

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

**Аннотация.** 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.

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

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

**Abstract.** 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 МЕХАНІЧНОЮ ЧАСТИНОЮ І НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

**Анотація.** 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  $\omega_0$ , 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 предварительно ознакомиться с указанной литературой.

Проанализируем возможные варианты повышения порядка астатизма  $\nu$  по управлению  $v_{U3}$  и возмущению  $v_{Mc}$  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  $K_0 = (1,5Z_p K_r \psi_{r0} K_{дс}) / (J_{\Sigma} K_T)$  – коэффициент усиления объекта  $K_T$  – коэффициент датчика тока;  $Z_p$  – число пар полюсов;  $K_r$  – коэффициент связи ротора;  $\psi_{r0}$  – потокосцепление ротора;  $K_{дс}$  – коэффициент датчика скорости;  $T_{\mu}$  – 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  $\psi_{r0}$  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  $\beta_c$ , 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:

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

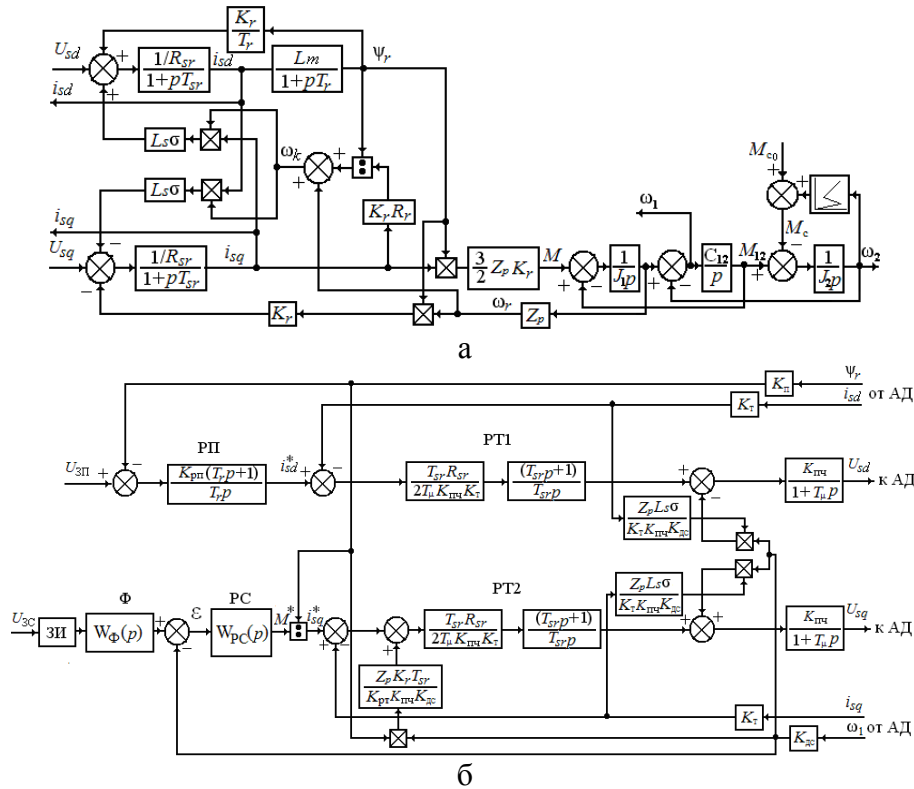


Рис. 1. Структурная схема АД с К3 ротором во вращающейся системе координат, ориентированной по потокосцеплению ротора – (а) и система его векторного управления с компенсацией перекрестных обратных связей – (б)



1. Таблица стандартных распределений

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

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  $\omega_0 = 100 \text{ c}^{-1}$ . Отметим, что при параметрическом астатизме полином знаменателя  $N(p)$  передаточной функции (2) принимает вид  $N(p) = n_2 p^2 + n_1 p = p(n_2 p + n_1)$ .

При введении новой постоянной времени  $T_5 = n_2 / n_1$  и изменении коэффициента усиления регулятора скорости до величины  $K_{PC}^* = m_0 / K_0 n_1$  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  $\alpha_6 p^6 + \alpha_5 \omega_0 p^5 + \alpha_4 \omega_0^2 p^4 + \alpha_3 \omega_0^3 p^3 + \alpha_2 \omega_0^4 p^2 + \alpha_1 \omega_0^5 p + \alpha_0 \omega_0^6$  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  $\omega_0 = 100 \text{ c}^{-1}$ , при котором  $n_0 = 0$ .

Переходной процесс по скорости  $\omega_2$  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.

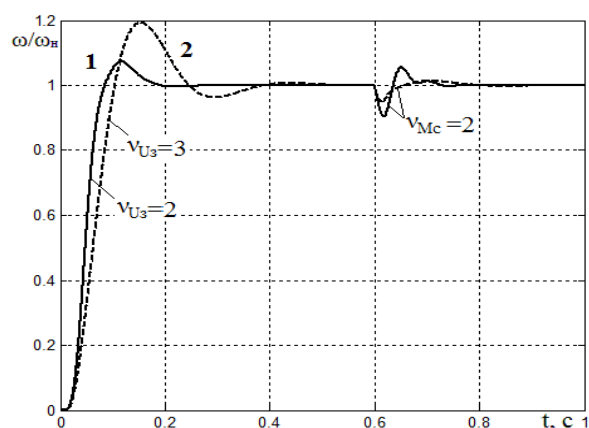


Рис. 3. Переходные характеристики и просадка скорости при набросе постоянной нагрузки в момент времени 0,6 с

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  $\omega_2$  с коэффициентом  $\beta_c$ , 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-

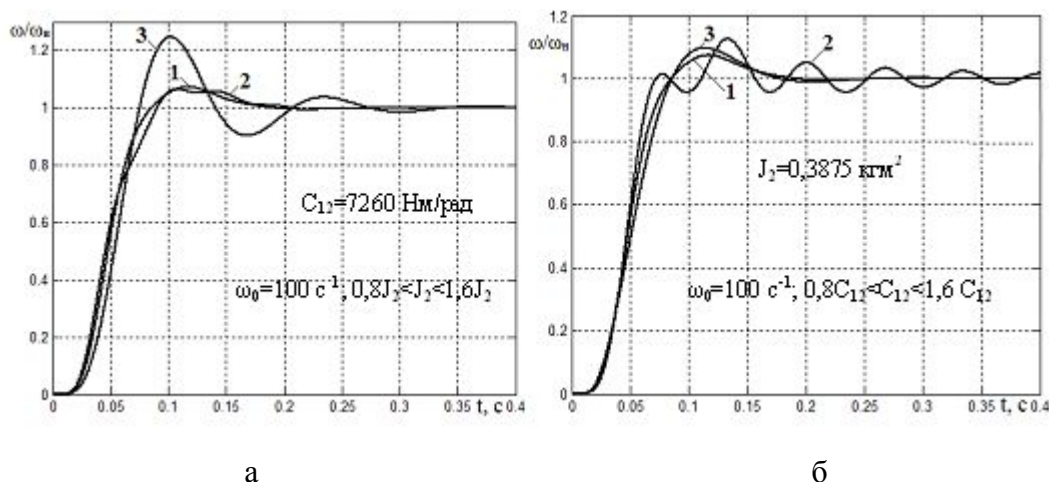


Рис. 4. Переходные характеристики при изменении  $J_2$  – (а) и  $C_{12}$  – (б) в системе с астатическим РС (5)

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 спостерегачами 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

пов. – 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. – Donets'k: 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

#### References

1. Bessekerskiy V.A. Theory of automatic control systems / V. A. Bessekerskiy, Y. P. Po-