

УДК 62.83

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АСТАТИЗМА ПРИ СИНТЕЗЕ РЕГУЛЯТОРОВ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОЛИНОМИАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Аннотация. Рассмотрено явление параметрического астатизма в сложной электромеханической системе регулирования скорости для электропривода переменного тока с асинхронным двигателем и векторным управлением. Предложен новый подход в решении задач синтеза полиномиальным методом астатических систем управления.

Ключевые слова: параметрический астатизм, электропривод переменного тока, векторное управление.

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

SEARCHING OF PARAMETRIC ASTATISM AT THE REGULATORS SYNTHESIS OF COMPLEX ELECTROMECHANICAL SYSTEMS BY POLYNOMIAL METHOD

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. A new approach to solving problems in the polynomial method synthesis of astatic control systems is proposed.

Keywords: parametric astatism, alternating current electric drive, vector control.

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО АСТАТИЗМУ ПРИ СИНТЕЗІ РЕГУЛЯТОРІВ СКЛАДНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ПОЛІНОМІАЛЬНИМ МЕТОДОМ

Анотація. Розглянуто явище параметричного астатизму у складній електромеханічній системі регулювання швидкості для електроприводу змінного струму з асинхронним двигуном і векторним управлінням. Запропоновано новий підхід до розв'язання задач синтезу поліноміальним методом астатичних систем управління.

Ключові слова: параметричний астатизм, електропривод змінного струму, векторне керування.

Введение. Одной из задач, решаемых при создании систем автоматического управления электромеханическими объектами, является обеспечение заданных показателей качества. При этом немаловажным является синтез регулятора с наиболее простой для реализации передаточной функцией. Отметим, что порядок синтезируемого регулятора зависит как от сложности объекта управления, так и от придаваемых системе желаемых астатических свойств. Чем выше порядок астатизма разрабатываемой системы, тем сложнее передаточная функция ее регулятора.

Использование метода полиномиальных уравнений для создания систем управления сложными электромеханическими объектами показало высокую эффективность. При этом методика непосредственного синтеза регулятора пониженного порядка, обеспечивающего системе заданный астатизм, позволяет получить систему с отсутствием ошибок по

управляющему и возмущающему воздействию и упрощенную передаточную функцию регулятора [1, 3].

В исследованиях [2] при синтезе полиномиальным методом системы управления асинхронным электроприводом (ЭП) с двухмассовой механической частью было установлено явление возникновения параметрического астатизма, которое открывает возможность повышения астатизма системы без изменения порядка регулятора. Основываясь на полученных в [3] результатах, можно предложить несколько иной, отличный от существующего, подход для синтеза астатических регуляторов полиномиальным методом.

Таким образом, исследования параметрического астатизма при синтезе систем автоматического управления полиномиальным методом будут способствовать разработке методики создания наиболее простых астатических регуляторов для сложных систем, что является актуальным и представляет теоретический и практический интерес.

© Акимов Л.В., Литвиненко Д.Г., 2011

Постановка задач исследования.

Целью исследования является разработка методики синтеза астатических регуляторов методом полиномиальных уравнений с использованием явления параметрического астатизма.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

синтез полиномиальным методом *статического* регулятора скорости (РС) векторно-управляемого асинхронного ЭП;

использование явления параметрического астатизма для получения астатического регулятора, придающего системе астатические свойства по возмущающему воздействию;

проведение сравнительного анализа переходных процессов в астатических системах, синтезированных полиномиальным методом с использованием параметрического астатизма и методами систем подчиненного регулирования (СПР).

Материалы исследования. Рассмотрим систему векторного управления асинхронным электроприводом (рис.1) с двухмассовой механической частью, которая исследовалась в [2], где указаны все условные обозначения. Передаточные функции синтезированного полиномиальным методом в [2] статического РС пониженного порядка и фильтра Ф на входе системы имеют вид

$$W_{PC}(p) = \frac{Q_{\kappa+}(p)(m_1 p + m_0)}{K_0 P_{\kappa+}(p)(n_2 p^2 + n_1 p + n_0)},$$

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{(m_1 p + m_0)}, \quad (1)$$

