

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ/ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.74> EDN: GOLMOG

ОБОБЩЕННЫЙ РЕГУЛЯТОР ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ШНЕКО-ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКОЙ

Научная статья

Мансурова О.К.^{1,*}, Аксенова Д.М.²^{1,2} Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (erke7[at]mail.ru)

Предложена: 10.04.2026; Принята: 06.07.2026; Опубликовано: 17.09.2026

Аннотация

В работе рассматривается методика применения обобщенного регулятора в системе автоматического управления производительностью дробильного агрегата с запаздыванием. Для исключения ограничений, накладываемых запаздыванием, вводится в структуру системы управления предиктор Смита. Обобщенный регулятор с предиктором Смита в замкнутой системе с запаздыванием позволяет уменьшить влияние возмущающих воздействий и обеспечить качественные показатели отслеживания задающей производительности дробления. А именно позволяет увеличить диапазон величин времени запаздывания объекта, уменьшить максимальные отклонения от номинальной скорости вращения валков дробильного агрегата и стабилизировать производительность дробления.

Ключевые слова: двухвалковая зубчатая дробилка, ленточный питатель, предиктор Смита, управление объектом с запаздыванием, обобщенный регулятор.

A GENERAL CONTROLLER FOR MANAGING A TOOTHED-SCREW CRUSHER

Research article

Mansurova O.K.^{1,*}, Aksenova D.M.²^{1,2} Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (erke7[at]mail.ru)

Suggested: 10.04.2026; Accepted: 06.07.2026; Published: 17.09.2026

Abstract

The work examines a methodology for applying a general controller in an automated control system for the productivity of a delayed crushing unit. To overcome the limitations imposed by the delay, a Smith predictor is incorporated into the control system architecture. A general controller with a Smith predictor in a closed-loop system with delay makes it possible to reduce the impact of disturbances and ensure high-quality performance in tracking the target crushing capacity. Specifically, it allows for an increase in the range of the object's time delay, a reduction in the maximum deviations from the nominal rotational speed of the crusher's rollers, and the stabilisation of crushing throughput.

Keywords: twin-roll gear crusher, belt feeder, Smith predictor, delayed-response object control, general controller.

Введение

Одним из основных объектов управления в горно-обогажительных производствах являются шнеко-зубчатые дробилки, используемые на участках растаривания некондиционных флотационных агрегатов. Эксплуатация шнеко-зубчатых дробилок в условиях случайного изменения физико-механических свойств перерабатываемого материала сопровождается существенным снижением качества регулирования технологического процесса. Нестационарность нагрузки вызывает колебания производительности, рост динамических нагрузок на механические элементы дробилки и ускоренный износ рабочих органов. Эти параметры вызывают колебания нагрузки на электроприводы объекта управления — дробилки ДШЗ-500, приводя к изменениям тока, мощности и скорости дробления. Влияние свойств материала, такие как прочность и крепость материала увеличивают сопротивление зубьям, повышая крутящий момент и ток. Абразивность ускоряет износ шнека и зубьев, добавляя неравномерность [1], [2], [3]. Влажность провоцирует налипание на шнек, снижая пропускную способность, а крупность (свыше 500 мм) влияет на заполнение камеры, перегружая привод при несоответствии щели разгрузки 50 мм [4], [5], [6]. Это приводит к увеличению энергопотребления, снижению надежности оборудования и ухудшению качества подготовки материала для последующих стадий переработки.

В настоящее время для управления подобными объектами используют типовые пропорционально-интегрально-дифференциальные алгоритмы управления, однако такие регуляторы не обеспечивают требуемого качества управления при наличии значительных запаздываний [7], [8], [9]. Вследствие этого возникает научно-техническая проблема разработки методов управления, обеспечивающих инвариантность системы к внешним возмущениям и сохранение требуемых показателей качества переходных процессов в условиях изменяющейся среды функционирования объекта. Сложность при решении подобных задач представляет компенсация влияния транспортного запаздывания и случайных возмущающих воздействий в связи с отсутствием зачастую статистических данных по возмущению.

В данной работе предлагается расширить функции типовых регуляторов введением в алгоритм управления встроенных моделей задающего и возмущающего воздействий, компенсирующих влияние среды функционирования, и

предиктор Смита в целях ослабления влияния запаздывающих элементов на качество процессов регулирования. Рассматриваемый подход позволяет стабилизировать производительность и подачу качественного материала на последующий участок технологического процесса.

Постановка задачи

Для решения задачи требуется разработка структуры системы автоматического управления, учитывающей как динамические свойства объекта, так и характеристики внешних воздействий.

Под объектом управления будем понимать совокупность ленточного накопителя (конвейера) и шнеко-зубчатой дробилки ДШЗ-500 с исполнительными механизмами, упрощенная модель, которая связывает выходную переменную дробилки $y(t)$ и управляющее воздействие $u(t)$, можно представить в виде:

$$W_0(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_0}{(T_0s+1)(T_{лк}s+1)} \cdot e^{-\tau s}, \quad (1)$$

где:

K_0 — коэффициент передачи объекта, равный произведению коэффициентов передачи ленточного конвейера и дробильного агрегата,

$T_{лк}$ — постоянная времени ленточного конвейера,

T_0 — постоянная времени дробильного агрегата,

τ — постоянная времени запаздывания.

