

УДК 62.83

Л. В. Акимов, д-р техн. наук,
Д. Г. Литвиненко

О ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ И СТРУКТУРНОМ АСТАТИЗМЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВУХМАССОВОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТЬЮ И НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

Рассмотрено явление параметрического астатизма в сложной электромеханической системе регулирования скорости для электропривода переменного тока с асинхронным двигателем и векторным управлением.

Ключевые слова: параметрический астатизм, векторное управление, асинхронный электропривод.

A L. Akimov, ScD,
D. G. Litvinenko

ABOUT SELF-REACTANCE AND STRUCTURAL ASTATISM OF ELECTRIC DRIVE WITH TWOMASS MECHANICAL PART AND NONLINEAR LOADING

The phenomenon of parametric astatism is considered in the complex electromechanical speed control system for alternating current electric drive with asynchronous motor and vector control.

Keywords: self-reactance, vector control, asynchronous electric drive.

Л.В. Акімов, д-р техн. наук,
Д. Г. Литвиненко

ПРО ПАРАМЕТРИЧНИЙ І СТРУКТУРНИЙ АСТАТИЗМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ДВОХМАСОВОЮ МЕХАНИЧНОЮ ЧАСТИНОЮ І НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Розглянуто явище параметричного астатизму у складній електромеханічній системі регулювання швидкості для електроприводу змінного струму з асинхронним двигуном і векторним управлінням.

Ключові слова: параметричний астатизм, векторне керування, асинхронний електропривод.

Введение. Известно, что для автоматизации ряда производственных механизмов проектируются астатические системы регулирования скорости и положения. Это электроприводы (ЭП) реверсивных и непрерывных прокатных станков, следящие системы, системы программного управления и многие другие ЭП различных механизмов.

Основной способ придания автоматической системе астатических свойств заключается в использовании интегрирующих корректирующих устройств – регуляторов [1].

Вместе с тем в работах [2–4] для двухмассового электропривода с системой модального управления было установлено явление параметрического астатизма и найдены условия его возникновения.

Оно заключается в существовании определенного значения среднегеометрического корня ω_0 , обеспечивающего нулевое значение коэффициента n_0 полинома $N(p) = n_j p^j + n_{j-1} p^{j-1} + \dots + n_1 p + n_0$ знаменателя передаточной функции регулятора, приводящего к повышению его астатизма на единицу.

Данная статья развивает идею, первоначально изложенную в публикации [5], где явление параметрического астатизма было обосновано для системы векторного управления двухмассового асинхронного электропривода с *постоянной нагрузкой* и синтезированным полиномиальным методом регулятором скорости (РС). Желательно предварительное ознакомление с указанной литературой.

Проанализируем возможные варианты повышения порядка астатизма ν по управлению ν_{U3} и возмущению ν_{Mc} на примере системы векторного управления двухмассового асинхронного электропривода с нелинейной нагрузкой.

Постановка задач исследования. Целью исследования является обоснование параметрического и структурного астатизма в системе двухмассового векторного частотноуправляемого асинхронного электропривода с нелинейной нагрузкой.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

определение неизвестных коэффициентов m_{i-1} и n_{j-1} полиномов $M(p)$ и $N(p)$ синтезированного полиномиальным методом астатического регулятора скорости пониженного порядка, имеющего вид

$$W_{PC}(p) = \frac{M(p)(2T_{\mu}p + 1)}{K_0 N(p)p},$$

где $K_0 = (1,5Z_p K_r \psi_{r0} K_{dc}) / (J_{\Sigma} K_T)$ – коэффициент усиления объекта K_T – коэффициент датчика тока; Z_p – число пар полюсов; K_r – коэффициент связи ротора; ψ_{r0} – потокосцепление ротора; K_{dc} – коэффициент датчика скорости; T_{μ} – малая постоянная времени контура тока; $J_{\Sigma} = J_1 + J_2$ – суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции привода

обоснование параметрического астатизма в системе по результатам построения графика зависимости $n_0 = f(\omega_0)$ для различных стандартных распределений;

аргументация структурного астатизма в системе при изменении характера нагрузки.