где $P_{\kappa+}(p)$, $Q_{\kappa+}(p)$ – полиномы объекта управления, имеющие только левые нули и полюсы (нули и полюсы с отрицательной вещественной частью), компенсируемые при помощи регулятора; K_0 – коэффициент усиления объекта; найденные в результате синтеза коэффициенты, n_0, n_1, n_2, m_0 и m_1 имеют следующие значения:

$$n_0 = \frac{1}{\gamma - 1} \left(\frac{\alpha_1 \gamma}{\omega_0} - \frac{\alpha_3 \omega_{12}^2}{\omega_0^3} + \frac{\omega_{12}^4}{\omega_0^5} \right); m_1 = \frac{\alpha_1}{\omega_0} - n_0;$$

$$n_2 = \frac{\alpha_5 \omega_{12}^2}{\omega_0^5}; n_1 = \frac{\alpha_4 \omega_{12}^2}{\omega_0^4}; m_0 = \alpha_0, \quad (2)$$

в которых $\alpha_0; \alpha_1; \alpha_2; \alpha_3; \alpha_4; \alpha_5$ – коэффициен-

ты выбранного стандартного распределения; $\gamma = (J_1 + J_2)/J_1$ – параметр, характеризующий соотношения масс; $\omega_{12} = \sqrt{C_{12} \gamma / J_2}$ – резонансная частота упругих колебаний; C_{12} – жесткость упругой механической части; J_1 и J_2 – моменты инерции первой и второй масс; ω_0 – определяемая в результате синтеза величина среднегеометрического корня системы.

Для проведения исследования по результатам [2] примем: $\omega_0 = 19,36 \text{ с}^{-1}$; $J_1 = J_2 = 0,3875 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $\gamma = 2$, $C_{12} = 72,6$; $\omega_{12} = 19,36 \text{ с}^{-1}$; для распределения Баттерворта пятого порядка $\alpha_5 p^5 + \alpha_4 \omega_0 p^4 + \alpha_3 \omega_0^2 p^3 + \alpha_2 \omega_0^3 p^2 + \alpha_1 \omega_0^4 p + \alpha_0 \omega_0^5$ имеем значения коэффициентов $\alpha_0 = 1$; $\alpha_1 = 3,24$; $\alpha_2 = 5,24$; $\alpha_3 = 5,24$; $\alpha_4 = 3,24$; $\alpha_5 = 1$. Построим графики изменения коэффициентов n_2, n_1, n_0 и m_1 в функции ω_0 . Необходимость построения приведенных на рис.2 графиков связана не только с определением нулевых значений коэффициента n_0 , но и с проверкой при его текущих значениях положительности коэффициентов n_2, n_1 , и m_1 .

Рассматривая полученные результаты, видим, что коэффициент n_0 дважды становится равным нулю: при $\omega_0 = 13,69 \text{ с}^{-1}$ и при $\omega_0 = 10,75 \text{ с}^{-1}$. При этом коэффициенты n_2, n_1 , и m_1 являются положительными величинами.

Отметим, что значения среднегеометрического корня ω_0 , обращающие в нуль n_0 , могут быть получены аналитически исходя из условия

$$\frac{\alpha_1 \gamma}{\omega_0} = \frac{\alpha_3 \omega_{12}^2}{\omega_0^3} - \frac{\omega_{12}^4}{\omega_0^5}. \quad (3)$$

Примем $\omega_0^2 = x$, тогда, решая квадратное уравнение $\alpha_1 \gamma x^2 - \alpha_3 \omega_{12}^2 x + \omega_{12}^4 = 0$, получим:

$$x_{1,2} = \frac{\alpha_3 \omega_{12}^2}{2 \alpha_1 \gamma} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4 \alpha_1 \gamma}{\alpha_3^2}} \right]. \quad (4)$$

Из условия положительности подкоренного выражения имеем неравенство

$$\frac{4 \alpha_1 \gamma}{\alpha_3^2} \leq 1, \quad (5)$$

по которому проверяется существование корней ω_0 , а соответственно и параметрического астатизма в системе. Отметим зависимость наличия параметрического астатизма от коэффициентов стандартного распределения α_1, α_3 и параметра γ . Следовательно, условие (5) может быть обеспечено либо выбором подходящего распределения, либо за счет