Описание объекта (1) можно представить в виде произведения двух передаточных функций:

$$W_0(s) = \frac{K_0}{(T_0s+1)(T_{лк}s+1)} \cdot e^{-\tau s} = W_{01}(s) \cdot W_3(s), \quad (2)$$

где

$$W_{01}(s) = \frac{K_0}{(T_0s+1)(T_{лк}s+1)}, \quad W_3(s) = e^{-\tau s}. \quad (3)$$

Обобщенный регулятор формируется в виде параллельного соединения ПИ- регулятора и регулятора со встроенной моделью возмущения, позволяющая обеспечить нулевую ошибку на возмущающее воздействие, модель которого встроена в контур ошибки [10]. Возмущающее воздействие приложено ко входу объекта. Предполагается, что получены модели входного и возмущающего воздействий в виде передаточных функций по входу

$$W_g(s) = \frac{1}{a_q s^q + a_{q-1} s^{q-1} + \dots + a_1 s + a_0} = \frac{1}{A(s)}, \quad (4)$$

где $i = 0, 1, \dots, q-1$, определяют полюса, порождающие задающие воздействия, и возмущению

$$W_f(s) = \frac{1}{c_l s^l + c_{l-1} s^{l-1} + \dots + c_1 s + c_0} = \frac{1}{C(s)}, \quad (5)$$

где коэффициенты полинома знаменателя $C_j = 0, 1, \dots, l-1$, определяют полюса, порождающие возмущающие воздействия.

Вид воздействий определяется значениям q и l полюсов полиномов $A(s)$ и $C(s)$ с ответственно, а параметры воздействий задаются значениями начальных условий. Следует отметить, что рассматриваются модели только сходящихся и незатухающих внешних воздействий, поэтому полюса передаточных функций (4) и (5), порождаемые эти процессы, должны иметь отрицательную вещественную часть либо равную нулю.

Ставится задача построения для объекта управления с передаточной функцией $W_0(s)$ обобщенного регулятора со встроенными моделями, определение его структуры и параметров, обеспечивающих в замкнутой системе нулевую ошибку в установившемся режиме при внешних воздействиях, определяемых моделями (4) и (5), и включения в структуру замкнутой системы предиктора Смита для обеспечения требуемых показателей качества переходных процессов.

Методика проведения исследований

Структура выработки управляющих воздействий объектом управления с запаздыванием, включающая обобщенный регулятор и предиктор Смита, представлена на рис. 1.

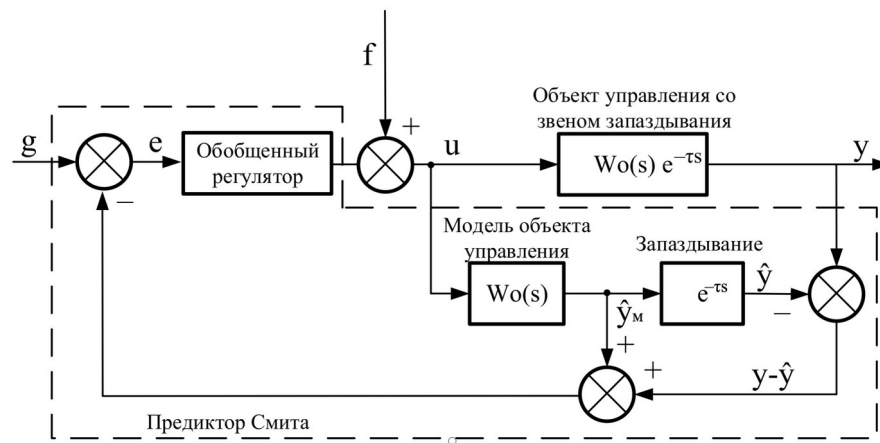


Рисунок 1 - Структурная схема системы с предиктором Смита

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.74.1>

Примечание: источник [10]

Приведенная структура «вход-возмущение-выход», связывает входную переменную $g(t)$ и выходную переменную $y(t)$ при возмущающем воздействии $f(t)$. Данная структура системы управления объектом $W_o(s)$ (1) с предиктором Смита, кроме обобщенного регулятора содержит дополнительный контур. Этот контур с последовательно соединенными моделями объекта $W_{o1}(s)$ (2) без запаздывания, вырабатывающая прогноз желаемых значений без учета запаздывания регулируемой величины $\hat{y}_M(t)$ и моделью элемента запаздывания $W_3(s)$ (3), которая вырабатывает прогноз значений регулируемой величины с учетом запаздывания $\hat{y}$. Прогнозируемые величины включаются в контур обратной связи и сравниваясь с истинным значением регулируемой переменной y , корректируют значение ошибки $e(t)$, поступающей на вход регулятора, вырабатывающего управляющее воздействие ошибки $u(t)$ на объект [11], [12], [13].

Передаточная функция регулятора со встроенной моделью задающего воздействия задается в виде:

$$W_{opg}(s) = \frac{s^q + k_{q-1}s^{q-1} + \dots + k_1s + k_0}{a_qs^q + a_{q-1}s^{q-1} + \dots + a_1s + a_0} = \frac{K_g(s)}{A(s)}. \quad (6)$$

Отметим, что коэффициенты k_i при $i = 0, 1, \dots, q-1$ полинома числителя $K_g(s)$ (6) определяют настроечные параметры регулятора и постоянные времени дифференцирующих звеньев.

Порядки полиномов числителя и знаменателя передаточной функции (6) должны совпадать (равны значению q).

