

СИНТЕЗ ПОЛИНОМИАЛЬНЫМ МЕТОДОМ УПРОЩЕННОЙ СТРУКТУРЫ ДВУХМАССОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С РЕГУЛЯТОРОМ ЭДС ПОНИЖЕННОГО ПОРЯДКА ПРИ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКЕ

Акимов Л.В., Пирожок А.В.

Национальный технический университет «ХПИ»

Запорожский национальный технический университет

pirozhek@zstu.zp.ua

A polynomial equation method with application of normalized characteristic polynomials is employed to synthesize a single-loop structure of a double-mass electric drive. A reduced-order transfer function of the electromotive force regulator is determined. The system is characterized by high response speed and operation accuracy corresponding to application of a speed regulator and provides elimination of both elastic oscillations and self-oscillation modes resulted from non-linearity of speed-torque characteristic of reactive load distinguished by randomness.

Механическая часть маломощного электропривода (ЭП) с параметром $m=T_{м1}/T_{э}>4$ спирально-винтового транспортера (СВТ), работающего в качестве дозатора сыпучих материалов, при непосредственном сочленении двигателя с рабочим органом-спиралью, представляется в виде двухмассовой системы [1]. Особенность этой системы заключается в том, что в режимах загрузки и выгрузки при длине транспортера в 5÷10 метров имеет место широкий диапазон изменения жесткости спирали $2,9 \leq C_{12}(\cdot) \leq 72,6$ Н·м/рад и момента инерции второй массы $0,0021 \leq J_2(\cdot) \leq 0,041$ кг·м². Кроме того, в силу наличия трения между спиралью и перемещаемым сыпучим материалом (комбикорм, мел, цемент, песок и т.д.), при определенной скорости вращения двигателя наблюдается проскальзывание, что обуславливает нелинейный характер реактивной нагрузки, показанной на рис.1. Это при определенных параметрах ЭП и его вынужденной работе в режиме точного дозирования на падающем участке характеристики нагрузки приводит к неустойчивости объекта регулирования.

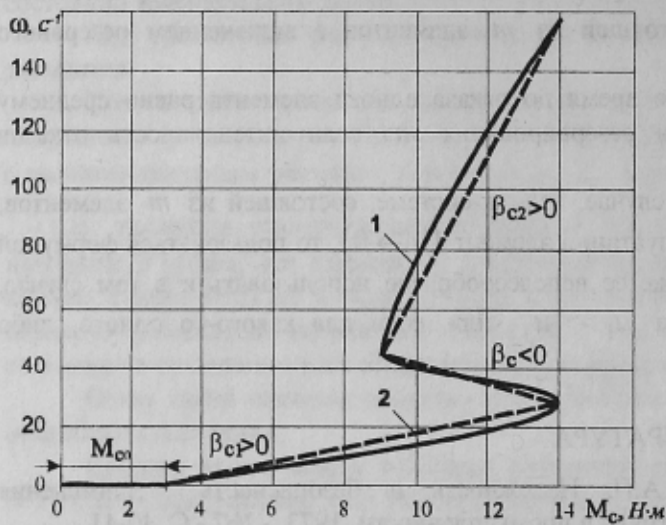


Рисунок 1 – Механическая характеристика нелинейной нагрузки СВТ (1) и ее линейзация (2)

Для данного исходно неустойчивого двухмассового электромеханического объекта (ДЭМО) с двигателем постоянного тока установлено [2,3], что применение традиционно настроенных пропорционального и пропорционально-интегрального регуляторов скорости (РС) при замыкании системы обратной связи по скорости двигателя не обеспечивает требуемой динамики ЭП, а при определенном значении коэффициента жесткости $\beta_c < 0$ падающего участка механической характеристики нагрузки, носящего к тому же случайный характер, приводит к расходящимся колебательным процессам.

Предложено максимально упростить структуру ЭП за счет отказа от обратной связи по току и использовании только одной связи по скорости. Однако данная система, структурная схема которой показана на рис.2, требует установки тахогенератора, который при мощности двигателя в 0,75 ÷ 2,2 кВт приводит к существенному ее усложнению и повышению стоимости ЭП. Рациональным при этом является общеизвестная [4,5] замена обратной связи по скорости двигателя ω_1

обратной связью по его ЭДС E .

Вместе с тем традиционно построенные системы подчиненного регулирования (СПР) с датчиком ЭДС имеют известные недостатки, связанные с уменьшением быстродействия по контуру регулирования скорости и низкую точность поддержания заданной скорости при действии нагрузки.

Покажем, что этих недостатков можно избежать, если определение передаточной функции регулятора ЭДС (РЭ) в системе с датчиком ЭДС (ДЭ) основано на использовании полиномиального метода синтеза аналогично тому, как это впервые сделано в [3].