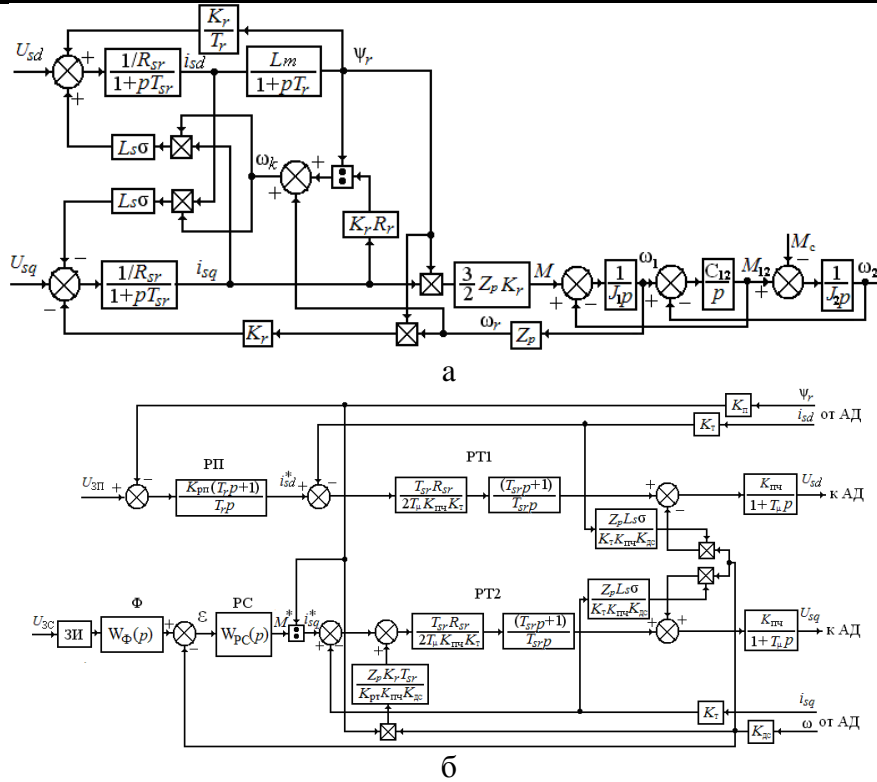


Рис.1. Структурная схема АД с КЗ ротором во вращающейся системе координат, ориентированной по потокосцеплению ротора (а) и система его векторного управления с компенсацией перекрестных обратных связей (б)

изменения параметра соотношения масс γ . После подстановки в (4) исходных данных получим два положительных корня $\omega_0=13,69 \text{ с}^{-1}$ и $\omega_0=10,75 \text{ с}^{-1}$, а также выполнение неравенства (5), $0,944 < 1$.

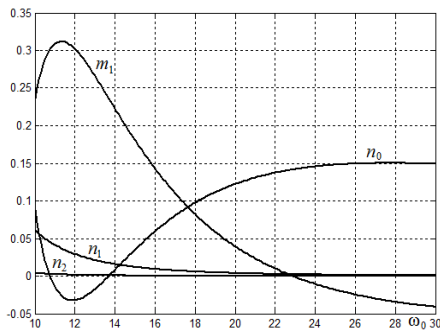


Рис.2. Зависимости для коэффициентов n_2, n_1, n_0 и m_1 от величины ω_0

В достижимом случае, когда $n_0=0$, выражение (1) принимает вид

$$W_{PC}(p) = \frac{Q_{\kappa+}(p)(m_1 p + m_0)}{K_0 P_{\kappa+}(p)(n_2 p + n_1) p} \quad (6)$$

Таким образом, статический регулятор (1) становится астатическим (6). При этом система приобретает соответствующие астатические свойства. На рис. 3,а показаны ха-

рактеристики процессов, отвечающих исходному статическому регулятору. Переходные процессы, подтверждающие появление астатизма в системе при набросе нагрузки представлены на рис. 3, б, в.

Из двух рассматриваемых случаев параметрического астатизма, отвечающих $\omega_0 = 13,69 \text{ с}^{-1}$ и $\omega_0 = 10,75 \text{ с}^{-1}$, более предпочтительным является вариант на рис. 3, б, так как он обладает большим быстродействием и меньшей колебательностью по сравнению с вариантом на рис.3, в.

Согласно методам СПР, введем интегральную часть с эквивалентной постоянной времени $T_0=1/\omega_0$ в статический РС (1). Получим передаточные функции астатического РС и необходимого фильтра на входе системы:

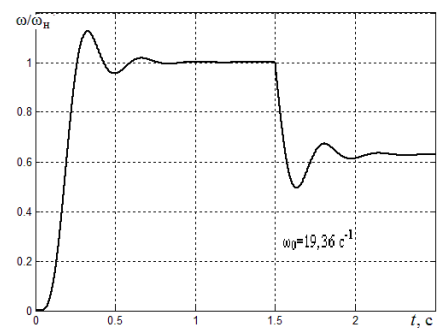
$$W_{PC}(p) = \frac{Q_{\kappa+}(p)(m_1 p + m_0)}{K_0 P_{\kappa+}(p)(n_2 p^2 + n_1 p + n_0)} \times \frac{(4T_0 p + 1)}{4T_0 p};$$