Передаточная функция регулятора со встроенной моделью возмущающего воздействия задается следующим образом:

$$W_{opf}(s) = \frac{s^l + k_{l-1}^f s^{l-1} + k_{l-2}^f s^{l-2} + \dots + k_1^f s + k_0^f}{c_l s^l + c_{l-1} s^{l-1} + \dots + c_7 s + c_0} = \frac{K_f(s)}{C(s)}. \quad (7)$$

Коэффициенты полинома k_j^f при $j = 0, 1, \dots, l$, числителя $K_f(s)$ (7) определяют настроечные параметры регулятора и постоянные времени дифференцирующих звеньев. Таким образом, передаточная функция обобщенного регулятора:

$$W_{op}(s) = W_{opg}(s) + W_{opf}(s). \quad (8)$$

Если положить в качестве типового воздействия воздействие с постоянной амплитудой, которое требуется отрабатывать с нулевой ошибкой, то в качестве составляющей обобщенного регулятора по задающему воздействию имеем ПИ регулятор с передаточной функцией:

$$W_{opg}(s) = W_{per}(s) = \frac{K_{II} \left(\frac{K_{PI}}{K_{II}} s + 1 \right)}{s}, \quad (9)$$

где:

K_{PI} — коэффициент передачи пропорциональной составляющей,

K_{II} — коэффициент передачи интегральной составляющей.

Таким образом, ПИ регулятор с передаточной функцией (9) есть частный случай обобщенного регулятора по задающему воздействию.

Обобщенный регулятор (8) представляет параллельное соединение двух составляющих, составляющую по задающему воздействию с передаточной функцией $W_{opg}(s)$ (6) и составляющую по возмущающему воздействию с передаточной функцией $W_{opf}(s)$ (7). Коэффициенты K_{PI} и K_{II} являются настроечными параметрами ПИ регулятора системы, а коэффициенты полинома числителя $K_f(s)$ (7) определяют настроечные параметры регулятора по возмущающему воздействию и постоянные времени дифференцирующих звеньев. Итак, количество

настроечных параметров равно $2 + l$, а порядок замкнутой системы равен $n = n_0 + 2 + l$, где n_0 — порядок объекта.

Для объекта первого порядка $n_0 = l$ при измерении регулируемой переменной добавляется еще один настроечный параметр — коэффициент передачи разомкнутого контура и количество настроечных параметров совпадает с порядком замкнутой системы, что говорит о предположении к разрешимости решения задачи модального управления, либо оптимального управления [14]. Для определенности остановимся на задаче модального управления. Значения $n_0 + 2 + l$ настроечных параметров, которые и являются фактически параметрами настройки ПИ регулятора совместно с предиктором Смита, выбираются по следующим соображениям. Для определения значений настроечных параметров регуляторов используется корневой метод, метод модального управления, когда выбирается стандартный полином — полином Ньютона, по заданному быстродействию $t_{\text{пп}}$ вычисляется значение параметра ω_0^* , определяющий коэффициенты желаемого характеристического полинома и, тем самым, желаемые корни замкнутой системы s_i , $i = 1, 2, \dots, n$ (n — порядок системы), которые для полинома Ньютона равны между собой $s_i = -\omega_0^*$. Настроечные параметры определяются из условия приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях s характеристического полинома замкнутой системы и коэффициентов желаемого характеристического полинома [15], [16], [17].

Подобный подход справедлив при отсутствии звена запаздывания, которое привносит свое влияние на показатели качества процессов такие как время переходных процессов и значение перерегулирования, вплоть до потери устойчивости [18], [19], [20]. Причем чем большее значение времени запаздывания, тем более сильное влияние оказывается на показатели качества процессов. Включение в структуру системы предиктора Смита позволяет ослабить влияние запаздывания на показатели качества процессов [21], [22], [23].

Результаты моделирования

Рассмотрим параметры двухвалковой зубчатой дробилки ДШЗ-500 с передаточной функцией:

$$W_0(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0,95}{60s+1} \cdot e^{-20s}, \quad (10)$$

$K_0 = 0,95$ — коэффициент передачи объекта,

$T_0 = 60\text{с}$ — постоянная времени объекта,

$\tau = 20\text{с}$ — постоянная времени запаздывания.

Для нахождения настроечных параметров $K_{\text{П}}$ и $K_{\text{И}}$ ПИ регулятора зададимся для объекта (10) желаемым временем переходного процесса значением $t_{\text{пп}} = 180\text{с}$, тогда параметр ω_0^* , определяющий коэффициенты желаемого характеристического полинома, равен $\omega_0^* = \frac{4,8}{t_{\text{пп}}} = 0,0255$.

Приравнивая коэффициенты характеристического уравнения замкнутой системы без учета звена запаздывания и коэффициенты желаемого полинома, получаем соотношения для вычисления настроечных параметров регулятора:

$$K_{\text{И}} = (\omega_0^*)^2 T_0 = 0,039; K_{\text{П}} = 2\omega_0^* T_0 - 1 = 2,41. \quad (11)$$

Сравним по качественным показателям переходные процессы системы по производительности $y(t)$ как с ПИ регулятором, так и при совместном включении ПИ регулятора с параметрами (11) и предиктора Смита, представленные на рисунках 2–8. На данных рисунках в качестве возмущения f_0 рассматривается неравномерность подачи сульфидной золотосодержащей руды в диапазоне 4–10 кг/с. Уставка по производительности составляет 20 кг/с.