В соответствии с рис.1 при пренебрежении обратной связью по ЭДС двигателя, а также с учетом работы ЭП на падающем участке нелинейной характеристики нагрузки, когда $\beta_c < 0$, найдена передаточная функция объекта регулирования контура скорости, имеющая вид

$$W_{OB}(p) = \frac{U_{OC}(p)}{U_{PC}(p)} = \frac{K_{TP} \cdot C\Phi \cdot K_{ДС}}{R_{Э} |\beta_C|} \left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 - \frac{|\beta_C|}{C_{12}} p + 1 \right) \left[(T_{\mu} + T_{Э}) p + 1 \right] \left(\frac{T_C}{\Omega_{12}^2} p^3 - \frac{\gamma}{(\gamma - 1)\Omega_{12}^2} p^2 + T_C p - 1 \right), \quad (1)$$

где $\gamma = (J_1 + J_2)/J_1$ – параметр, характеризующий соотношение масс; $\Omega_{12} = \sqrt{C_{12}\gamma/J_2}$ – резонансная частота упругих колебаний, c^{-1} ; $T_c = (J_1 + J_2)/|\beta_c|$ – механическая постоянная времени, с;

$$K_0 = \frac{K_{TP} C\Phi \cdot K_{ДС}}{R_{Э} |\beta_C|} - \quad (2)$$

- коэффициент усиления объекта с датчиком скорости ДС.

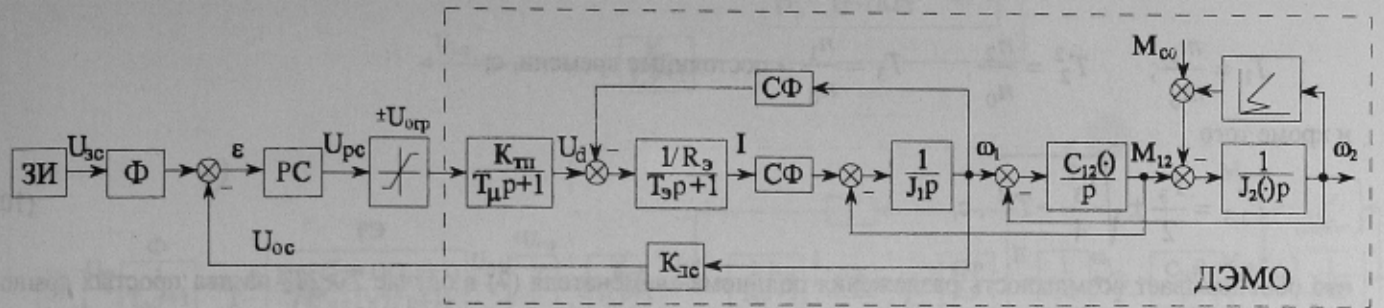


Рисунок 2 – Структурная схема двухмассовой системы регулирования скорости СВТ без внутреннего контура тока

Допустим, что согласно методу полиномиальных уравнений [6] передаточная функция объекта (1) представлена в виде

$$W_{OB}(p) = \frac{P_-(p)}{Q(p)} = \frac{K_0 P_{к+}(p) P_{н+}(p) P_-(p)}{Q_{к+}(p) Q_{н+}(p) Q_-(p) p^s}, \quad (3)$$

и найдены степени всех полиномов, входящих в (3), где $P_{к+}(p)$, $Q_{к+}(p)$ – полиномы, имеющие в качестве своих нулей только левые нули и полюсы объекта, компенсируемые при помощи регулятора; $P_{н+}(p)$, $Q_{н+}(p)$ – полиномы, содержащие только нули и полюсы объекта, в компенсации которых нет необходимости; $P_-(p)$, $Q_-(p)$ – полиномы, содержащие правые и нейтральные нули и полюсы, за исключением расположенных в точке $p=0$, компенсация которых неприемлема из-за нарушения условия грубости; s – количество полюсов объекта в точке $p=0$. Тогда, принимая для компенсации регулятором скорости полином $Q_{к+}(p) = (T_{\mu} + T_{Э})p + 1$ при $P_{к+}(p) = 1$ может быть записана его передаточная функция

$$W_{PC}(p) = \frac{Q_{к+}(p) M(p)}{K_0 P_{к+}(p) N(p) p^{v-s}}, \quad (4)$$

где $M(p) = m_i p^i + m_{i-1} p^{i-1} + \dots + m_1 p + m_0$, $N(p) = n_j p^j + n_{j-1} p^{j-1} + \dots + n_1 p + n_0$ – неизвестные полиномы, соответствующей степени i и j ; v – желаемый порядок астатизма замкнутой системы, принимаемый при синтезе статического регулятора $v=0$.

При предварительно найденных степенях полиномов $M(p)$ и $N(p)$, а также степени полинома $G(p)$ характеристического уравнения замкнутой системы, с учетом возможного понижения их порядков на единицу, коэффициенты m_{i-1} и n_{j-1} находятся из полиномиального уравнения синтеза

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

при задании $G(p)$ в виде стандартного или видоизмененного пониженного на единицу степени n распределения

$$G(p) = \alpha_n T_0^n p^n + \alpha_{n-1} T_0^{n-1} p^{n-1} + \dots + \alpha_1 T_0 p + \alpha_0, \quad (6)$$

где $T_0 = 1/\omega_0$ – эквивалентная малая постоянная времени замкнутой системы, отвечающая ее среднегеометрическому корню ω_0 , определяющему ее быстродействие; $\alpha_n, \dots, \alpha_0$ – коэффициенты заданного распределения.

