

УДК 62-83

**В. В. Бушер**, д-р техн. наук,

**Е. В. Найденко**, канд. техн. наук

### УЧЕБНЫЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ МАКЕТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**Аннотация.** Рассмотрена возможность реализации программы управления двухмассовой электромеханической системой на базе промышленного контроллера. Получена возможность продемонстрировать работу системы в реальном времени, а также, изменяя масштаб времени, исследовать динамические нагрузки, возникающие в кинематических элементах механизма при различных условиях и методах управления.

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

**В. В. Бушер**, д-р техн. наук,

**Е. В. Найденко**, канд. техн. наук

### НАВЧАЛЬНИЙ ПРОГРАМНО-АППАРАТНИЙ МАКЕТ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОХМАСОВОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

**Анотація.** Розглянуто можливість реалізації програми управління двухмассовой электромеханичної системою на базі промислового контролера. Отримано можливість продемонструвати роботу системи в реальному часі, а також, змінюючи масштаб часу, досліджувати динамічні навантаження, що виникають в кінематичних елементах механізму при різних умовах і методах управління.

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

**V. V. Busher**, ScD,

**E. Naydenko**, PhD.

### EDUCATIONAL HARDWARE AND SOFTWARE LAYOUT FOR TWO-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEM RESEARCH

**Abstract.** The possibility of implementation of the program of two-mass electromechanical- system control on the basis of industrial controller. We have got the chance to demonstrate the system operation in real time, as well as changing the time scale, to explore the dynamic loads encountered in kinematic elements of the mechanism under various conditions and management practices.

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

**Введение.** Известно, что для оптимального управления механизмом, обеспечивающим быстрые переходные процессы и одновременно гашение колебаний, требуются не плавные, а мгновенные приложения максимального момента [3]. Таким образом предполагается, что двигатель, разгонявший механизм с постоянным моментом  $M_m$ , мгновенно переходит в тормозной режим, развивая момент  $-M_m$  (рис.1). В частности, так должен работать механизм, которому за определенное время разгона и торможения требуется пройти заданный путь (угол поворота), после чего необходима его остановка [1]. Однако скачкообразное приложение момента к упругим звеньям – валам, металлоконструкциям между двигателем и рабочим органом приводит к наибольшим динамиче-

ским нагрузкам в этих элементах в переходных режимах [3].

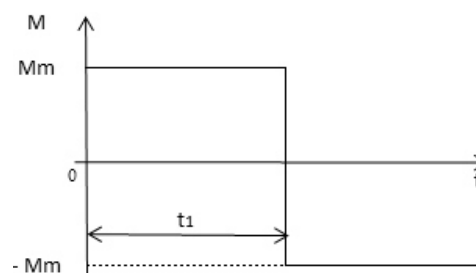


Рис. 1. Диаграмма момента  $M(t)$  при разгоне и торможении

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 рабочим органом обладает конечным значением жёсткости  $C_y$ . Расчётная схема такой ДЭМС после приведения всех элементов к валу двигателя приведена на рис. 2.

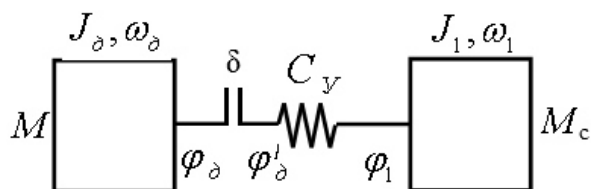


Рис.2. Расчётная схема ДЭМС

Здесь ротор двигателя с моментом инерции  $J_d$ , механизм с моментом инерции  $J_1$ ,  $M$  – момент (усилие) двигателя,  $\omega_d$  и  $\omega_1$  – угловые скорости вращения двигателя и рабочего органа соответственно,  $M_y = C_y(\varphi_d - \varphi_1)$  – 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 таких ЭМС. Так, в работе [6] показана возможность реализации плавных переходных процессов крановых механизмов. В [7,8] представлены практические результаты ограничения динамических нагрузок в ДЭМС за счёт демпфирующего эффекта электропривода, в [9] предложена схема, позволяющая обеспечить эффективное управление режимами работы крановых механизмов при их модернизации. В работе [10] приведены соотношения, учитывающие потери на диссипацию, а в [11] показана возможность расщепления систем управления многомассовых объектов на подсистемы, связанные только вектором неопределённости, и управления каждой из них.