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{(m_1 p + m_0) \times (4T_0 p + 1)} \quad (7)$$

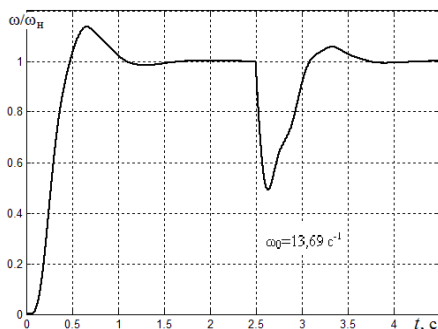
В результате компьютерного моделирования системы векторного управления асинхронным ЭП рис.1 с астатическим РС (7) по-

лучен характер изменения скорости, показанный на рис. 4.

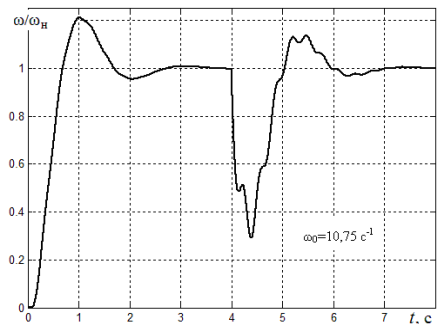
Рис.4. График переходного процесса в системе с астатическим РС (7)



а

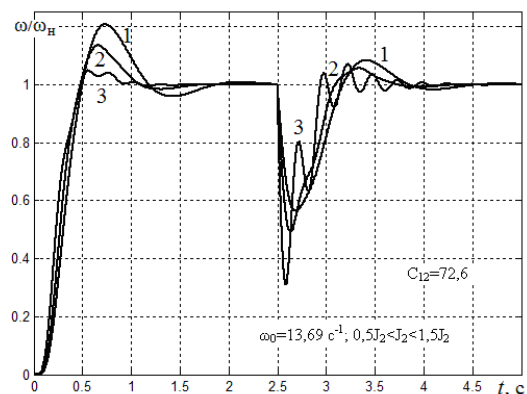
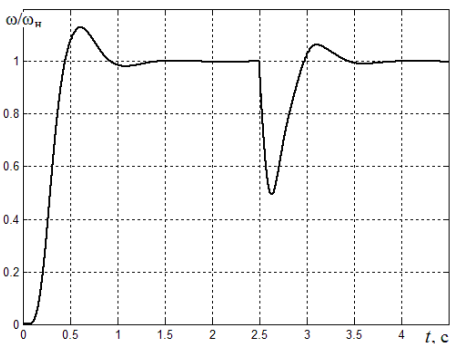


б

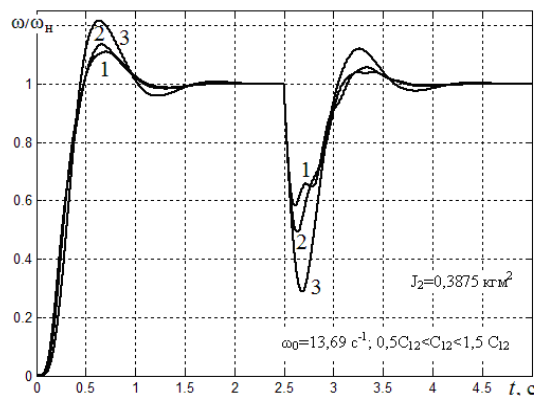


в

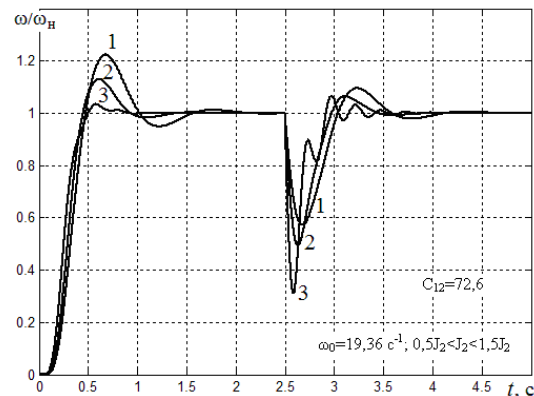
Рис.3. Переходные характеристики в системе управления с синтезированным полиномиальным методом статическим регулятором (1) и полученным астатическим регулятором (б) при различных значениях ω_0



