

УДК 62-83-52

Ю.В. Губарь (канд. техн. наук, доц.)
Донецкий национальный технический университет
gubar@cs.dgtu.donetsk.ua

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ СИНТЕЗА И МОДЕЛИРОВАНИЯ АСТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ

Методом стандартных полиномов выполнен синтез параметров астатической по нагрузке системы позиционного электропривода. В среде Matlab+Simulink проведено исследование динамических свойств рассмотренной системы при работе ее в линейном режиме и в режиме ограничения координат внутренних контуров регулирования. Выполнен сравнительный анализ основных характеристик разработанной системы и системы позиционного электропривода с комбинированным управлением.

позиционный электропривод, характеристический полином, передаточная функция, переходной процесс

Введение

Анализ методов синтеза современных систем управления электроприводами показывает широкий интерес к использованию метода полиномиальных уравнений [1,2]. Выбор оптимальных коэффициентов характеристического полинома (ХП) в системах регулирования положения существенно расширяет возможности параметрического синтеза этих систем.

В [3] предложена астатическая по нагрузке система подчиненного регулирования положения (СРП) с комбинированным управлением по задающему воздействию. В двукратноинтегрирующей системе, в которой контур регулирования скорости (КРС) настроен в соответствии с требованиями симметричного оптимума, перерегулирование по току σ_T при разгоне (торможении) с задатчиком интенсивности составляет 53,7% [4]. Для снижения перерегулирования по току при отработке управляющего воздействия на входе КРС устанавливают апериодическое звено (RC-фильтр), что приводит к значительному ухудшению быстродействия привода при его работе в пуско – тормозных режимах.

При доступности измерения всех составляющих вектора состояния всегда можно поместить корни характеристического уравнения замкнутой системы в любое желаемое положение. Этим достигается свобода не только в выборе известного нормированного

распределения [5], но и среднегеометрического корня (СГК), а следовательно, быстродействия замкнутой системы.

В связи с изложенным, научный и практический интерес представляет решение задачи обеспечения желаемого качества переходных процессов в СРП в рамках традиционной структуры подчиненного регулирования (СПР). Целью данной работы является синтез параметров СРП методом стандартных полиномов, исследование основных динамических характеристик разработанной системы методом математического моделирования, а также сравнительный анализ показателей работы СРП с аналогичной системой, реализующей принцип комбинированного управления.

Описание исследуемой системы

Структурная схема астатической СРП представлена на рис.1. КРС реализован с ПИ – регулятором скорости (РС). Его структурная схема представлена на рис.2.