Соответственно, при подготовке студентов-электромехаников необходимо уделить внимание и решению задач управления такими механизмами. Однако в условиях учебных заведений весьма сложно обеспечить лабораторный практикум в данной области. Слож-

ности возникают как при физической реализации двухмассовой системы с реальными параметрами колебаний, зазоров, так и при подборе измерительной, регистрирующей и управляющей аппаратуры.

**Целью работы** является создание учебного макета двухмассовой электромеханической системы на базе промышленного микроконтроллера, реализующего как различные способы управления для снижения динамических нагрузок в кинематических элементах при резком торможении механизма, так и имитацию поведения механизма и регистрацию соответствующих данных за счёт встроенной в программу модели ДЭМС.

**Материалы исследования.** Мгновенное изменение момента и поддержание его постоянным при пуске и торможении может быть реализовано современными электроприводами ПЧ-АД с векторным управлением или прямым контролем момента. При этом электромагнитные процессы оказываются настолько кратковременными, что ими можно пренебречь, особенно с учетом механической инерционности крупных кранов и экскаваторов. Также предварительные исследования [10] показывают, что учёт диссипации в крановых механизмах снижает пиковые нагрузки лишь на 6...10 %.

Тогда для режима торможения или реверса, когда двигатель мгновенно изменяет момент от  $+M$  до  $-M_m$ , и без учета диссипативных потерь поведение ДЭМС описывается следующим дифференциальным уравнением [3]:

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

где  $J = J_d + J_1$  – суммарный момент инерции,  $M_{ycp}$  – среднее значение упругого момента, определяемого по формуле:

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

где  $M_c$  – статический момент сопротивления, который можно считать постоянным.

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 А и В – постоянные интегрирования. Корни характеристического уравнения в этом случае мнимые, а частота собственных колебаний

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

В общем случае начальные условия ненулевые

$$M_y = M_{yнач2}, \quad \frac{dM_y}{dt} = C_y w_{o1}, \quad (3)$$

причём  $M_{yнач2}$  – это конечное значение упругого момента на первом этапе (разгона) перед началом торможения,  $w_{o1}$  – разность скоростей двигателя и рабочего органа в момент переключения  $t = t_1$  (рис.3).

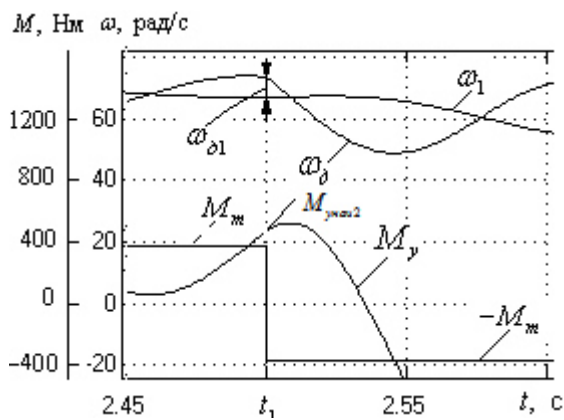


Рис.3. Момент упругой связи, скорости двигателя и механизма при переключении

Используя эти начальные значения момента и разности скоростей (3), запишем в общем случае уравнения для упругого момента и его производной в момент времени  $t_1$ , считая для начала второго этапа  $t = 0$ :

$$M_{yнач2} = M_{ycp} - 2M_m \frac{J_1}{J} + B \quad \text{и}$$

$$C_y w_{o1} = A \Omega;$$

откуда находим постоянные интегрирования,

которые подставляем в уравнение (2). Окончательно

$$M_y = (M_{yнач2} - M_{ycp} + 2M_m \frac{J_1}{J}) \cos \Omega t + \frac{C_y w_{o1}}{\Omega} \sin \Omega t + M_{ycp} - 2M_m \frac{J_1}{J}, \quad (4)$$

а максимальное значение момента упругой деформации

$$M_{y \max} = \left| M_{ycp} - 2M_m \frac{J_1}{J} \right| + \sqrt{\left( M_{yнач2} - M_{ycp} + 2M_m \frac{J_1}{J} \right)^2 + \left( \frac{C_y w_{o1}}{\Omega} \right)^2}. \quad (5)$$