Допустим, что в результате синтеза найдена необходимая величина среднегеометрического корня ω_0 , обеспечена положительность всех коэффициентов m_{i-1} и n_{j-1} полиномов $M(p)$ и $N(p)$, что говорит о физической

реализуемости регулятора. Тогда на основании (4) окончательно для передаточной функции статического РС пониженного порядка будем иметь

$$W_{PC}(p) = \frac{K_{PC} [(T_{\mu} + T_{\varepsilon})p + 1] (T_1 p + 1)}{T_2^2 p^2 + T_3 p + 1} \quad (7)$$

или

$$W_{PC}(p) = \frac{K_{PC} [(T_{\mu} + T_{\varepsilon})p + 1] (T_1 p + 1)}{(T_2^* p + 1) (T_3^* p + 1)}, \quad (8)$$

где $K_{PC} = \frac{m_0}{n_0 K_0} = \frac{m_0 R_{\varepsilon} |\beta_C|}{n_0 K_{TP} C\Phi \cdot K_{ДС}}$ - коэффициент усиления регулятора (9)

$$T_1 = \frac{m_1}{m_0}; \quad T_2^2 = \frac{n_2}{n_0}; \quad T_3 = \frac{n_1}{n_0} \text{ - постоянные времени, с;}$$

и кроме того

$$T_{2,3}^* = \frac{T_3}{2} \pm \sqrt{\frac{T_3^2}{4} - T_2^2}, \text{ с,} \quad (10)$$

что обосновывает возможность разложения полинома знаменателя (7) в случае $T_3 > 2T_2$ на два простых сомножителя знаменателя (8).

Таким образом, при нулевом астатизме замкнутой системы регулирования скорости в качестве РС следует использовать, например ПИГ²-РС, отвечающий передаточной функции (8). При этом система будет иметь легко реализуемый регулятор пониженного порядка и обладать быстродействием, отвечающим ее среднегеометрическому корню ω_0 .

Рассмотрим теперь, показанную на рис.3а, структурную схему ЭП, в котором обратная связь по скорости ω_1 заменена связью по ЭДС двигателя Е. После пренебрежения влиянием ЭДС двигателя исходная структурная схема преобразуется к виду рис.3б.

В соответствии с [7] может быть найдена эквивалентная постоянная времени объекта рис.3 б

$$T_{\mu}^* = \frac{\sum T_{3i} + \sqrt{(\sum T_{3i} + \sum T_{4i})^2 + \sum T_{4i}^2}}{2}, \quad (11)$$

где $\sum T_{3i} = T_{\mu} + T_{\varepsilon}$ - сумма малых инерционностей прямого канала регулирования; $\sum T_{4i} = T_a$ - сумма малых инерционностей цепи обратной связи.

С учетом (11) передаточная функция объекта регулирования контура ЭДС представляется в виде

$$W_{OB}(p) = \frac{U_{OC}(p)}{U_{P\varepsilon}(p)} = \frac{\frac{K_{TP} K_H (C\Phi)^2}{R_{\varepsilon} |\beta_C|} \left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 - \frac{|\beta_C|}{C_{12}} p + 1 \right)}{(T_{\mu}^* p + 1) \left(\frac{T_C}{\Omega_{12}^2} p^3 - \frac{\gamma}{(\gamma-1)\Omega_{12}^2} p^2 + T_C p - 1 \right)}, \quad (12)$$

в котором передаточный коэффициент цепи обратной связи равен

$$K_H = \frac{U_{3\varepsilon.МАКС}}{E_{ДВ.МАКС}}, \quad (13)$$

где $E_{ДВ.МАКС}$ - максимальная ЭДС двигателя; $U_{3\varepsilon.МАКС}$ - напряжение задания, соответствующее $E_{ДВ.МАКС}$.

Умножим левую и правую части (13) на СФ. Легко видеть, что если принять напряжение задания скорости $U_{3\varepsilon} = U_{3\varepsilon.МАКС}$, то

$$K_H C\Phi = \frac{U_{3\varepsilon} C\Phi}{E_{ДВ.МАКС}} = K_{ДС}. \quad (14)$$

Таким образом, коэффициент усиления K_0 объекта (12) остается равным (2).

Как и при синтезе РС разложим передаточную функцию объекта регулирования контура ЭДС (12) на составляющие полиномы в соответствии с формулой (3). В результате получим:

