

УДК 62-83.

**Р. П. Герасимьяк**, д-р техн. наук,  
**В. В. Субботин**

### УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫБОРЕ ЗАЗОРА В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

**Аннотация.** Рассмотрены процессы, происходящие при выборе зазора в зубчатых передачах с учетом вязкого трения. Даны основные соотношения для определения коэффициента динамичности с учетом потерь на диссипацию. Рассмотрено влияние обратной связи по разности скоростей на качество переходных процессов.

**Ключевые слова:** электромеханическая система, зазор в передаче, вязкое трение, коэффициент динамичности, коэффициент демпфирования, обратная связь по разности скоростей

**R. P. Gerasymiak**, ScD.,  
**V. V. Subbotin**

### TRANSITION PROCESSES QUALITY IMPROVING WHILE SELECTING A GAP IN ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

**Abstract.** Processes that occur during the selection of the gap with influence of the viscous friction are considered. The basic relations for determination dynamical coefficient with dissipation are given.

The feedback influence of the speeds difference on the dynamical properties of the system

**Keywords:** electromechanical system, gap, dynamical coefficient, viscous friction? Damping coefficient, feedback of the speeds difference

**Р. П. Герасимьяк**, д-р техн. наук,  
**В. В. Субботин**

### ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ВИБОРУ ЗАГОРІВ У ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ

**Анотація.** Розглянуто процеси, що відбуваються під час вибору зазору в кінематичних передачах з урахуванням в'язкого тертя. Наведено залежності для визначення коефіцієнта динамічності із врахуванням втрат на дисипацію. Розглянуто вплив зворотного зв'язку за різницею швидкостей на якість перехідних процесів.

**Ключові слова:** електромеханічна система, зазор у передачі, в'язке тертя, коефіцієнт динамічності, коефіцієнт демпфування, зворотний зв'язок за різницею швидкостей

**Введение.** В работе [3] рассмотрены особенности пуска в электромеханической системе (ЭМС) с двухмассовой механической частью (ДМЧ) и зазором. Там же обусловлена необходимость ограничения момента двигателя до выбора зазора, даны основные соотношения для расчета пиковой нагрузки. Снижению пиковых нагрузок в передачах механизма способствуют реальные потери на диссипацию, которые не были учтены в [3]. Эти потери обусловлены деформацией элементов передаточного механизма. Полагают, что они пропорциональны разности скоростей [2]. Кроме того, имеется возможность ввести в ЭМС коррекцию, также способствующую улучшению показателей качества.

**Материалы исследования.** Рассмотрим вначале влияние вязкого трения на вид переходных процессов во время второго этапа, © Герасимьяк Р.П., Субботин В.В., 2013

после выбора зазора. Система уравнений, описывающая ЭМС на четных этапах ([1]),

$$\begin{cases} M_1^{(2)} - M_{12} - b_{12}(\omega_1 - \omega_2) = J_1 \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} \\ M_{12} + b_{12}(\omega_1 - \omega_2) - M_N^{(2)} = J_2 \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} \end{cases} \quad (1)$$

Преобразовав систему (1), запишем уравнение относительно момента упругости:

$$\frac{1}{\Omega^2} \frac{d^2 M_{12}}{dt^2} + \frac{b_{12}}{c_{12}} \frac{dM_{12}}{dt} + M_{12} = M_{12cp}, \quad (2)$$

где  $b_{12}$  – коэффициент вязкого трения.

Он определяется на основании экспериментальных значений логарифмического декремента затухания  $d$  [2]

$$b_{12} = \frac{\tilde{n}_{12}}{\Omega} \times \frac{d}{\pi}, \quad (3)$$

где  $\Omega$  – частота свободных колебаний.

Корни характеристического уравнения из (2):

$$k_{1,2} = -\Omega \frac{d}{2\pi} \pm \Omega \sqrt{\left(\frac{d}{2\pi}\right)^2 - 1}. \quad (4)$$

Корни (4) являются парой комплексно сопряженных корней, так как обычно,  $d \leq 0,5$  т.е.  $\left(\frac{d}{2\pi} < 1\right)$  [2]. Свободное решение уравнения (2) представляет собой сумму гармонических колебаний частотой

$$\omega_0 = \Omega \frac{\sqrt{4\pi^2 - d^2}}{2\pi}, \quad (5)$$

с затуханием

$$\alpha = -\frac{d}{2\pi}\Omega. \quad (6)$$

Поэтому решение уравнения (2)

$$M_{12} = M_{12cp} + M_{12cp} e^{-\alpha t} \sqrt{1 + \left(\frac{c_{12}\omega_{12}}{\omega_0 M_{12cp}} - \frac{\alpha}{\omega_0}\right)^2} \times \sin(\omega_0 t + \psi), \quad (7)$$

