

УДК 62–83

Е. В. Найденко, канд. техн. наук

### ДВУХМАССОВАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С ЛЮФТОМ В ПЕРЕДАЧЕ В РЕЖИМЕ ПУСКА

**Аннотация.** Рассмотрены возможные динамические нагрузки в элементах двухмассовой электромеханической системы с учетом зазора в механической передаче при различных законах управления пуском двигателя. Представлены результаты моделирования.

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

Е. В. Найденко, канд. техн. наук

### ДВОМАСОВА ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНА СИСТЕМА З ЛЮФТОМ У ПЕРЕДАЧІ В РЕЖИМІ ПУСКУ

**Анотація.** Розглянуто можливі динамічні навантаження в елементах двухмассовой электромеханичної системи з урахуванням зазору в механічній передачі при різних законах управління пуском двигуна. Представлені результати моделювання.

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

Е. Naydenko, PhD.

### START A TWO-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH BACKLASH

**Abstract.** The possible dynamic loads in elements of a two-mass electromechanical system based on the gap in the mechanical transmission in various start-up the engine control laws. The simulation results.

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

**Введение.** Динамические нагрузки и время переходного процесса для механизмов горизонтального перемещения играют преобладающую роль, так как значительную долю цикла они работают в переходных режимах. Характер изменения управляющего воздействия существенно влияет на показатели качества системы.

Рассмотрим пуск реального механизма горизонтального перемещения (например, поворотной платформы крана или экскаватора), когда двигатель мгновенно развивает момент  $M_m$  (характеристика 1 на рис.1).

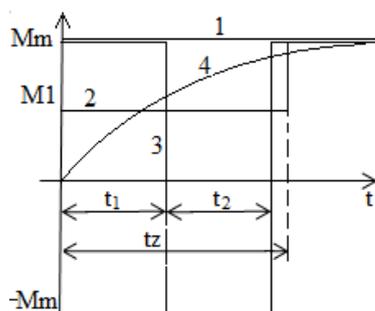


Рис. 1. Диаграмма момента  $M(t)$  при разгоне

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  $C_v$ . Расчётная схема такой ДЭМС после приведения всех элементов к валу двигателя приведена на рис. 2.

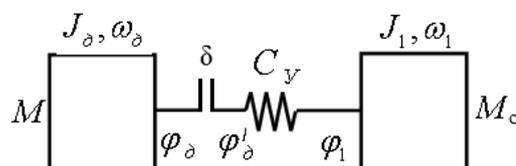


Рис.2. Расчетная схема ДЭМС

Здесь ротор двигателя с моментом инерции  $J_d$ , механизм поворота с моментом инерции  $J_1$ ,  $M$  – момент (усилие) двигателя,  $\omega_d$  и  $\omega_1$  – угловые скорости вращения двига-

теля и рабочего органа соответственно,  $M_y = C_y(\varphi_0 - \varphi_1)$  – 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 много-массовых ЭМС. Так, в работах [3,4] рассмотрены динамические нагрузки в ДЭМС в режиме торможения, в [5] предложено управление асинхронным электроприводом механизмов поворота, обеспечивающее снижение динамических нагрузок. В работе [6] рассмотрена возможность реализации программы управления двухмассовой электромеханической системой на базе промышленного контроллера, в работе [7] приведены соотношения, учитывающие потери на диссипацию, а в [8] показана возможность реализации плавных переходных процессов крановых механизмов.

**Целью работы** является определение быстродействия ЭМС и возможной динамической нагрузки в ее элементах с учетом зазора при различных законах управления пуском двигателя.

**Материалы исследования.** Наличие зазора в механической части может приводить к повышенным динамическим нагрузкам при его выборе.

