

УДК 62-83

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

**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

диаграмм качества управления, для улучшения динамических характеристик двухмассового электропривода с нелинейной нагрузкой.

Постановка задач исследования. Целью исследования является оптимизация динамических характеристик астатической системы векторного управления двухмассового асинхронного электропривода с нелинейной нагрузкой.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- астатическая система регулирования скорости создается методами систем подчиненного регулирования (СПР) на основе синтезированного полиномиальным методом статического регулятора скорости (РС) пониженного порядка;
- непосредственное создание астатической системы методом полиномиальных уравнений;
- оптимизация полученных астатических систем по критерию МДУ.

Материалы исследования. Используем, разработанные в [3], статический и астатические законы управления двигателем постоянного тока с двухмассовой механической частью и нелинейной нагрузкой, которые при определенных условиях адаптируются для управления системой векторного управления асинхронным двигателем (АД). Этими условиями являются: 1) компенсация перекрестных обратных связей в структуре АД; 2) компенсация обратной связи по электродвижущей силе (ЭДС) двигателя; 3) отсутствие влияния активной составляющей тока статора на потокосцепление ротора ($\psi_r = \text{const}$). При выполнении указанных условий двухканальная структура АД для решения задач синтеза регуляторов полиномиальным методом может быть представлена одноканальной структурой рис.1, которая подобна структуре системы электропривода постоянного тока тиристорный преобразователь – двигатель.

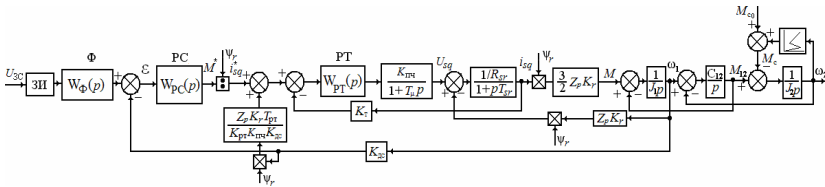


Рис. 1. Одноканальная структура асинхронного ЭП при $\psi_r = \text{const}$.

В связи с изложенным, основываясь на [3], сразу запишем передаточные функции статического РС пониженного порядка и фильтра Ф на входе системы:

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

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; Ψ_{r0} – потокосцепление ротора; $K_{ДС}$ – коэффициент датчика скорости; T_{μ} – 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 ω_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 $J_1 = J_2 = 0,3875$ кгм²; $K_r = 0,9808$; $Z_p = 4$; $T_{sr} = 0,0028$ 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.

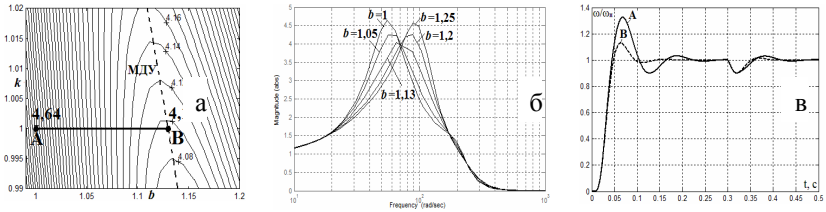


Рис. 2. Диаграмма качества управления в частотной области (а); амплитудные частотные характеристики замкнутой системы при изменении параметра b от 1 до 1,25 (б); переходные характеристики и просадка скорости при набросе постоянной нагрузки в момент времени 0,3 с (в).

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 $n_2=0,00000114 \text{ с}^3$, $n_1=0,000625 \text{ с}^2$, $n_0=0,0042 \text{ с}$.

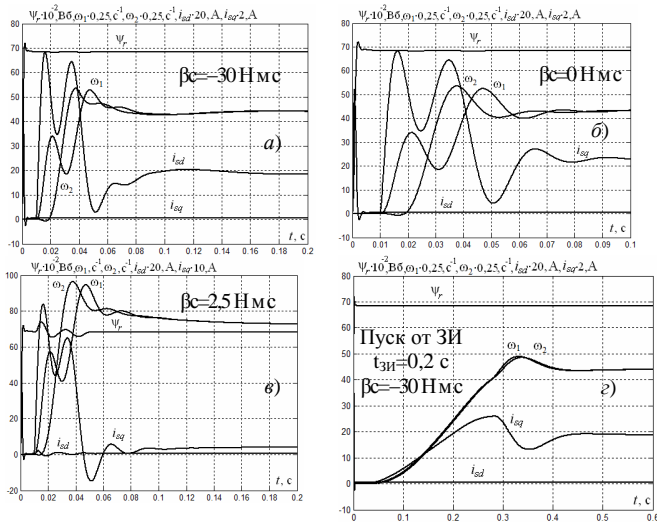


Рис. 3. Переходные характеристики асинхронного ЭП с оптимизированным по критерию МДУ РС: а – нагрузка $\beta_c = -30$ Нмс; б – $\beta_c = 0$ Нмс; в – $\beta_c = -2,5$ Нмс; г – $\beta_c = -30$ Нмс, пуск при $t_{3И} = 0,2$ с.

Передаточная функция астатического РС (3) и фильтра Φ 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 ω_0 для выбранного распределения с критическим затуханием переходного процесса.

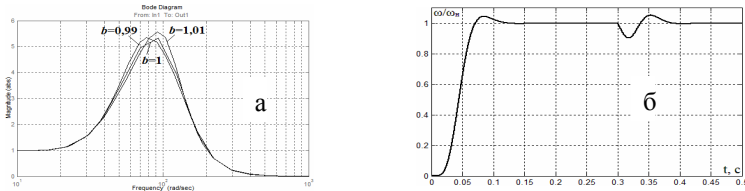


Рис. 4. Амплитудные частотные характеристики замкнутой системы при изменении параметра b от 0,99 до 1,01 (а); переходные характеристики в линеаризованной системе при $\beta_c = -30$ нс с фильтром на входе и просадка скорости при набросе постоянной нагрузки в момент времени 0,3 секунды (б).

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

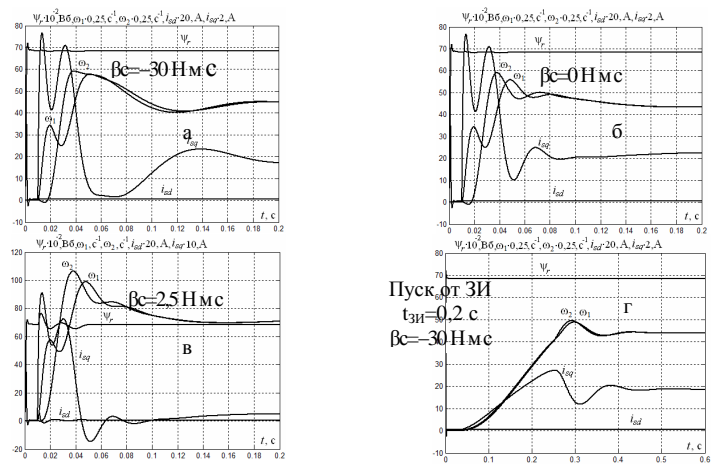


Рис. 5. Переходные характеристики асинхронного ЭП с непосредственно синтезированным астатическим РС: а – нагрузка $\beta_c = -30$ нс; б – $\beta_c = 0$ нс; в – $\beta_c = -2,5$ нс; г – $\beta_c = -30$ нс, пуск при $t_{ЗИ} = 0,2$ с..

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 распространено 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.*