

**Т. Ю. КУНЧЕНКО, А. В. ПИРОЖОК, Ю. Н. КУТОВОЙ, И. В. ОБРУЧ, А. В. КАЩЕЕВ**

# **СИНТЕЗ ПОЛИНОМИАЛЬНЫМ МЕТОДОМ АСТАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ДЛЯ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Обоснована возможность синтеза полиномиальным методом астатического регулятора скорости, для синтеза динамометрических испытаний асинхронных двигателей, имеющие, в силу влияния нелинейной нагрузки, неустойчивую двухмассовую механическую часть. Астатический регулятор идентифицирует механические характеристики асинхронных двигателей, имеющие игольчатые провалы момента. Не традиционная настройка регулятора таким образом обеспечивает заданную точность идентификации характеристик асинхронных двигателей квазистатическим методом.

**Ключевые слова:** полиномиальный метод, механическая характеристика асинхронного двигателя с провалами момента, астатический регулятор

**Т. Ю. КУНЧЕНКО, А. В. ПИРОЖОК, Ю. М. КУТОВИЙ, І. В. ОБРУЧ, О. В. КАЩЕЄВ**

# **СИНТЕЗ ПОЛІНОМІАЛЬНИМ МЕТОДОМ АСТАТИЧНОГО РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ ДЛЯ КВАЗИСТАТИЧНОГО МЕТОДА ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ**

Обґрунтована можливість синтезу поліноміальним методом астатичного регулятора швидкості, для синтезу динамометричних випробувань асинхронних двигунів, що мають, в силу впливу нелінійного навантаження, нестійку двомасову механічну частину. Астатичний регулятор ідентифікує механічні характеристики асинхронних двигунів, що мають голчасті провали моменту. Не традиційне налагодження регулятора таким чином забезпечує задану точність ідентифікації характеристик асинхронних двигунів квазістатичним методом.

**Ключові слова:** поліноміальний метод, механічна характеристика асинхронного двигуна з провалами моменту, астатичний регулятор

**T. YU. KUNCHENKO, A. V. PIROZHOK, YU. N. KUTOVOJ, I. V. OBRUCH, A. V. KASCHEEV**

# **SYNTHESIS OF A POLYNOMIAL METHOD OF AN ASTATIC VELOCITY REGULATOR FOR A QUASISTATIC METHOD FOR STUDYING AN INDUCTION MOTOR**

The possibility of the synthesis by the polynomial method of the astatic speed controller, for the synthesis of dynamometric tests of induction motors, having, due to the influence of a nonlinear load, an unstable two-mass mechanical part, is substantiated. The astatic controller identifies the mechanical characteristics of asynchronous motors that have needle dips of the moment. Not traditional adjustment of the regulator thus provides the specified accuracy of identification of the characteristics of asynchronous motors by the quasistatic method. Examples of such mechanisms are asynchronous machine test benches with similar dips in mechanical characteristics, grinding machines, drawing mills, etc. In some cases, for working machines that are not related to the continuity of the technological process with other units, it is also advisable to use astatic systems under the conditions for obtaining higher productivity or to achieve increased technological process accuracy.

**Keywords:** polynomial method, mechanical characteristic of induction motor, astatic controller

**Введение.** В работах [1, 2] показана возможность использования полиномиального метода для синтеза регулятора скорости (РС) в электроприводах с нелинейными характеристиками нагрузки.

Было отмечено, что применение традиционных для систем подчинённого регулирования электропривода (СПР ЭП) постоянного тока методов синтеза регулятора при настройке контуров на модульный и симметричный оптимумы во многих случаях не могут обеспечить устойчивую работу системы с двухмассовым электромеханическим объектом, при нелинейном реактивном характере нагрузки с падающим  $\beta_{c1} < 0$  и восходящим  $\beta_{c1} > 0$  участками.

Подобный характер нагрузки имеет асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором при динамометрических испытаниях. Пример механической характеристики АД приведен на рис. 1.

Наличие падающего участка в нелинейной характеристике нагрузки приводит к исходной неустойчивости ЭП, что способствует возникновению расхождений и автоколебательных режимов, причины и условия появления которых раскрыты в [3]. Это существенно усложняет синтез систем автоматического управления, которые должны быть простыми и сохра-

нять свою работоспособность при изменении их параметров в достаточно широком диапазоне.

В связи с изложенным, для маломощных ЭП, где чаще всего оптимизированный контур тока заменяется узлом упреждающего токоограничения, при исходной неустойчивости объекта применение традиционного метода синтеза РС на симметричный оптимум не обеспечивает требуемой по качеству динамики.