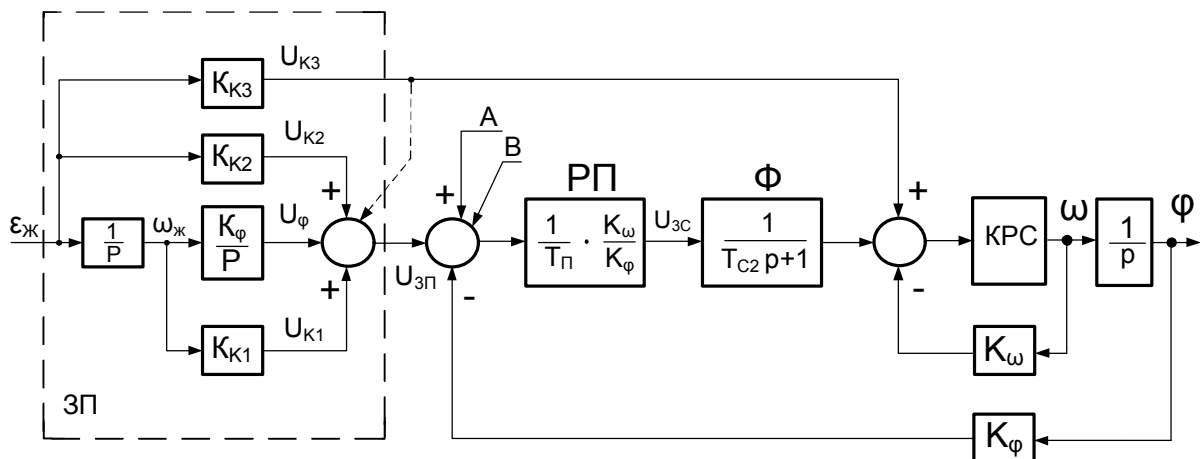


Рисунок 1 – Структурная схема системы регулирования положения

На рис.1 и рис.2 введены следующие обозначения: ЗП – задатчик положения; РП, РС и РТ – соответственно регуляторы положения, скорости и тока; Ф – фильтр; ТО – звено ограничения тока; φ - угол, отрабатываемый валом двигателя, рад; ω - угловая скорость вала двигателя, рад/с; I – ток якоря двигателя, А; I_c , $I_{дин}$ – соответственно статический и динамический ток, А; $U_{зп}$, $U_{зс}$, $U_{зт}$ – соответственно напряжения задания положения, скорости и тока, В; K_φ , K_ω , K_i - соответственно коэффициенты обратных связей по углу, скорости и току; T_Π , T_{C2} , T_{C1} , T_T - соответственно постоянные времени

интегрирования контуров регулирования положения (КРП), скорости (КРС) и тока (КРТ), с;

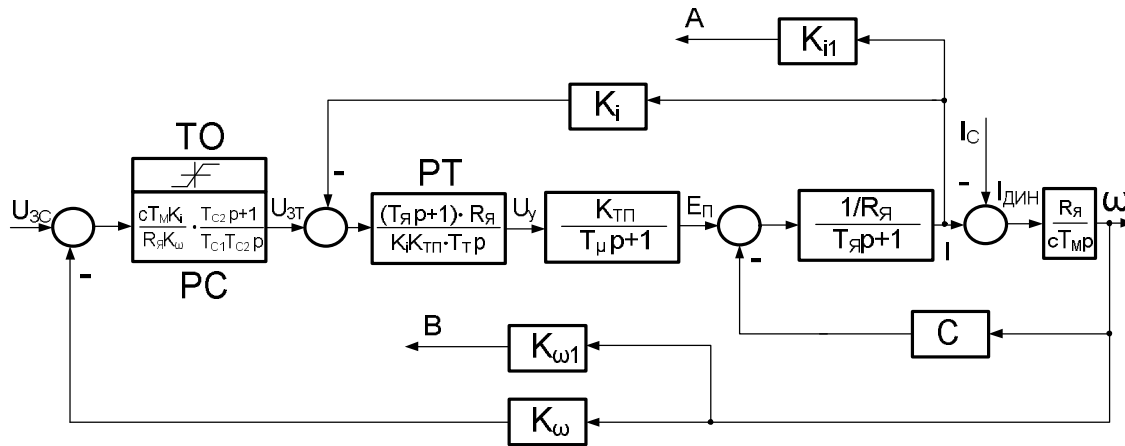


Рисунок 2 – Структурная схема контура регулирования скорости

$R_{\text{я}}$ - суммарное активное сопротивление силовой цепи, Ом; C - коэффициент ЭДС двигателя, В/рад/с; T_M - электромеханическая постоянная двигателя, с; K_{K1}, K_{K2}, K_{K3} - коэффициенты компаундирующих связей ЗП; $K_{\omega 1}, K_{i 1}$ - дополнительные настроечные коэффициенты по скорости и току при работе привода в режиме ограничения координат; $\varepsilon_{\text{ж}}, \omega_{\text{ж}}$ - желаемые сигналы изменения ускорения и скорости двигателя.

КРС настроен в соответствии с требованиями симметричного оптимума [4], которые обеспечиваются при выборе постоянных интегрирования РС в виде:

$$T_{C1} = 2T_T, \quad T_{C2} = 2T_{C1} = 4T_T. \quad (1)$$

Постоянная времени фильтра (Φ) $T_{\Phi} = T_{C2}$.

Синтез СРП методом стандартных полиномов

Синтез системы позиционного электропривода выполним в соответствии с методикой [2].

1. Выбирается один из стандартных нормированных полиномов вида

$$G_n(p_{\omega}) = p_{\omega}^n + \gamma_{n-1} p_{\omega}^{n-1} + \dots + \gamma_1 p_{\omega} + 1, \quad (2)$$

где $p_{\omega} = p / \Omega_0$ - относительный параметр Лапласа;

Ω_0 - среднегеометрический корень полинома.