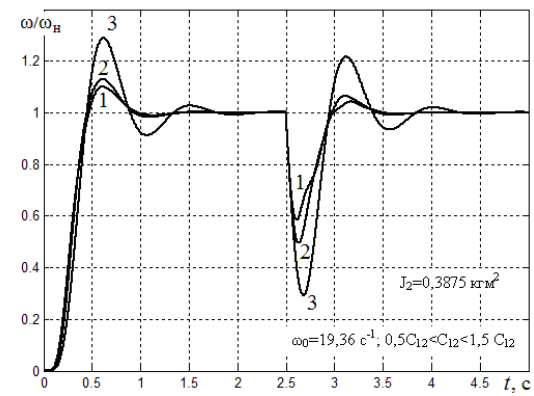
а



б



в



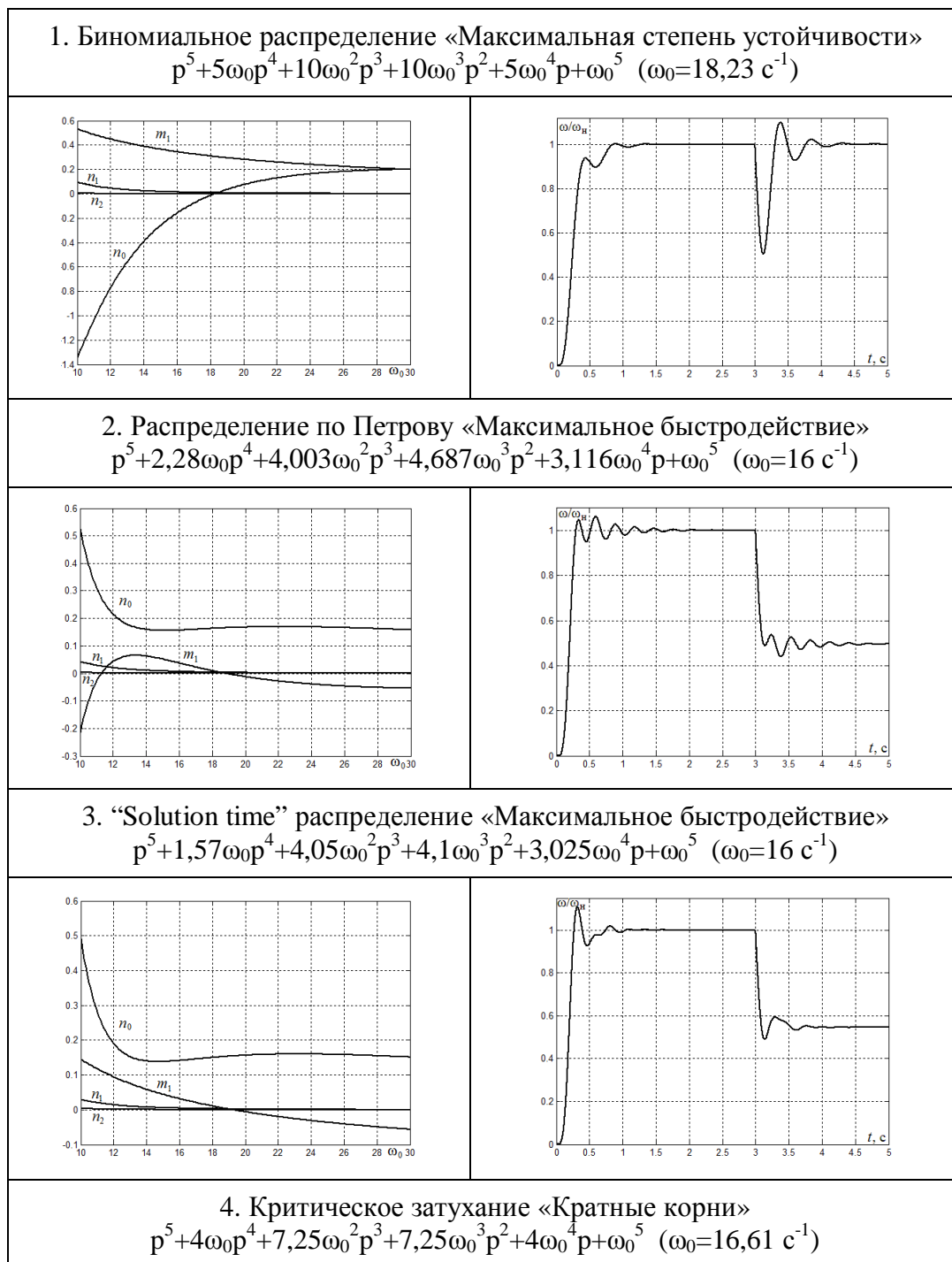
г

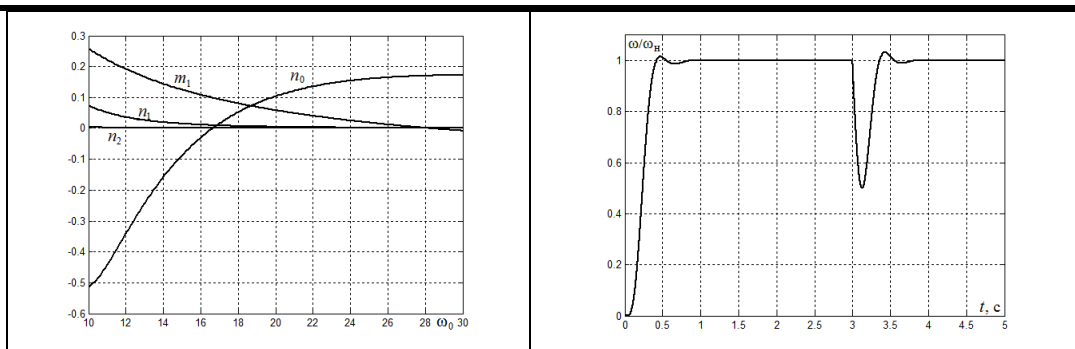
Рис.5. Переходные процессы при изменении J_2 и

C_{12} в системе с астатическими РС:

а, б – РС (6) ; в, г – РС (7)

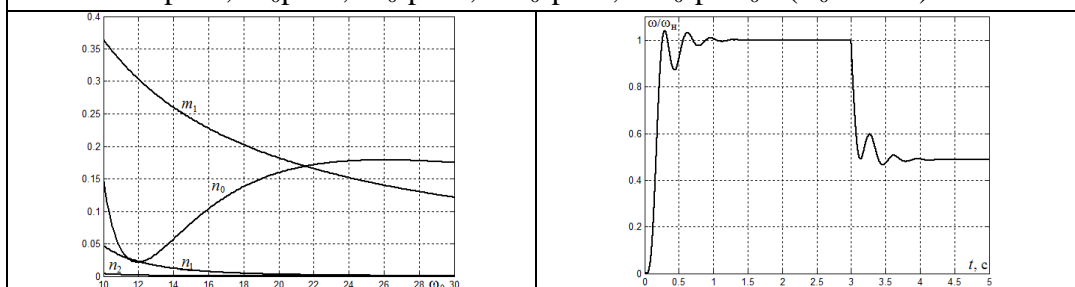
1. Кривые коэффициентов n_2, n_1, n_0, m_1 различных распределений в функции ω_0 и соответствующие переходные процессы