где начальная фаза

$$\psi = \arctg\left(\omega_0 / \left(\alpha - \frac{c_{12}\omega_{12}}{M_{12cp}}\right)\right) + \begin{cases} 0, & \text{при } \alpha - \frac{c_{12}\omega_{12}}{M_{12cp}} < 0 \\ -\pi, & \text{при } \alpha - \frac{c_{12}\omega_{12}}{M_{12cp}} > 0 \end{cases}.$$

Фаза, при которой наступает пик упругого момента,

$$\psi_{\max} = \omega_0 t_{\max} = \arctg \frac{\sqrt{4\pi^2 - d^2}}{d - \frac{2\pi\Omega}{c_{12}\omega_{12}} M_{12cp}} \quad (8)$$

при  $d > \frac{2\pi\Omega}{c_{12}\omega_{12}} M_{12cp}$ ,

$$\psi_{\max} = \omega_0 t_{\max} = \pi - \arctg \frac{\sqrt{4\pi^2 - d^2}}{\frac{2\pi\Omega}{c_{12}\omega_{12}} M_{12cp} - d} \quad (9)$$

при  $d < \frac{2\pi\Omega}{c_{12}\omega_{12}} M_{12cp}$ .

Тогда пик упругого момента находим из (7) с учетом (8) или (9):

$$M_{12\text{пик}} = M_{12cp} \left( 1 + e^{\frac{\alpha}{\omega_0} \psi_{\max}} \sqrt{1 + \left(\frac{c_{12}\omega_{12}}{\omega_0 M_{12cp}} + \frac{\alpha}{\omega_0}\right)^2} \times \sin(\psi_{\max} + \psi) \right). \quad (10)$$

Коэффициент динамичности определим как отношение пика упругого момента к среднему базовому

$$K_{\text{дин}} = \frac{M_{12cp}}{M_{12cp.\text{баз}}} \left( 1 + e^{\frac{\alpha}{\omega_0} \psi_{\max}} \sqrt{1 + \left(\frac{c_{12}\omega_{12}}{\omega_0 M_{12cp}} + \frac{\alpha}{\omega_0}\right)^2} \times \sin(\psi_{\max} + \psi) \right). \quad (11)$$

Для количественной оценки процессов воспользуемся следующими данными.

Тип двигателя: АД 4МКТФ (Н) 112L6,  
 $P_H = 2,2$  кВт,  $n_H = 880$  мин<sup>-1</sup>,  
 $M_{\max} = 64$  Н·м,  $M_{II} = 62$  Н·м,  
 $J_1 = 0,035$  кг·м<sup>2</sup>.

Параметры механической части:

$c_{12} = 368,465$  Н·м / рад,  
 $J_2 = 2J_1$ ;  $J_2' = 5J_1$ ,  $\delta_1 = 0,5$  рад,  $\delta_2 = 2$  рад,  
 $M_c = 7,15$  Н·м.

На рис. 1 приведены зависимости коэффициента динамичности от момента при разных способах демпфирования и граничных значениях декремента затухания с зазором  $\delta = 2$  рад и соотношением моментов инерции  $J_2 / J_1 = 5$ . Напомним, что первый способ предполагает уменьшение момента, развиваемого двигателем только на первом этапе, а второй – на первом и на втором этапах. Учет потерь на диссипацию обеспечивает снижение коэффициента динамичности от 4,82 до 4,26, т.е на 11,6 %. При моменте, равном половине от номинала и первом способе регулирования – от 3,8 до 3,34 (на 13 %), а при втором способе регулирования – от 3,17 до 2,8 (на 11,7 %).

Учет потерь на диссипацию при первом способе демпфирования уменьшает коэффициент динамичности во всем диапазоне моментов. Осуществляется лишь параллельный перенос кривой коэффициента динамичности относительно той же зависимости без учета потерь на диссипацию с небольшим изменением угла наклона кривой. При втором способе демпфирования изменяется

только угол наклона кривой, естественно, влияние диссипации тем сильнее, чем меньше момент.

