

СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ БАРАБАННОГО ОКОМКОВАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МНОГОЗОННОЙ ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Чернецкая И.Е.,

Курский юго-западный технический университет,

Исаев Е.А., Наговский Д.А.,

Херсонский государственный морская академия

Введение. В настоящее время электропривод широко применяется во всех отраслях промышленности. Применение различных алгоритмов управления электроприводом может повысить количественные и качественные показатели выходной продукции, стабильность и управляемость режимами работы тех или иных агрегатов и т.п. Статья посвящена проблемам управления электроприводом барабанного окомкователя при обработке железорудного концентрата.

Актуальность исследований. При обработке железорудного концентрата сырье комкуется в окатыши для дальнейшего обжига. Технологический процесс окомкования требует поддержания определенной скорости окомкователя, его угла наклона и т.д. для оптимального соотношения качества готовой продукции производительности. В определенные моменты времени технологического процесса целесообразно изменять скорость вращения барабана. Поэтому управление электроприводом барабанного окомкователя является актуальной задачей.

Постановка задачи. Барабанный окомкователь обладает спецификой работы, заключающейся в следующем: при вращении барабана в режиме оптимального гранулообразования восходящий и скатывающийся потоки материала примерно равны по объему, что характеризуется оптимальной частотой вращения ω_2 , определенным моментом сопротивления M_{c2} и соответствующим значением жесткости механической характеристики объекта β_B . При отклонении от указанного режима изменение жесткости механической характеристики барабана либо увеличивается, либо уменьшается, что подтверждается и теорией, и практикой производства окатышей. Необходимо синтезировать такой способ управления скоростью вращения окомкователя, чтобы он учитывал вышеуказанные моменты.

Рассмотрим электропривод барабанного окомкователя как двухмассовую систему. Тогда при различных значениях жесткости механических характеристик электропривода и окомкователя ($\beta < \beta_B$) может наступить автоколебательный режим работы оборудования. Особенно это будет наблюдаться при резком изменении производительности по сырью или скорости. Например, при увеличении скорости вращения барабана ω_2 в переходном процессе первоначально объем ссыпавшегося материала увеличивается, и момент сопротивления вращения M_{c2} уменьшается и т.д.

После завершения переходного процесса при дальнейшем увеличении ω_2 центробежные силы возрастают настолько, что объем ссыпавшейся части

становится меньше объема восходящего потока. Эти специфические особенности определяются эффектом взаимодействия частиц при гранулообразовании и росте размеров гранул.

Динамическая неустойчивость в двухмассовых системах с изменяющейся механической характеристикой нагрузки рассмотрена в [1].

Выполнен синтез передаточной функции регулятора скорости (РС) для двухмассовой системы с управляемым двигателем постоянного тока независимого возбуждения с различной жесткостью механической характеристики в зоне оптимальной скорости вращения [2].

Соотношение масс механической части электропривода: если механизм обладает большим приводным моментом инерции $J_2 > J_1$, $\gamma > 1$. В этом случае основную нагрузку передач составляет динамическая нагрузка, связанная с ускорением и замедлением масс механизма в переходных процессах.

Структурная схема регулирования скорости электропривода барабанного окомкователя представлена на рис. 1.