Материалы исследования. В обозначениях [5] рассмотрим систему векторного управления асинхронным электроприводом (рис.1) с двухмассовой механической частью и нелинейной нагрузкой.

При условии постоянства потокосцепления ротора ψ_{r0} и компенсации взаимовлияния каналов асинхронного двигателя (АД), а также наличия в прямом канале структурной

схемы рис. 1 блока деления и умножения в основу синтеза регуляторов системы векторного управления можно положить однокаленную линейную структуру, аналогичную структуре электропривода постоянного тока тиристорный преобразователь – двигатель, представленную на рис. 2. Исходя из этого, все дальнейшие исследования будут в равной степени относиться к двухмассовым электроприводам постоянного и переменного тока с нелинейной нагрузкой.

Для приведенной на рис. 2 структуры, при работе ЭП на падающем участке механической характеристики нагрузки с жесткостью β_c , в [6] был синтезирован полиномиальным методом астатический регулятор скорости пониженного порядка. Используем указанные исследования ЭП постоянного тока в системе векторного управления АД. На основании [6] запишем передаточную функцию астатического РС пониженного порядка для структуры на рис. 1:

$$W_{PC}(p) = \frac{(2T_{\mu}p + 1)(m_2 p^2 + m_1 p + m_0)}{K_0 (n_2 p^2 + n_1 p + n_0)p}. \quad (1)$$

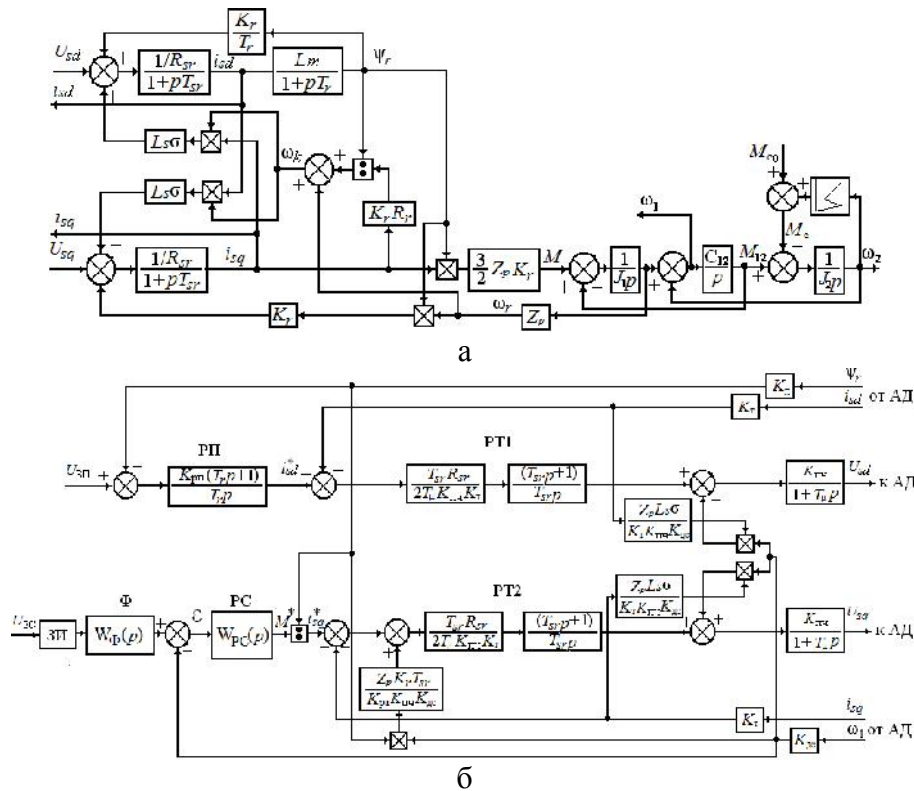


Рис. 1. Структурная схема АД с КЗ ротором во вращающейся системе координат, ориентированной по потокосцеплению ротора – (а) и система его векторного управления с компенсацией перекрестных обратных связей – (б)

