

**УДК 62-83**

***Л.В. АКИМОВ***, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков  
***Д.Г. ЛИТВИНЕНКО***, аспірант, НТУ "ХПИ", Харьков

**ОПТИМИЗАЦИЯ АСТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВУХМАССОВОГО  
АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ**

The creation technique of astatic speed regulation system for the two-mass asynchronous electric drive of an alternating current with vector management is considered. The complex approach to a problem of optimization frequency-regulated on the basis of the independent inverter of pressure electric drives with a two-mass mechanical part and the nonlinear moment of resistance is realized.

Рассмотрена методика создания астатической системы регулирования скорости для двухмассового асинхронного электропривода переменного тока с векторным управлением. Реализован комплексный подход к проблеме оптимизации частотно-регулируемых на базе автономного инвертора напряжения электроприводов с двухмассовой механической частью и нелинейным моментом сопротивления.

Розглянуто методика створення астатичної системи регулювання швидкості для двохмасового асинхронного електроприводу змінного струму з векторним управлінням. Реалізований комплексний підхід до проблеми оптимізації частотно-регульованих на базі автономного інвертора напруги електроприводів з двохмасовою механічною частиною і нелінійним моментом опору.

**Введение.** В исследованиях [1, 2] был предложен и реализован комплексный подход к улучшению динамических характеристик электроприводов, отличающихся сложной механической частью. При этом положительные результаты были получены для астатических систем одномассового электропривода (ЭП) с нелинейной нагрузкой [1] и двухмассового – при  $M_c = \text{const}$  [2]. Поэтапное применение методов полиномиальных уравнений и диаграмм качества управления (ДКУ) позволяет не только синтезировать, но и оптимизировать по критерию максимальной добротности и запаса устойчивости (МДУ) систему даже с исходно неустойчивым объектом управления.

Подтвердим эффективность комплексного подхода, обусловленного совместным применением методов полиномиальных уравнений и



$$W_{PC}(p) = \frac{Q_{\kappa+}(p)(m_1 p + m_0)}{K_O P_{\kappa+}(p)(n_2 p^2 + n_1 p + n_0)}; \quad W_{\Phi}(p) = \frac{1}{(T_1 p + 1)}, \quad (1)$$

где  $Q_{\kappa+}(p) = 2T_{\mu} p + 1$ ;  $P_{\kappa+}(p) = 1$ ;  $K_O = (1,5 Z_p K_r \Psi_{r0} K_{ДС}) / (\beta_c K_T)$ ;  $K_T$  – 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;  $J$  – приведенный к валу двигателя момент инерции ЭП;  $m_{i-1}$  и  $n_{j-1}$  – неизвестные коэффициенты пониженной на единицу степени полиномов  $M(p)$ ,  $N(p)$  числителя и знаменателя синтезируемого регулятора;  $T_1 = m_1/m_0$  – постоянная времени.

Используя методы СПР и рекомендации, указанные в [4], а также РС (1), получим передаточную функцию астатического РС и необходимого фильтра на входе системы:

$$W_{ДН}(p) = \frac{K_{ДН}(2T_{\mu} p + 1)(T_1 p + 1)}{(T_3^2 p^2 + T_2 p + 1)} \times \frac{(\gamma^* T_0 p + 1)}{\gamma^* T_0 p}; \quad (2)$$

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{(T_1 p + 1)(\gamma^* T_0 p + 1)},$$

где  $K_{PC} = m_0/K_O n_0 = m_0 K_T \beta_c / 1,5 Z_p K_r \Psi_{r0} K_{ДС} n_0$ ;  $T_3^2 = n_2/n_0$ ,  $T_2 = n_1/n_0$ ,  $T_0 = 1/\omega_0$  – эквивалентная малая постоянная времени системы, определяющаяся величиной среднегеометрического корня  $\omega_0$ ;  $4 \leq \gamma^* \leq \infty$  – параметр настройки.