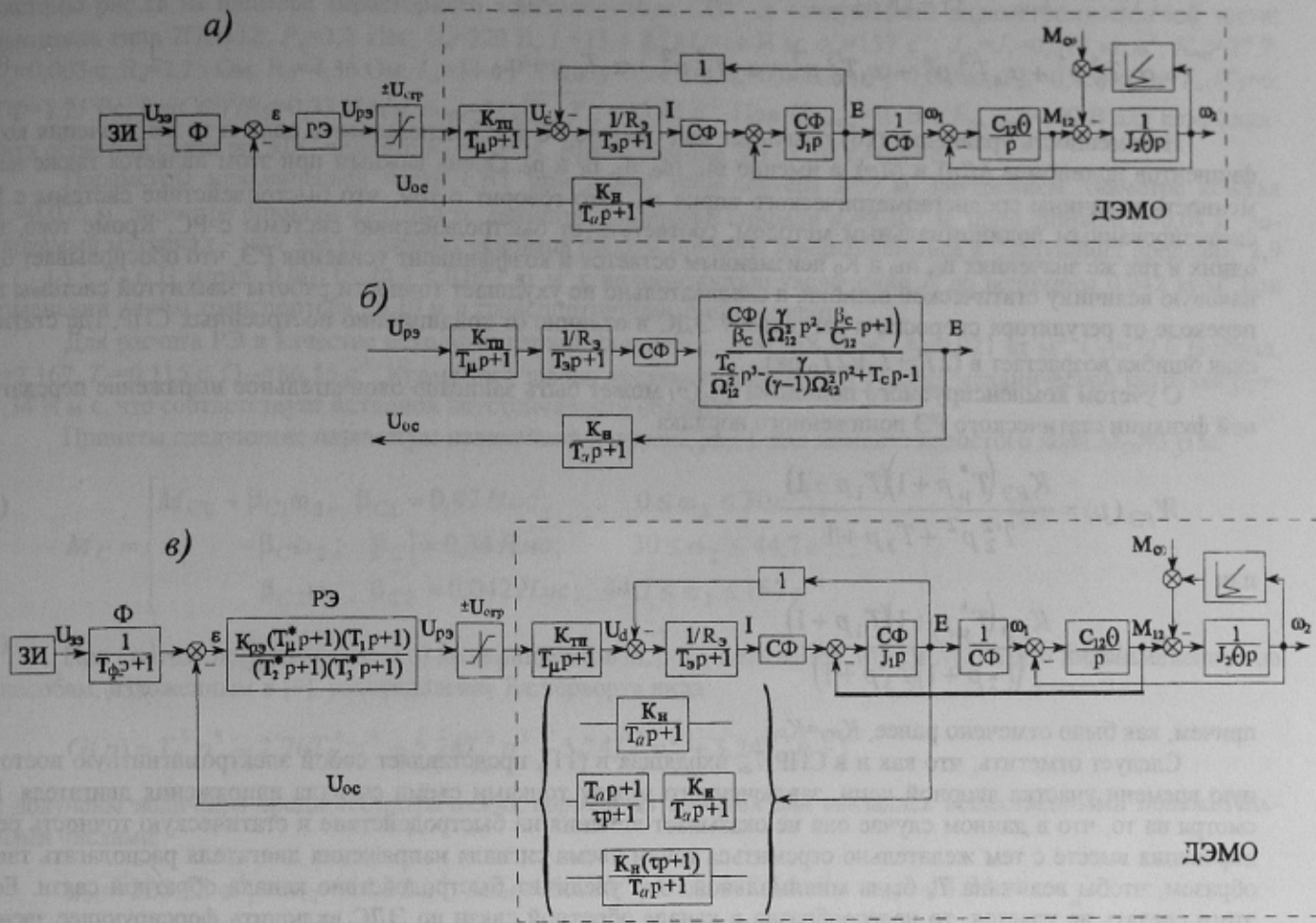


Рисунок 3 – Структурные схемы двухмассовой системы регулирования скорости с РЭ и обратной связью по ЭДС двигателя: а) исходная структурная схема; б) преобразованная структурная схема; в) окончательная структурная схема системы регулирования

$$P_{к+}(p) = 1; \quad P_{н+}(p) = 1; \quad P_{-}(p) = \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 - \frac{|\beta_C|}{C_{12}} p + 1;$$

$$Q_{к+}(p) = T_{\mu}^* p + 1; \quad Q_{н+}(p) = 1; \quad Q_{-}(p) = \frac{T_C}{\Omega_{12}^2} p^3 - \frac{\gamma}{(\gamma-1)\Omega_{12}^2} p^2 + T_C p - 1; \quad s=0, \quad (15)$$

откуда следует, что при синтезе РЭ компенсации подлежит полином знаменателя $Q_{к+}(p) = T_{\mu}^* p + 1$ вместо компенсируемого при синтезе РС полинома $Q_{к+}(p) = (T_{\mu} + T_{\varepsilon})p + 1$.

Из полиномиального уравнения синтеза (5) следует, что входящие в него полиномы объекта $P(p)$, $P_{н+}(p)$, $Q(p)$, $Q_{н+}(p)$, а также степень астатизма замкнутой системы $\nu=0$ остались неизменными. Не изменяются при этом и степени неизвестных полиномов $M(p)$ и $N(p)$ регулятора. Поэтому, как и в случае синтеза РС пониженного порядка, полиномиальное уравнение при синтезе РЭ в развернутом виде представляется как

$$(m_1 p + m_0) \left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 - \frac{|\beta_C|}{C_{12}} p + 1 \right) + (n_2 p^2 + n_1 p + n_0) \left(\frac{T_C}{\Omega_{12}^2} p^3 - \frac{\gamma}{(\gamma-1)\Omega_{12}^2} p^2 + T_C p - 1 \right) p^0 = \\ = \frac{n_2 T_C}{\Omega_{12}^2} p^5 + \left(\frac{n_1 T_C}{\Omega_{12}^2} - \frac{n_2 \gamma}{(\gamma-1)\Omega_{12}^2} \right) p^4 + \left(\frac{m_1 \gamma}{\Omega_{12}^2} - \frac{n_1 \gamma}{(\gamma-1)\Omega_{12}^2} + n_2 T_C + n_0 \frac{T_C}{\Omega_{12}^2} \right) p^3 +$$

$$+ \left(\frac{m_0 \gamma}{\Omega_{12}^2} - \frac{m_1 |\beta_C|}{C_{12}} - \frac{n_0 \gamma}{(\gamma - 1) \Omega_{12}^2} + n_1 T_C - n_2 \right) p^2 + \left(m_1 - \frac{m_0 |\beta_C|}{C_{12}} + n_0 T_C - n_1 \right) p + (m_0 + n_0) =$$

$$= \alpha_5 T_0^5 p^5 + \alpha_4 T_0^4 p^4 + \alpha_3 T_0^3 p^3 + \alpha_2 T_0^2 p^2 + \alpha_1 T_0 p + \alpha_0. \quad (16)$$

Неизменность уравнения (16) позволяет при синтезе РС и РЭ использовать одни и те же значения коэффициентов полиномов $M(p)$ и $N(p)$, а именно m_1 , m_0 , n_2 , n_1 и n_0 . Очень важным при этом является также неизменность величины среднегеометрического корня ω_0 . Это говорит о том, что быстродействие системы с РЭ, синтезированным полиномиальным методом, соответствует быстродействию системы с РС. Кроме того, при одних и тех же значениях n_0 , m_0 и K_0 неизменным остается и коэффициент усиления РЭ, что обосновывает одинаковую величину статической ошибки, а следовательно не ухудшает точности работы замкнутой системы при переходе от регулятора скорости к регулятору ЭДС в отличие от традиционно построенных СПР, где статическая ошибка возрастает в $(2T_\mu + T_a)/2T_\mu$ раз.