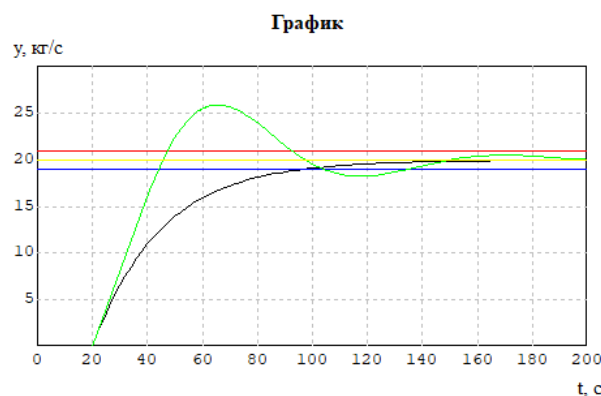


Рисунок 2 – Переходная характеристика системы по производительности с ПИ регулятором без предиктора Смита (зеленый график) с учетом звена запаздывания и с предиктором Смита (черный график)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.74.2>

Примечание: составлено автором

На рис. 2 получены переходные функции системы с ПИ регулятором без предиктора Смита и с предиктором Смита. Время переходного процесса системы с ПИ регулятором составляет $t_{\text{пп}} = 135\text{с}$, а значение

перерегулирования равно $\sigma = 30\%$. Для системы с ПИ регулятором и предиктором Смита время переходного процесса равно $t_{\text{пп}} = 100\text{с}$, а значение перерегулирования отсутствует $\sigma = 0\%$. Таким образом, качественные показатели по быстродействию и перерегулированию системы с ПИ регулятором и предиктором Смита значительно превосходят подобные показатели качества системы с ПИ регулятором и предиктором Смита значительно превосходят подобные показатели качества системы только с ПИ регулятором. С предиктором Смита время переходного процесса 1,35 раз меньше, а перерегулирование вообще отсутствует (без предиктора $\sigma = 30\%$).

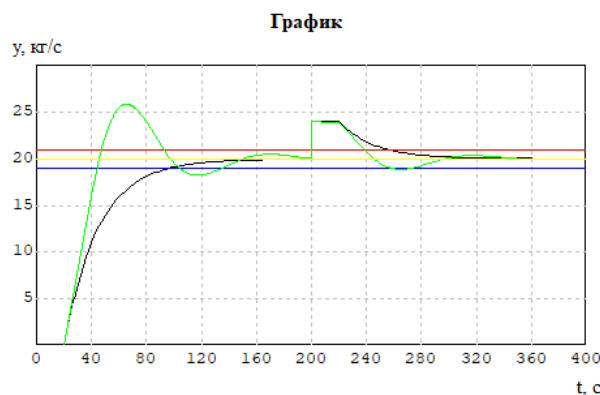


Рисунок 3 - Графики процессов парирования постоянных возмущений амплитудой $f_0 = 4$, кг/с приложенных к выходу, для замкнутой системы с ПИ регулятором (зеленый график), с предиктором Смита (черный график)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.74.3>

Примечание: составлено автором

Анализ графиков процессов парирования постоянных возмущений амплитудой $f_0 = 4$ кг/с (рис. 3), приложенных к выходу в момент времени $t_1 = 200\text{с}$, приводят к следующим выводам: в течение времени, равному постоянной времени запаздывания $\tau = 20\text{с}$, в системе без предиктора и с предиктором возмущения не парируются, а сам процесс парирования системы с предиктором более быстродействующий и носит аperiodический характер, в отличие от колебательного характера, присущего системе с ПИ регулятором. Отметим, что отработка постоянных возмущений производится с нулевой установившейся ошибкой.

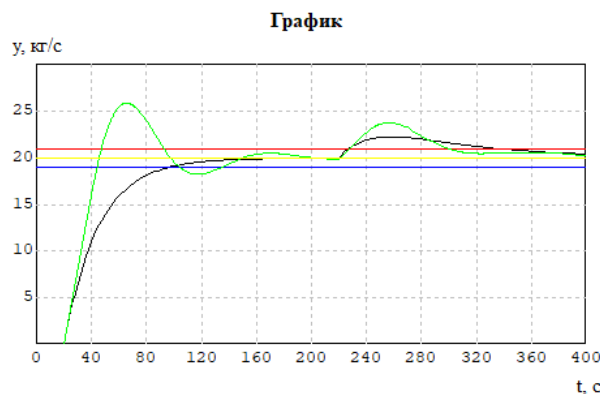


Рисунок 4 - Графики процессов парирования постоянных возмущений амплитудой $f_{01} = 10$ кг/с, приложенных к входу по управлению, для замкнутой системы с ПИ регулятором с учетом звена запаздывания, с предиктором Смита (черный график) и только с ПИ регулятором (зеленый график)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.74.4>

Примечание: составлено автором

Из анализа графиков парирования постоянных возмущений амплитудой $f_{01} = 10$ кг/с (рис. 4), приложенных к входу по управлению в момент времени $t_1 = 200\text{с}$ следует, что в последующие 20с реакция выходов систем с предиктором и только с ПИ регулятором отсутствует, а начиная с момента времени $t_1 = 220\text{с}$ имеет место изменение выходной величины, причем наибольшая амплитуда изменения переменной регулирования, равная $\Delta y_{\text{max}} = 0,15$, характерна для системы с ПИ регулятором, а для системы с предиктором $\Delta y_{1\text{max}} = 0,09$ и затухание отклонения носит аperiodический, а не колебательный характер [24], [25]. Следует отметить, что отработка постоянных возмущений производится с нулевой установившейся ошибкой.

