с люфтом 1 рад и 7 рад, при пуске с максимальным моментом и торможении при экстремальных начальных условиях представлены в табл.1.

В табл.2 представлены динамические нагрузки в механических передачах ДЭМС при управлении, снижающем их (рис.2).

Для управления процессом переключения в ДЭМС с люфтом, ограничивающем динамические нагрузки, необходимо производить пуск двигателя с пониженным моментом, а также стремиться к тому, чтобы торможение осуществлялось, по возможности, в моменты времени  $2\pi n / \Omega$ . Определив время зазора и период колебаний  $T$  из формулы  $\Omega = 2\pi / T$  рассчитать, сколько периодов этой частоты

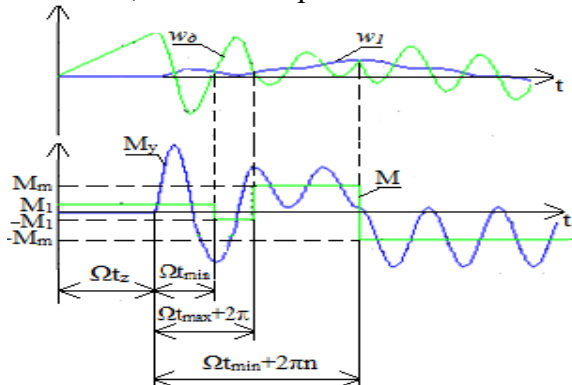


Рис. 2. Пуск и торможение ДЭМС с зазором в передачах при управлении, снижающем динамические загрузки

Таблица 1

Динамические нагрузки при мгновенном изменении максимального момента

$\delta$ , рад	Режим	$K_\delta$		
		Начальная величина зазора при пуске		
		$\delta$	$0,5 \cdot \delta$	0
1	Пуск	5,7	4,4	2,0
	Торможение	7,9	6,4	4,0
7	Пуск	13,2	9,6	2,0
	Торможение	16,4	12,5	4,0

Таблица 2

Динамические нагрузки при управлении, снижающем их

$\delta$ , рад	Режим	$K$		
		Начальная величина зазора при пуске		
		$\delta$	$0,5 \cdot \delta$	0
1	Пуск	2,67	1,99	0,54
	реверс	1,62	1,19	0,59
	разгон	1,81	1,00	1,96
	торможение	2,20	2,97	2,00
7	Пуск	2,48	1,76	0,08
	реверс	1,47	1,05	0,08
	разгон	2,75	1,90	2,00
	торможение	1,25	2,11	2,00

укладывается за время разгона двигателя до скорости отсечки, когда он переходит на жёсткий участок экскаваторной механической характеристики. Если при этом число периодов окажется дробным, используется только целая часть, выяснив, до какой скорости можно разогнаться за это целое число периодов. На этом основании составляется программа работы процессора, который и будет таким образом управлять приводом. Переходные процессы при управляющем воздействии, снижающем динамические нагрузки, в ДЭМС с люфтом 7 рад и различным начальном зазоре при пуске изображены на рис.3.

**Выводы.** Очевидно, что мгновенные приложения максимального момента, необходимые для оптимального управления механизмом, приводят к недопустимым динамическим нагрузкам в передачах. Коэффициент динамичности зависит

главным образом от начальных условий, поэтому желательно обеспечивать его снижение на каждом этапе, учитывая необходимость выбора зазора и стремясь производить переключение в моменты времени, кратные периоду колебаний. Задавая в программе управляющего электроприводом микропроцессора значение времени переключения, кратным числу периодов колебаний, можно существенно снизить динамические нагрузки в кинематических передачах.

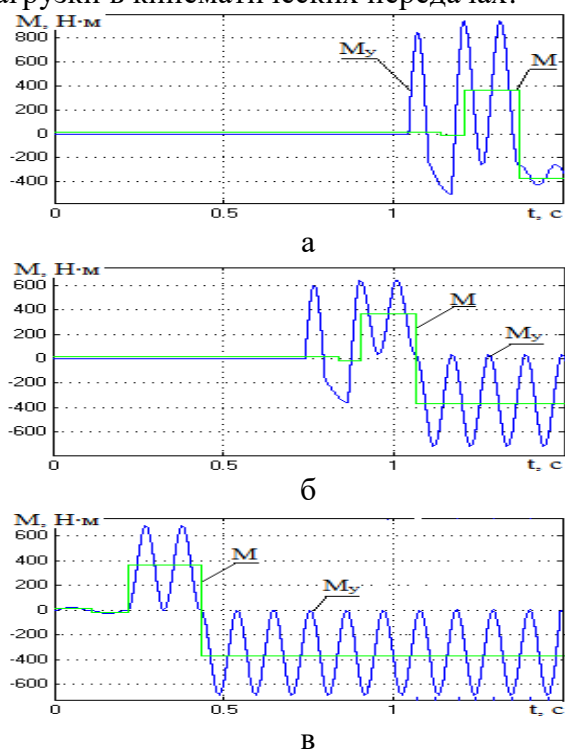


Рис.3. Момент двигателя  $M$  и момент упругих колебаний  $M_y$  при управляющем воздействии, снижающем динамические нагрузки, в ДЭМС с люфтом 7 рад и различным начальном зазоре при пуске, равном, а -  $\delta$ ; б -  $0,5\cdot\delta$ ; в - 0.

### 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. Герасимьяк, Р.П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем [Текст] / Р.П.Герасимьяк, В.А. Лещёв. – Одесса: СМІЛ, 2008. – 192 с.
3. Найденко, Е.В. Двухмассовая электромеханическая система с люфтом в

передаче в режиме пуска [Текст] / Е. В. Найденко // Электротехнические и компьютерные системы. – Киев: – 2016. – Вып. 21(97). – С.36–42.