Учет потерь на диссипацию не приводит к существенному влиянию на коэффициент динамичности при изменении, как момента инерции второй массы, так и зазора. Чем меньше изменение коэффициента динамичности при изменении момента от нуля до максимального значения, т.е. чем более пологой оказывается зависимость, тем сильнее можно увеличить момент двигателя при условии равенства коэффициента динамичности, что позволит уменьшить время переход-

ного процесса.

Последующие исследования показали, что коэффициент динамичности линейно связан с декрементом затухания, причем степень влияния декремента затухания (угол наклона прямой) практически не зависит от величины момента, развиваемого двигателем. При максимальном декременте затухания  $d = 0,5$  обеспечивается демпфирование пика на уровне 88,5 % по сравнению с коэффициентом динамичности с нулевым декрементом затухания  $d = 0$ .

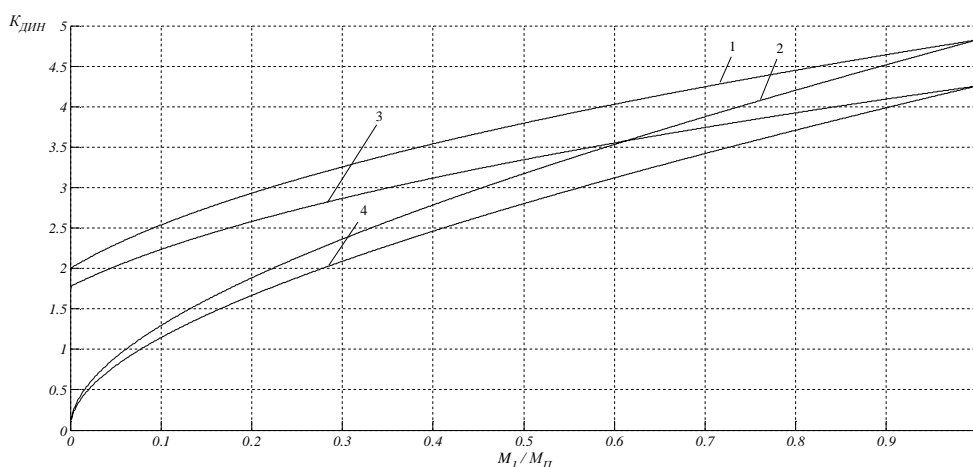


Рис. 1. Зависимость коэффициента динамичности при  $J_2 = 5J_1$  и  $\delta = 2$  рад от момента при различном декременте затухания:  
 1,2 – при  $d = 0$ , 3,4 – при  $d = 0,5$