Порядок полинома знаменателя передаточной функции СРП $n = 5$. Выбираем наиболее универсальный стандартный нормированный полином Грехема – Летропа пятого порядка, обеспечивающий малое перерегулирование переходной функции [5]:

$$G_{5GL}(p_\omega) = p_\omega^5 + 2,8p_\omega^4 + 5p_\omega^3 + 5,5p_\omega^2 + 3,4p_\omega^1 + 1, \quad (3)$$

где $\gamma_5 = 1$; $\gamma_4 = 2,8$; $\gamma_3 = 5$; $\gamma_2 = 5,5$; $\gamma_1 = 3,4$; $\gamma_0 = 1$.

2. Определяют характеристические соотношения выбранного полинома:

$$\delta_i = \frac{\gamma_{n-i}^2}{\gamma_{n-i-1}\gamma_{n-i+1}}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (4)$$

$$\delta_1 = \delta_T = \frac{\gamma_4^2}{\gamma_3\gamma_5}; \quad \delta_2 = \delta_{C1} = \frac{\gamma_3^2}{\gamma_2\gamma_4}; \quad \delta_3 = \delta_{C2} = \frac{\gamma_2^2}{\gamma_1\gamma_3}; \quad \delta_4 = \delta_{II} = \frac{\gamma_1^2}{\gamma_0\gamma_2}.$$

3. Определяют постоянные времени разомкнутых контуров регулирования

$$T_i = \delta_i \cdot T_{i-1}. \quad (5)$$

Индекс $i = 1$ соответствует самому внутреннему контуру. В качестве постоянной времени T_0 принимается малая некомпенсированная постоянная времени привода T_μ .

$$T_0 = T_\mu; \quad T_1 = T_T = \delta_1 \cdot T_0; \quad T_2 = T_{C1} = \delta_2 \cdot T_1; \quad T_3 = T_{C2} = \delta_3 \cdot T_2; \quad T_4 = T_{II} = \delta_4 \cdot T_3.$$

4. Характеристический полином синтезированной СРП при работе в линейном режиме имеет вид:

$$G_{5GL}(p) = a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1 = \quad (6)$$

$$= \chi_4 T_\mu p \cdot (\chi_3 T_\mu p \cdot (\chi_2 T_\mu p \cdot (\chi_1 T_\mu p \cdot (\chi_0 T_\mu p + 1) + 1) + 1) + 1) + 1,$$

$$\text{где } \chi_i = \frac{T_i}{T_\mu} = \prod_{j=0}^i \delta_j, \quad i = 0, 1, \dots, 4.$$

$$a_i = \left(\prod_{j=n-i}^{n-1} \chi_j \right) \cdot T_\mu = \frac{\gamma_i}{\Omega_0^i}, \quad i = 1, 2, \dots, 5.$$

5. Определение среднегеометрического корня полинома

$$\Omega_0 = \frac{1}{\sqrt[5]{a_5}}. \quad (7)$$

6. При найденном ХП СРП определяют вид подчиненных ему контуров регулирования скорости и тока:

$$G_{C2}(p) = a_{4_C2} p^4 + a_{3_C2} p^3 + a_{2_C2} p^2 + a_{1_C2} p + 1; \quad (8)$$

$$G_{C1}(p) = a_{3_C1} p^3 + a_{2_C1} p^2 + a_{1_C1} p; \quad (9)$$

$$G_T(p) = a_{2_T} p^2 + a_{1_T} p + 1. \quad (10)$$

Результаты расчета параметров СРП при $T_\mu=0.005$ с сведены в табл.1 – табл.4.

Таблица 1. Характеристические соотношения полинома

δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
1,568	1,6234	1,7794	2,1018

Таблица 2. Постоянные времени разомкнутых контуров регулирования

T_T	T_{C1}	T_{C2}	T_Π
0,0078	0,0127	0,0226	0,0476

Таблица 3. Коэффициенты характеристического полинома (6)

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
$9,52T_\mu$	$43,12T_\mu^2$	$109,7T_\mu^3$	$172,1T_\mu^4$	$172,1T_\mu^5$

Таблица 4. Коэффициенты характеристических полиномов (8 – 10)

a_{1_C2}	a_{2_C2}	a_{3_C2}	a_{4_C2}	a_{1_C1}	a_{2_C1}	a_{3_C1}	a_{1_T}	a_{2_T}
$4,53T_\mu$	$11,53T_\mu^2$	$18,1T_\mu^3$	$18,1T_\mu^4$	$2,55T_\mu$	$3,99T_\mu^2$	$3,99T_\mu^3$	$1,57T_\mu$	$1,57T_\mu^2$

Среднегеометрический корень полинома (6) $\Omega_0 = 0,3571/T_\mu$.