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

5. Герасимьяк, Р.П. Двухмассовая электромеханическая система с люфтом в передаче в режиме торможения [Текст] / Р. П. Герасимьяк, Е. В. Найденко // Электротехнические и компьютерные системы. – Киев: – 2015. – Вып. 18(94). – С.62–68.

6. Герасимьяк, Р.П. Управление асинхронным электроприводом механизмов поворота, обеспечивающее снижение динамических нагрузок [Текст] / П.Герасимьяк, Е.В.Найденко // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Вісник НТУ «ХПІ» – Харків: – 2008. – Вып. 30. – С. 111– 112.

7. Бушер, В.В. Учебный программно-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.

8. Герасимьяк, Р.П. Улучшение качества переходных процессов при выборе зазора в электромеханических системах [Текст] / Р.П. Герасимьяк, В.В. Субботин // Электротехнические и компьютерные системы. – Киев: – 2013. – Вып. 10(86). – С.27–32.

9. Бойко, А. А. Ограничение колебаний элементов лифтовых подъемных механизмов за счет корректирующей обратной связи [Текст] / А. А. Бойко // Матеріали XVIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасна освіта і наука в Україні: традиції та інновації». — Київ: Нова освіта, — 2014. — С.140—145.

10. Smolyaninov, D. Stand der Forschungen zur Pendeldämpfung bei Drehkränen / Smolyaninov D., Palis F., Horn P., Grigorov O.W.

– Kranfachtangung Universität Magdeburg, 2002, pp. 113 – 128.

Получено 26.04.2016

#### References

1. Klyuchev V.I., and Terekhov V.M. Elektroprivod i avtomatizatsiya obshchepromyshlennykh mekhanizmov [Electric Drive and Automation of General-Purpose Machinery], (1980), Moscow, Russian Federation, *Energy*, 360 p. (In Russian).
2. Gerasimyak R.P., and Leshchev V.A. Analiz i sintez kranovih elektromehani cheskikh system [Analysis and Synthesis of Crane Electromechanical Systems], (2008), Odessa, Ukraine, *SMIL*, 192 p. (In Russian).
3. Naydenko E. V. Dvuhmassovaya elektromehani cheskaja sistema s luftom v peredache v regime puska [Two-mass electromechanical system with backlash in the transmission start mode]. (2016), *Electrotechnic and computer systems*, Kiev, Ukraine, Vol. 21 (97), pp. 36–42 (in Russian).
4. Gerasimyak R. P., and Naydenko E. V. Nagruzki v kinemati cheskikh peredachah dvuhmassovoy elektromehani cheskoy sistemi v regime tormogenija [Loads in Kinematic Transfers Two-mass Electromechanical System During Braking]. (2015), *Electrotechnic and computer systems*, Kiev, Ukraine, Vol. 1(93), pp. 15–22 (in Russian).
5. Gerasimyak R. P., and Naydenko E. V. Dvuhmassovaya elektromehani cheskaja sistema s luftom v peredache v regime tormogenija [The kinematic transmission loads of two-mass electromechanical system with gear during braking]. (2015), *Electrotechnic and computer systems*, Kiev, Ukraine, Vol. 18(94), pp. 62–68 (in Russian).
6. Gerasimyak, R.P., and Naydenko, E.V. Upravlenie asinhronnim elektroprivodom mehanizmju povorota, obespechivayuchee snigienie dinami cheskikh nagrusok [Management of asynchronous electric drive mechanisms pivot provides a reduction of dynamic loads]. (2008), *Problems of Automated Electric. Theory and Practice*. – Kharkiv, Ukraine, Vol. 30, pp 111– 112 (In Russian).

7. Buser, V. V., and Naydenko E. V. Uchebniy programno–apparatniy maket dlja issledovanija dvuhmassovoy electromehani cheskoy sistemi [Educational hardware and software layout for research two-mass electromechanical system]. (2015), *Electrotechnic and computer systems*, Kiev, Ukraine, Vol. 20 (96), pp.16–22 (in Russian).
8. Gerasimyak R. P., and Subbotin V. V. Uluchshenie kachestva perehodnih prozessov pri vibore zazora v elektromehani cheskikh sistemah [Improving the quality of transients in the selection of the gap in electromechanical systems]. (2013), *Electrotechnic and computer systems*, Kiev, Ukraine, Vol. 10 (86), pp.27–32 (in Russian).
9. Boiko A. A. Ohranychenye kolebanyi elementov liftovyh podemnyh mekhanizmov za schet korrektyruishchei obratnoi sviazy [Limiting elements hesitation lift lifting gear due to corrective feedback]. (2014), *Materialy XVIII Vseukrainskoi naukovopraktychnoi konferentsii «Suchasna osvita i nauka v Ukraini: tradytsii ta innovatsii»*, Kyiv, Ukraine, pp.140—145 (in Russian).
10. Smolyaninov D., Palis F., Horn P., and Grigorov O.W. Prior research of oscillation damping in cranes. *Kranfachtangung Universität Magdeburg*, 2002, pp. 113—128 (in Germany).



Найденко  
Елена Валерьевна,  
канд. техн. наук,  
доцент каф. ЭМСКУ  
Одесского нац. политехн.  
ун-та.  
Тел. 048-705-8467



Бойко Андрей  
Александрович, доктор  
техн. наук, доцент, дир.  
института электромеханики  
и энергоменеджмента  
Одесского нац.



политехнического ун-та  
Конякина Ольга Сергіївна  
інженер кафедри електрич  
них машин Одеського  
національного  
політехнічного ун-та, г.  
Одесса, пр. Шевченко 1.