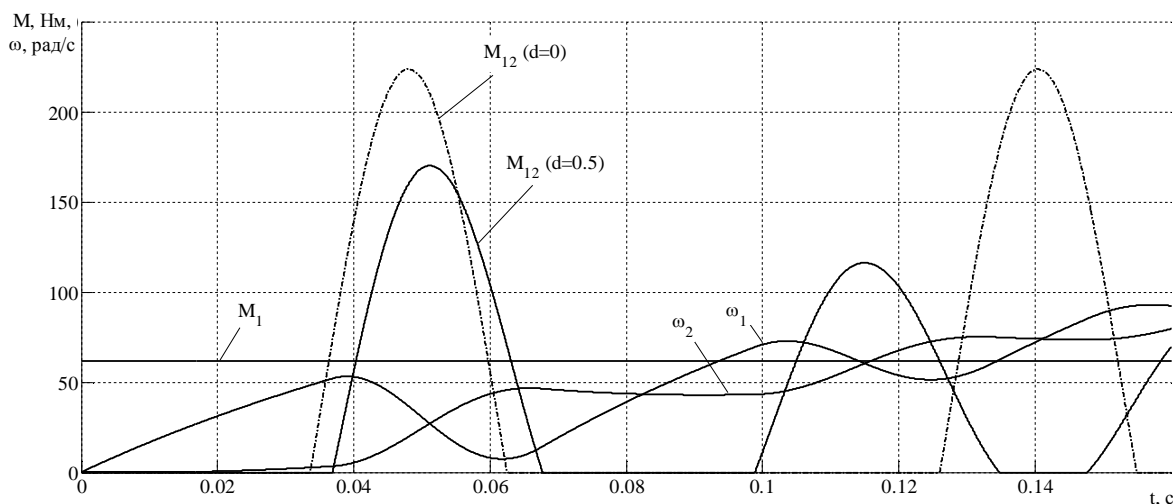


Рис. 2. Пуск ЭМС с ДМЧ с зазором и демпфированием при  $\delta = 2$  рад

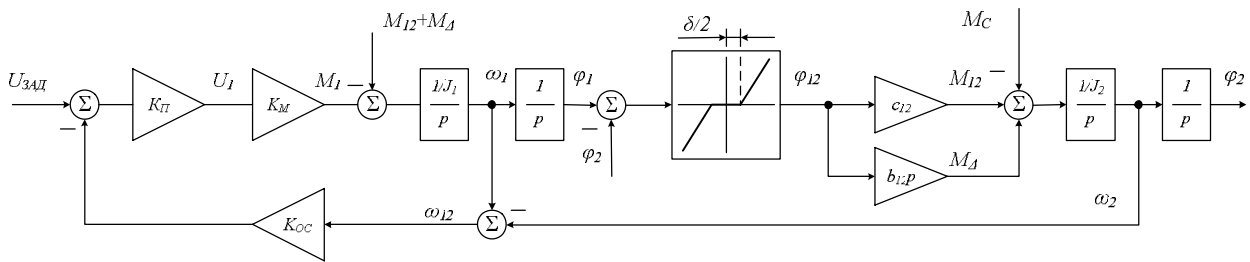


Рис. 3. Структурная схема ЭМС с ДМЧ, зазором и отрицательной обратной связью по разности скоростей

Переходный процесс пуска при параметрах ЭМС, соответствующих рис.1, изображен на рис. 2, из которого видно, что учёт вязкого трения не только снижает пиковую нагрузку на передачу, но и в случае неоднократного замыкания зазора, увеличивает частоту замыкания. Благодаря этому уменьшается общая длительность процессов, связанных с чередованием этапов и пульсацией скорости.

Структурная схема ЭМС с ДМЧ и дополнительной обратной связью по разности скоростей приведена на рис.3. Преобразователь представлен пропорциональным звеном  $K_{\Pi}$ , электромагнитные переходные процессы в двигателе игнорируются. Система остается замкнутой обратной связью на любом этапе движения, несмотря на размыкание зазора. Для такой системы (рис.3) уравнение относительно упругого момента

$$\frac{1}{\Omega^2} \frac{d^2 M_{12}}{dt^2} + \left( \frac{b_{12}}{c_{12}} + \frac{K_{\Pi} K_M K_{OC}}{J_1 \Omega^2} \right) \frac{dM_{12}}{dt} + M_{12} = M_{12cp}. \quad (12)$$

Как видно из уравнения, множитель при первой производной момента упругости, определяющий демпфирование, зависит от введённой обратной связи ( $K_{OC}$ ), а частота колебаний остается неизменной. Выбором глубины обратной связи можно обеспечить желаемое перерегулирование. Коэффициент обратной связи ЭМС, в которой величиной зазора можно пренебречь,

$$K_{OC} = \frac{1}{K_I K_M} \times \frac{J_1}{T} \left( 2\xi - \frac{d}{\pi} \right).$$

Если зазор существенен, то при  $\xi < 1$  справедливы формулы (7)...(11), в которых затухание

$$\alpha = -\frac{\Omega}{2} \left( \frac{d}{\pi} + \frac{K_{\Pi} K_M}{J_1 \Omega} K_{OC} \right)$$

и собственная частота

$$\omega_0 = \Omega \sqrt{1 - \frac{1}{4} \left( \frac{d}{\pi} + \frac{K_{\Pi} K_M}{J_1 \Omega} K_{OC} \right)^2},$$

где  $K_{\Pi} = U_1 / U_V$  – коэффициент передачи, связывающий напряжение, подводимое к статору  $U_1$ , с напряжением системы управления  $U_V$ ,  $K_M = M_1 / U_1$  – коэффициент, связывающий напряжение, подводимое к статору  $U_1$ , с моментом, развиваемым двигателем  $M_1$ . Так как для АД  $M_1 \equiv U_1^2$ , то  $K_M \equiv U_1$ .