**Целью статьи** является использование полиномиального метода (4) при синтезе астатического РС для исходно неустойчивого объекта, которым является асинхронный двигатель при идентификации его механической характеристики, особенно в области падающих и восходящих участков.

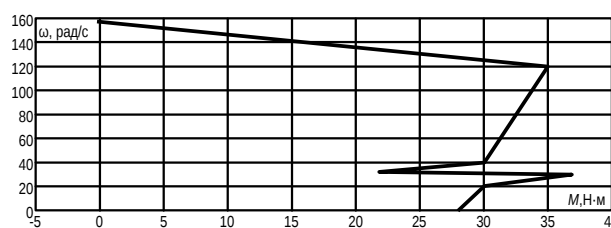


Рис. 1. Линеаризованная механическая характеристика АД с кз ротором с падающими  $\beta_c < 0$  и возрастающими  $\beta_c > 0$  участками

Структурная схема ЭП постоянного тока с астатическим РС, лежащего в основе устройства «Экс-пресс» в общепринятых обозначениях приведена на рис. 2.

Для использования полиномиального метода синтеза прежде всего, с учётом возможности пренебрежения влиянием ЭДС двигателя при  $T_{м1} / T_3 > 4$ , получена передаточная функция объекта в контуре регулирования скорости. При этом рассматривается режим работы ЭП на падающем участке нагрузки с  $\beta_{c1} < 0$ , как наиболее влияющей на динамику системы. Она имеет вид:

$$W_{об}(p) = U_{ос}(p) / U_{PC}(p) = \frac{K_0 \left( \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 - \frac{|\beta_C|}{C_{12}} p + 1 \right)}{\left[ (T_{\mu} + T_{\varepsilon}) p + 1 \right] \left( \frac{T_C}{\Omega_{12}^2} p^3 - \frac{\gamma}{(\gamma - 1)} \Omega_{12}^2 p^2 + T_C p - 1 \right)}, \quad (1)$$

где  $K_0 = K_{\text{тп}} \text{СФ} \cdot K_{\text{дс}} / R_{\Sigma} |\beta_C|$  – коэффициент усиления объекта;

$\gamma = (J_1 + J_2) / J_1$  – параметр, характеризующий соотношение масс;

$\Omega_{12} = \sqrt{C_{12} \gamma / J_2}$  – резонансная частота упругих колебаний,  $\text{с}^{-1}$ ;

$T_C = (J_1 + J_2) / |\beta_C|$  – механическая постоянная времени, с.

Для синтеза РС представим передаточную функцию объекта  $W_{об}(p)$  в виде произведения отдельных полиномов числителя  $P(p)$  и знаменателя  $Q(p)$  как:

$$W_{об}(p) = \frac{P(p)}{Q(p)} = \frac{K_0 P_{\kappa+}(p) P_{n+}(p) P_{-}(p)}{Q_{\kappa+}(p) Q_{n+}(p) Q_{-}(p) p^s}, \quad (2)$$

где  $P_{\kappa+}(p)$ ,  $Q_{\kappa+}(p)$  – полиномы, имеющие в качестве своих нулей только левые нули и полюсы объекта, компенсируемые при помощи регулятора;

$P_{n+}(p)$ ,  $Q_{n+}(p)$  – полиномы, содержащие только левые нули и полюсы объекта, в компенсации которых нет необходимости;

$P_{-}(p)$ ,  $Q_{-}(p)$  – полиномы, содержащие правые и нейтральные нули и полюсы объекта, за исключением расположенных в точке  $p = 0$ , компенсация которых неприемлема из-за нарушения условия грубости;

$s = 0, 1, 2$  – количество полюсов объекта в точке  $p = 0$ .

Характер переходного процесса в замкнутой системе задаётся выбором нормированного распределения с величиной среднегеометрического корня  $\omega_0$ .

Ему отвечает эквивалентная постоянная времени системы  $T_0 = 1 / \omega_0$ .