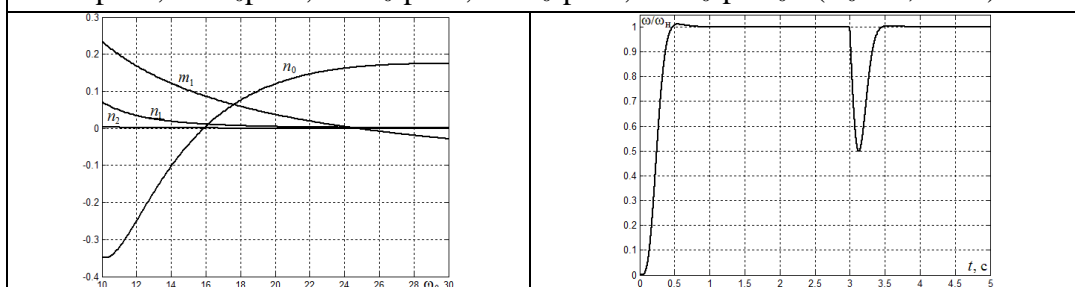


Продолжение табл. 1

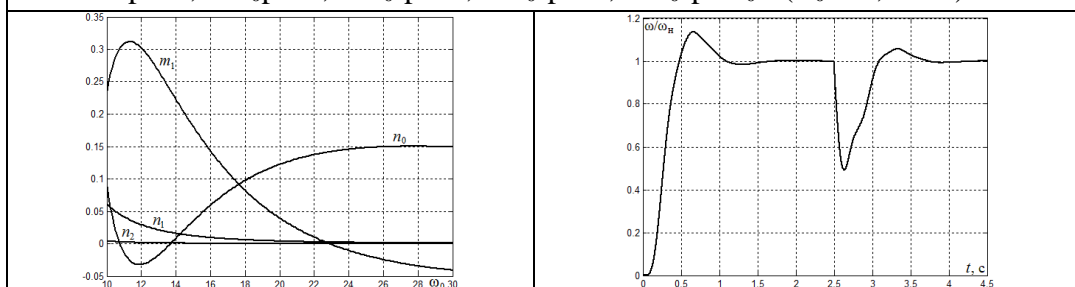
5. Максимальное быстродействие
 $p^5 + 2,5\omega_0 p^4 + 5,3\omega_0^2 p^3 + 5,46\omega_0^3 p^2 + 3,64\omega_0^4 p + \omega_0^5$ ($\omega_0 = 20 \text{ c}^{-1}$)



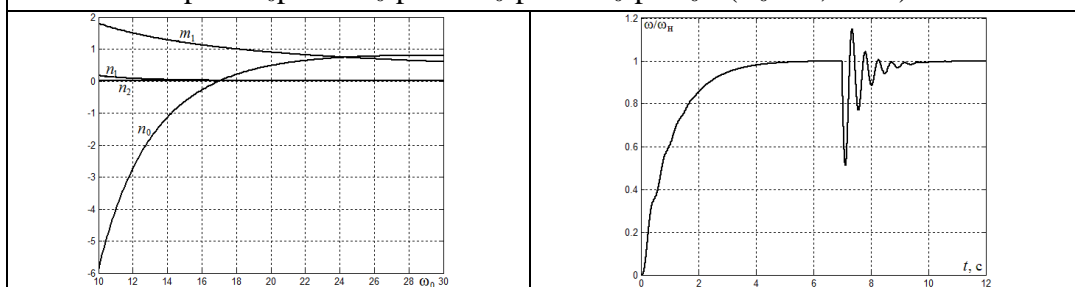
6. Бессель ω_0 – полоса
 $p^5 + 3,811\omega_0 p^4 + 6,777\omega_0^2 p^3 + 6,886\omega_0^3 p^2 + 3,936\omega_0^4 p + \omega_0^5$ ($\omega_0 = 15,86 \text{ c}^{-1}$)

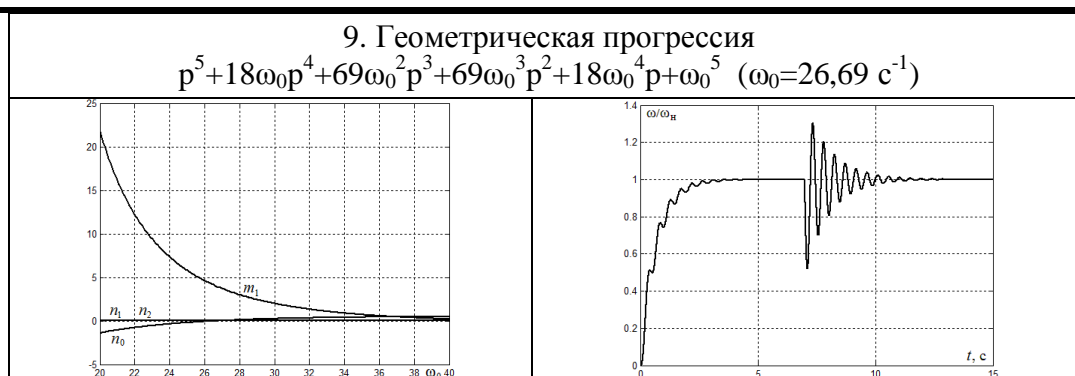


7. Баттерворт «Идеальный фильтр»
 $p^5 + 3,24\omega_0 p^4 + 5,24\omega_0^2 p^3 + 5,24\omega_0^3 p^2 + 3,24\omega_0^4 p + \omega_0^5$ ($\omega_0 = 13,69 \text{ c}^{-1}$)



8. Арифметическая прогрессия
 $p^5 + 9\omega_0 p^4 + 29\omega_0^2 p^3 + 38\omega_0^3 p^2 + 18\omega_0^4 p + \omega_0^5$ ($\omega_0 = 16,98 \text{ c}^{-1}$)





Сравнительный анализ рис. 3,б и рис.4 показывает практическую идентичность переходных процессов в системе со статическим РС при настройке его в точку параметрического астатизма (6) и с астатическим РС (7). Отметим также одинаковую величину и время восстановления просядки скорости от скачка нагрузки. При этом необходимо подчеркнуть, что астатический РС (7) имеет более сложную передаточную функцию, чем РС (6). Аналогичная ситуация и с соответствующими передаточными функциями фильтров на входе системы.