С учетом компенсируемого полинома $Q_{\kappa}(p)$ может быть записано окончательное выражение передаточной функции статического РЭ пониженного порядка

$$W_{PЭ}(p) = \frac{K_{PЭ} (T_\mu^* p + 1)(T_1 p + 1)}{T_2^2 p^2 + T_3 p + 1} \quad (17)$$

или

$$W_{PЭ}(p) = \frac{K_{PЭ} (T_\mu^* p + 1)(T_1 p + 1)}{(T_2^* p + 1)(T_3^* p + 1)} \quad (18)$$

причем, как было отмечено ранее, $K_{PЭ} = K_{РС}$.

Следует отметить, что как и в СПР T_a , входящая в (11), представляет собой электромагнитную постоянную времени участка якорной цепи, заключенного между точками съема сигнала напряжения двигателя. Несмотря на то, что в данном случае она не оказывает влияния на быстродействие и статическую точность регулирования вместе с тем желательно стремиться точки съема сигнала напряжения двигателя располагать таким образом, чтобы величина T_a была минимальной. Это увеличит быстродействие канала обратной связи. Если этого сделать не удастся, то целесообразно в канале обратной связи по ЭДС включить форсирующее звено с малой постоянной времени τ . В этом случае передаточной функцией канала обратной связи будет

$$W_{OC}(p) = \frac{K_H (\tau p + 1)}{T_a p + 1}, \quad \tau < T_a. \quad (19)$$

Кроме того, для снижения инерционности цепи обратной связи по ЭДС двигателя до значения, характеризующегося малой постоянной времени τ , может быть использовано дополнительное звено с передаточной функцией

$$W_{OC}(p) = \frac{T_a p + 1}{\tau p + 1}, \quad \tau < T_a, \quad (20)$$

которое в [8] рекомендуется для использования в СПР с РЭ.

Наличие аperiodического звена $K_H/(T_a p + 1)$ в канале обратной связи и форсирующего звена $(T_1 p + 1)$ в передаточной функции РЭ (17) вызывает необходимость включения на входе системы несколько усложненного фильтра Φ с передаточной функцией

$$W_\Phi(p) = \frac{1}{(T_1 p + 1)(T_a p + 1)} \quad (21)$$

во избежание повышенного перерегулирования при возмущении по заданию.

Для удобства практической реализации фильтра $W_\Phi(p)$ его передаточную функцию можно упростить без существенного влияния на качество переходных процессов и принять в виде

$$W_\Phi^*(p) = \frac{1}{(T_1 + T_a)p + 1} = \frac{1}{T_\Phi p + 1}. \quad (22)$$

Окончательная структурная схема упрощенной структуры двухмассового электропривода СВТ при его нелинейной нагрузке с обратной связью по ЭДС двигателя и РЭ представлена на рис.3в.

Следует отметить, что полученная структурная схема эквивалентна системе с обратной связью по скорости двигателя рис.2 и фильтром с постоянной времени T_a на выходе тахогенератора. Возможно применение

синтезированной структуры и для одномассового ЭП.

Для подтверждения правильности полученных результатов проведено математическое моделирование системы рис.3в на примере тиристорного электропривода СВТ со следующими параметрами силовой части: двигатель типа 2ПН112; $P_n=2,2$ кВт; $U_n=220$ В; $I_n=13,4$ А; $M_n=14$ Н м; $\omega_n=157$ с⁻¹; $J_{\text{дв}}=J_1=0,018$ кг м²; $K_{\text{мп}}=27,7$; $T_\mu=0,003$ с; $R_\alpha=2,25$ Ом; $R_\beta=4,36$ Ом; $L_\alpha=14 \cdot 10^{-3}$ Гн; $L_\beta=0,04$ Гн; $T_\alpha=0,0062$ с; $T_\beta=0,009$ с; $T_{\text{м1}}=0,054$ с; $m=T_{\text{м1}}/T_\beta=6$; $C\Phi=1,21$ Вс; $\beta=(C\Phi)^2/R_\beta=0,33$ Н м с; $\omega_{\text{дв}}=1/\sqrt{T_{\text{м1}}T_\beta}=45,45$ с⁻¹. При $U_{\text{зз макс}}=10$ В и $E_{\text{дв макс}}=190$ В для коэффициента обратной связи по ЭДС принято $K_H=0,0524$. Время разгона ЭП от ЗИ $t_p=0,44$ с.