Коэффициент динамичности – важный показатель условий работы механического оборудования [1, 4]

$$K_o = \frac{M_{y \max}}{M_{ycp}};$$

его можно найти, используя (5), по формуле:

$$K_{o2} = \left| 1 - 2 \frac{M_m J_1}{M_{ycp} J} \right| + \sqrt{\left( \frac{M_{yнач2} + \frac{2M_m J_1}{M_{ycp} J} - 1}{M_{ycp}} \right)^2 + \left( \frac{C_y w_{o1}}{\Omega M_{ycp}} \right)^2}. \quad (6)$$

Очевидно, что коэффициент динамичности  $K_o$  существенно зависит от начальных условий  $M_{yнач2}$  и  $w_{o1}$ , а последние определяются предыдущим режимом работы ЭМС [4]. Поэтому при управлении моментом целесообразно рассчитать, сколько целых периодов колебаний проходит за время разгона, а затем при  $t = \frac{2\pi n}{\Omega}$  осуществить переключение. Расчет частоты колебаний, скорости, при которой во время разгона завершится целое число периодов, формирование команды на переключение момента, а также регистрацию данных для отображения на виртуальном осциллографе выполняет микроконтроллер.

Поведение ДЭМС моделируется также в программе микроконтроллера с помощью уравнений, составленных для решения (1) численными методами интегрирования. В частности, преобразовав (1) к форме Коши, получим систему дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{1}{J_1}(M - M_y),$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2}(M_y - M_c),$$

$$\partial\omega = \omega_1 - \omega_2,$$

$$\frac{d\partial\varphi}{dt} = \partial\omega,$$

$$M_y = C_y(\partial\varphi - \delta) \forall \partial\varphi > \delta.$$

А затем, используя простейший метод конечных приращений, получим систему алгебраических уравнений:

$$\omega_{1i} = \omega_{1i-1} + \frac{1}{J_1}(M_i - M_{yi})\Delta t,$$

$$\omega_{2i} = \omega_{2i-1} + \frac{1}{J_2}(M_y - M_c)\Delta t,$$

$$\partial\omega_i = \omega_{1i} - \omega_{2i},$$

$$\varphi_{1i} = \varphi_{1i-1} + \omega_{1i}\Delta t,$$

$$\varphi_{2i} = \varphi_{2i-1} + \omega_{2i}\Delta t,$$

$$\partial\varphi_i = \varphi_{1i} - \varphi_{2i},$$

$$M_{yi} = C_y(\partial\varphi_i - \delta) \forall \partial\varphi_i > \delta.$$

Система может быть дополнена уравнениями, описывающими линейную или нелинейную механическую характеристику электропривода.

Программа реализована на базе промышленного микроконтроллера серии TWIDO производства Schneider Electric с программным обеспечением TwidoSuite.

Последнее позволяет студентам быстро освоить основы программирования на языке релейно-контакторных схем (LADDER), освоить принципы использования регистров, дискретных и аналоговых устройств ввода/вывода, таймеров.

Программное обеспечение TwidoSuite также позволяет выполнять симуляцию работы контроллера в процессе отладки программы.

Ядро программы состоит из трех основ-

ных блоков:

1. Модуль инициализации – однократно при запуске контроллера задает и рассчитывает начальные условия, представленные либо в виде констант, либо подаваемых на аналоговые входы сигналов от виртуальных датчиков (на лабораторном стенде – потенциометров);

2. Модуль управления – осуществляет расчет момента времени переключения в зависимости от поданного на аналоговый вход задания перемещения и запускает таймер;

3. Модуль наблюдателя – виртуальная модель ДЭМС с организацией вывода значений переменных на аналоговые выходы.

Замечательной особенностью контроллера является возможность изменения длительности исполнения программного цикла  $T_0$ .

Задаваясь величиной  $\Delta t = 2 \text{ ms}$  и такой же длительностью программного цикла  $T_0 = \Delta t$ , контроллер выполняет работу и регистрирует координаты ДЭМС в реальном масштабе времени. Студенты в этом случае обычно могут наблюдать лишь близкие к линейным законы изменения скоростей и момент времени переключения от режима пуска к режиму торможения. Важно, что программа загружается в контроллер и при ее выполнении изменяется состояние физических дискретных и аналоговых выводов контроллера.