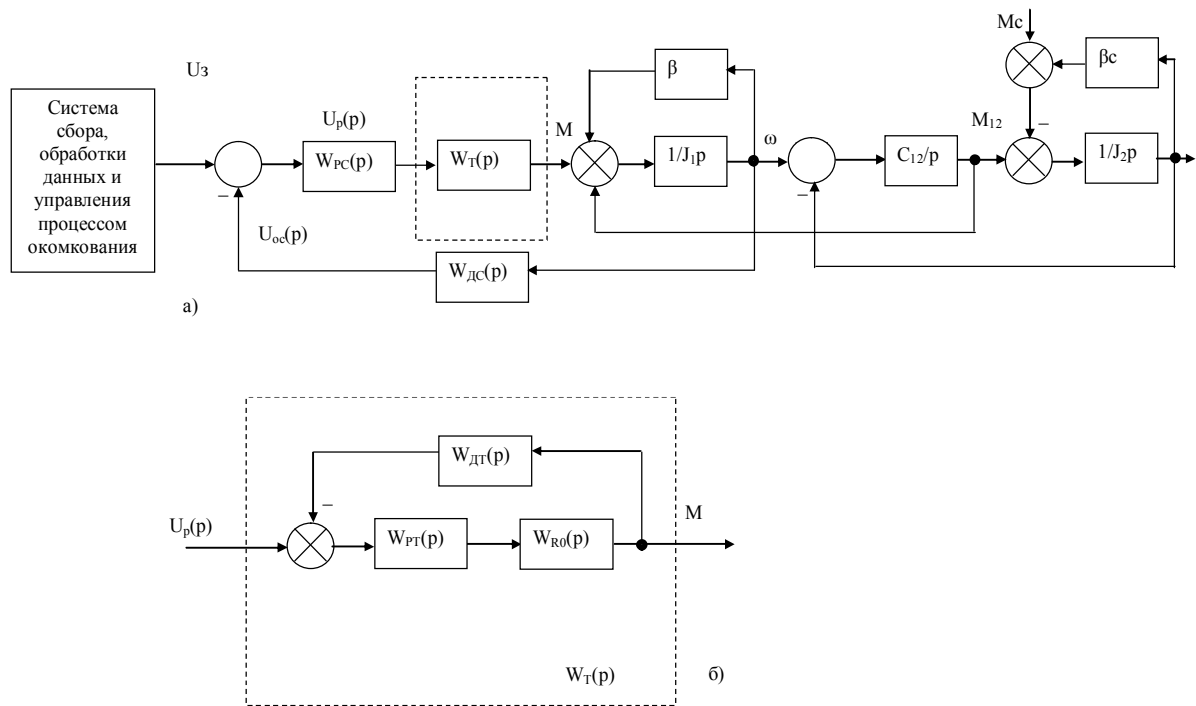


Рис. 1 – Структурная схема системы регулирования скорости электропривода барабанного окомкователя

Определяем передаточную функцию $W_{PT}(p)$ (рис. 1. б). Т.к.
 $W_{R_0} = \frac{N}{R_0}$; $W_{PT} = \frac{K_{PT}}{p}$; $W_{DT} = K_{DT}$.

Тогда передаточная функция прямого участка имеет вид
 $W_{np}(p) = \frac{K_{PT}}{p} \cdot \frac{N}{R_0}$.

Получим

$$W_T(p) = \frac{\frac{K_{PT} \cdot N}{p \cdot R_0}}{1 + \frac{K_{PT} \cdot N}{p \cdot R_0} \cdot K_{DT}} = \frac{K_{PT} \cdot N}{T_T \cdot p + 1} = \frac{K_T}{T_T \cdot p + 1}, \quad (1)$$

где $T_T = \frac{R_0}{K_{PT} \cdot N \cdot K_{DT}}$, c ; K_{PT} – число переключений в секунду с учетом времени срабатывания компараторов-ключей на резисторах в цепи якоря двигателя.

Передаточная функция двухмассового электромеханического объекта, который является объектом для контура регулирования скорости (при $\beta_B \leq 0$ и $\beta < 0$)

$$W_{об}(p) = \frac{U_{oc}(p)}{U_p(p)} = \frac{K \cdot \left(\frac{J_1}{C_{12}} p^2 - \frac{|\beta_B|}{C_{12}} + 1 \right)}{(T_T \cdot p + 1) \left(\frac{J_1 J_2}{C_{12} |\beta|} p^3 + \frac{1}{C_{12}} (J_2 - J_1 \frac{|\beta_B|}{|\beta|}) p^2 + \left(\frac{J_1 + J_2}{|\beta|} - \frac{|\beta_B|}{C_{12}} \right) p + \left(1 - \frac{|\beta_B|}{|\beta|} \right) \right)}, \quad (2)$$

где коэффициент усиления объекта $K = \frac{T_T \cdot K_{ЭМ} \cdot K_{ДС}}{|\beta|}$.