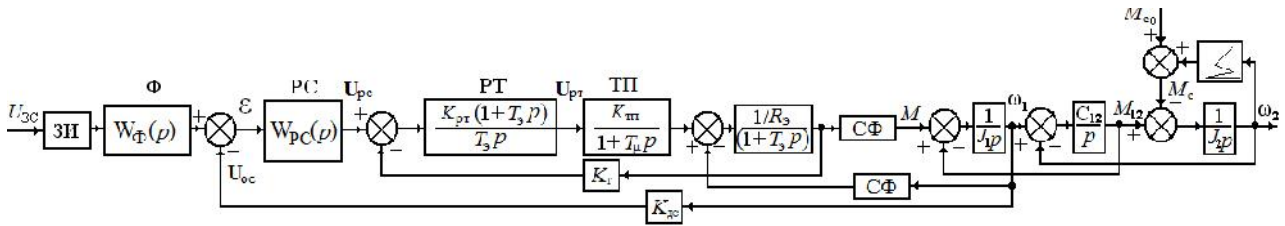


Рис. 2. Структурная схема системы подчиненного регулирования скорости неустойчивым, под влиянием отрицательного вязкого трения, двухмассового электромеханического объекта

Данная передаточная функция при введении постоянных времени T_1 , T_2^2 , T_4^2 и T_3 преобразуется к виду

$$W_{PC}(p) = \frac{K_{PC}(2T_{\mu}p + 1)(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)}{(T_4^2 p^2 + T_3 p + 1)p}, \quad (2)$$

где постоянные времени $T_1 = m_1/m_0$; $T_2^2 = m_2/m_0$; $T_4^2 = n_2/n_0$, $T_3 = n_1/n_0$, $K_{PC} = m_0/K_{\sigma}n_0$; β_c – жесткость механической характеристики нагрузки. При этом для компенсации полинома числителя (2) на входе системы необходима установка фильтра с передаточной функцией

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)}. \quad (3)$$

Выражения для расчета неизвестных коэффициентов m_{i-1} и n_{j-1} полиномов $M(p)$ и $N(p)$ астатического регулятора скорости, синтезированного полиномиальным методом в [6] представляются в виде

$$\begin{aligned} m_0 &= \alpha_0; \quad n_2 = \frac{\omega_{12}^2 \alpha_6}{T_c^* \omega_0^6}; \\ n_1 &= \frac{\omega_{12}^2}{T_c^*} \left[\frac{\alpha_5}{\omega_0^5} + \frac{\gamma n_2}{(\gamma - 1)\omega_{12}^2} \right]; \\ m_1 &= \frac{\alpha_1}{\omega_0} + \frac{|\beta_c|}{C_{12}} \alpha_0 + n_0; \quad m_2 = \frac{\alpha_2}{\omega_0^2}; \\ n_0 &= \frac{1}{(\gamma - 1)T_c^*} \left[\frac{|\beta_c| \gamma}{C_{12}} \left[\frac{\alpha_2 \gamma}{\omega_0^2} - \frac{\alpha_4 \omega_{12}^2}{\omega_0^4} + \frac{\alpha_1 |\beta_c| \gamma}{\omega_0 C_{12}} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \gamma \left(\frac{\beta_c}{C_{12}} \right)^2 - \frac{\gamma^2}{\omega_{12}^2} - \left(\frac{\gamma}{(\gamma - 1)} - \gamma \right) n_1 + T_c^* \omega_{12}^2 n_2 \right]; \\ m_{21} &= \frac{1}{\gamma} \left[\frac{\alpha_4 \omega_{12}^2}{\omega_0^4} - T_c^* n_0 + \frac{\gamma}{(\gamma - 1)} n_1 - T_c^* \omega_{12}^2 n_2 \right]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$m_{22} = \frac{C_{12}}{|\beta_c|} \left[\frac{\gamma}{\omega_{12}^2} m_1 - \frac{\gamma}{(\gamma - 1)\omega_{12}^2} n_0 + T_c^* n_1 - n_2 - \frac{\alpha_3}{\omega_0^3} \right],$$