В качестве компенсируемого полинома знаменателя передаточной функции (1) примем

$$Q_{\kappa+}(p) = (T_{\mu} + T_3) \cdot p + 1 \text{ при } P_{\kappa+}(p) = 1.$$

В этом случае передаточную функцию астатического РС пониженного порядка можно представить:

$$W_{PC}^A(p) = \frac{Q_{\kappa+}(p) M(p)}{K_0 P_{\kappa+}(p) N(p) p^{v-s}}, \quad (3)$$

где  $v$  – желаемый порядок астатизма замкнутой системы регулирования скорости, принимаемый равным единице ( $v = 1$ );

$M(p)$ ,  $N(p)$  – неизвестные полиномы, пониженной на единицу степени  $i-1$  и  $j-1$ , соответственно имеющие вид:

$$\begin{aligned} M(p) &= m_{i-1} p^{i-1} + \dots + m_1 p + m_0; \\ N(p) &= n_{j-1} p^{j-1} + \dots + n_1 p + n_0. \end{aligned} \quad (4)$$

Коэффициенты полиномов  $M(p)$  и  $N(p)$  находятся из полиномиального уравнения синтеза [4]:

$$M(p) P_{-}(p) P_{n+}(p) + N(p) Q_{-}(p) Q_{n+}(p) p^v = G(p), \quad (5)$$

где  $G(p)$  – характеристический полином замкнутой системы, задаваемый выбором того или иного распределения полюсов.

Анализ передаточной функции (1) показывает, что по своей структуре она аналогична передаточной функции объекта, которым является ЭП с внутренним контуром тока и астатическим РС, синтезированным в [6]. Поэтому, по аналогии с [6] сразу запишем полиномиальное уравнение синтеза (5) в развёрнутой форме по мере убывания степени  $p$ :

$$\begin{aligned} & \frac{T_C}{\Omega_{12}^2} n_2 p^6 + \left( \frac{T_C}{\Omega_{12}^2} n_1 - \frac{\gamma}{(\gamma - 1)} \Omega_{12}^2 n_2 \right) p^5 + \\ & + \left( \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} m_2 + T_C n_2 - \frac{\gamma}{(\gamma - 1)} \Omega_{12}^2 n_1 + \frac{T_C}{\Omega_{12}^2} n_0 \right) p^4 + \\ & + \left( \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} m_1 - \frac{|\beta_C|}{C_{12}} m_2 - n_2 + T_C n_1 - \frac{\gamma}{(\gamma - 1)} \Omega_{12}^2 n_0 \right) p^3 + \\ & + \left( \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} m_0 - \frac{|\beta_C|}{C_{12}} m_1 + m_2 + T_C n_0 - n_1 \right) p^2 + \\ & + \left( m_1 - \frac{|\beta_C|}{C_{12}} m_0 - n_0 \right) p + m_0 = \\ & = \alpha_6 T_0^6 p^6 + \alpha_5 T_0^5 p^5 + \alpha_4 T_0^4 p^4 + \alpha_3 T_0^3 p^3 + \\ & + \alpha_2 T_0^2 p^2 + \alpha_1 T_0 p + \alpha_0 \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\alpha_6 \dots \alpha_0$  – коэфф-ты выбранного распределения.

В результате сравнения сомножителей при одинаковых степенях  $p$  левой и правой части уравнения (6) получено семь нелинейных зависимостей, определяющих неизвестные коэффициенты полиномов  $M(p)$  и  $N(p)$ , а именно:

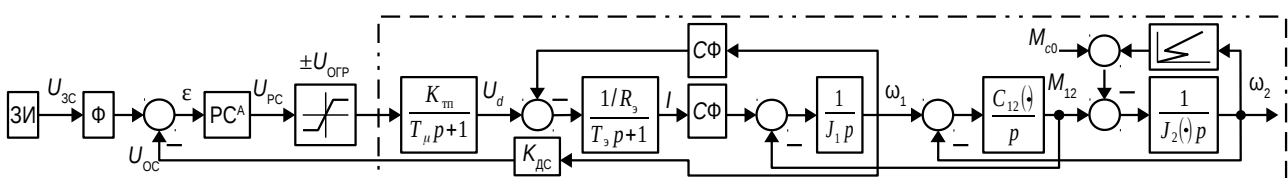


Рис. 2. Структурная схема двухмассовой системы с астатическим регулятором скорости РС<sup>А</sup>

$$n_2 = \frac{\Omega_{12}^2}{T_C} \frac{\alpha_6}{\omega_0^6} n_2 > 0; \quad (7)$$

$$n_1 = \frac{\Omega_{12}^2}{T_C} \left[ \frac{\alpha_5}{\omega_0^5} + \frac{\gamma}{(\gamma-1)} \Omega_{12}^2 n_2 \right], n_1 > 0; \quad (8)$$