Адаптируем ранее проведенные исследования по непосредственному синтезу астатического РС пониженного порядка для ЭП постоянного тока [3] к системе векторного управления АД рис.1. Запишем передаточную функцию астатического РС пониженного порядка и необходимого фильтра на входе системы:

$$W_{PC}(p) = \frac{K_{PC}(2T_{\mu} p + 1)(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)}{(T_4^2 p^2 + T_3 p + 1)p}; \quad (3)$$

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

где постоянные времени  $T_1 = m_1/m_0$ ;  $T_2^2 = m_2/m_0$ ;  $T_4^2 = n_2/n_0$ ,  $T_3 = n_1/n_0$ .

Для компьютерного моделирования системы векторного управления с РС (2) и (3) принято  $J_1 = J_2 = 0,3875$  кгм<sup>2</sup>;  $K_r = 0,9808$ ;  $Z_p = 4$ ;  $T_{sr} = 0,0028$  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:  $K_T = 0,1258$  В/А;  $K_{ДС} = 0,1384$  Вс;  $K_{П} = 14,6326$  В/Вб;  $K_{Пч} = 38$ ;  $T_{\mu} = 0,0002$  с;  $\Psi_{r0} = 0,6834$  Вб. При модуле жест-

кости механической характеристики АД  $\beta=28,58 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$  величина жесткости падающего участка механической характеристики нагрузки взята на уровне  $\beta_c=-30 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ , при котором  $\beta_c/\beta=-1,05$ .

В исследованиях принято, что нелинейная нагрузка ЭП имеет следующий характер

$$M_c = \begin{cases} M_{c0} + \beta_{c1}\omega; & \beta_{c1} = 18 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}; \quad M_{c0} = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad 0 \leq \omega \leq 10 \text{ с}^{-1}; \\ -\beta_c\omega; & |\beta_c| = 30 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}; \quad 10 \leq \omega \leq 15 \text{ с}^{-1}; \\ +\beta_{c2}\omega; & \beta_{c2} = 2,5 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}; \quad 15 \leq \omega \leq 75 \text{ с}^{-1}. \end{cases} \quad (4)$$

При этом для синтеза статического РС (1) взято распределение Баттерворта пятого порядка

$$\alpha_5 p^5 + \alpha_4 \omega_0 p^4 + \alpha_3 \omega_0^2 p^3 + \alpha_2 \omega_0^3 p^2 + \alpha_1 \omega_0^4 p + \alpha_0 \omega_0^5$$

со значениями коэффициентов:

$\alpha_0=1$ ;  $\alpha_1=3,24$ ;  $\alpha_2=5,24$ ;  $\alpha_3=5,24$ ;  $\alpha_4=3,24$ ;  $\alpha_5=1$ , а  $\omega_0=190 \text{ с}^{-1}$ ;  $\gamma=2$ ,  $C_{12}=7260 \text{ Нм/рад}$ ;  $\omega_{12}=193,6 \text{ с}^{-1}$ . Для коэффициентов  $m_{i-1}$  и  $n_{j-1}$  формулы (1) согласно [3] получено  $m_1=0,0013 \text{ с}$ ,  $m_0=2,1$  и  $n_2=0,000005858 \text{ с}^2$ ,  $n_1=0,0041 \text{ с}$ ,  $n_0=1,105$ . На основании [4] примем  $\gamma^*=10$ . Тогда при  $T_0=1/\omega_0=0,00526 \text{ с}$  передаточная функция астатического РС (2) и фильтра на входе системы принимают вид:

$$W_{PC}(p) = \frac{12,92(0,0004p+1)(0,00062p+1)}{(0,0000053p^2+0,0037p+1)} \times \frac{(0,0526p+1)}{0,0526p}; \quad (5)$$

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{(0,00062p+1)(0,0526p+1)}.$$

Для оптимизации астатической системы векторного управления рис. 1 с РС (5) по критерию МДУ, как и ранее в [1, 2] введем в его коэффициент усиления и интегральную составляющую переменные  $k$  и  $b$ . С учетом этого получим:

$$W_{PC}(p) = \frac{k \times 12,92(0,0004p+1)(0,00062p+1)}{(0,0000053p^2+0,0037p+1)} \times \frac{(b \times 0,0526p+1)}{0,0526p}; \quad (6)$$