Используем известные соотношения [2]

$$\gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_1}; \Omega_{12}^2 = \frac{C_{12} \xi}{J_2}; T_M = \frac{J_1 + J_2}{|\beta|} \quad (3)$$

Подставив (3) в (2), получим

$$W_{об}(p) = \frac{U_{oc}(p)}{U_p(p)} = \frac{K \cdot \left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 - \frac{|\beta_B|}{C_{12}} + 1 \right)}{(T_T \cdot p + 1) \left(\frac{T_M}{\Omega_{12}^2} p^3 + \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \left(1 - \frac{|\beta_B|}{|\beta|(\gamma - 1)} \right) p^2 + \left(T_M - \frac{|\beta_B|}{C_{12}} \right) p + \left(1 - \frac{|\beta_B|}{|\beta|} \right) \right)}, \quad (4)$$

В связи с тем, что при $|\beta| < |\beta_B|$ $W_{об}(p)$ относится к группе неминимально-фазовых звеньев [3], для синтеза РС воспользуемся методом полиномиальных уравнений [4] и представим функцию (4) в виде

$$W_{об}(p) = \frac{P(p)}{Q(p)} = \frac{K_0 P_{k+}(p) P_{n+}(p) P_-(p)}{Q_{k+}(p) Q_{n+}(p) Q_-(p) p^s}, \quad (5)$$

где $P_{k+}(p)$, $Q_{k+}(p)$ – 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, за исключением расположенных в точке $p = 0$, компенсация которых неприемлема из-за нарушения условий грубости; $s = 0, 1, 2$ – количество полюсов объекта в точке $p = 0$.

Используя сравнение выражения (5) и выражения (4) определим полиномы выражения (5)

$$\begin{aligned}
 P_{k+}(p) &= 1 & P_{n+}(p) &= 1 & P_-(p) &= \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 - \frac{|\beta_B|}{C_{12}} p + 1; \\
 Q_{k+}(p) &= T_T \cdot p + 1; & Q_{n+}(p) &= 1 & s &= 0; \\
 Q_-(p) &= \frac{T_M}{\Omega_{12}^2} p^3 + \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \left(1 - \frac{|\beta_B|}{|\beta|(\gamma - 1)}\right) p^2 + \left(T_M - \frac{|\beta_B|}{C_{12}}\right) p + \left(1 - \frac{|\beta_B|}{|\beta|}\right)
 \end{aligned} \tag{6}$$

Передаточную функцию статического регулятора скорости, на основании используемого метода полиномиальных уравнений, представляем в виде

$$W_{PC}(p) = \frac{Q_{k+}(p)M(p)}{K_0 P_{k+}(p)N(p)p^{v-s}}, \tag{7}$$

где $v = 0$ – порядок астатизма замкнутой системы регулирования скорости; $M(p)$, $N(p)$ – неизвестные полиномы.

$$M(p) = m_i p^i + m_{i-1} p^{i-1} + \dots + m_0; \quad N(p) = n_j p^j + n_{j-1} p^{j-1} + \dots + n_0 \tag{8}$$

Неизвестные полиномы регулятора скорости по выражению (8) определяются в результате решения следующего уравнения синтеза [4]

$$M(p)P_-(p)P_{n+}(p) + N(p)Q_-(p)Q_{n+}(p)p^v = G(p), \tag{9}$$

где $G(p)$ – характеристический полином замкнутой системы, который задается в зависимости от условия обеспечения желаемого характера переходных процессов, в частности, отвечающий одному из известных стандартных распределений или их видоизменениям [5].