Для режима разгона, когда двигатель развивает пусковой момент, мгновенно достигающий значения  $M_m$ , получено дифференциальное уравнение для двухмассовой ЭМС после выбора зазора  $\delta$  без учёта потерь на диссипацию [2]:

$$T^2 \frac{d^2 M_y}{dt^2} + M_y = M_{y\text{cp}}, \quad (1)$$

Решением этого уравнения с учетом начальных условий к моменту окончания выбора зазора

$$M_y = 0, \quad \frac{dM_y}{dt} = C_y \sqrt{\frac{2M_m \delta}{J_\delta}}, \quad (2)$$

будет выражение

$$M_y = M_{y\text{cp}}(1 - \cos \Omega t) + \sqrt{\frac{2C_y M_m J_1 \delta}{J}} \sin \Omega t, \quad (3)$$

На рис. 3 изображена зависимость момента упругой связи от времени при пуске ДЭМС, где  $t_z$  – время выбора зазора. Времена достижения упругим моментом экстремальных значений

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

$$t_{\min} = \frac{1}{\Omega} \left[ 2\pi - \arctg \frac{C_y}{M_{y\text{cp}} \Omega} \sqrt{\frac{2\delta M_m}{J_\delta}} \right], \quad (5)$$

а также максимальное и минимальное значение упругого момента

$$M_{\max} = M_{y\text{cp}} + \sqrt{M_{y\text{cp}}^2 + \frac{C_y^2}{\Omega^2} \frac{2M_m \delta}{J_\delta}} \quad (6)$$

$$M_{\min} = M_{y\text{cp}} - \sqrt{M_{y\text{cp}}^2 + \frac{C_y^2}{\Omega^2} \frac{2M_m \delta}{J_\delta}}, \quad (7)$$

определяются при решении уравнения, получаемого из выражения (3) при

$$\frac{dM_y}{dt} = 0.$$

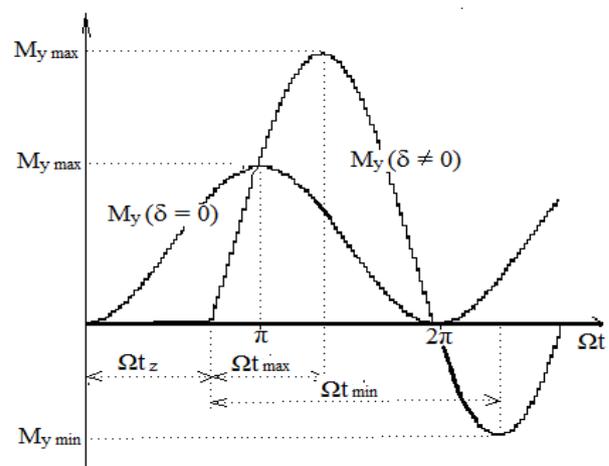


Рис.3. Зависимость момента упругой связи от времени при пуске

Во время пуска при разомкнутом зазоре механическая связь между инерционными массами  $J_\delta$  и  $J_1$  отсутствует, и под действием момента  $M_m$  ротор двигателя вращается равноускоренно со скоростью

$$\omega_\delta = \frac{M_m - M_c}{J_\delta} t = \varepsilon_z t, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_z$  – ускорение при выборе зазора. За время выбора зазора двигатель успевает разогнаться до некоторой начальной скорости  $\omega_{\delta \text{ нач}}$  и запастись кинетическую энергию

$$J_{\delta} \frac{\omega_{\delta \text{ нач}}^2}{2} = (M_m - M_c) \frac{\delta}{2}, \quad (9)$$

откуда

$$\omega_{\delta \text{ нач}} = \sqrt{\varepsilon_z \delta}.$$

Тогда время выбора зазора

$$t_z = \frac{\omega_{\delta \text{ нач}}}{\varepsilon_z}. \quad (10)$$

Чтобы избежать больших нагрузок в передаточных кинематических звеньях при выборе зазоров в зубчатых передачах, на время выбора зазора используют управление, при котором двигатель развивает небольшой момент  $M_1$ , достаточный лишь для разгона самого двигателя, а затем скачком изменяется до максимального  $M_m$  (характеристика 2 на рис. 1) [2],

$$M_1 = \frac{K_{\text{дм}}(K_{\text{дм}} - 2)}{2\delta C_{12}} M_m^2, \quad (11)$$

где  $K_{\text{дм}}$  – допустимый коэффициент динамичности, задавая который можно определить  $M_1$ .