где C_{12} – жесткость упругой механической части; $\omega_{12} = \sqrt{C_{12}\gamma/J_2}$ – резонансная частота упругих колебаний; $\gamma = (J_1 + J_2)/J_1$ – параметр, характеризующий соотношения масс.

Отметим, что необходимым условием работоспособности регулятора является положительность всех коэффициентов m_{i-1} и n_{j-1} . Кроме того для обеспечения качества переходных характеристик, отвечающих выбранному стандартному распределению, должно выполняться равенство $m_{21} = m_{22}$.

Поскольку положительность первых пяти коэффициентов (4) очевидна, построим графики зависимостей $m_{22} = f(\omega_0)$, $m_{21} = f(\omega_0)$, $n_0 = f(\omega_0)$ для различных распределений и проведем их сравнительный анализ по табл.1.

Для компьютерного моделирования системы векторного управления АД с РС (2) принято $J_1 = J_2 = 0,3875$ кг·м²; $K_r = 0,9808$; $Z_p = 4$; $T_{sr} = 0,0028$ с; $R_{sr} = 1,0657$ Ом; $T_r = 0,1088$ с; $L_s = 0,07$ Гн; $L_m = 0,0683$ Гн; $\sigma = 0,0428$. При $U_{3c} = U_{3П} = 10$ В учтем, что: $K_r = 0,1258$ В/А; $K_{\sigma} = 0,1384$ В·с; $K_{\mu} = 14,6326$ В/Вб; $K_{\mu\sigma} = 38$; $T_{\mu} = 0,0002$ с; $\psi_{r0} = 0,6834$ Вб, $\gamma = 2$, $C_{12} = 7260$ Нм/рад; $\omega_{12} = 193,6$ с⁻¹. При модуле жесткости механической характеристики АД $\beta = 28,58$ Н·м·с величина жесткости падающего участка механической характеристики нагрузки взята на уровне $\beta_c = 30$ Н·м·с, при котором $\beta_c/\beta = 1,05$.

Необходимо отметить, что для первых трех распределений табл.1 синтез астатического РС (2) не возможен, так как графики $m_{22} = f(\omega_0)$ и $m_{21} = f(\omega_0)$ проходят близко друг к другу и при этом не пересекаются ($m_{21} \neq m_{22}$). Общий для первых трех позиций табл.1 рисунок с графиками $m_{22} = f(\omega_0)$, $m_{21} = f(\omega_0)$ и $n_0 = f(\omega_0)$

1. Таблица стандартных распределений

Распределения		Графики
1	Баттерворт $p^6+3,86\omega_0p^5+7,46\omega_0^2p^4+9,13\omega_0^3p^3+7,46\omega_0^4p^2+3,86\omega_0^5p+\omega_0^6$	
2	Некратное распределение комплексных корней $p^6+3,73\omega_0p^5+8\omega_0^2p^4+10,3\omega_0^3p^3+8,56\omega_0^4p^2+4,18\omega_0^5p+\omega_0^6$	
3	ИТАЕ $p^6+3,25\omega_0p^5+6,6\omega_0^2p^4+8,6\omega_0^3p^3+7,45\omega_0^4p^2+3,95\omega_0^5p+\omega_0^6$	
4	Максимальная степень устойчивости (Бином) $p^6+6\omega_0p^5+15\omega_0^2p^4+20\omega_0^3p^3+15\omega_0^4p^2+6\omega_0^5p+\omega_0^6$	
5	Критическое затухание переходного процесса $p^6+4,5\omega_0p^5+9,75\omega_0^2p^4+12,375\omega_0^3p^3+9,75\omega_0^4p^2+4,5\omega_0^5p+\omega_0^6$	
6	Бессель $p^6+4,495\omega_0p^5+9,622\omega_0^2p^4+12,358\omega_0^3p^3+9,92\omega_0^4p^2+4,672\omega_0^5p+\omega_0^6$	
7	Псевдо-полином Бесселя $p^6+4,81\omega_0p^5+10,511\omega_0^2p^4+13,395\omega_0^3p^3+10,51\omega_0^4p^2+4,81\omega_0^5p+\omega_0^6$	