Затем длительность программного цикла увеличивается до 100...200 ms. Это приводит к увеличению масштаба времени в 50...100 раз без каких-либо дополнительных расчетов и модификации программы. И позволяет отобразить на встроенном виртуальном осциллографе колебательные переходные процессы, которые крайне затруднительно было бы наблюдать на реальном объекте. Также в ходе выполнения лабораторной работы могут быть намерено внесены изменения в программу (начальные условия, время выдержки таймера), которые позволяют наглядно увидеть изменения динамических нагрузок в ДЭМС. Алгоритм управляющей программы показан на рис.4.

При моделировании использовались данные реального портального крана, у которого  $C_y = 3,7 \text{ kNm}$ . Поворотная платформа приво-

дится в движение двумя асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором серии МТКФ 411-6, номинальная мощность каждого из них  $P_n = 30 \text{ kW}$ , номинальная скорость  $\omega_n = 101,53 \text{ s}^{-1}$ . Принят максимальный пусковой (тормозной) момент  $M_m = 2,5 \text{ Mn} = 367,68 \text{ Nm}$ , момент инерции двух двигателей  $J_o = 1,15 \text{ kgm}^2$ . Момент инерции поворотной платформы составляет  $13J_o = 14,92 \text{ kgm}^2$ .

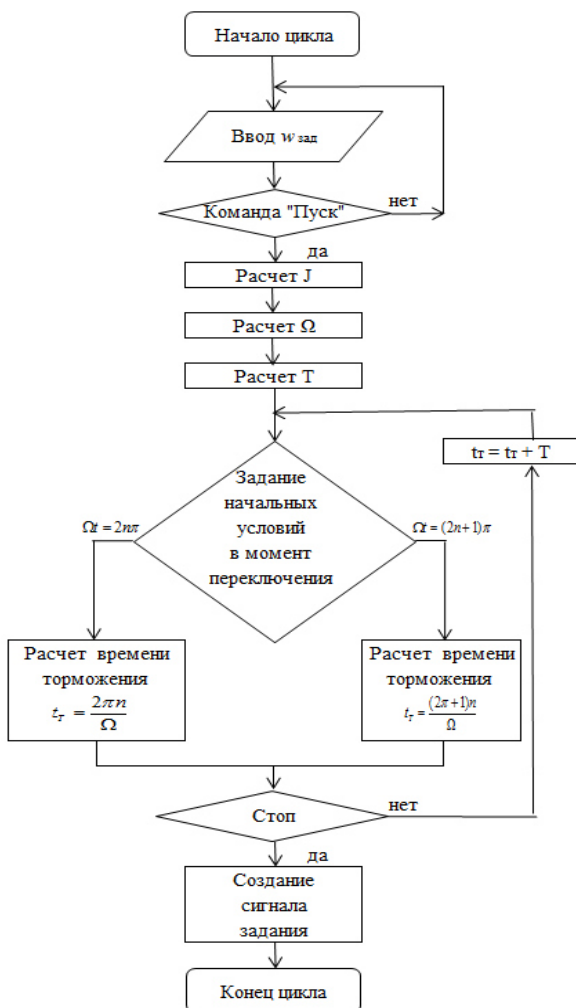
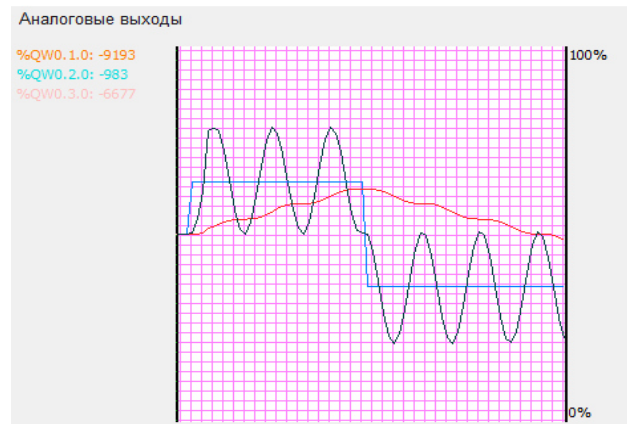
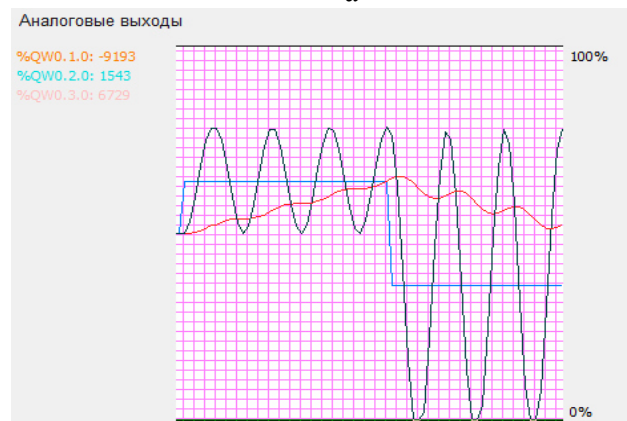