Изменение управляющего воздействия в два этапа (характеристика 3 на рис.1), где времена переключения определяются из условия равенства нулю скорости двигателя к моменту выбора зазора

$$t_1 = t_2 = \sqrt{\frac{\delta J_{\delta}}{2M}}, \quad (12)$$

что необходимо для снижения динамических нагрузок и обеспечения минимального времени пуска.

Известно [2], что коэффициент динамичности  $K_{\delta}$  можно снизить при пуске, если осуществить не мгновенное, а монотонное нарастание момента. Так, если момент двигателя нарастает по экспоненте (характеристика 4 на рис. 1)

$$M = M_m (1 - e^{-t/T_m}), \quad (12)$$

то коэффициент динамичности зависит от темпа изменения момента, т.е. от постоянной времени  $T_m$ , и частоты собственных колебаний  $\Omega$

$$K_{\delta} = 1 + \frac{1}{\sqrt{1 + T_m^2 \Omega^2}}, \quad (13)$$

Для подтверждения результатов расчёта по приведенным формулам проведено моделирование известным методом [2] по структурной схеме ДЭМС. При моделировании использовались данные реального порталного крана, у которого  $C_y = 3,6$  кН·м. Поворотная платформа приводится в движение двумя асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором серии МТКФ 411–6, номинальная мощность каждого из них  $P_n = 30$  кВт, номинальная скорость  $\omega_n = 101,53$  с<sup>-1</sup>. Принят максимальный пусковой (тормозной) момент  $M_m = 2,5$  Мн = 367,68 Нм, момент инерции двух двигателей  $J_{\delta} = 1,15$  кгм<sup>2</sup>. Момент инерции поворотной платформы составляет  $13 J_{\delta} = 14,92$  кгм<sup>2</sup>.

Детальное моделирование пуска ДЭМС с  $J_1 / J_{\delta} = 13$  и  $M_c = 0$  проводилось при различных начальных условиях. Полученные в результате значения максимального момента упругости и коэффициента динамичности при  $\delta = 0,5$  рад, 7 рад и мгновенном изменении задающего воздействия (характеристика 1 на рис. 1), приведены соответственно в табл.1 и 2.

Таблица 1  
 $\delta = 0,5$  рад

| Момент переключения              | $M_{y \text{ max}},$<br>Н·м | $K_{\delta}$ |
|----------------------------------|-----------------------------|--------------|
| $\Omega t = \Omega t_z$          | 0                           | 0            |
| $\Omega t = \Omega t_z + \pi/4$  | 652                         | 1,9          |
| $\Omega t = \Omega t_z + \pi/2$  | 1170                        | 3,4          |
| $\Omega t = \Omega t_z + 3\pi/4$ | 1170                        | 3,4          |
| $\Omega t = \Omega t_z + \pi$    | 700                         | 2,1          |
| $\Omega t = \Omega t_z + 5\pi/4$ | 20                          | 0,1          |
| $\Omega t = \Omega t_z + 3\pi/2$ | -490                        | 1,4          |
| $\Omega t = \Omega t_z + 7\pi/4$ | -490                        | 1,4          |
| $\Omega t = \Omega t_z + 2\pi$   | 0                           | 0            |

График зависимости коэффициента динамичности от начальных условий при пуске для

$J_1/J_0 = 13$  и  $\delta = 0,5$  рад и 7 рад представлен на рис.4.