Параметры механической части СВТ при длине транспортера $L=5$ м, внутреннем диаметре кожуха $D_n=0,075$ м, диаметре спирали $d_c=0,065$ м, диаметре проволоки спирали $d_n=8 \cdot 10^{-3}$ м, шаге спирали $h=0,04$ м, дозируемый материал – мел для различных режимов работы приняты изменяющимися в следующих пределах: $2,9 \leq C_{12}(\cdot) \leq 72,6$ Н м/рад; $0,0011 \leq J_2(\cdot) \leq 0,021$ кг м² с возможностью увеличения J_2 до величины $0,042$ кг м² при изменении длины транспортера до 10 м и транспортируемого ингредиента.

Для расчета РЭ в качестве исходных параметров взято: $J_1=0,018$ кг м², $J_2=0,021$ кг м², $C_{12}=72,6$ Н м/рад, $\gamma=2,167$, $T_c=0,115$ с, $\Omega_{12}=86,55$ с⁻¹. Кроме того задана жесткость падающего участка механической нагрузки $\beta_c=0,34$ Н м с, что соответствует исходной неустойчивости объекта.

Приняты следующие параметры нелинейной нагрузки рис. 1 при моменте холостого хода $M_{c0}=3$ Н м.

$$M_C = \begin{cases} M_{C0} + \beta_{C1}\omega_2; & \beta_{C1} = 0,47 \text{ Нмс}; & 0 \leq \omega_2 \leq 30 \text{ с}^{-1}; \\ -\beta_{C0}\omega_2; & |\beta_{C0}| = 0,34 \text{ Нмс}; & 30 \leq \omega_2 \leq 44,7 \text{ с}^{-1}; \\ \beta_{C2}\omega_2; & \beta_{C2} = 0,042 \text{ Нмс}; & 44,7 \leq \omega_2 \leq 157 \text{ с}^{-1}. \end{cases}$$

При синтезе по уравнению (16) коэффициентов m_{i-1} , n_{j-1} полиномов $M(p)$ и $N(p)$ взято видоизмененное по способам, изложенным в [9], распределение Баттерворта вида

$$G(p) = T_0^5 p^5 + 2,76T_0^4 p^4 + 5,24T_0^3 p^3 + 5,24T_0^2 p^2 + 3,24T_0 p + 1$$

и получены величины среднегеометрических корней, из которых два оказались вещественными положительными числами:

$$\omega_{01}=-120,63 \text{ с}^{-1}; \quad \omega_{02}=-84,32 \text{ с}^{-1}; \quad \omega_{03}=98,48 \text{ с}^{-1}; \quad \omega_{04}=68,54 \text{ с}^{-1}; \quad \omega_{05}=-14,24 \text{ с}^{-1}.$$

Для последующего расчета принята величина $\omega_0=68,54$ с⁻¹, которая обеспечивает положительность всех коэффициентов полиномов $M(p)$ и $N(p)$:

$$p_2=4,32 \cdot 10^{-5}, \text{ с}^2; \quad p_1=8,86 \cdot 10^{-3}, \text{ с}; \quad p_0=0,25; \quad m_1=0,034, \text{ с}; \quad m_0=1,25,$$

а также эквивалентную постоянную времени синтезируемой системы $T_0=0,0146$ с.

По соотношениям (9) и (10) найдены параметры РЭ:

$T_1=0,027$ с, $T_2^2=1,75 \cdot 10^{-4}$ с², $T_3=0,036$ с, $T_2^*=0,03$ с², $T_3^*=5,8 \cdot 10^{-3}$ с, $T_\mu+T_\beta=0,012$ с, $K_{РЭ}=K_{РС}=3,5$ и кроме того по формуле (11) величина $T_\mu^*=0,013$ с. В соответствии с формулами (19) и (20) принята малая постоянная времени $\tau=0,002$ с, а также определена постоянная времени фильтра на входе системы $T_\phi=0,029 \div 0,033$ с.

Окончательно получены следующие численные значения передаточных функций РС и РЭ:

$$W_{РС}(p) = \frac{3,5 \cdot (0,012p + 1)(0,027p + 1)}{(5,8 \cdot 10^{-3}p + 1)(0,03p + 1)}; \quad W_{РЭ}(p) = \frac{3,5 \cdot (0,013p + 1)(0,027p + 1)}{(5,8 \cdot 10^{-3}p + 1)(0,03p + 1)}.$$

На рис.4 для сравнения показаны переходные характеристики по управляющему $U_{zc}=U_{\text{зз макс}}=2,95$ В и возмущающему $M_c=M_n=14$ Нм=const воздействиям системы с РС (рис.4а, в) и с РЭ (рис.4 б и г). Видно, что обе системы имеют одинаковое быстроедействие и одну величину статической ошибки $\Delta\omega_{\text{ст}}=6,85$ с⁻¹.

Переходные процессы в системе с РЭ при различных режимах работы ЭП с СВТ приведены на рис.5. Прежде всего отметим, что они отвечают аналогичным процессам в системе с РС.

На рис.5а показана переходная характеристика системы, соответствующая разгону ЭП на номинальную скорость. Процесс рис.5б отвечает разгону ЭП от ЗИ на пониженную скорость, при которой СВТ работает в режиме дозирования. При этом скорость находится на падающем участке механической характеристики нагрузки с жесткостью $\beta_c=-0,34$ Н м с.