Проведем анализ чувствительности системы к изменению параметров объекта. Рассмотрим влияние величины запаздывания объекта на качество процессов (таблица 1).

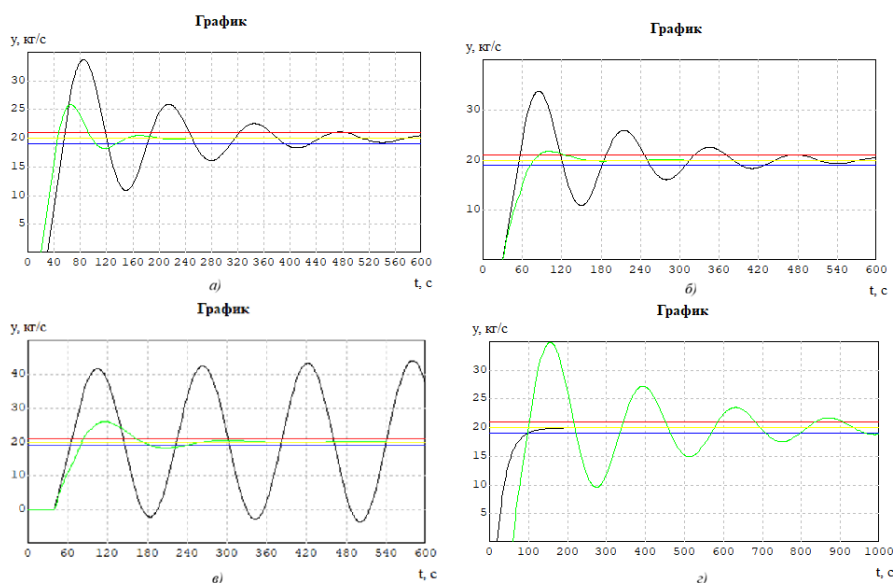


Рисунок 5 - Графики переходных процессов системы с ПИ регулятором при значении постоянной времени запаздывания:

а) без предиктора $\tau = 20$ с (зелёный график) и при значении $\tau = 30$ с (чёрный график); б) без предиктора $\tau = 30$ с (зелёный график), с предиктором Смита при значении $\tau = 30$ с (чёрный график); в) без предиктора $\tau = 40$ с (чёрный график), с предиктором Смита при значении $\tau = 40$ с (зелёный график); г) с предиктором Смита $\tau = 20$ с (зелёный график) и при значении $\tau = 60$ с (чёрный график)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.74.5>

Примечание: составлено автором

Таблица 1 - Характеристики системы в зависимости от времени запаздывания

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.74.6>

Система с ПИ регулятором	без предиктора Смита (рис. 5а)		без предиктора Смита (рис. 5б)	с предиктором Смита (рис. 5б)	без предиктора Смита (рис. 5в)	с предиктором Смита (рис. 5в)	с предиктором Смита (рис. 5г)	
Время запаздывания,	20	30	30		40		20	60
Перерегулирование,	30	70	70	8	Незатухающие колебания	35	0	75
Время переходного процесса,	135	485	490	130	Незатухающие колебания	240	100	1000

Примечание: составлено автором

Перестановка местами

Анализ качества процессов, результаты моделирования (см. табл.1) и теоретические предпосылки показывают зависимость качества регулирования от времени запаздывания. В системе без предиктора с ростом времени запаздывания τ до критического значения наблюдается увеличение времени переходного процесса, увеличение значения перерегулирования, процессы становятся более колебательными, а при $\tau_{кр} = 40$ с возникают незатухающие колебания.

В системе с предиктором Смита с ростом значения времени запаздывания до критического так же возрастает время переходного процесса и имеет место увеличение значения перерегулирования, хотя значение перерегулирования значительно меньше значения перерегулирования в системе без предиктора. Также критическое значение времени запаздывания $\tau_{крС} = 81$ с, когда система находится на границе устойчивости колебательного типа (незатухающие

колебания) в системе с предиктором в два раза превосходит соответствующее значение $\tau_{кр} = 40с$ в системе без предиктора.

Заключение

Внедрение предиктора Смита с обобщенным регулятором в структуру контура системы стабилизации производительности дробильного агрегата позволяет скорректировать влияние запаздывания на ухудшение качества переходных процессов в замкнутой системе:

- минимальные значения перерегулирования, уменьшая тем самым максимальные значения отклонений токов электроприводов дробильного агрегата от номинальных значений;
- повышение быстродействия и запаса устойчивого функционирования контура регулирования производительности;
- увеличение диапазона изменений значений времени запаздывания объекта $\tau_{кр}$, при которых система остается устойчивой (в два раза).