Таблица 2

$\delta = 7$  рад

| Момент переключения              | $M_{y \max}$ , Н·м | $K_\delta$ |
|----------------------------------|--------------------|------------|
| $\Omega t = \Omega t_z$          | 0                  | 0          |
| $\Omega t = \Omega t_z + \pi/4$  | 2150               | 6,3        |
| $\Omega t = \Omega t_z + \pi/2$  | 3185               | 9,3        |
| $\Omega t = \Omega t_z + 3\pi/4$ | 2550               | 7,5        |
| $\Omega t = \Omega t_z + \pi$    | 700                | 2,1        |
| $\Omega t = \Omega t_z + 5\pi/4$ | -1705              | 5,0        |
| $\Omega t = \Omega t_z + 3\pi/2$ | -2600              | 7,6        |
| $\Omega t = \Omega t_z + 7\pi/4$ | -1770              | 5,2        |
| $\Omega t = \Omega t_z + 2\pi$   | 0                  | 0          |

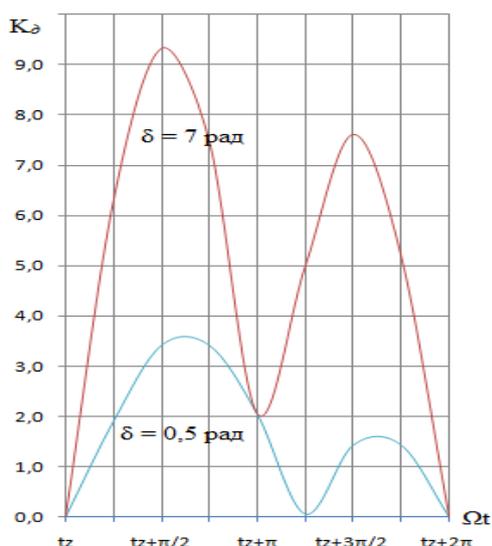


Рис.4. Зависимость коэффициента динамичности от начальных условий при пуске для  $\delta = 0,5$  рад и  $\delta = 7$  рад

Полученные по расчетным формулам и моделированием минимальное и максимальное значения коэффициента динамичности в режиме пуска ДЭМС и мгновенном изменении задающего воздействия (характеристика 1 на рис. 1) при отсутствии статического момента и реальном значении статической нагрузки механизма поворота ( $M_c=0,15 M_m$ ) при различных значениях зазора  $\delta$  приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

$M_c = 0, J_1/J_0 = 13, M_{y \text{ ср}} = 341,42$  Н·м

| $\delta$ , рад | $\Omega t = \Omega t_{\max}$ |         | $\Omega t = \Omega t_{\min}$ |         |       |
|----------------|------------------------------|---------|------------------------------|---------|-------|
|                | Моделирование                | Формула | Моделирование                | Формула |       |
| 0              | $M_{y, \text{Н·м}}$          | 682     | 682,8                        | 0,00    | 0,00  |
|                | $K_\delta$                   | 2,00    | 2,00                         | 0,00    | 0,00  |
| 0,5            | $M_{y, \text{Н·м}}$          | 1200    | 1198                         | -515    | -515  |
|                | $K_\delta$                   | 3,51    | 3,51                         | 1,51    | 1,51  |
| 1,0            | $M_{y, \text{Н·м}}$          | 1505    | 1504                         | -780    | -821  |
|                | $K_\delta$                   | 4,41    | 4,41                         | 2,28    | 2,41  |
| 3,0            | $M_{y, \text{Н·м}}$          | 2297    | 2297                         | -1615   | -1614 |
|                | $K_\delta$                   | 6,73    | 6,73                         | 4,73    | 4,73  |
| 7,0            | $M_{y, \text{Н·м}}$          | 3303    | 3303                         | -2620   | -2620 |
|                | $K_\delta$                   | 9,67    | 9,68                         | 7,67    | 7,68  |