На рис. 5 в, г, д, е показана удовлетворительная работа ЭП на падающем участке нелинейной характеристики нагрузки в следующих режимах СВТ:

- уменьшении в 2 раза жесткости падающего участка, т.е. до величины $\beta_c=-0,68$ Нмс (рис.5в);

- уменьшении момента инерции второй массы до величины $J_2=0,007 \text{ кгм}^2$ (рис.5г), что возможно при изменении удельного веса дозируемого материала или при частичном заполнении транспортера;
- увеличении в два раза момента инерции второй массы ($J_2=0,042 \text{ кгм}^2$) по отношению к расчетной (рис.5д), что соответствует, например, увеличению длины транспортера с 5 до 10 метров;
- уменьшении жесткости C_{12} (рис.5е), что отвечает началу высвобождения перемещаемой массы из СВТ.

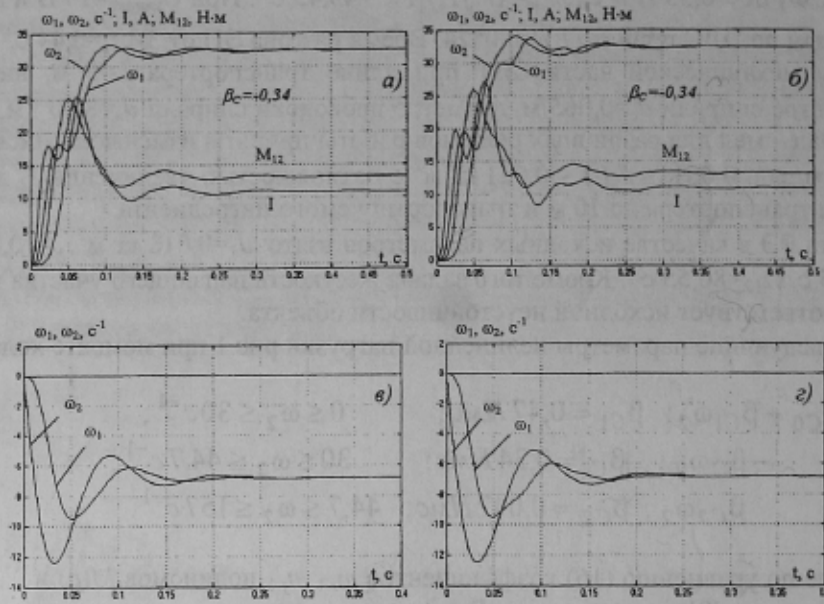


Рисунок 4 – Переходные характеристики по управляющему и возмущающему воздействиям в системах с РС (а, в) и РЭ (б, г)