Используя выражение передаточной функции объекта (4) и ее принятых составляющих (6), определим степени полиномов (обозначаемые $|\ast|$), входящих в (5)

$$|P| = 2; \quad |P_{k+}| = 0; \quad |P_{n+}| = 0; \quad |P_-| = 2; \quad |Q| = 4; \quad |Q_{k+}| = 1; \quad |Q_{n+}| = 0 \quad |Q_-| = 3; \quad s = 0.$$

Исходя из полученных степеней полиномов, получим полные степени полиномов $M(p)$, $N(p)$ и $G(p)$ при синтезе статической системы

$$i = |Q_-| + |Q_{n+}| + \nu - 1 = 3 + 0 + 0 - 1 = 2; j = |Q_-| - |P_{k+}| - 1 = 4 - 0 - 1 = 3;$$

$$n = i + j + 1 = 6.$$

Упростим реализацию и настройку регулятора скорости, обоснованную в [4], путем уменьшения на единицу степени полиномов $M(p)$, $N(p)$ и $G(p)$. Вместе с тем, необходимо отметить, что указанная процедура упрощения исключает свободный выбор эквивалентной малой постоянной времени T_0 замкнутой системы или среднегеометрического корня $\omega_0 = 1/T_0$ характеристического полинома $G(p)$, который оказывается зависимым от параметров двухмассового электромеханического объекта.

С учетом вышесказанного, окончательно определим степени полиномов $|\tilde{M}|=1; |\tilde{N}|=2; |\tilde{G}|=5$ и запишем выражение (9) в следующей развернутой форме

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

$$\cdot \left(\frac{T_M}{\Omega_{12}^2} p^3 + \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \left(1 - \frac{|\beta_B|}{|\beta|(\gamma-1)} \right) p^2 + \left(T_M - \frac{|\beta_B|}{C_{12}} \right) p + \left(1 - \frac{|\beta_B|}{|\beta|} \right) \right) = \quad (10)$$

$$= \alpha_5 T_0^5 p^5 + \alpha_4 T_0^4 p^4 + \alpha_3 T_0^3 p^3 + \alpha_2 T_0^2 p^2 + \alpha_1 T_0 p + \alpha_0,$$

где $\alpha_0 \dots \alpha_5$ – коэффициенты, соответствующие выбранному стандартному распределению. В качестве примера приведем значения указанных коэффициентов для фильтра Баттерворта:

$$\alpha_5 = 1; \quad \alpha_4 = 3.24; \quad \alpha_3 = 5.24; \quad \alpha_2 = 5.24; \quad \alpha_1 = 3.24; \quad \alpha_0 = 1.$$

Раскрывая левую часть выражения (10), представим его в виде слагаемых по мере убывания степени p :

$$n_2 \frac{T_M}{\Omega_{12}^2} p^5 + \left(n_1 \frac{T_M}{\Omega_{12}^2} + n_2 \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \left(1 - \frac{|\beta_B|}{|\beta|(\gamma-1)} \right) \right) p^4 +$$

$$+ \left(n_2 \left(T_M - \frac{|\beta_B|}{C_{12}} \right) + n_1 \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \left(1 - \frac{|\beta_B|}{|\beta|(\gamma-1)} \right) + n_0 \frac{T_M}{\Omega_{12}^2} + m_1 \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \right) p^3 + \quad (11)$$

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

$$+ \left(n_1 \left(1 - \frac{|\beta_B|}{|\beta|} \right) + n_0 \left(T_M - \frac{|\beta_B|}{C_{12}} \right) + m_1 - m_0 \frac{|\beta_B|}{C_{12}} \right) p + \left(m_0 + n_0 \left(1 - \frac{|\beta_B|}{|\beta|} \right) \right).$$

Сравнивая выражения (11) и (10) относительно степеней p , получим значения коэффициентов m_{i-1} и n_{j-1} полиномов $M(p)$ и $N(p)$.