Таблица 4

$M_c = 0,15 M_m, J_1/J_0 = 13, M_{y \text{ ср}} = 345,31$  Н·м

| $\delta$ , рад | $\Omega t = \Omega t_{\max}$ |         | $\Omega t = \Omega t_{\min}$ |         |       |
|----------------|------------------------------|---------|------------------------------|---------|-------|
|                | Моделирование                | Формула | Моделирование                | Формула |       |
| 0              | $M_{y, \text{Н·м}}$          | 686     | 686,7                        | -4,00   | -3,94 |
|                | $K_\delta$                   | 1,99    | 1,99                         | 0,01    | 0,01  |
| 0,5            | $M_{y, \text{Н·м}}$          | 1200    | 1200                         | 517,0   | 517,4 |
|                | $K_\delta$                   | 3,47    | 3,48                         | 1,50    | 1,50  |
| 1,0            | $M_{y, \text{Н·м}}$          | 1505    | 1505                         | 823,0   | 822,9 |
|                | $K_\delta$                   | 4,36    | 4,36                         | 2,38    | 2,38  |
| 3,0            | $M_{y, \text{Н·м}}$          | 2297    | 2298                         | -1615   | -1615 |
|                | $K_\delta$                   | 6,65    | 6,65                         | 4,68    | 4,68  |
| 7,0            | $M_{y, \text{Н·м}}$          | 3303    | 3303                         | -2620   | -2620 |
|                | $K_\delta$                   | 9,56    | 9,57                         | 7,59    | 7,59  |

Полученные моделированием значения максимального коэффициента динамичности в режиме пуска ДЭМС с различным соотношением моментов инерции  $J_1/J_0$  и отсутствии статического момента при изменении задающего воздействия по экспоненте (характеристика 2 на рис. 1) и различных значениях зазора  $\delta$  приведены в таблице 5.

В табл.6 приведены динамические нагрузки, а также время переходного процесса при различных задающих воздействиях во время пуска.

Таблица 5  
Максимальный коэффициент динамичности

| $\frac{J_1}{J_0}$ | $\delta$ , рад | $\frac{T_m}{2\pi/\Omega}$ |      |      |      |      |      |
|-------------------|----------------|---------------------------|------|------|------|------|------|
|                   |                | 0                         | 0,2  | 0,4  | 0,6  | 0,8  | 1    |
| 1,5               | 0,5            | 5,0                       | 4,8  | 4,4  | 4,1  | 3,9  | 3,7  |
|                   | 3              | 10,5                      | 10,4 | 10,1 | 9,8  | 9,5  | 9,2  |
|                   | 7              | 15,4                      | 15,4 | 15,2 | 14,9 | 14,6 | 14,4 |
| 13                | 0,5            | 3,5                       | 3,3  | 2,9  | 2,6  | 2,4  | 2,2  |
|                   | 3              | 6,7                       | 6,6  | 6,3  | 6,0  | 5,7  | 5,4  |
|                   | 7              | 9,7                       | 9,6  | 9,3  | 9,0  | 8,7  | 8,5  |
| 100               | 0,5            | 3,4                       | 3,2  | 2,8  | 2,5  | 2,3  | 2,2  |
|                   | 3              | 6,6                       | 6,4  | 6,1  | 5,8  | 5,5  | 5,2  |
|                   | 7              | 9,4                       | 9,3  | 9,1  | 8,7  | 8,4  | 8,1  |