Рис.4. Алгоритм управления ДЭМС

Примеры осциллограмм процесса торможения при экстремальных начальных условиях, полученных на контроллере, представлены на рис.5 (цена деления по оси времени – 2 s, что в реальной системе соответствует 0,02 s). По осциллограммам можно рассчитать период колебаний, определить экстремальные значения скоростей, моментов, вычислить коэффициенты динамичности.



а



б

Рис. 5. Пример осциллограмм торможения при  $M_c = 0$  в момент времени  $\Omega t = 2\pi n$  (а);  $\Omega t = (2n + 1)\pi$  (б)

Полученные по расчетным формулам и с помощью модели в контроллере значения коэффициента динамичности в режиме торможения ДЭМС при мгновенном изменении задающего воздействия (рис. 1) и отсутствии статического момента приведены в таблице 1. Основной причиной различий результатов является погрешность отсчета из-за невысокой разрешающей способности осциллографа (что, впрочем, тоже имеет некоторую учебную ценность).

Таблица 1

	Моделирование	Расчет
Момент переключения	Коэффициент динамичности $K_d$	
$\Omega t = 2\pi n$	11/5,5=2,00	2,00
$\Omega t = (2n + 1)\pi$	19/5=3,80	4,00
Частота колебаний		
$f, \text{ Hz}$	100/11,5=8,7	9,4

**Выводы.** На базе промышленного контроллера реализована программа управления двухмассовой электромеханической системой. Показана возможность существенного снижения нагрузок в кинематических элементах при торможении, если могут быть определены с незначительными погрешностями параметры системы. При проведении лабораторных работ для студентов-электромехаников старших курсов получена возможность продемонстрировать работу системы в реальном времени, а также, изменяя масштаб времени, исследовать динамические нагрузки, возникающие в кинематических элементах механизма при различных условиях и методах управления. Работа полезна также для изучения основ программирования промышленных контроллеров.

#### 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. Комаров М. С. Динамика грузоподъемных машин [Текст] / В. И. Комаров. – М. : Машгиз, 1962. – 268 с.
3. Герасимьяк Р. П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем [Текст] / Р. П. Герасимьяк, В. А. Лещёв. – Одесса : СМІЛ, 2008. – 192 с.
4. Герасимьяк Р. П. Нагрузки в кинематических передачах двухмассовой электромеханической системы в режиме торможения [Текст] / Р. П. Герасимьяк, Е. В. Найдено // Электротехнические и компьютерные системы. – Киев : Техника, 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. Найдено // Электротехнические и компьютерные системы. – Киев: Техника, 2015. – Вып.18(94). – С. 62–68.
6. 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: Техника, 2011. – Вып.4.(80). – С. 30–38.

7. Задорожный Н. А. Исследование динамических свойств ДЭМС по амплитудно-частотным характеристикам [Текст] / Н. А. Задорожный, Н. С. Пономарев // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Киев: Техника, 2011. – Вып. 3(79). – С. 28–32.

8. Задорожная И. Н. Исследование влияния степени электромеханической связи на демпфирующее действие электропривода с упругими связями [Текст] / И. Н. Задорожная, Н. А. Задорожный // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Киев: Техника, 2014. – Вып. 15(91). – С. 99–103.

9. Андриенко П. Д. Энергоэффективное торможение противовключением асинхронного двигателя с фазным ротором [Текст] / П. Д. Андриенко, Д. С. Андриенко, М. И. Коцур, С. В. Калужный // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Киев : Техника, 2014. – Вып. 15(91). – С. 89–91.

10. 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 : Техника, 2013. – Вып. 10(86). – С. 27–32.