Для расчета начальной разности скоростей необходимо решить уравнение изменения пути на первом этапе

$$\frac{\delta}{2} = \frac{M}{K_I K_M K_{OC}} \times \left( t + \frac{J_1}{K_I K_M K_{OC}} \left( e^{-\frac{K_I K_M K_{OC} t}{J_1}} - 1 \right) \right),$$

а полученное время подставить в переходную функцию скорости на первом этапе:

$$\omega_{12} = \frac{M}{K_I K_M K_{OC}} \left( 1 - e^{-\frac{K_I K_M K_{OC} t}{J_1}} \right).$$

Рассмотрим зависимость коэффициента динамичности от глубины обратной связи для ЭМС с  $J_2 = 5J_1$  и  $\delta_1 = 2$ .

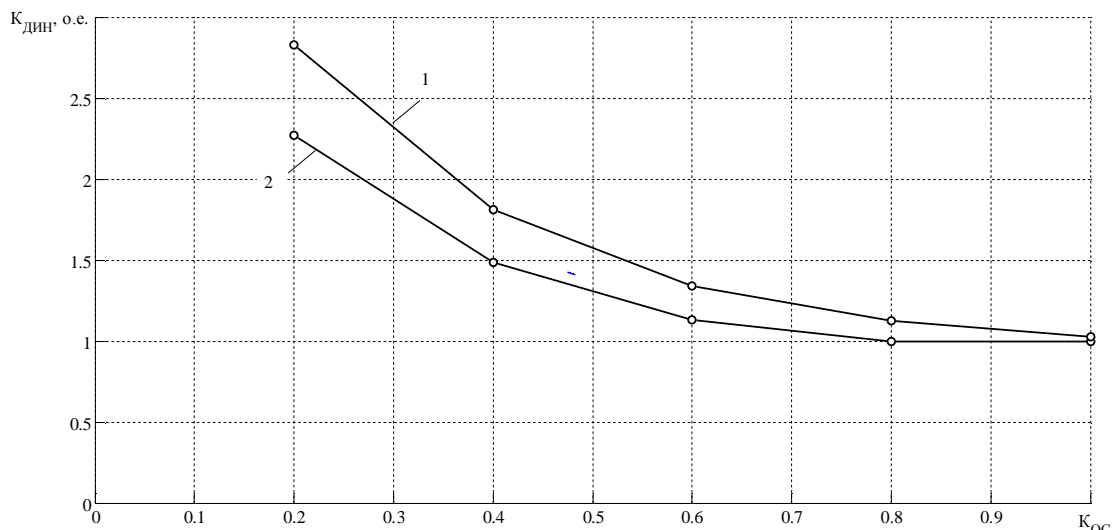


Рис. 4. Зависимость коэффициента динамичности от глубины обратной связи при  $J_2 = 5J_1$ ,  $\delta = 2$ ,  $d = 0$ :  $1 - K_M = const$ ,  $2 - K_M \equiv U_1$

Как видно из рис 4, нелинейная связь между напряжением статора и моментом, развиваемым двигателем, приводит к уменьшению коэффициента динамичности по сравнению с линеаризованной системой (при линеаризации в большом). Так, увеличение коэффициента  $K_M$  способствует росту коэффициента демпфирования  $\xi$  при том же коэффициенте обратной связи  $K_{ос}$ .

Следует иметь в виду, что с введением обратной связи процесс изменения скорости соответствует переходной характеристике аperiodического звена. Установившееся значение скорости уменьшается с увеличением глубины обратной связи, а эквивалентная постоянная времени возрастает. Таким образом, существенно возрастают длительности переходного процесса.

При использовании дополнительной обратной связи потери на диссипацию можно не учитывать ввиду широкого диапазона глубины обратной связи.

#### Выводы

Учитывать потери на диссипацию необходимо в тех случаях, если критично ограничение по прочности. Выбрав более высокий уровень ограничения с учетом диссипации, можно получить тот же коэффициент динамичности, но несколько меньшее время переходных процессов.

Или напротив, после снижения момента, исходя из ограничения коэффициента динамичности без учета вязкого трения, реально переходной процесс оказывается более длительным, но коэффициент динамичности меньше расчетного. Таким образом, получаем временной запас функционирования устройства, так как в процессе работы естественным образом увеличивается зазор и растет коэффициент динамичности.

Введение дополнительной обратной связи позволяет обеспечивать требуемый коэффициент динамичности. При этом усилению демпфирования соответствует увеличение длительности пуска.