приведен для распределения ИТАЕ. Кроме того характерной особенностью этих распределений является недостижимость параметрического астатизма, который, как показано в [5], имеет место, если график $n_0 = f(\omega_0)$ пересекает ось абсцисс. Последующие четыре распределения позволяют синтезировать РС (2) с астатизмом первого порядка.

Более того, существует возможность повысить астатизм регулятора и всей системы с $v_{U3}=v_{Mc}=1$ до $v_{U3}=v_{Mc}=2$ в точке 1, где $n_0=0$ при $\omega_0=100 \text{ с}^{-1}$. Отметим, что при параметрическом астатизме полином знаменателя $N(p)$ передаточной функции (2) принимает вид $N(p)=n_2p^2+n_1p=p(n_2p+n_1)$.

При введении новой постоянной времени $T_5=n_2/n_1$ и изменении коэффициента усиления регулятора скорости до величины $K_{PC}^*=m_0/K_0n_1$ передаточная функция РС, отвечающая параметрическому астатизму в системе, представляется как

$$W_{PC}(p) = \frac{K_{PC}^*(2T_\mu p + 1)(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)}{(T_5 p + 1)p^2} \quad (5)$$

Общий рисунок с графиками $m_{22}=f(\omega_0)$, $m_{21}=f(\omega_0)$ и $n_0 = f(\omega_0)$ в табл. 1 для позиций 4–

7 приведен для распределения 5 – критическое затухание переходного процесса.

Расчет параметров РС с астатизмом второго порядка (5) выполнен полиномиальным методом с использованием распределения, отвечающего критическому затуханию переходного процесса шестого порядка $\alpha_6p^6+\alpha_5\omega_0p^5+\alpha_4\omega_0^2p^4+\alpha_3\omega_0^3p^3+\alpha_2\omega_0^4p^2+\alpha_1\omega_0^5p+\alpha_0\omega_0^6$ со значениями коэффициентов $\alpha_0=1$; $\alpha_1=4,5$; $\alpha_2=9,75$; $\alpha_3=12,375$; $\alpha_4=9,75$; $\alpha_5=4,5$; $\alpha_6=1$. Регулятор (5) имеет следующие параметры $K_{PC}^*=8862,3$; $T_5=0,0019 \text{ с}$; $T_1=0,0491 \text{ с}$; $T_2^2=0,0021 \text{ с}^2$.

Добавим, что первоначально синтезированная система имела первый порядок астатизма по управляющему и возмущающему воздействиям. Однако при условии $n_0=0$ она становится астатической второго порядка ($v_{U3}=v_{Mc}=2$). Увеличение астатизма жестко привязывается к среднегеометрическому корню $\omega_0=100 \text{ с}^{-1}$, при котором $n_0=0$.

Переходной процесс по скорости ω_2 в системе с синтезированным РС (5), настроенным в точку параметрического астатизма 1 при $\omega_0=100 \text{ с}^{-1}$ с фильтром на входе, приведен на рис. 3 и обозначен цифрой 1.