Оценим адекватность переходных процессов в системе с астатическими регуляторами (6) и (7) при вариации параметров C_{12} и J_2 . На рис. 5 представлены графики переходных процессов, которые отвечают: 1 – увеличению параметра на 50 %; 2 – сходным значениям параметров; 3 – уменьшению параметра на 50 %.

Как видно на рис. 5, системы с РС (6) и (7) обладают одинаковой чувствительностью к изменению параметров C_{12} и J_2 , что еще раз подтверждает сопоставимость их динамических характеристик.

Проверим возможность получения параметрического астатизма в исходной рассматриваемой системе при использовании различных стандартных распределений. При этом обратим внимание не только на обеспечиваемый астатизм по возмущению, но и на качество получаемых при этом переходных процессов. Ниже приведена табл.1, где для различных распределений показаны кривые коэффициентов n_2 , n_1 , n_0 , m_1 в функции ω_0 и соответствующие переходные процессы.

По результатам, представленным в табл.1, видно, что для распределений 2, 3 и 5 параметрический астатизм не достигается.

Наилучший характер переходных процессов соответствует распределениям 4 и 6. При этом наибольшее быстродействие в восстановлении скорости и ее минимальная просядка обеспечивается распределением 4.

Основываясь на полученных результатах исследований, которые подтверждают возможность достижения в системе со статическим РС динамических характеристик астатической системы, можно предложить новый подход в решении задач синтеза упрощенных структур астатических регуляторов полиномиальным методом.

При необходимости создания астатической системы необходимо сначала синтезировать статический РС пониженного порядка, а затем выбором значения ω_0 придавать системе желаемые астатические свойства. Этим будут обеспечены заданные показатели качества переходного процесса с существенным упрощением передаточной функции, а следовательно, и реализуемости регулятора.

Выводы

1. Определено условие возникновения параметрического астатизма в системе векторного управления асинхронным электроприводом с двухмассовой механической частью.

2. Установлена возможность достаточно простой модернизации синтезированного статического РС в астатический путем вырождения коэффициента n_0 , что придает системе астатические свойства.

3. Проведен сравнительный анализ переходных процессов в астатических системах, синтезированных полиномиальным методом с использованием параметрического астатизма и методами СПР.

4. Показано получение параметрического астатизма в шести случаях из девяти про-

стым выбором одного из стандартных распределений.

5. Предложен новый подход в решении задач синтеза полиномиальным методом астатических систем управления.

Список использованной литературы

1. 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. – 93с.

2. Акимов Л.В. Улучшение динамики астатической системы векторного управления двухмассового асинхронного электропривода с постоянной нагрузкой / Л.В. Акимов, Д.Г. Литвиненко, А.А. Вакуленко // Научно-технический журнал «Электротехнические и компьютерные системы» № 03(79). – К.: Техника. – 2011. – С.92– 97.

3. Синтез упрощенных структур двухмассовых электроприводов с нелинейной нагрузкой / Акимов Л.В., Долбня В.Т., Клепиков В.Б., Пирожок А.В. // Под общей редакцией В.Б.Клепикова. – Харьков: НТУ «ХПИ», Запорожье: ЗНТУ, 2002. – 160 с.

Получено 10.11.2011

References

1. Akimov L.V, Kolotilo V.I., Markov V.S. Dynamics of two-mass systems with unconventional speed regulators and observers states: monograph – Kharkov: KSPU, 2000. – 93 p. [in Russian].

2. Akimov L.V., Litvinenko D.G., Vakulenko A.A. Improving the dynamics of the astatic system of two-mass vector control of asynchronous electric drive with a constant load / Sci-Tech. magazine "Electrical and computer systems» № 03 (79). – Kyiv: Technique. – 2011. – P.92–97[in Russian].

3. Akimov L.V., Dolbnya V.T., Klepikov V.B., Patty A.V. Synthesis of simplified structures of the two-mass actuators with nonlinear load / Edited by VB Klepikova. – Kharkov: NTU"KPI". – Kyiv: ZNTU: 2002, – 160 p. [in Russian].



Акимов
Леонид Владимирович,
д.т.н., проф. каф. «Автоматизированные эл. механич. системы» НТУ «ХПИ»,
т. (057) 70-50-356



Литвиненко Дмитрий Григорьевич, аспирант каф. «Автоматизированные эл. механические системы» НТУ «ХПИ»,
т. (057) 70-76-445,
e-mail: dilitne@mail.ru