$$n_2 = \frac{\alpha_5 \Omega_{12}^2}{\omega_0^5 T_M}, c^2; \quad (12)$$

$$n_1 = \frac{\Omega_{12}^2}{T_M} \left(\frac{\alpha_4}{\omega_0^4} + \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \left(\frac{|\beta_B|}{|\beta|(\gamma-1)} - 1 \right) n_2 \right), c; \quad (13)$$

$$n_{01} = \frac{C_{12} \Omega_{12}^2 |\beta|}{T_M C_{12} |\beta| (\gamma-1) - \gamma |\beta_B^2|} \cdot \left(\frac{\alpha_1 \gamma}{\omega_0 \Omega_{12}^2} - \frac{\alpha_3}{\omega_0^3} + \frac{|\beta_B| \gamma}{|\beta| \Omega_{12}^2} \left(1 - \frac{1}{\gamma-1} \right) n_1 + \left(T_M - \frac{|\beta_B|}{C_{12}} \right) n_2 \right); \quad (14)$$

$$m_1 = \frac{\Omega_{12}^2}{\gamma} \left(\frac{\alpha_3}{\omega_0^3} - \frac{T_M}{\Omega_{12}^2} n_0 + \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \left(\frac{|\beta_B|}{|\beta|(\gamma-1)} - 1 \right) n_1 - \left(T_M - \frac{|\beta_B|}{C_{12}} \right) n_2 \right) \quad (15)$$

$$m_0 = 1 + \left(\frac{|\beta_B|}{|\beta|} - 1 \right) n_0. \quad (16)$$

Из сомножителя при p^2 следуют два уравнения, первое из которых определяет неоднозначность коэффициента n_0 , принимающего в данном случае следующее значение

$$n_{02} = \frac{C_{12} (\gamma-1) \gamma \Omega_{12}^2 |\beta|}{\Omega_{12}^2 T_M |\beta| |\beta_B| (\gamma-1) + \gamma^2 C_{12} |\beta_B| (\gamma-2)} \cdot \left(\frac{\alpha_2}{\omega_0^2} + \frac{\alpha_3 \Omega_{12}^2 |\beta_B|}{\omega_0^3 \gamma C_{12}} - \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} + \left(\frac{|\beta_B|^2}{|\beta| C_{12} (\gamma-1)} - T_M \right) n_1 - \left(1 - \frac{|\beta_B|}{|\beta|} + \frac{|\beta_B| \Omega_{12}^2}{C_{12} \gamma} \left(T_M - \frac{|\beta_B|}{C_{12}} \right) \right) n_2 \right). \quad (17)$$

Отметим, что задача синтеза регулятора скорости может считаться решенной только при условии равенства $n_{01} = n_{02} = n_0$.

Второе уравнение, следующее из сомножителя p^2 , может быть использовано для определения величины среднегеометрического корня ω_0 синтезируемой статической системы регулирования скорости двухмассового электромеханического объекта. В данном случае при понижении порядка передаточной функции регулятора, его величина оказывается зависимой от параметров объекта. Подставим в сомножитель при p^2 полученные ранее значения $n_2, n_1, n_{01}, m_1, m_0$.

В результате преобразований определяем, что поиск возможных для реализации положительных величин ω_0 должен осуществляться по выражению:

$$\alpha_0 \omega_0^5 + \alpha_1 \frac{A \gamma}{E \Omega_{12}^2} \omega_0^4 - \alpha_2 \frac{1}{E} \omega_0^3 - \alpha_3 \frac{D}{E} \omega_0^2 + \alpha_4 \frac{B}{E} \omega_0 + \alpha_5 \frac{C \Omega_{12}^2}{E T_M} = 0, \quad (18)$$