Анализ переходных процессов

Исследование переходных процессов в СРП проводилось методом имитационного моделирования с использованием системы Matlab + Simulink. Переходные характеристики замкнутых контуров тока, скорости и положения при сравниваемых настройках приведены

на рис. 3 (кривая 1 соответствует СРП, рассчитанной методом двойных пропорций [6]; кривая 2 – СРП с полиномом Грехема – Летропа).

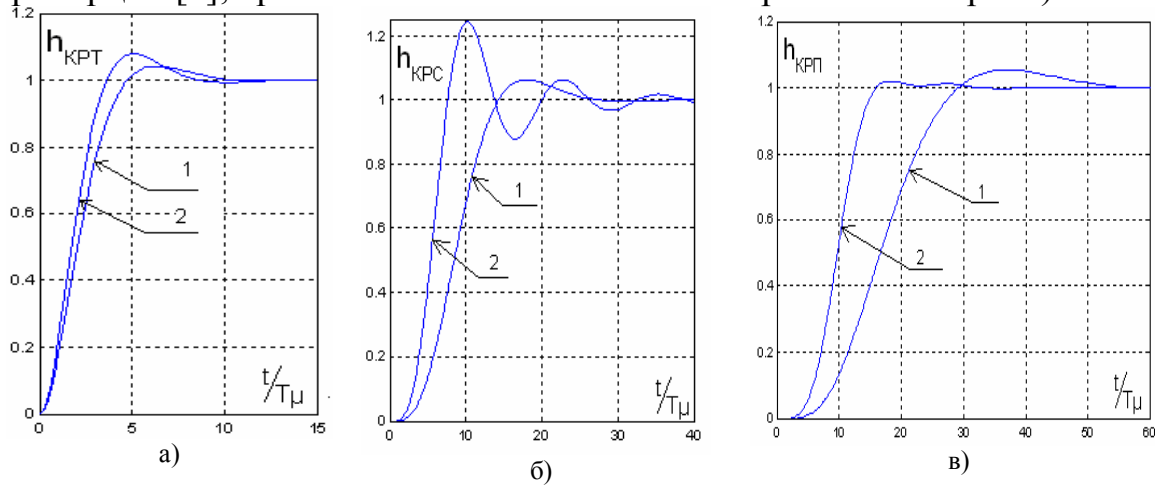


Рисунок 3 – Графики переходных функций КРТ, КРС и КРП

Анализ результатов моделирования показывает, что при использовании характеристического полинома Грехема – Летропа пятого порядка переходная функция КРП, определяющая качество переходных процессов в системе электропривода при работе всех ее элементов в линейном режиме, имеет при перерегулировании $\sigma = 2,1\%$ более высокое быстродействие (времена первого согласования с установившимся значением и достижения максимума составляют соответственно $t_c = 16,2T_\mu$, $t_M = 18,2T_\mu$), чем при использовании традиционной СРП с линейным РП ($t_c = 29,4T_\mu$, $t_M = 37,2T_\mu$, $\sigma = 5,46\%$). Можно показать, что и ошибка позиционирования в первом случае будет примерно в два раза меньше, чем во втором.

Однако положительный эффект при использовании полинома Грехема – Летропа достигается за счет более жесткой настройки контуров тока и скорости, что приводит к увеличению перерегулирования их переходных функций, которые определяют качество переходных процессов при работе привода в режимах ограничения соответствующих координат.