Таблица 6

| $\frac{J_1}{J_0}$ | $\delta$ , рад | Разгон на пониженной скорости, $K_{\delta m}=2,5$ |              | Обеспечение нулевой скорости двигателя в момент выбора зазора, |              | Изменение момента по экспоненте $\frac{T_m}{2\pi/\Omega}=1$ |              |
|-------------------|----------------|---|--------------|--|--------------|---|--------------|
|                   |                | $K_\delta$  | $t_{пп}$ , с | $K_\delta$   | $t_{пп}$ , с | $K_\delta$  | $t_{пп}$ , с |
| 1,5               | 0,5            | 3,14  | 0,55         | 2,00   | 0,53         | 3,66  | 0,55         |
|                   | 3              | 3,13  | 1            | 2,00   | 0,62         | 9,24  | 0,65         |
|                   | 7              | 3,13  | 1,55         | 2,00   | 0,7          | 14,4  | 0,7          |
| 13                | 0,5            | 2,51  | 4,5          | 2,00   | 4,48         | 2,23  | 4,48         |
|                   | 3              | 2,50  | 5,3          | 2,00   | 4,60         | 5,42  | 4,65         |
|                   | 7              | 2,51  | 5,5          | 2,00   | 4,62         | 8,42  | 4,66         |
| 100               | 0,5            | 2,49  | 31,6         | 2,00   | 31,6         | 2,16  | 31,7         |
|                   | 3              | 2,48  | 32           | 2,00   | 31,7         | 5,25  | 31,8         |
|                   | 7              | 2,48  | 32,5         | 2,00   | 31,8         | 9,89  | 31,9         |

Изменение динамических нагрузок в зависимости от постоянной времени  $T_m$  при изменении задающего воздействия по экспоненте в ДЭМС с соотношением моментов инерции  $J_1/J_0 = 13$  и  $\delta = 0,5; 3$  и  $7$  рад при отсутствии статического момента представлено на рис.5.

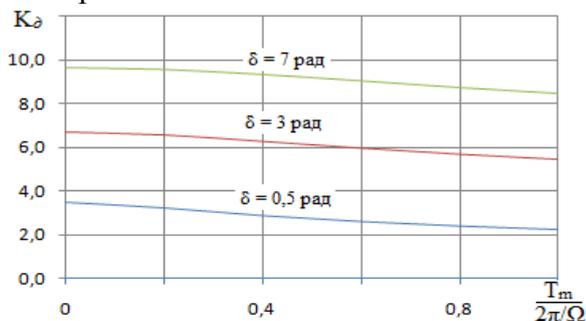


Рис.5. Зависимость коэффициента динамичности от постоянной времени  $T_m$  в ДЭМС с  $J_1/J_0 = 13$

Процессы пуска в ДЭМС при соотношении моментов инерции  $J_1/J_0 = 13$  и значении зазора  $\delta = 3$  рад в передачах при различном управлении, полученные при моделировании, представлены на рис. 6 и 7.

Для управления процессом пуска на пониженной скорости (характеристика 2 на рис.1) или в два этапа с обеспечением нулевой скорости двигателя в момент выбора зазора (характеристика 3 на рис.1), необходимо достаточно точно определить величину зазора и времена переключения. На основании этих данных составляется программа работы процессора, который и будет таким образом управлять приводом.