где $A = \frac{C_{12} \Omega_{12}^2 |\beta_B| (\gamma-2) \gamma}{(\gamma-1) (T_M C_{12} |\beta| (\gamma-1) - \gamma \beta_B^2)}$; $E = \frac{A |\beta_B| \gamma}{C_{12} \Omega_{12}^2}$

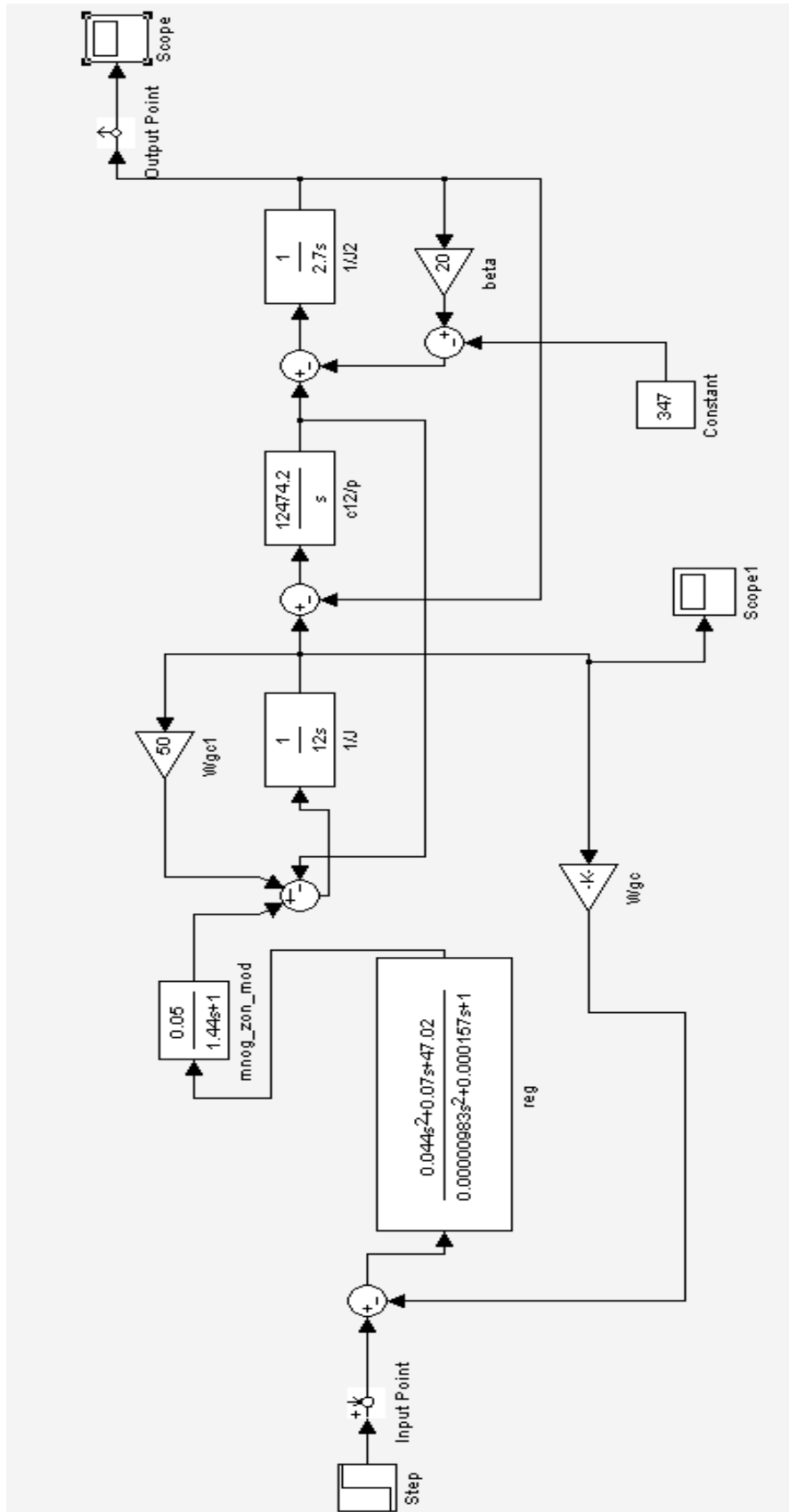


Рисунок 2 – Модель системи управління вращением барабанного окомкователя

$$D = A + \frac{|\beta_B| \Omega_{12}^2}{C_{12} \gamma}; \quad B = \frac{\Omega_{12}^2}{T_M} \left(T_M + \frac{|\beta_B|}{|\beta|(\gamma-1)} \left(\frac{\gamma A(\gamma-1)}{\Omega_{12}^2} - \frac{|\beta_B|}{C_{12}} \right) \right);$$

$$C = 1 - \frac{|\beta_B|}{|\beta|} + \left(\frac{\Omega_{12}^2 |\beta_B|}{C_{12} \gamma} + A \right) \left(T_M - \frac{|\beta_B|}{C_{12}} \right) + B \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \left(\frac{|\beta_B|}{|\beta|(\gamma-1)} - 1 \right).$$

Допустим, что уравнение (18) при выбранном распределении по Баттерворту имеет хотя бы одно вещественное положительное решение ω_{0i} , при котором все коэффициенты полиномов $M(p)$ и $N(p)$ принимают положительные значения. Это определяет физическую реализуемость синтезируемого регулятора скорости. Тогда передаточная функция регулятора скорости на основании (7) представляется в виде:

$$W_{pc}(p) = \frac{K_{pc} (T_T p + 1)(T_1 p + 1)}{T_2^2 p^2 + T_3 p + 1}, \quad (19)$$

где коэффициенты регулятора $K_{pc} = \frac{m_0 |\beta|}{n_0 T_T K_{эм} K_{дс}}$, $T_1 = \frac{m_1}{m_0}$, $T_2^2 = \frac{n_2}{n_0}$, $T_3 = \frac{n_1}{n_0}$.

Постоянные времени форсирующей и инерционной второго порядка $T_{2,3}^* = \frac{T_3}{2} \pm \sqrt{\frac{T_3^2}{4} - T_2^2}$, что обосновывает возможность разложения полинома знаменателя выражения (19) в случае $T_3 > 2T_2$ на два сомножителя.