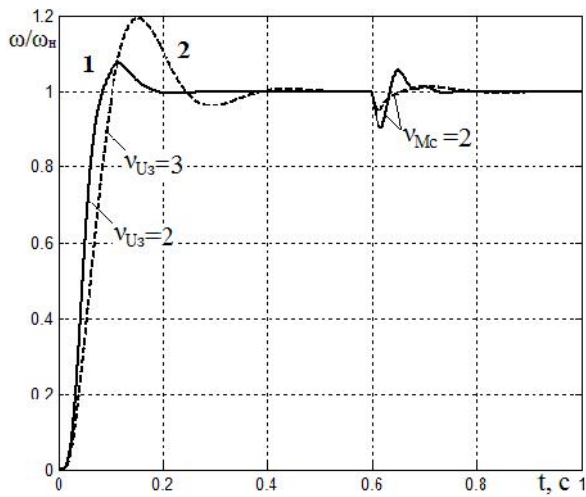


Рис. 3. Переходные характеристики и просадка скорости при набросе постоянной нагрузки в момент времени 0,6 с

Анализ характера изменения динамической ошибки от скачка номинальной нагрузки в момент времени 0,6 с, в частности ее нулевая площадь, подтверждает, что исследуемая система при обоснованной настройке является астатической системой второго порядка по возмущению.

Отметим, что при работе исследуемой системы с постоянной нагрузкой астатизм по управлению возрастет до третьего порядка, а по возмущению останется второго порядка. В этом случае имеет место структурный астатизм, так как неустойчивое неминимально-фазовое звено с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{1/\beta_c}{(T_c p - 1)}, \quad T_c = \frac{J_2}{\beta_c}$$

на выходе системы (рис. 2), в силу отсутствия положительной обратной связи по скорости ω_2 с коэффициентом β_c , становится интегрирующим звеном традиционного вида

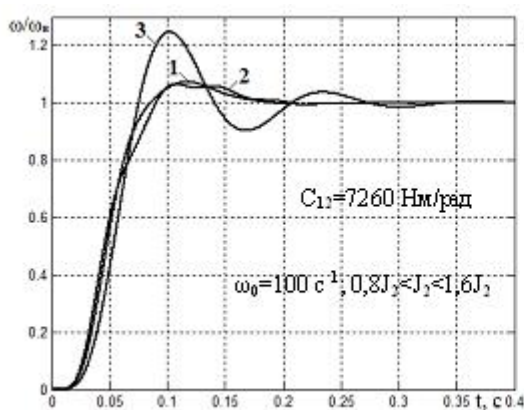
$$W(p) = \frac{1}{J_2 p}$$

Соответствующая данному случаю переходная характеристика, приведенная на рис. 3, обозначена цифрой 2. Добавим, что рост перерегулирования переходной характеристики по управлению 2 характерен для трехкратноинтегрирующих систем.

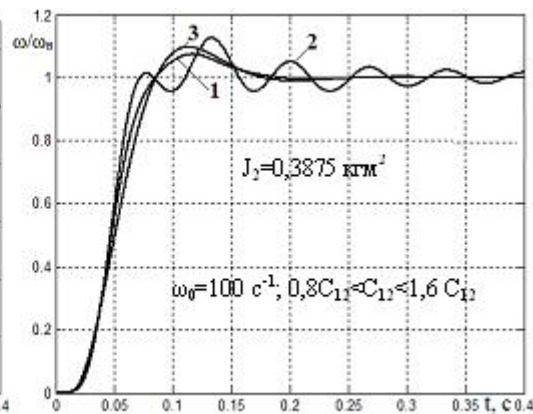
Оценка параметрической чувствительности системы с астатическим регулятором (5) при вариации параметров C_{12} и J_2 приведена на рис. 4, где представлены переходные характеристики, отвечающие: 1 – исходным значениям параметров; 2 – уменьшению параметра на 20 %; 3 – увеличению параметра на 60 %.