Для того, чтобы не изменять работу системы в режиме токоограничения и в режиме ограничения скорости, следует в регуляторах тока (РТ) и скорости (РС) оставить общепринятую настройку ($T_T = 2T_\mu$, $T_{C1} = 2T_T = 4T_\mu$, $T_{C2} = 2T_{C1} = 8T_\mu$), а значения T_T , T_{C1} и T_{C2} , соответствующие выбранному стандартному полиному, обеспечить за счет дополнительных обратных связей по току Ki_i и скорости $K\omega_i$, заведенных на вход регулятора положения [2]. На рис.1

и рис.2 эти связи обозначены сигналами А и В. Методика расчета этих параметров рассмотрена в [2].

Полученная таким образом система с дополнительными связями по току и по скорости, введенными на вход регулятора положения, имеет переходные функции контуров тока и скорости, соответствующие оптимизации их методом двойных пропорций (кривые 1 на рис.3а, б), и переходную функцию контура положения, соответствующую ХП Грехема-Летропа (кривая 2 на рис.3в).

Продемонстрированная выше возможность вариации коэффициентов характеристического полинома в СРП существенно расширяет возможности параметрического синтеза этих систем и при наличии в передаточной функции привода числителя. В [3] предлагается использовать для управления позиционными электроприводами, работающими в напряженном повторно-кратковременном режиме, задатчик положения (ЗП) с компаундирующими связями по первой, второй и третьей производным от основного управляющего воздействия, реализующими принцип комбинированного управления по каналу задания. Структура такого ЗП показана на рис.1.

Передаточная функция СРП по управляющему воздействию

$$K_{СРП}(p) = \frac{\varphi(p)}{U_{\varphi}(p)} = \frac{1}{K_{\varphi}} \cdot \frac{b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + 1}{a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}, \quad (11)$$

где $a_1 = T_{\Pi}$; $a_2 = 4T_{\Pi}T_T$; $a_3 = 8T_{\Pi}T_T^2$; $a_4 = 8T_{\Pi}T_T^3$; $a_5 = 8T_{\Pi}T_T^3T_{\mu}$.

Постоянная интегрирования T_{Π} разомкнутого КРП определяется в соответствии с [6] $T_{\Pi} = 2T_{C2} = 8T_T = 16T_{\mu}$.

Определим выражение, связывающее коэффициенты компаундирующих связей ЗП K_{K1} , K_{K2} , K_{K3} с параметрами числителя передаточной функции (11). С этой целью выполним эквивалентный структурный перенос третьей компаундирующей связи K_{K3} со входа РС на вход линейного РП (пунктирная линия на рис.1). Передаточная функция ЗП от $\varepsilon_{Ж}(p)$ до $U_{ЗП}(p)/K_{\varphi}$ имеет вид:

$$W_{ЗП}(p) = 1 + \frac{K_{K1}}{K_{\varphi}} \cdot p + \left(\frac{K_{K2}}{K_{\varphi}} + T_{\Pi} \cdot \frac{K_{K3}}{K_{\omega}} \right) \cdot p^2 + T_{C2}T_{\Pi} \frac{K_{K3}}{K_{\omega}} \cdot p^3. \quad (12)$$

Приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях оператора p числителя ПФ (11) и выражения (12) и воспользовавшись [6], находят

формулы для определения коэффициентов компаундирующих связей ЗП:

$$K_{K1} = \beta_1 T_\mu; \quad K_{K2} = \beta_2 T_\mu^2; \quad K_{K3} = \beta_3 T_\mu^3. \quad (13)$$

В табл.5 приведены значения корректирующих коэффициентов ЗП $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ и результаты моделирования комбинированной СРП, а на рис.4 – графики переходных функций КРП.

Таблица 5. Параметры комбинированной СРП

Номер кривой	β_1	β_2	β_3	t_C / T_μ	t_M / T_μ	$\sigma, \%$
1	0	0	0	29,5	37	5,5
3	12,8	81,7	181	7,5	10	5,6
2	9,5	45,8	0	15	20,5	2,4