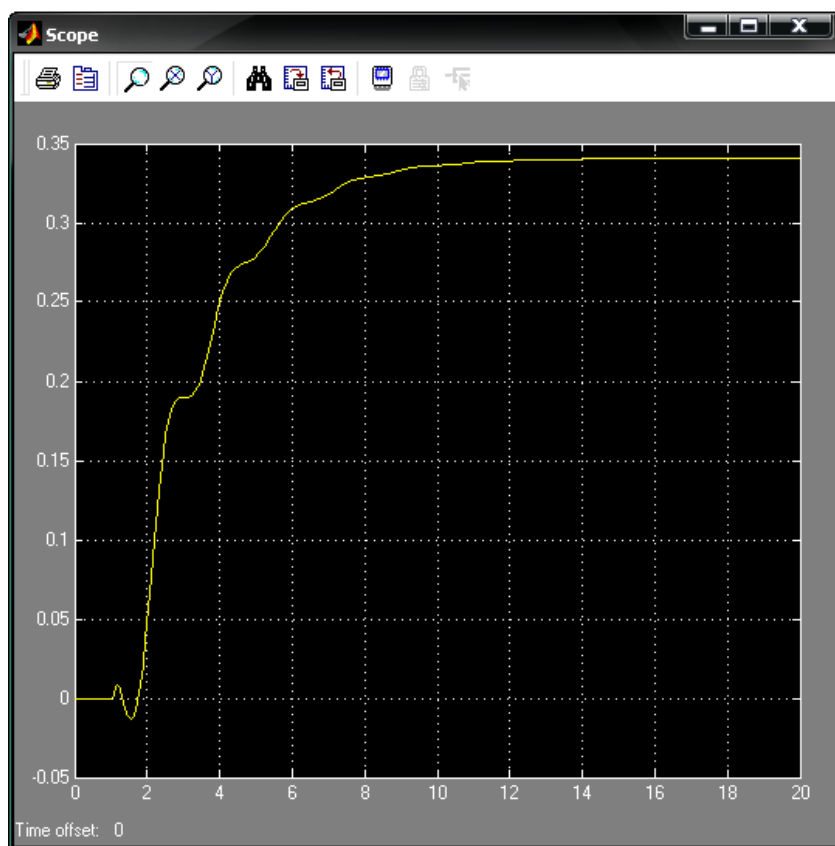


Рисунок 3 – Переходной процесс без блока импульсного моделирования

Таким образом, для создания статической системы регулирования скорости исходно неустойчивым двухмассовым электромеханическим объектом в качестве регулятора скорости следует использовать, например, в соответствии (19) ПИД²-регулятор. При этом для уменьшения перерегулирования на входе системы должен быть установлен фильтр с передаточной функцией

$$W_{\phi} = \frac{K_{\phi}}{T_{\phi}p + 1} \quad (20)$$

Результаты исследований. После всех вышеуказанных мероприятий была смоделирована система управления скоростью вращения барабанного окомкователя с использованием многозонного импульсного моделирования в среде Matlab Simulink, представленная на рис.2. и получены результаты ее работы (рис. 3, 4)



Рисунок 4 – Осциллограмма переходного процесса при включенном блоке импульсного моделирования

Выводы. Была разработана модель системы управления скоростью вращения барабанного окомкователя на основе многозонной импульсной модуляции путем синтеза регулятора скорости вращения, обеспечивающего управление объектом большой массы за сравнительно небольшой промежуток времени (рис. 4). Модель обеспечивает приемлемую плавность регулирования, а значит и мягкий режим работы оборудования. Применение подобной системы повысит качество выхода готовой продукции из окомкователя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клепиков В. Б. Определение границ устойчивости электропривода с отрицательным вязким трением с учетом упругости кинематической цепи // Электричество / В. Б. Клепиков, А. В. Осичев. – 1989. – №1. – С. 36-41.
2. Ключев В. И. Теория электропривода: учебник для ВУЗов. / В. И. Ключев. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
3. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – М. : Наука, 1972. – 760 с.
4. Залялеев С. Р. О применении метода полиномиальных уравнений для синтеза непрерывных систем электропривода // Электротехника / С. Р. Залялеев. – 1988. – №2. – С. 48-53.
5. Акимов Л. В. Динамика двухмассовых систем с нетрадиционными регуляторами скорости и наблюдателями состояния / Л. В. Акимов, В. И. Колотило, В. С. Марков. – Харьков : ХГПУ, 2000. – 93 с.

Чернецкая И.Е., Исаев Е.А., Наговский Д.А. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ БАРАБАННОГО КОМКУВАЧА НА ОСНОВІ БАГАТОЗОННОЇ ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ

Стаття присвячена проблемам управління електроприводом обробного барабана при обробці руди. В результаті проведених обчислень побудована математична модель системи управління електроприводом з урахуванням зміни жорсткості механічної характеристики барабана.

Ключові слова: барабанний комкувач, система управління, багатозонне управління.

Chernetska I.E., Isayev E.A., Nagovskiy D.A. SYSTEM OF CONTROLLING ROTATION SPEED OF DRUM-TYPE PELLETIZER ON THE BASIS OF MULTIZONAL PULSE MODULATION

Problems of operating the electric drive of a processing drum at processing ore are considered. As a result of conducted calculations, mathematical model of the system for controlling the electric drive subject to rigidity change of the drum mechanical characteristic has been made.

Keywords: drum pelletizer, control system, multi-zone control.