$$n_0 = \frac{1}{\frac{\gamma|\beta_c|}{C_{12}} - T_C(\gamma-1)} \times \left[ \frac{\Omega_{12}^2}{\omega_0^4} \alpha_4 - \frac{\gamma}{\omega_0^2} \alpha_2 - \frac{\gamma|\beta_c|}{C_{12}\omega_0} \alpha_1 + \frac{\gamma^2}{\Omega_{12}^2} \alpha_0 - \right. \\ \left. - \gamma \left( \frac{\beta_c}{C_{12}} \right)^2 + \left( \frac{\gamma}{\gamma-1} - \gamma \right) n_1 - T_C \Omega_{12}^2 n_2 \right]; \quad (9)$$

$$m_0 = \alpha_0 > 0; \quad (10)$$

$$m_1 = \frac{\alpha_1}{\omega_0} + \frac{\alpha_0|\beta_c|}{C_{12}} + n_0, m_1 > 0, \text{ если } n_0 > 0; \quad (11)$$

$$m_{21} = \frac{1}{\gamma} \left[ \frac{\Omega_{12}^2}{\omega_0^4} \alpha_4 - T_C n_0 + \frac{\gamma}{\gamma-1} n_1 - \Omega_{12}^2 T_C n_2 \right]; \quad (12)$$

$$m_{22} = \frac{C_{12}}{|\beta_c|} \left[ \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2 \omega_0} \alpha_1 + \frac{\gamma|\beta_c|}{\Omega_{12}^2 C_{12} \alpha_0} + T_C n_1 - \right. \\ \left. - n_2 - \frac{\alpha_3}{\omega_0^3} + \left( \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} - \frac{\gamma}{(\gamma-1)\Omega_{12}^2} \right) n_0 \right]. \quad (13)$$

Неоднозначность коэффициентов  $m_{21}$  и  $m_{22}$  несколько усложняет решаемую задачу, так как выбором соответствующей величины среднегеометрического корня не только должно быть обеспечено равенство  $m_{21} = m_{22}$ , но и положительность  $n_0$  и  $m_2$ , что гарантирует физическую реализуемость регулятора.

Поиск среднегеометрического корня  $\omega_0$ , отвечающего указанным условиям, может быть осуществлён по уравнению, следующему из равенства  $m_{21} = m_{22}$ , а именно:

$$D\omega_0^6 + \alpha_1 E\omega_0^5 - \alpha_2 A\gamma\omega_0^4 - \alpha_3\omega_0^3 - \alpha_4 F\omega_0^2 + \alpha_5 B\frac{\Omega_{12}^2}{T_C}\omega_0 + \alpha_6 C\frac{\Omega_{12}^2}{T_C} = 0, \quad (14)$$

где  $A = \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2 \left( \frac{\gamma|\beta_c|}{C_{12}} - T_C(\gamma-1) \right)}$ ;

$$B = T_C - \frac{|\beta_c|}{C_{12}(\gamma-1)} + A \left( \frac{\gamma}{\gamma-1} - \gamma \right);$$

$$C = \left( \frac{B\gamma}{T_C(\gamma-1)} - AT_C\Omega_{12}^2 + \frac{T_C|\beta_c|\Omega_{12}^2}{C_{12}\gamma} - 1 \right);$$

$$D = \alpha_0 \left( \frac{\gamma|\beta_c|}{\Omega_{12}^2 C_{12}} + A \frac{\gamma^2}{\Omega_{12}^2} \right) - A\gamma \left( \frac{\beta_c}{C_{12}} \right)^2;$$

$$E = \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} - \frac{A\gamma|\beta_c|}{C_{12}}; F = \frac{\Omega_{12}^2|\beta_c|}{\gamma C_{12}} - \Omega_{12}^2 A.$$

Нужно иметь в виду, что уравнение (14) не всегда даёт требуемую вещественную величину  $\omega_0$ . Ряд значений  $\omega_0$  могут быть отрицательными или комплексно-сопряжёнными числами. Поэтому поиск  $\omega_0$  по уравнению (14) носит итерационный характер и связан с коэффициентами  $\alpha_i$  выбираемого распределения.