11. Казурова А. Е. Высокоточное управление многомассовой неопределенной упругой системой [Текст] / А. Е. Казурова // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Электротехнические и компьютерные системы. – Киев : Техника, 2014. – Вып. 15(91). – С. 96–98.

12. Здрозис К. П. Повышение качества электромеханических систем с асинхронным электроприводом [Текст] / К. П. Здрозис // Електромашинобуд. і електрообл. – Киев, Техника, 2000. – Вып.55. – С. 36 – 41.

Получено 28.10.2015

#### References

1. Kluchev V. I., and Terekhov V. M. Elektroprivod i avtomatizacija obshchepromishlennih mehanizmov [Electric drive and automation of general-purpose machinery]. – Moscow : Energy , 1980. – 360 p. (in Russian)

2. Komarov M. S. Dinamika obshchepromishlennih mashin [Dynamics of lifting equipment]. – Moscow : *Mashgiz* , 1962. – 268 p. (in Russian)

3. Gerasimyak R. P., and Leshchev V. A. Analiz i sintez kranovih elektromehani cheskikh system [Analysis and synthesis of crane electromechanical systems]. Odessa: *SMIL* , 2008. – 192 p. (in Russian)

4. Gerasimyak R. P., and Naydenko E. V. Nagruzki v kinematicheskikh peredachah dvuhmassovoy elektromehani cheskoy sistemi v regime tormogenija [Loads in Kinematic Transfers Two-mass Electromechanical System During Braking] / *Electro-technical and computer systems*. –Kiev, *Technics*, 2015. – No.17 (93). – P.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] / *Electro-technical and computer systems*. – Kiev, *Technics*, 2015. – No.18 (94). – P.62–68. (in Russian)

6. Firago B. I., and Vasilyev D. S. Primenenie ustrojstv plavnogo puska i tormogenija asinhronnih dvigatelej v elektroprivodah kranovih mehanizmov peredvigenija [The use of soft starters and braking asynchronous motors in electric crane mechanisms of movement] // *Electrical and Computer Systems*. – Kiev, *Technics*, 2011. – No.4 (80). – P.30–38. (in Russian)

7. Zadorozhnyj N. A., and Ponomarev N. S. Issledovanie mehanicheskikh svojstv DEMS po amplitudno-chastotnim harakteristikam [DEMS study of the dynamic properties for the amplitude-frequency characteristics]. / *Problems of automated electric. Theory and practice*. – Kiev, *Technics*, 2011. – No.3 (79). – P.28–32. (in Russian)

8. Zadorozhnyaya I. N., and Zadorozhnii N. A. Issledovanie vlijaniya stepeni elektromehani cheskoy svjazi na dempfi ruju shchee dejstvie elektroprivoda s uprugimi svjazjami [Investigation of the influence degree of electromechanical coupling in the damping effect of actuator and elastic constraints / *problems of automated electric*]. *Theory and practice*. – Kiev, *Technics*, 2014. – No.15 (91). – P.99–103. (in Russian)

9. Andrienko P. D., Andrienko D. S., Kocur M. I., and Kalyuzhny S. V. Energoeffektivnoe tormogenie protivovklucheniem asinhronnogo dvigatelja s faznim rotorom [Energy efficient braking opposition asynchronous motor with wound rotor] / *Problems automated electric. Theory and practice*. – *Electro-technical and computer systems*. – Kiev, *Technics*, 2014. – No.15 (91). – P.89–91. (in Russian)

10. 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] / *Electro-technical and computer systems*. – Kiev, *Technics*, 2013. – No.10 (86). – P.27–32. (in Russian)

11. Kazurova A. E. Visokotochnoe upravlenie mnogomassovoj neopredelennoj sistemoj [Precision control multimass uncertain elastic system] / *Problems automated electric. Theory and practice*. – *Electro-technical and computer systems*. – Kiev, *Technics*, 2014. – No.15 (91). – P.96–98. (in Russian)

12. Zdrozis K. P. Povishenie kachestva elektromehani cheskikh system s asinhronnim elektroprivodom [Improving the quality of electromechanical systems with asynchronous electric] // *Elektromashinobud. i elektroobl.* – Kiev, *Technics*, 2000. – No.55. – P.36–41. (in Russian)



Бушер  
Виктор Владимирович,  
д-р техн. наук,  
профессор каф. ЭМСКУ  
Одесского нац. поли-  
техн. ун-та.  
Тел. 048-705-8467



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