Выводы

Установлено, что в двухмассовых ЭП постоянного и переменного тока с постоянной и переменной в функции скорости нагрузкой имеет место параметрический астатизм при условии синтеза управляющей части системы с использованием корневых методов. В частности, это относится к системам модального управления и к системам, где синтез регуляторов скорости пониженного порядка выполнен на основе полиномиального метода. Определено, что большинство из рассмотренных стандартных распре-



а



б

Рис. 4. Переходные характеристики при изменении J_2 – (а) и C_{12} – (б) в системе с астатическим РС (5)

делений позволяют получить параметрический астатизм в системе. Использование явления параметрического астатизма способствует существенному упрощению структуры регулятора и обеспечивает возможность существенного отклонения таких параметров ЭП как жесткость упругой связи C_{12} и момент инерции второй массы J_2 .

Список использованной литературы

1. Бессекерский В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бессекерский, Е. П. Попов. – 3-е изд., испр. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
2. Борцов Ю. А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт – Петербург. отд-ние, 1992. 288 с.
3. Толочко О. І. Аналіз та синтез електромеханічних систем зі спостерігачами стану/ О. І. Толочко. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Донецьк: Норд – Прес, 2004. – 298 с.
4. Акимов Л. В. Об астатизме по возмущению в электроприводах с модальными регуляторами / Л. В. Акимов, А. В. Клепиков. //Автоматизированные электромеханические системы с модальными регуляторами и наблюдателями состояния. Под ред. В. Б. Клепикова и Л. В. Акимова. – Харьков: ХГПУ, 1997. – 90 с.
5. Акимов Л. В. Исследование параметрического астатизма при синтезе регуляторов сложных электромеханических систем полиномиальным методом / Л. В. Акимов, Д. Г. Литвиненко //Науч.-технич.журнал «Электротехнические и компьютерные системы» № 04(80). – К.: Техника. – 2011. – С. 7–14.
6. Акимов Л. В. Динамика двухмассовых систем с нетрадиционными регуляторами скорости и наблюдателями состояния: Монография / Л. В. Акимов, В. И. Колотило, В. С. Марков. – Харьков: ХГПУ, 2000. – 93 с.

Получено 05.06.2012

References

1. Bessekerskiy V.A. Theory of automatic control systems / V. A. Bessekerskiy, Y. P. Popov. – 3-d publ., corr. – Moscow: Science, 1975. – 768 p. [in Russian].
2. Borcov Y. A. Automated electric drive with elastic feedback / Y. A. Borcov, G. G. Sokolovskiy – 2-d. publ. – Spb.: Energoatompubl. Saint-Petersburg. department, 1992. – 288 p. [in Russian].
3. Tolochko O. I. Analysis and synthesis of electromechanical systems with state observer: textbook for university students. – Donetsk: Nord – Pres, 2004. – 298 p. [in Ukrainian].
4. Akimov L. V. About perturbation astatism in electric drives with modal regulators / L. V. Akimov, A. V. Klepikov. – Collection Automated electromechanical systems with modal regulators and state observers. Collection of science articles under the edition of V. B. Klepikov and L. V. Akimov. – Kharkov: KSPU, 1997. – 90 p. [in Russian].
5. Akimov L. V. Searching of parametric astatism at the regulators synthesis of complex electromechanical systems by polynomial method / L. V. Akimov, D. G. Litvinenko. – Sci-Tech. magazine Electrical and computer systems. – № 04(80). – Kyiv: Technique. – 2011. – P.7–14 [in Russian].
6. Akimov L. V. Dynamics of two-mass system with nontraditional regulators and state observers: Monograph / L. V. Akimov, V. I. Kolotilo, V. S. Markov. – Kharkov: KSPU, 2000. – 93 p. [in Russian].



Акимов
Леонид Владимирович,
д.т.н., проф. каф. автоматизированных электромеханических систем НТУ «ХПИ»,
т. (057) 70-50-356,



Литвиненко
Дмитрий Григорьевич,
аспирант каф. автоматизированных электромеханических систем НТУ «ХПИ»,
т. (057) 70-76-445,
e-mail: dilitne@mail.ru