Процедура поиска необходимого распределения

и желаемой величины среднегеометрического корня может быть упрощена построением зависимостей  $n_0$  (9),  $m_{21}$  (12) и  $m_{22}$  (13) в функции произвольно задаваемого  $\omega_0$ . На рис. 3 показан характер зависимостей  $n_0$ ,  $m_{21}$ ,  $m_{22}$  от  $\omega_0$  распределения Баттерворта шестого порядка с видоизменёнными коэффициентами нормированного полинома:

$$\alpha_0 = 1; \alpha_1 = 3,86; \alpha_2 = 7,46; \alpha_3 = 11,27;$$

$$\alpha_4 = 7,46; \alpha_5 = 3,58; \alpha_6 = 1.$$

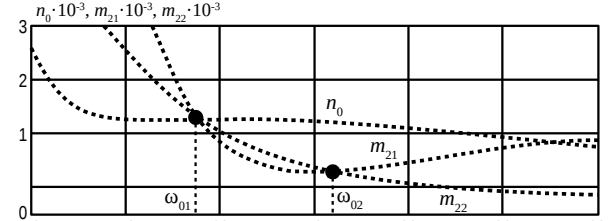


Рис. 3. Зависимости для коэффициентов полиномов  $M(p)$  и  $N(p)$  от величины  $\omega_0$  для распределения по Баттерворту

Таким образом, имеется возможность не только выбирать нужное распределение, обеспечивающее требуемое качество переходного процесса, но и задавать величину среднегеометрического корня  $\omega_0$  в большей или меньшей степени отстоящим от  $\Omega_{12}$ .

Допустим, что по представленным методикам выбрано, удовлетворяющее требованиям к электроприводу устройства «Экспресс», распределение полюсов, найдена величина среднегеометрического корня замкнутой системы  $\omega_0$  и рассчитаны по формулам (7)÷(12) положительные значения коэффициентов полиномов  $M(p)$  и  $N(p)$ . Тогда передаточная функция астатического РС пониженного порядка на основании (3) представляется в виде:

$$W_{PC.1}^A(p) = \frac{[(T_{\mu} + T_{\Sigma})p + 1](T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)}{T_{\Pi} p (T_3^2 p^2 + T_4 p + 1)}, \quad (15)$$

где  $T_{\Pi} = \frac{n_0 K_0}{m_0}$ ;  $T_1 = \frac{m_1}{m_0}$ ;  $T_2 = \frac{m_2}{m_0}$ ;  $T_3 = \frac{n_2}{n_0}$ ;  $T_4 = \frac{n_1}{n_0}$  – постоянные интегрирования и времени.

С целью уменьшения перерегулирования до значения, соответствующего выбранному распределению, форсирующее звено  $(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)$  числителя передаточной функции (15) должно быть скомпенсировано установкой на входе системы фильтра  $\Phi$  с одной из передаточных функций:

$$W_{\Phi 1}(p) = \frac{1}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}; W_{\Phi 2}(p) = \frac{1}{T_1 p + 1}. \quad (16)$$

Таким образом, синтезирована передаточная функция астатического РС пониженного порядка. Она обеспечивает системе с неустойчивым объектом астатизм первого порядка при работе устройства на падающем участке нелинейной нагрузки, когда  $\beta_c < 0$ , а также в случае изменяющейся нагрузки, которая характерна для механической характеристике АД при  $\beta_c = 0$ . В системе будут отсутствовать ошибки по управлению и возмущению. Это в конечном итоге повышает точность работы системы при идентификации механической характеристики АД.

Рекомендуется и вторая методика синтеза астатического РС. Она основана на использовании традиционного для СПР метода расчёта пропорционально-интегрального регулятора взамен пропорционального.

Допустим, что с использованием метода полиномиальных уравнений для структуры рис. 2 синтезирован статический РС пониженного порядка, имеющий передаточную функцию [2]:

$$W_{PC}(p) = \frac{K_{PC}^*[(T_u + T_\Sigma)p + 1](T_1^*p + 1)}{(T_3^{*2}p^2 + T_4^*p + 1)}, \quad (17)$$

где  $K_{PC}^* = \frac{m_0^* R_\Sigma |\beta_C|}{n_0 K_{TP} K_{ДС} C \Phi}$ ,  $T_1^* = \frac{m_1^*}{m_0^*}$ ,  $T_3^{*2} = \frac{n_2^*}{n_0^*}$  найдены при известной величине среднегеометрического корня. Тогда, определив значение  $T_0^* = 1/\omega_0^*$ , в состав  $W_{PC}(p)$  может быть введена интегральная часть с постоянной времени  $4T_0^*$ . В этом случае передаточная функция астатического РС представляется как:

$$W_{PC.2}^A(p) = \frac{K_{PC}^*[(T_u + T_\Sigma)p + 1](T_1^*p + 1)(4T_0^*p + 1)}{4T_0^*p(T_3^{*2}p^2 + T_4^*p + 1)}. \quad (18)$$

Обозначим  $T_u^* = 4T_0^*/K_{PC}^*$ ,  $T_2^{*2} = 4T_0^*T_1^*$ ,  $T_1^{**} = T_1^* + 4T_0^*$ .