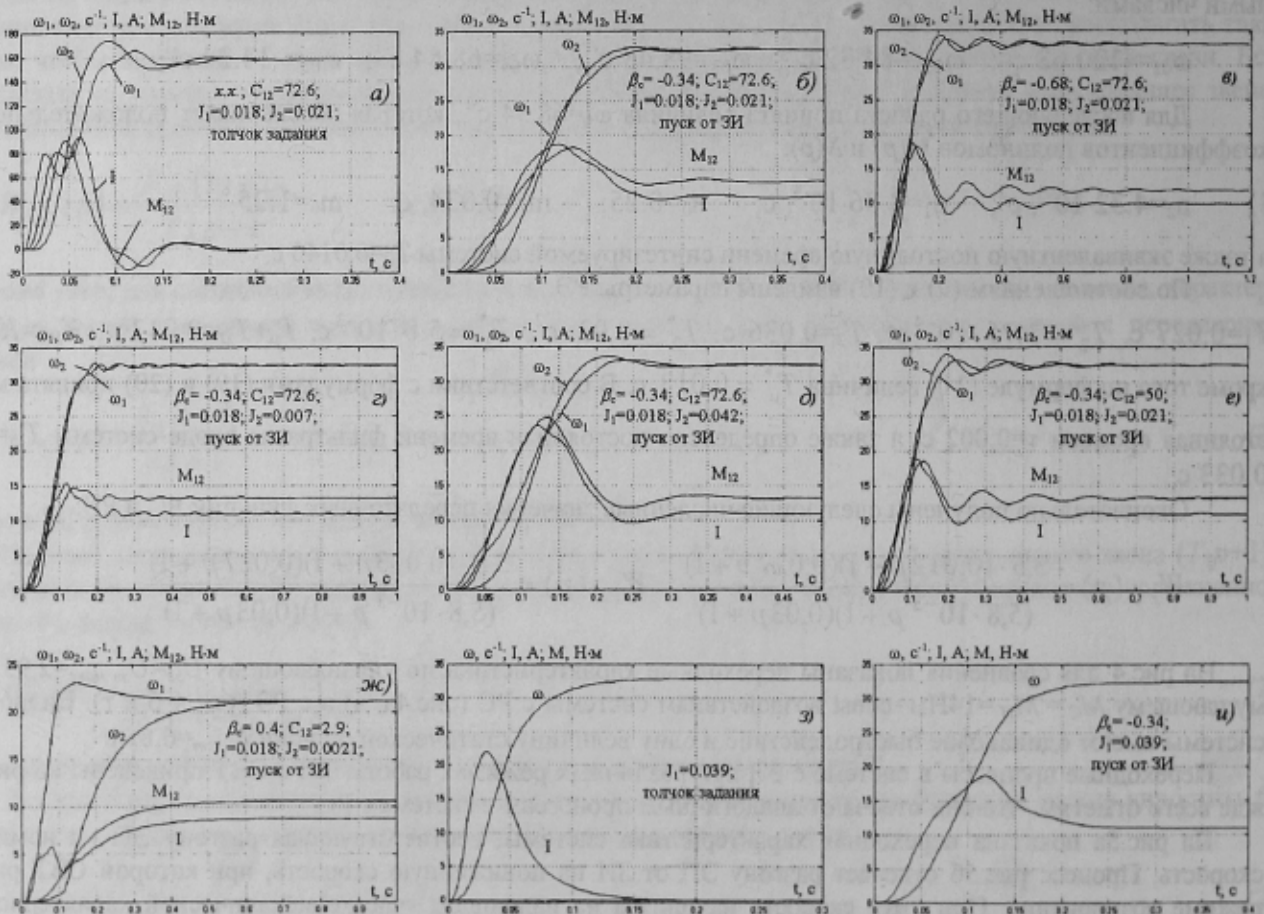


Рисунок 5 – Переходные процессы в системе с РЭ при различных режимах работы СВТ

Процесс рис.5ж отвечает режиму окончательного высвобождения СВТ, когда происходит существенное уменьшение жесткости в 25 раз ($2,9 \leq C_{12} \leq 72,6$) и момента инерции второй массы в 20 раз ($0,0021 \leq J_2 \leq 0,042$). Это приводит к изменению коэффициента соотношения масс γ в пределах $1,13 \leq \gamma \leq 3,5$ и частоты упругих колебаний в пределах $37,5 \leq \Omega_{12} \leq 120 \text{ с}^{-1}$.

Показанный на рис.5з процесс отвечает разгону одномассового ЭП без нагрузки, что характерно для режима работы СВТ в начале загрузки и по окончании выгрузки перемешиваемой массы. При этом момент инерции одномассового ЭП может находиться в пределах $0,018 \leq J_1 \leq 0,042 \text{ кг м}^2$. На рис.5и показан аномальный процесс полного заполнения СВТ, при котором исчезает свободная область гибкой спирали и двухмассовая система становится одномассовой с моментом инерции $J=J_1+J_2=0,039 \text{ кг м}^2$ и к тому же работающей на падающем участке характеристики нагрузки с жесткостью $\beta_c=-0,34 \text{ Н м с}$.

Можно видеть, что синтезированный РЭ без изменения своих параметров обеспечивает удовлетворительное качество переходных процессов, отвечающих всем возможным динамическим режимам СВТ как объекта с изменяющимися не только параметрами, но и переменной структурой.

ВЫВОДЫ

1. Методом полиномиальных уравнений с использованием нормированных характеристических полиномов впервые синтезирована упрощенная одноконтурная структура двухмассового электропривода с найденной передаточной функцией регулятора ЭДС пониженного порядка и датчиком ЭДС двигателя, способствующая ликвидации колебаний, связанных с упругостью кинематики, и автоколебательных режимов, обусловленных нелинейной реактивной нагрузкой, носящей к тому же случайный характер.

2. Обосновано, что при использовании полиномиального метода синтеза исходно неустойчивые одноконтурные двухмассовые системы с регуляторами скорости и ЭДС обладают одинаковыми быстродействием в отработке сигналов задания и точностью поддержания скорости при действии на вал двигателя нагрузки в отличие от традиционно построенных СПР.

3. Подтверждена работоспособность разработанной системы с РЭ во всех технологических режимах СВТ, которые сопровождаются не только изменением жесткости спирали в 25 раз, момента инерции механизма в 20 раз, коэффициента соотношения масс в пределах $1,13 \leq \gamma \leq 3,5$, но в случае когда в силу особенностей работы СВТ двухмассовая структура превращается в одномассовую при холостом ходе транспортера и в режиме полного заполнения пространства кожуха.

4. Разработанная методика синтеза РЭ пониженного порядка может быть распространена на двухмассовые системы с двухконтурной структурой, а также на случай работы системы с РС при наличии фильтра в канале обратной связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акимов Л.В., Пирожок А.В. Математическая модель электромеханической системы дозатора с спирально-винтовым транспортером и нелинейной нагрузкой // Вестник НТУ ХПИ. Выпуск 10. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Харьков. - 2001. - С.43-46.
2. Акимов Л.В., Колотило В.И. Синтез СПР скорости неустойчивого, под влиянием отрицательного вязкого трения, объекта методом полиномиальных уравнений // Электротехника. - 1999. - №3. - С.22-31.
3. Акимов Л.В., Колотило В.И. Синтез статической СПР скорости двухмассового неустойчивого, под влиянием отрицательного вязкого трения, объектом методом полиномиальных уравнений // Электротехника. - 2000. - №5. - С.11-17.
4. Лебедев Е.Д., Неймарк В.Е., Пистрак М.Я., Слежановский О.В. Управление вентилями электроприводами постоянного тока. – М.: Энергия, 1970. – 197 с.
5. Фишбеин В.Г. Расчет систем подчиненного регулирования вентильного электропривода постоянного тока. – М.: Энергия, 1972. – 136 с.
6. Залялеев С.Р. О применении метода полиномиальных уравнений для синтеза непрерывных систем электропривода // Электротехника. - 1998. - №2. - С.48-53.
7. Решмин Б.И., Ямпольский Д.С. Проектирование и наладка систем подчиненного регулирования электроприводов. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
8. Коцегуб П.Х. Синтез вентильних приводів постійного струму. – Київ, ІЗМН, 1997. – 122с.
9. Акимов Л.В., Колотило В.И., Марков В.С. Динамика двухмассовых систем с нетрадиционными регуляторами скорости и наблюдателями состояния. – Харьков. ХПИУ, 2000. – 93 с.