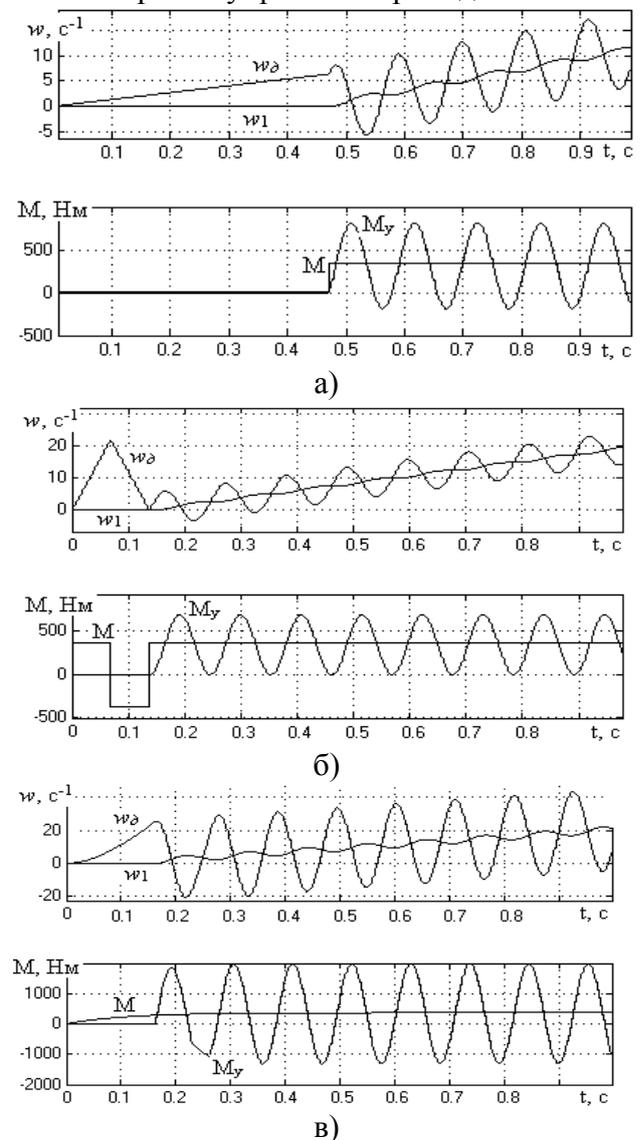


Рис.6. Пуск при  $J_1/J_0 = 13$  и  $\delta = 3$  рад: (а) – разгон на пониженной скорости, (б) – обеспечение нулевой скорости двигателя в момент выбора зазора, (в) – изменение момента по экспоненте,  $T_m/(2\pi/\Omega) = 1$

**Выводы.** Очевидно, что с увеличением зазора возрастает также коэффициент динамичности. Наличие статического момента

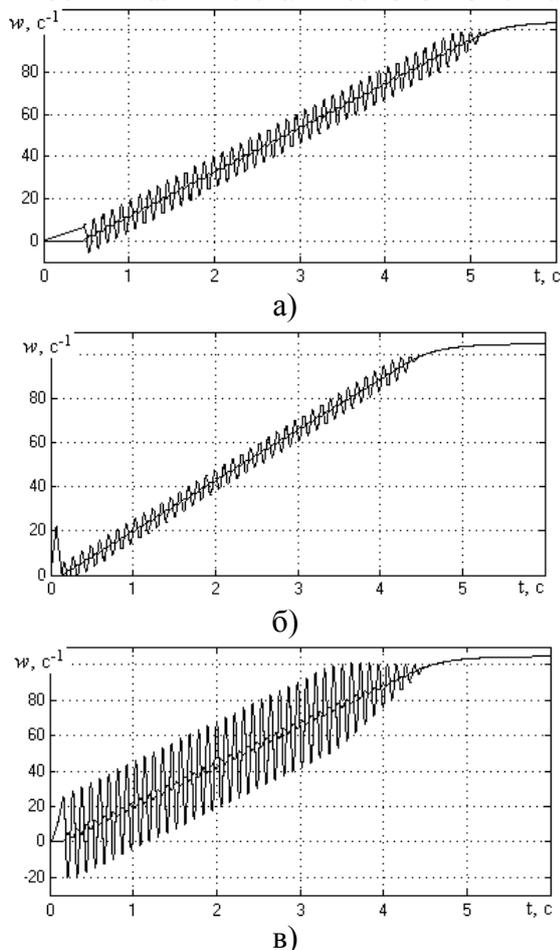


Рис.7. Пуск при  $J_1/J_0 = 13$  и  $\delta = 3$  рад:  
(а) – разгон на пониженной скорости, (б) – обеспечение нулевой скорости двигателя в момент выбора зазора, (в) – изменение момента по экспоненте,  $T_m/(2\pi/\Omega) = 1$ .