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{(0,00062p+1)(b \times 0,0526p+1)}.$$

Диаграмма качества управления в частотной области для линеаризованной при  $\beta_c=-30 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$  системы рис.1 с РС (6) приведена на рис. 2,а, где точка А – соответствует исходной настройке системы ( $k=1$ ,  $b=1$ ) с показателем колебательности  $M=4,64$ , а точка В – настройке по критерию МДУ на максимальный запас устойчивости ( $k=1$ ,  $b=1,13$ ) с  $M=4,1$ . Амплитудные частотные характеристики рис. 2,б подтверждают

существование минимума показателя колебательности  $M$  при вариации параметра  $b$ . На рис.2,в представлены переходные характеристики, отвечающие настройкам в точках А и В системы с фильтром на входе.

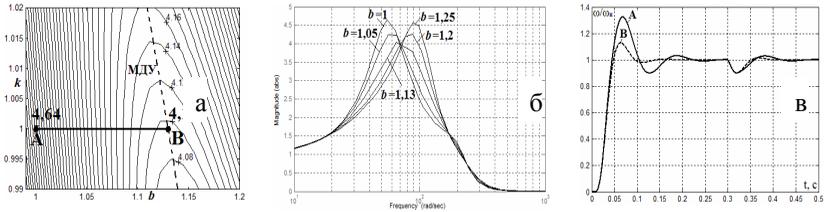


Рис. 2. Диаграмма качества управления в частотной области (а); амплитудные частотные характеристики замкнутой системы при изменении параметра  $b$  от 1 до 1,25 (б); переходные характеристики и просадка скорости при набросе постоянной нагрузки в момент времени 0,3 с (в).

Таким образом, анализ рис. 2 показывает существование резерва повышения запаса устойчивости синтезированной системы (понижения показателя колебательности на 13%) с исходного значения  $M=4,64$  до  $M=4,1$ . На переходных характеристиках рис. 2,в оптимизированной и исходной систем с фильтром на входе, понижение перерегулирования составляет 20% при  $\sigma=10..30\%$ . На рис. 3 показаны результаты компьютерных исследований двухмассового ЭП с оптимизированным РС (6) при работе на пониженной скорости  $\omega=11 \text{ с}^{-1}$ , соответствующей падающему участку нелинейной характеристики нагрузки с расчетной величиной  $\beta c=-30 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$  (осциллограмма а). Случаю  $\beta c=0$  отвечает осциллограмма б. Выходу ЭП на участок с  $\beta c=2,5 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$  при номинальной скорости  $\omega=72,2 \text{ с}^{-1}$  соответствует осциллограмма в. Разгон ЭП с фильтром на входе от задатчика интенсивности (ЗИ) до скорости  $\omega=11 \text{ с}^{-1}$  представлен на осциллограмме г.

Анализ графиков рис.3 показывает устойчивую работу оптимизированной на максимальный запас устойчивости по критерию МДУ системы с РС (6) на всех участках нелинейной характеристики нагрузки (4).

Расчет параметров астатического РС (3) выполнен с использованием распределения, отвечающего критическому загрузанию 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  $\alpha_0=1$ ;  $\alpha_1=4,5$ ;  $\alpha_2=9,75$ ;  $\alpha_3=12,375$ ;  $\alpha_4=9,75$ ;  $\alpha_5=4,5$ ;  $\alpha_6=1$ . При этом для  $\omega_0=104 \text{ с}^{-1}$ ;  $\gamma=2$ ,  $C_{12}=7260 \text{ Нм/рад}$ ;  $\omega_{12}=193,6 \text{ с}^{-1}$  получено:  $m_2=0,0016 \text{ с}^2$ ,  $m_1=0,0516 \text{ с}$ ,  $m_0=1$  и  $n_2=0,00000114 \text{ с}^3$ ,  $n_1=0,000625 \text{ с}^2$ ,  $n_0=0,0042 \text{ с}$ .