Следует отметить так же, улучшение качества сходимости к установившемуся режиму процессов при парировании возмущений постоянного вида, которое происходит аperiodически, а не носит колебательный характер, что качественно влияет на процесс перемешивания и гранулометрический состав руды в процессе дробления породы. Наблюдается так же понижение чувствительности качества к изменению времени запаздывания исходной модели объекта.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты могут найти применение для настройки параметров автоматических регуляторов систем управления технологическими объектами горно-обогатительных комбинатов.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Кондрахин В.П. Расчет оптимальных параметров валковой дробилки для дробления породы / В.П. Кондрахин, В.Ю. Конюхов, А.С. Полякова [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 11-1. — С. 88–101. — DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_88.
2. Снитко С.А. Влияние особенностей процесса дробления горной массы на акустические характеристики двухвалковой зубчатой дробилки / С.А. Снитко, В.Н. Онопченко, Ю.В. Пипкин // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. — 2023. — № 4(70). — С. 203–207.
3. Снитко С.А. Исследование рабочих нагрузок двухвалковой зубчатой дробилки / С.А. Снитко, Д.А. Вишневский, А.М. Зинченко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического института. — 2023. — № 31 (74). — С. 69–74.
4. Липатов А.Г. Инновационные решения в повышении эффективности крупного дробления на железорудных горно-обогатительных комбинатах / А.Г. Липатов, В.О. Фурин, А.А. Холодков [и др.] // Горная промышленность. — 2023. — № 3. — С. 93–100. — DOI: 10.30686/1609-9192-2023-3-93-100.
5. Yamashita A.S. A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries / A.S. Yamashita, A. Thivierge, T.A.M. Euzébio // Minerals Engineering. — 2021. — Vol. 170. — Art. 107036. — DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107036.
6. Виноградов Ю.И. Оптимизация удельных энергозатрат на дробление горных пород взрывом на месторождениях со сложным геологическим строением / Ю.И. Виноградов, С.В. Хохлов, Р.Р. Зигангиров [и др.] // Записки Горного института. — 2024. — Т. 266. — С. 231–245.
7. Николаева Н.В. Особенности процесса измельчения медно-молибденовых руд / Н.В. Николаева, И.Т. Каллаев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2024. — № 1. — С. 52–66. — DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_52.
8. Кондрашева Н.К. Разработка новых составов для борьбы с пылеобразованием в горнодобывающей и горнотранспортной промышленности / Н.К. Кондрашева, Е.В. Киреева, О.В. Зырянова // Записки Горного института. — 2021. — Т. 248. — С. 272–280. — DOI: 10.31897/PMI.2021.2.11.
9. Яковис Л.М. Простые способы расчета типовых регуляторов для сложных объектов промышленной автоматизации / Л.М. Яковис // Автоматизация в промышленности. — 2007. — № 6. — С. 51–56.
10. Григорьев В.В. Обобщенный регулятор со встроенными моделями / В.В. Григорьев, О.К. Мансурова, А.Е. Васильев // Системный синтез и прикладная синергетика : сборник научных трудов XII Всероссийской научной конференции. — Ростов-на-Дону — Таганрог, 2024. — С. 43–46. — DOI: 10.18522/syssyn-2024-6.
11. Мансурова О.К. Система автоматического регулирования скорости ленточного конвейера подачи руды для металлургического производства / О.К. Мансурова, Е.А. Лебедик, А.Е. Васильев // Международный научно-исследовательский журнал. — 2023. — № 12 (138). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.138.143.