Тогда окончательно для передаточной функции астатического РС пониженного порядка, найденной по второй методике, будем иметь:

$$W_{PC.2}^A(p) = \frac{[(T_u + T_\Sigma)p + 1](T_2^{*2}p^2 + T_1^{**}p + 1)}{T_u^*p(T_3^{*2}p^2 + T_4^*p + 1)}, \quad (19)$$

что соответствует виду передаточной функции  $W_{PC.1}^A(p)$  (15).

Таким образом, синтезированы, отличающиеся своими значениями, две передаточные функции астатического РС пониженного порядка. Они обеспечивают системе с неустойчивым объектом астатизм первого порядка при работе ЭП на падающем участке нелинейной нагрузки, когда  $\beta_C < 0$ , а также в случае постоянной нагрузки  $M_C = M_{C0} = \text{const}$  при  $\beta_C = 0$ . В системе будут отсутствовать ошибки по управлению и возмущению. Это, в конечном итоге, повышает точность работы ЭП по идентификации механической характеристики АД.

Проверка работоспособности синтезированной одноконтурной системы регулирования скорости с астатическим РС пониженного порядка рис. 2, работающей совместно с испытываемым АД, проводилась компьютерными исследованиями ЭП со следующими параметрами двигателя типа 2ПН112 –  $P_n = 2,2$  кВт;

$U_n = 220$  В;  $I_n = 13,4$  А;  $\omega_n = 157$  с<sup>-1</sup>;  $M_n = 14$  Нм и тиристорного преобразователя:  $K_{TP} = 27,7$ ;  $T_\mu = 0,003$  с;  $R_\Sigma = 4,36$  Ом;  $T_{м,дв} = 0,054$  с;  $L_\Sigma = 0,04$  Гн;  $T_\Sigma = 0,009$  с;  $J_{дв} = J_1 = 0,018$  кгм<sup>2</sup>;  $m = T_{м,дв} / T_\Sigma = 6$ ;  $\beta = (C\Phi)^2 / R_\Sigma = 0,33$  Нмс;  $\omega_{0,дв} = 1/\sqrt{T_{м,дв}T_\Sigma} = 45,45$  с<sup>-1</sup> при  $U_{\Sigma} = 10$  В, времени разгона от задатчика интенсивности (ЗИ)  $t_p = 12$  с и  $K_{ДС} = 0,0637$  В·с.

Для синтеза РС взяты параметры АД, отвечающие наиболее ответственному, с точки зрения динамики, режиму его работы на участке игольчатого провала момента с  $\beta_C < 0$ .

При моделировании принято, что нелинейная нагрузка, характеризующая механическую характеристику АД, имеет следующие параметры:

$$M_c = \begin{cases} M_{c0}\beta_{c1}\omega_2 & 0 < \omega_2 < 30 \text{ с}^{-1} & \beta_{c1} = 0,1 \text{ Нмс} \\ \beta_{c2}\omega_2 & 20 \leq \omega_2 \leq 30 \text{ с}^{-1} & \beta_{c2} = 0,7 \text{ Нмс} \\ -\beta_{c3}\omega_2 & 30 \leq \omega_2 \leq 32 \text{ с}^{-1} & \beta_{c3} = -7 \text{ Нмс} \\ \beta_{c4}\omega_2 & 32 \leq \omega_2 \leq 40 \text{ с}^{-1} & \beta_{c4} = 1 \text{ Нмс} \\ \beta_{c5}\omega_2 & 40 \leq \omega_2 \leq 120 \text{ с}^{-1} & \beta_{c5} = 0,06 \text{ Нмс} \\ \beta_{c5}\omega_2 & 120 \leq \omega_2 \leq 157 \text{ с}^{-1} & \beta_{c5} = 0,95 \text{ Нмс} \end{cases} \quad (20)$$