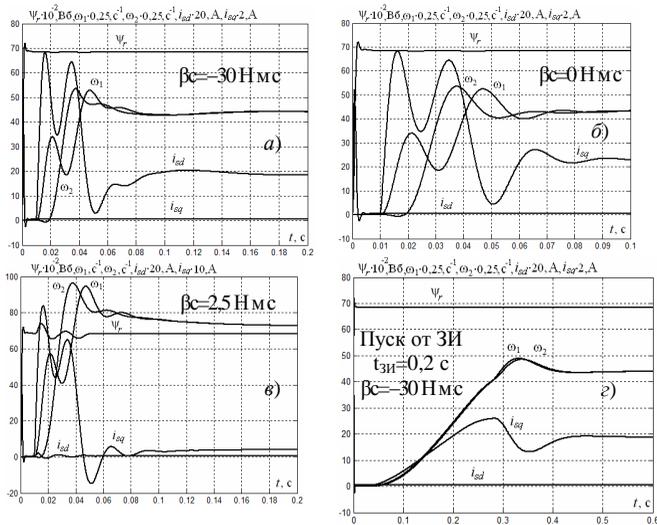


Рис. 3. Переходные характеристики асинхронного ЭП с оптимизированным по критерию МДУ РС: а – нагрузка  $\beta_c = -30 \text{ Нмс}$ ; б –  $\beta_c = 0 \text{ Нмс}$ ; в –  $\beta_c = -2,5 \text{ Нмс}$ ; г –  $\beta_c = -30 \text{ Нмс}$ , пуск при  $t_{3И} = 0,2 \text{ с}$ .

Передаточная функция астатического РС (3) и фильтра  $\Phi$  представляются в виде:

$$W_{PC}(p) = \frac{1597(0,0004p + 1)(0,0016p^2 + 0,0516p + 1)}{(0,00027p^2 + 0,1473p + 1)p}; \quad (7)$$

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{(0,0016p^2 + 0,0516p + 1)}.$$

Для оптимизации астатической системы векторного управления с РС (7) по критерию МДУ, как и ранее, введем в его коэффициент усиления и интегральную составляющую переменные  $k$  и  $b$ . С учетом этого получим:

$$W_{PC}(p) = \frac{k \times 1597(0,0004p + 1)(b^2 \times 0,0016p^2 + b \times 0,0516p + 1)}{(0,00027p^2 + 0,1473p + 1)p}; \quad (8)$$

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{(b^2 \times 0,0016p^2 + b \times 0,0516p + 1)}.$$

АЧХ замкнутой системы с РС (8) при изменении переменной  $b$  представлены на рис. 4а. Их анализ показывает, что минимальное значение частотного показателя колебательности  $M = 5,3$  отвечает исходной настройке РС при  $b = 1$ . Таким образом, оптимальная настройка по критерию МДУ системы с непосредственно синтезированным астатическим регулятором впервые за многие исследования совпадает с ис-

ходной настройкой РС (7). Такое совпадение исходной и оптимальной по критерию МДУ настроек можно объяснить тщательным выбором параметров РС (7). В частности при синтезе полиномиальным методом РС (6) было найдено одно фиксированное значение  $\omega_0$  для выбранного распределения с критическим затуханием переходного процесса.

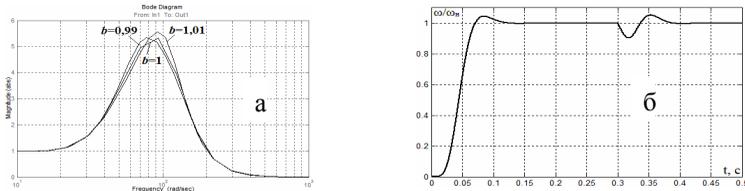


Рис. 4. Амплитудные частотные характеристики замкнутой системы при изменении параметра  $b$  от 0,99 до 1,01 (а); переходные характеристики в линеаризованной системе при  $\beta_c = -30$  нс с фильтром на входе и просадка скорости при набросе постоянной нагрузки в момент времени 0,3 секунды (б).