12. GnanaMurugan M. Smith Predictor for Control of the Process with Long Dead Time / M. GnanaMurugan, A. Senthilkumar // International Journal of Engineering Research & Technology. — 2018. — Vol. 2, Iss. 6. — P. 81–85. — DOI: 10.17577/IJERTCONV2IS06016.
13. Бобиков А.И. Переоборудование ПИД-регулятора для неустойчивых объектов с запаздыванием в фильтрованный предиктор Смита / А.И. Бобиков, Т.С. Бубнова // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. — 2020. — № 74. — С. 108–118. — DOI: 10.21667/1995-4565-2020-74-108-118.
14. Погорелов М.Г. Эталонная модель для синтеза модального регулятора системы автоматического управления / М.Г. Погорелов, Е.И. Понитков, П.Р. Добаринов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2019. — № 8. — С. 173–197.
15. Тютиков В.В. Синтез систем модального управления заданной статической точности / В.В. Тютиков, С.В. Тарарыкин, Е.В. Красильникянц [и др.] // Электротехника. — 2003. — № 2. — С. 2–7.
16. Булындин М.Г. Исследование эталонных моделей систем модального управления / М.Г. Булындин // Современные научные исследования и инновации. — 2013. — № 11 (31). — С. 9.
17. Булындин М.Г. Разработка алгоритма синтеза модальных регуляторов электропривода методом генетических алгоритмов / М.Г. Булындин // Современные научные исследования и инновации. — 2014. — № 12-1 (44). — С. 137–145.
18. Афанасьев В.Н. Управление объектом в условиях запаздывания и последствия с интервальной длительностью / В.Н. Афанасьев, А.А. Семион // Автоматизация. Современные технологии. — 2020. — Т. 74, № 4. — С. 170–175. — DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-4-170-175.
19. Малышенко А.М. Определение индексов каузальности, структурных свойств управляемости, наблюдаемости, достижимости и восстанавливаемости линейных динамических систем / А.М. Малышенко // Вестник науки Сибири. — 2011. — № 1 (1). — С. 374–378.
20. Пыркин А.А. Модифицированный предиктор Смита для неустойчивых линейных систем / А.А. Пыркин, К.Ю. Калинин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2025. — Т. 68, № 9. — С. 753–761. — DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-9-753-761.
21. Бобиков А.И. Настройка параметров предиктора Смита с фильтром с помощью пакета Simulink Response Optimization / А.И. Бобиков, Т.С. Бубнова // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. — 2017. — № 61. — С. 96–104. — DOI: 10.21667/1995-4565-2017-61-3-96-104.
22. Бураков М.В. Модификация предиктора Смита для линейного объекта с переменными параметрами / М.В. Бураков, А.С. Коновалов // Информационно-управляющие системы. — 2017. — № 4 (89). — С. 25–34. — DOI: 10.15217/issn1684-8853.2017.4.25.
23. Бураков М.В. Модифицированный предиктор Смита для объекта с переменной задержкой / М.В. Бураков, В.Ф. Шишлаков // Труды СПИИРАН. — 2017. — № 2 (51). — С. 60–77. — DOI: 10.15622/sp.51.3.
24. Ahuja A. Application of Unified Smith Predictor for Load Frequency Control with Communication Delays / A. Ahuja, S.K. Aggarwal // WSEAS Transactions on Systems and Control. — 2015. — Vol. 10. — P. 237–248.
25. Kosale D. Departed Time Compensators Using Smith Predictor / D. Kosale, A. Khanna // International Journal of Electrical and Electronics Engineering Studies. — 2016. — Vol. 4, No. 2. — P. 11–27.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kondrakhin V.P. Raschet optimal'nykh parametrov valkovoy drobilki dlya drobleniya porody [Calculation of optimal parameters of a roll crusher for rock crushing] / V.P. Kondrakhin, V.Yu. Konyukhov, A.S. Polyakova [et al.] // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' [Mining Information and Analytical Bulletin]. — 2023. — № 11-1. — P. 88–101. — DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_88. [in Russian]
2. Snitko S.A. Vliyaniye osobennostey protsessa drobleniya gornoy massy na akusticheskie kharakteristiki dvukhvalkovoy zubchatoy drobilki [Influence of the features of the rock mass crushing process on the acoustic characteristics of a double-roll crusher] / S.A. Snitko, V.N. Onopchenko, Yu.V. Pipkin // Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dal'ya [Bulletin of the Luhansk State University named after Vladimir Dahl]. — 2023. — № 4(70). — P. 203–207. [in Russian]
3. Snitko S.A. Issledovanie rabochikh nagruzok dvukhvalkovoy zubchatoy drobilki [Study of working loads of a double-roll crusher] / S.A. Snitko, D.A. Vishnevskiy, A.M. Zinchenko // Sbornik nauchnykh trudov Donbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo instituta [Collection of Scientific Papers of Donbass State Technical Institute]. — 2023. — № 31 (74). — P. 69–74. [in Russian]
4. Lipatov A.G. Innovatsionnye resheniya v povyshenii effektivnosti krupnogo drobleniya na zhelezorudnykh gorno-obogatitel'nykh kombinatakh [Innovative solutions for improving the efficiency of coarse crushing at iron ore mining and processing plants] / A.G. Lipatov, V.O. Furin, A.A. Kholodkov [et al.] // Gornaya promyshlennost' [Mining Industry]. — 2023. — № 3. — P. 93–100. — DOI: 10.30686/1609-9192-2023-3-93-100. [in Russian]
5. Yamashita A.S. A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries / A.S. Yamashita, A. Thivierge, T.A.M. Euzébio // Minerals Engineering. — 2021. — Vol. 170. — Art. 107036. — DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107036.
6. Vinogradov Yu.I. Optimizatsiya udel'nykh energozatrat na droblenie gornykh porod vzryvom na mestorozhdeniyakh so slozhnym geologicheskim stroeniem [Optimization of specific energy consumption for rock crushing by blasting in deposits with complex geological structure] / Yu.I. Vinogradov, S.V. Khokhlov, R.R. Zigangirov [et al.] // Zapiski Gornogo instituta [Proceedings of the Mining Institute]. — 2024. — Vol. 266. — P. 231–245. [in Russian]
7. Nikolaeva N.V. Osobennosti protsessa izmel'cheniya medno-molibdenovykh rud [Features of the grinding process of copper-molybdenum ores] / N.V. Nikolaeva, I.T. Kallaev // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-

tekhnikheskiy zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. — 2024. — № 1. — P. 52–66. — DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_52. [in Russian]

8. Kondrasheva N.K. Razrabotka novykh sostavov dlya bor'by s pyleobrazovaniem v gornodobyvayushchey i gornotransportnoy promyshlennosti [Development of new compositions for dust control in the mining and mining transport industries] / N.K. Kondrasheva, E.V. Kireeva, O.V. Zyryanova // Zapiski Gornogo instituta [Proceedings of the Mining Institute]. — 2021. — Vol. 248. — P. 272–280. — DOI: 10.31897/PMI.2021.2.11. [in Russian]

9. Yakovis L.M. Prostye sposoby rascheta tipovykh regulyatorov dlya slozhnykh ob"ektov promyshlennoy avtomatizatsii [Simple methods for calculating typical controllers for complex industrial automation objects] / L.M. Yakovis // Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Automation in Industry]. — 2007. — № 6. — P. 51–56. [in Russian]

10. Grigor'ev V.V. Obobshchennyy regulyator so vstroennymi modelyami [Generalized controller with built-in models] / V.V. Grigor'ev, O.K. Mansurova, A.E. Vasil'ev // Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika : sbornik nauchnykh trudov XII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii [System Synthesis and Applied Synergetics : Collection of Scientific Papers of the XII All-Russian Scientific Conference]. — Rostov-on-Don — Taganrog, 2024. — P. 43–46. — DOI: 10.18522/syssyn-2024-6. [in Russian]

11. Mansurova O.K. Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya skorosti lentochnogo konveyera podachi rudy dlya metallurgicheskogo proizvodstva [Automatic speed control system for the ore feed belt conveyor for metallurgical production] / O.K. Mansurova, E.A. Lebedik, A.E. Vasil'ev // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International Research Journal]. — 2023. — № 12 (138). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.138.143. [in Russian]

12. GnanaMurugan M. Smith Predictor for Control of the Process with Long Dead Time / M. GnanaMurugan, A. Senthikumar // International Journal of Engineering Research & Technology. — 2018. — Vol. 2, Iss. 6. — P. 81–85. — DOI: 10.17577/IJERTCONV2IS06016.