Определение параметров передаточной функции РС  $W_{PC.1}^A(p)$  (15) выполнено при величине среднегеометрического корня  $\omega_0 = 71,24$  с<sup>-1</sup>, а передаточной функции  $W_{PC.2}^A(p)$  при  $\omega_0 = 68,5$  с<sup>-1</sup>, они имеют следующее значение:

$$W_{PC.11}^A(p) = \frac{(0,012p + 1)(2,96 \cdot 10^{-4}p^2 + 0,07p + 1)}{0,017p(4,24 \cdot 10^{-5}p^2 + 0,011p + 1)},$$

$$W_\Phi(p) = \frac{1}{0,07p + 1}, \quad (21)$$

$$W_{PC.2}^A(p) = \frac{(0,012p + 1)(1,576 \cdot 10^{-3}p^2 + 0,085p + 1)}{0,017p(1,75 \cdot 10^{-4}p^2 + 0,0358p + 1)},$$

$$W_\Phi(p) = \frac{1}{0,085p + 1}. \quad (22)$$

Исследование системы рис. 2 с РС (21) и (22) показало, что более эффективной является система с РС (22), показанная на рис. 4. Полученная с ее помощью динамическая механическая характеристика, соответствующая использованию квазистатического метода исследования механических характеристик АД показана на рис. 5. Исходя из данного рисунка видно полное совпадение значений  $M_n$ ,  $M_{\max}$ ,  $M_{\min}$  динамической характеристики АД значениям исходной статической характеристики на рис. 1.

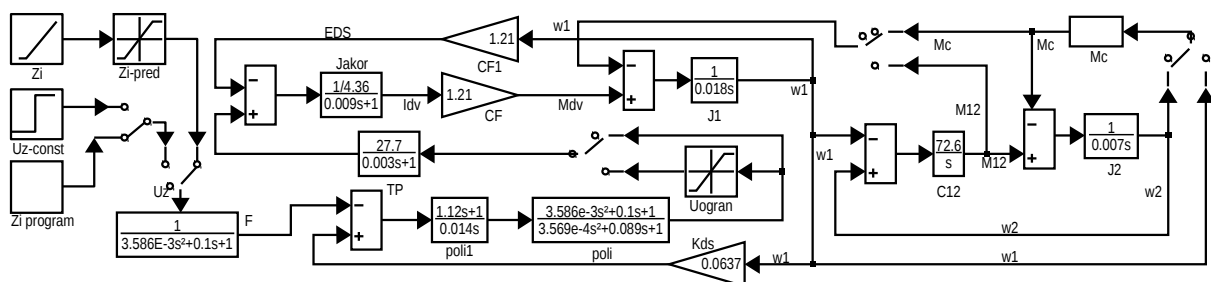


Рис. 4. Математическая модель устройства «Экспресс» с  $W_{PC.2}^A(p)$

Для обеих характеристик:

$$M_n = 28 \text{ Н·м}, M_{\max} = 37 \text{ Н·м}, M_{\min} = 22 \text{ Н·м}.$$

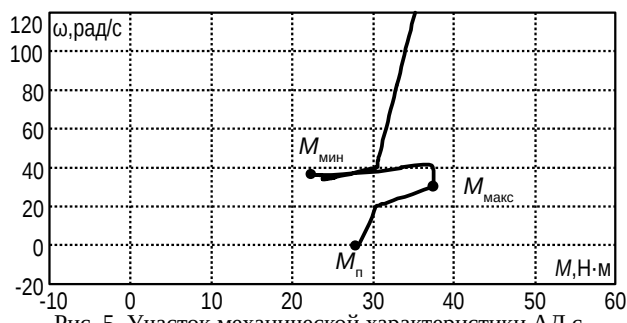


Рис. 5. Участок механической характеристики АД с провалами момента

**Выводы.** 1) Обоснована возможность использования полиномиального метода для синтеза астатического РС пониженного порядка для двухмассового исходно неустойчивого ЭП с упрощённой структурой без внутреннего контура тока, предотвращающего колебания, связанные с упругостью кинематической линии, и автоколебательные режимы, обусловленные нелинейностью нагрузки; 2) Синтезированные астатические регуляторы обеспечивают высокое быстродействие и точность поддержания скорости при широкой вариации параметров механической характеристики АД; 3) Показано, что обе предложенные методики синтеза астатических РС пониженного порядка приводят к мало отличающимся результатам, но предпочтение следует отдать регулятору синтезированному по второй методике.

#### Список литературы

1. Акимов Л. В., Пирожок А. В. Математическая модель электромеханической системы дозатора со спирально-винтовым транспортером и нелинейной нагрузкой. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Сер.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Харків: НТУ «ХПІ». 2001, вип. 10. С.43-45.
2. Акимов Л. В., Долбня В. Т., Клепиков В. Б., Пирожок А. В. Синтез упрощенных структур двухмассовых электроприводов с нелинейной нагрузкой. Харьков: НТУ «ХПИ», Запорожье: ЗНТУ, 2002. 160 с.
3. Клепиков В. Б., Осичев А. В. Определение границ устойчивости электропривода с отрицательным вязким трением с учётом упругости кинематической цепи. *Електричество*. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/27384>.