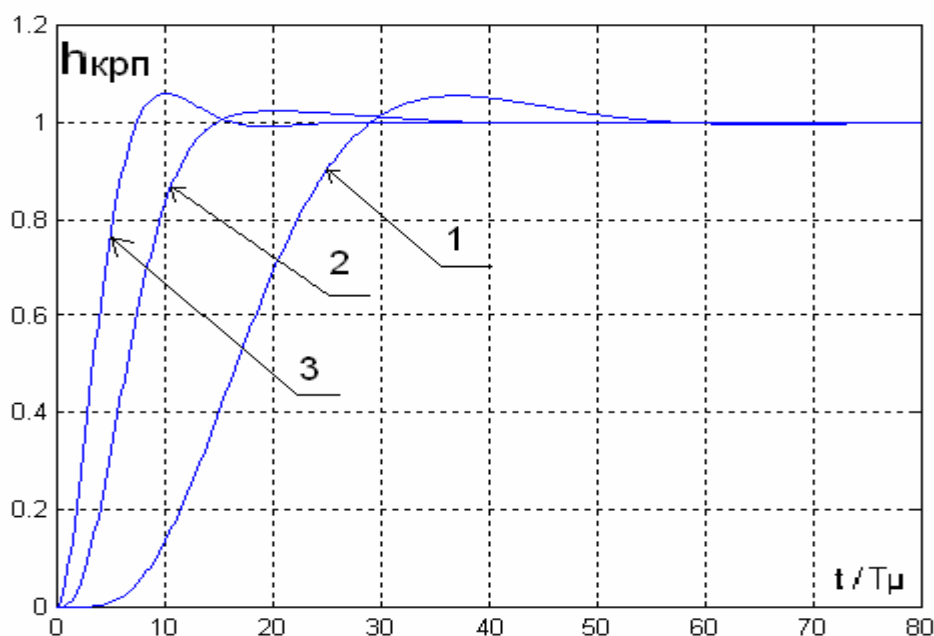


Рисунок 4 – Графики переходных процессов в комбинированной СРП

Выводы

1. Возможность вариации вида ХП в соответствии методикой полиномиального синтеза позволяет улучшить показатели качества переходных процессов в СРП как при использовании принципа управления по отклонению, так и при комбинированном управлении без ухудшения работы САУ в режиме ограничения координат внутренних контуров.

2. Работу целесообразно продолжить при исследовании цифровых систем позиционного электропривода.

Список литературы

1. Ишматов З.Ш., Волков М.А., Плотников Ю.В., Гурентьев Е.А. Полиномиальный подход к синтезу и анализу систем управления электроприводами. - Труды V Международной конференции по автоматизированному электроприводу – С.-Петербург, 2007, с.141 – 144.
2. Толочко О.И., Коцегуб П.Х., Розкаряка П.И. Применение метода стандартных полиномов при синтезе системы подчиненного регулирования положения.- Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля: Луганськ, 2007, № 11 (117), с.182 – 193.
3. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Светличный А.В., Губарь Ю В. Система позиционного электропривода с задатчиком положения.- Известия вузов. Электромеханика, 1982, № 3, с.331 – 337.
4. Фанштейн В.Г., Фанштейн Э.Г. Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами. – М.:Энергоатомиздат, 1986. – 240 с.
5. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976.
6. Коцегуб П.Х., Толочко О. И. Оптимизация систем управления по модулю амплитудно – частотной характеристики. – Известия вузов. Электромеханика, 1977, № 6, с. 679 – 684.

Надійшла до редакції 20.09.2009 р. Рецензент: д.т.н., проф. Святний В.А.

Ю. В. Губарь

Донецький національний технічний університет

Методом стандартних поліномів виконано синтез параметрів астатичної по навантаженню системи позиційного електроприводу. У середовищі Matlab+Simulink проведено дослідження динамічних властивостей розглянутої системи при роботі її в лінійному режимі та у режимі обмеження координат внутрішніх контурів регулювання. Виконано порівняльний аналіз основних характеристик розробленої системи і системи позиційного електропривода з комбінованим керуванням.

позиційний електропривод, характеристичний поліном, передатна функція, перехідний процес

Y.V.Gubar

Donetsk National Technical University

Using of polynomial equations method for synthesis and modeling of position control floating system. Parameters for floating-load system of positional electric drive were synthesized by method of standard polynomials. Researchs of system under study dynamic properties in linear working mode and in mode of inner control circuit coordinate restrictions were made in Matlab + Simulink. Comparative analysis of basic characteristics of developed system and system of positional electric drive with combined control is performed.

positional electric drive, characteristics polynomial, transmission function, transient