13. Bobikov A.I. Pereoborudovanie PID-regulyatora dlya neustoychivyykh ob"ektov s zapazdyvaniem v fil'trovannyi prediktor Smita [Conversion of a PID controller for unstable plants with delay into a filtered Smith predictor] / A.I. Bobikov, T.S. Bubnova // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University]. — 2020. — № 74. — P. 108–118. — DOI: 10.21667/1995-4565-2020-74-108-118. [in Russian]

14. Pogorelov M.G. Etalonnaya model' dlya sinteza modal'nogo regulyatora sistemy avtomaticheskogo upravleniya [Reference model for the synthesis of a modal controller of an automatic control system] / M.G. Pogorelov, E.I. Ponitkov, P.R. Dobarinov [et al.] // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences]. — 2019. — № 8. — P. 173–197. [in Russian]

15. Tyutikov V.V. Sintez sistem modal'nogo upravleniya zadannoy staticheskoy tochnosti [Synthesis of modal control systems of a given static accuracy] / V.V. Tyutikov, S.V. Tararykin, E.V. Krasil'nik'yants [et al.] // Elektrotehnika [Electrical Engineering]. — 2003. — № 2. — P. 2–7. [in Russian]

16. Bulyndin M.G. Issledovanie etalonnnykh modeley sistem modal'nogo upravleniya [Research of reference models of modal control systems] / M.G. Bulyndin // Sovremennyye nauchnye issledovaniya i innovatsii [Modern Scientific Research and Innovations]. — 2013. — № 11 (31). — P. 9. [in Russian]

17. Bulyndin M.G. Razrabotka algoritma sinteza modal'nykh regulyatorov elektroprivoda metodom geneticheskikh algoritmov [Development of an algorithm for the synthesis of modal controllers of an electric drive by the method of genetic algorithms] / M.G. Bulyndin // Sovremennyye nauchnye issledovaniya i innovatsii [Modern Scientific Research and Innovations]. — 2014. — № 12-1 (44). — P. 137–145. [in Russian]

18. Afanas'ev V.N. Upravlenie ob"ektom v usloviyakh zapazdyvaniya i posledeystviya s interval'noy dlitel'nost'yu [Control of a plant under delay and aftereffect with interval duration] / V.N. Afanas'ev, A.A. Semion // Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii [Automation. Modern Technologies]. — 2020. — Vol. 74, № 4. — P. 170–175. — DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-4-170-175. [in Russian]

19. Malysenko A.M. Opredelenie indeksov kauzal'nosti, strukturnykh svoystv upravlyaemosti, nablyudaemosti, dostizhimosti i vosstanavlivaemosti lineynykh dinamicheskikh sistem [Determination of causality indices, structural properties of controllability, observability, reachability and recoverability of linear dynamic systems] / A.M. Malysenko // Vestnik nauki Sibiri [Bulletin of Science of Siberia]. — 2011. — № 1 (1). — P. 374–378. [in Russian]

20. Pyrkin A.A. Modifitsirovannyi prediktor Smita dlya neustoychivyykh lineynykh sistem [Modified Smith predictor for unstable linear systems] / A.A. Pyrkin, K.Yu. Kalinin // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie [Proceedings of Higher Educational Institutions. Instrument Engineering]. — 2025. — Vol. 68, № 9. — P. 753–761. — DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-9-753-761. [in Russian]

21. Bobikov A.I. Nastroyka parametrov prediktora Smita s fil'trom s pomoshch'yu paketa Simulink Response Optimization [Tuning the parameters of a Smith predictor with a filter using the Simulink Response Optimization package] / A.I. Bobikov, T.S. Bubnova // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University]. — 2017. — № 61. — P. 96–104. — DOI: 10.21667/1995-4565-2017-61-3-96-104. [in Russian]

22. Burakov M.V. Modifikatsiya prediktora Smita dlya lineynogo ob"ekta s peremennymi parametrami [Modification of the Smith predictor for a linear plant with variable parameters] / M.V. Burakov, A.S. Konovalov // Informatsionno-upravlyayushchie sistemy [Information and Control Systems]. — 2017. — № 4 (89). — P. 25–34. — DOI: 10.15217/issn1684-8853.2017.4.25. [in Russian]

23. Burakov M.V. Modifitsirovannyi prediktor Smita dlya ob"ekta s peremennoy zaderzhkoy [Modified Smith predictor for a plant with variable delay] / M.V. Burakov, V.F. Shishlakov // Trudy SPIIRAN [Proceedings of SPIIRAS]. — 2017. — № 2 (51). — P. 60–77. — DOI: 10.15622/sp.51.3. [in Russian]

24. Ahuja A. Application of Unified Smith Predictor for Load Frequency Control with Communication Delays / A. Ahuja, S.K. Aggarwal // WSEAS Transactions on Systems and Control. — 2015. — Vol. 10. — P. 237–248.



25. Kosale D. Departed Time Compensators Using Smith Predictor / D. Kosale, A. Khanna // International Journal of Electrical and Electronics Engineering Studies. — 2016. — Vol. 4, No. 2. — P. 11–27.