(дата обращения 20.04.2019).

4. Залыаев С. Р. О применении метода полиномиальных уравнений для синтеза непрерывных систем электропривода. *Електротехніка*. URL: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=33288741>. (дата обращения 04.04.2019).
5. Акимов Л. В., Колотило В. И., Марков В. С. *Динамика двухмассовых систем с нетрадиционными регуляторами скорости и наблюдателями состояния*. Харьков: ХГПУ, 2000. 93 с.
6. Акимов Л. В., Марков В. С. Методики синтеза астатической системы подчиненного регулирования скорости неустойчивого двухмассового объекта. *Інтегровані технології та енергозбереження*. Харків: ХДПУ, 2000, №1. С.41-52.

#### References (transliterated)

1. Akimov L. V., Pirozhok A. V. Matematicheskaya model' elektromekhanicheskoy sistemy dozatora so spiral'no-vintovym transporterom i nelinejnoy nagruzkoy [Mathematical model of the electro-mechanical system of the dispenser with a spiral-helix conveyor and non-linear load]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut»*. Ser.: *Problemy avtomatyzovanoho elektropriyvoda. Teoriia i praktyka* [Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Problems of automated electrodrives. Theory and practice]. Kharkiv: NTU «KhPI». 2001. pp. 43-45.
2. Akimov L. V., Dolbnya V. T., Klepikov V. B., Pirozhok A. V. *Sintez uproschennykh struktur dvuhmassovykh elektropriyvodov s nelinejnoy nagruzkoy* [Synthesis of simplified structures of two-mass electric drives with non-linear load]. Khar'kov: NTU «KHPI», Zaporozh'ye: ZNTU, 2002. 160 p.
3. Klepikov V. B., Osichev A. V. *Opreделение granic ustojchivosti jelektropriyvoda s otricatel'ny'm vjazkim treniem s uchetoм uprugosti kinemacheskoy cepi* [Determination of the stability limits of the electric drive with a negative viscous friction, taking into account the elasticity of the kinematic chain]. *Jelektrichestvo* [Electricity]. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/27384>. (accessed 20.04.2019).
4. Zaljaeev S. R. *O primenenii metoda polinomial'nykh uravnenij dlja sinteza nepreryvnykh sistem jelektropriyvoda* [On the application of the method of polynomial equations for the synthesis of continuous electric drive systems]. *Jelektrotehnika* [Electrical Engineering]. URL: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=33288741>. (accessed 04.04.2019).
5. Akimov L. V., Kolotilo V. I., Markov V. S. *Dinamika dvuhmassovykh sistem s netradicionnymi reguljatorami skorosti i nablyudatelyami sostoyaniya* [Dynamics two-mass systems with unconventional speed regulators and state observers]. Har'kov: HGPU, 2000. 93 p.
6. Akimov L. V., Markov V. S. *Metodiki sinteza astaticheskoy sistemy podchinennogo regulirovaniya skorosti neustojchivogo dvuhmassovogo ob'ekta* [Methods of synthesis of an astatic system of a subordinate speed control of an unstable two-mass object]. *Integrirovannye tekhnologii i energosberezhenie* [Integrated technology and energy saving]. Kharkiv: KHDPU. 2000, №1. pp. 41-52.

Поступила 10.05.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Кунченко Тетяна Юріївна (Кунченко Татьяна Юрьевна, Kunchenko Tatiana Yur'evna)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; e-mail: medvedeva\_1412@ukr.net

**Пирожок Андрій Володимирович (Пирожок Андрей Владимирович, Pirozhok Andrej Vladimirovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», завідувач кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: apirozhok@gmail.com

**Кутовой Юрій Миколайович (Кутовой Юрий Николаевич, Kutovoj Yuriy Nikolaevich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; e-mail: kutovoj.yuriy@ukr.net

**Обруч Ігор Володимирович (Обруч Игорь Владимирович, Obruch Ihor Vladimirovich)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; e-mail: obruch@kpi.kharkov.ua

**Кашеев Олексій Валерійович (Кашеев Алексей Валерьевич, Kascheev Aleksej Valerievich)** – Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», завідувач лабораторії; м. Харків, Україна; e-mail: kascheew1974@gmail.com