приводит к снижению динамических нагрузок, однако при величине зазора более 0,5 рад мгновенное изменение момента при пуске недопустимо. Разгон на пониженной скорости ограничивает динамические нагрузки, хотя в ДЭМС с малым значением момента инерции  $J_1$  экспериментальные значения коэффициента динамичности превышают расчетные на 25%. При управляющем воздействии, обеспечивающем нулевую скорость двигателя на момент выбора зазора, достигается минимальное значение динамических нагрузок вне зависимости от соотношения моментов инерции и значения зазора, однако требуются данные о реаль-

ной величине зазора и возможность переключения с необходимой точностью. Изменение управляющего воздействия по экспоненте можно рекомендовать в ДЭМС с большим значением момента инерции  $J_1$  и величине зазора до 1 рад.

#### 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. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.

8. 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.

9. Smolyaninov D. Stand der Forschungen zur Pendeldämpfung bei Drehkränen / Smolyaninov D., Palis F., Horn P., Grigorov O.W. – Kranfachtagung Universität Magdeburg, 2002, pp. 113 – 128.

10. Smolyaninov D. Ergebnisse der Untersuchungen zur Pendeldämpfung bei Drehkränen. / Smolyaninov D., Horn P., Krause F., Palis F. – Kranfachtagung Technische Universität Dresden, 2003, pp. 107 – 116.

Получено 28.02.2016

#### 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*, pp. 360 (In Russian).

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

3. Gerasimyak R. P., and Naydenko E. V. Nagruzki v kinematicheskikh peredachah dvuhmassovoy elektromechanicheskoy sistemi v regime tormogeniya [Loads in Kinematic Transfers Two-mass Electromechanical System During Braking]. (2015), *Electro-technical and computer systems*, Kiev, Ukraine, Vol. 1(93), pp. 15–22 (in Russian).

4. Gerasimyak R. P., and Naydenko E. V. Dvuhmassovaya elektromechanicheskaya sistema s luftom v peredache v regime tormogeniya [The kinematic transmission loads of two-mass electromechanical system with gear during braking]. (2015), *Electro-technical and computer systems*, Kiev, Ukraine, Vol.18(94), pp. 62–68 (in Russian).

5. Gerasimyak, R.P., and Naydenko, E.V. Upravlenie asinhronnim elektroprivodom me-

hanismjv povorota, obespechivayuchee 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, Vol. 30, pp. 111–112 (In Russian).

6. Busher V. V., and Naydenko E. V. Uchebniy programno–apparatniy maket dlja issledovaniya dvuhmassovoy elektromechanicheskoy sistemi [Educational hardware and software layout for research two-mass electromechanical system]. (2015), *Electro-technical and computer systems*, Kiev, Ukraine, Vol. 20 (96), pp.16–22 (in Russian).

7. Gerasimyak R. P., and Subbotin V. V. Uluchshenie kachestva perehodnih processov pri vibore zazora v elektromechanicheskikh sistemah [Improving the quality of transients in the selection of the gap in electromechanical systems]. (2013), *Electro-technical and computer systems*, Kiev, Ukraine, Vol. 10 (86), pp.27–32 (in Russian).

8. Firago B. I., and Vasilyev D. S. Primenenie ustrojstv pavnogo puska i tormogeniya asinhronnih dvigatelej v elektroprivodah kranovih mekhanizmov peredvigeniya [The use of soft starters and braking asynchronous motors in electric crane mechanisms of movement]. (2011), *Electrical and Computer Systems*, Kiev, Ukraine, Vol. 4(80), pp.30–38 (in Russian).

9. Smolyaninov D., Palis F., Horn P., and Grigorov O.W. Prior research of oscillation damping in cranes. *Kranfachtagung Universität Magdeburg*, 2002, pp. 113–128 (in Germany).

10. Smolyaninov D., Horn P., Krause F., and Palis F. Results of investigations of oscillation damping in cranes. *Crane Symposium Technical University Dresden*, 2003, pp. 107–116 (in Germany).



Найденко  
Елена Валерьевна,  
к.т.н., доц. каф. ЭСКУ  
Одесского национального  
политехнического универ-  
ситета.  
Тел. 048–705–8467.  
E-mail: alena2808@ukr.net