Работа системы с непосредственно синтезированным полиномиальным методом астатическим РС в тех же режимах, что и на рис.3, приведена на рис. 5.

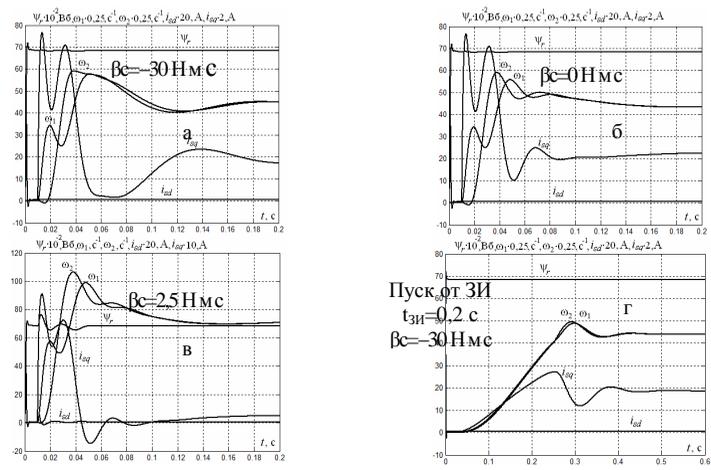


Рис. 5. Переходные характеристики асинхронного ЭП с непосредственно синтезированным астатическим РС: а – нагрузка  $\beta_c = -30$  нс; б –  $\beta_c = 0$  нс; в –  $\beta_c = -2,5$  нс; г –  $\beta_c = -30$  нс, пуск при  $t_{ЗИ} = 0,2$  с..

Графики на рис. 5 подтверждают работоспособность системы с непосредственно синтезированным астатическим регулятором скорости на всех участках нелинейной характеристики нагрузки (4).

**Выводы.** Предложено в [1, 2] использование методов полиномиальных уравнений и диаграмм качества управления распространяемо для улучшения динамических характеристик сложных двухмассовых асинхронных электроприводов с нелинейной нагрузкой. Этим обосновывается целесообразность применения комплексного подхода для улучшения динамических характеристик электроприводов. Установлено, что более эффективной является оптимизация по критерию МДУ астатической системы, полученной совместным применением методов полиномиальных уравнений и систем подчиненного регулирования.

**Список литературы:** 1. *Акимов Л.В.* Синтез астатического регулятора скорости для системы векторного управления одномассовым асинхронным электроприводом с нелинейной нагрузкой / *Л.В. Акимов, Д.Г. Литвиненко* // Наукові праці "ДонНТУ". Сер. Електротехніка і енергетика. – Донецьк: "ДонНТУ". – Вип. №11(186). – 2011. – С. 16-23. 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* // Электротехнические и компьютерные системы. Киев: Техника. – 2011. – №03(79). – С. 92-97. 3. *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. 4. *Крупович В.И.* Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / *В.И. Крупович, Ю.Г. Барыбин, М.Л. Самовер*. – М.: Энергоиздат, 1982. – 416 с.



Акимов Леонид Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры "Автоматизированные электромеханические системы", НТУ "ХПИ". В 1989 году защитил в Московском энергетическом институте докторскую диссертацию и в 1990 году получил ученое звание профессор. Является отличником высшей школы, изобретателем СССР, награжден медалями ВДНХ СССР за выполненные разработки промышленных электроприводов. Неизменной с 1956 года областью инженерных и научных интересов является электропривод.



Литвиненко Дмитрий Григорьевич, аспирант кафедры "Автоматизированные электромеханические системы" НТУ "ХПИ". В 2007 г. закончил Харьковский политехнический институт по специальности "Электробытовая техника". В 2007 г. поступил в аспирантуру с отрывом от производства. Научные интересы – улучшение динамических характеристик частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением при нелинейном характере нагрузки использованием методов полиномиальных уравнений и диаграмм качества управления.

*Поступила в редколлегию 26.04.2012  
Рецензент проф., д.т.н. Клепиков В.Б.*