При расчете желаемого коэффициента обратной связи задачу необходимо решать методом последовательных приближений, рассчитывая сначала длительность первого этапа и начальную разность скоростей, а после – коэффициент динамичности.

#### Список использованной литературы

1. Борцов, Ю. А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.
2. Герасимьяк, Р. П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р. П. Герасимьяк, В. А. Лещев. – Одесса : – СМІЛ, 2008. – 192 с.

3. Герасимьяк, Р. П. Анализ поведения электромеханической системы с двухмассовой механической частью / Р. П. Герасимьяк, В. В. Субботин. // *Электротехнические и компьютерные системы* – К. : Техника. – 2012. – № 08 (84). – 2012. – С.17 – 23

4. Герасимьяк, Р. П. Динамика асинхронных электроприводов крановых механизмов / Р. П. Герасимьяк. – М. : Энергоатомиздат, 1986 – 168 с.

5. Герасимьяк, Р. П. Динамика элементов автоматизированного электропривода/ Р. П. Герасимьяк. – К. : УМК ВО, 1989. – 100 с.

6. Ключев, В. И. Ограничение динамических нагрузок электропривода / В. И. Ключев. – М. : Энергия, 1971 – 320 с.

7. Ключев, В. И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов / В. И. Ключев, В. М. Терехов. – М. : Энергия, 1980. – 360 с.

8. Чиликин, М. Г. Теория автоматизированного электропривода. Учеб. пособие для вузов / М. Г Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер. – М. : Энергия, 1979. – 616 с.

9. Guoguang, Zh. Speed control of two-inertia system by PI/PID-control / Zh. Guoguang, J., Furusho. – IEEE International conference on power electronics and drive system. – 1999. – Vol. 1. – P. 567 – 572.

10. Thomsen, S. Speed control of torsional drive systems with backlash. / S. Thomsen, F. W. Fuchs – 13th European conference on power electronics and application. – 2009. – P. 1 – 10.

Получено 22.04.2013

#### References

1. Bortsov, Y. A. The automatic electric drive with elastic communications / Y. A. Bortsov, G. G. Sokolovskiy. – St.Peterburg : Energyatom publish, 1992 – 288 p. [in Russian].

2. Gerasymiak, R. P. Analysis and synthesis electromechanical systems of cranes / R. P. Gerasymiak, V. A. Leshchev. – Odessa : SMIL, 2008. – 192 p. [in Russian].

3. Gerasymiak, R. P. Dual-mass mechanical part electromechanical system behavior analysis / R. P. Gerasymiak, V. V. Subbotin // *Electrical and computer system* – Kyev : Technique. – 2012. – № 08 (84). – 2012. – P. 17 – 23 [in Russian].

4. Gerasymiak, R. P. Dynamics of asynchronous electric drive of crane mechanisms / R. P. Gerasymiak. – Moscow : Energyatompublish, 1986. – 168 p. [in Russian].

5. Gerasymiak, R. P. The dynamics of the elements of automated electric drive / R. P. Gerasymiak. – Kiev : TMC HE, 1989. – 100 p. [in Russian].

6. Klyuchev, V. I. Restricting the dynamic loads of the electric drive / V. I. Klyuchev. – Moscow : Energy, 1971. – 320 p. [in Russian].

7. Klyuchev, V. I. Electric drive and automation of general-purpose mechanisms. School-book / V. I. Klyuchev, V. M. Terekhov. – Moscow : Energy, 1980. – 360 p. [in Russian].

8. Chilikin, M. G. The automated electric drive theory / M. G Chilikin, V. A Leshchev. – Moscow : Energy, 1979. – 616 p. [in Russian].

9. Guoguang, Zh. Speed control of two-inertia system by PI/PID-control / Zh. Guoguang, J. Furusho. – IEEE International conference on power electronics and drive system. – 1999. – Vol. 1. – P. 567 – 572 [in English].

10. Thomsen, S. Speed control of torsional drive systems with backlash. / S. Thomsen, F. W. Fuchs. – 13-th European conference on power electronics and application. – 2009. – P. 1 – 10 [in English].



Герасимьяк  
Ростислав Павлович  
д-р техн. наук,  
профессор. кафедры  
ЭМС КУ  
Одесского нац.  
политехн. ун-та



Субботин Виктор  
Владимирович,  
студент Одесского  
нац. политехн. ун-та,  
каф. ЭМС КУ