

## Построение системы автоматического управления шаровой мельницей с применением наблюдателя возмущений и виртуального анализатора

А. А. Закамалдин <sup>1</sup> ✉, А. А. Шилин <sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО "Электра +"

ул. Малая Бухарестская, д. 6 к1, г. Санкт-Петербург 192288, Российская Федерация

<sup>2</sup> ОЭЭ ИШЭ НИТПУ

пр. Ленина, д. 30, г. Томск 634050, Российская Федерация

✉ e-mail: aaz5@tpu.ru

### Резюме

**Цель исследования.** Повышение производительности по руде агрегата измельчения при воздействии внешних возмущений, не допуская перегрузки мельницы в условиях эксплуатации, близких к перегрузке.

**Методы.** Для достижения поставленной цели предложена новая система автоматического управления (САУ) заполнением материалом шаровой мельницы с разгрузкой через торцевую решетку в замкнутом цикле измельчения с применением управления с прогнозирующей моделью и активным подавлением возмущающих воздействий (MPC-DOB). В дополнение к САУ для контроля за перегрузом мельницы предложен виртуальный анализатор (ВА) веса материала в мельнице на основе разработанной модели технологического процесса. Проведено тестирование системы управления на лабораторной установке, где в качестве объекта выступала модель мельницы в Simulink, а система управления была реализована на ПЛК. Тестировались САУ с ПИД-регуляторами, MPC, MPC-DOB для различных сценариев.

**Результаты.** MPC-DOB показал эффективность по отношению к ПИД и MPC при синусоидальных и ступенчатых возмущениях, сократив RSD на 4-7 %. Совместное применение MPC-DOB и ВА позволило повысить производительность измельчения на 1 % и улучшить качество стабилизации вибрации мельницы в режиме функциональной неустойчивости.

**Заключение.** Разработанная САУ может быть применена в АСУТП измельчения в шаровой мельнице с решеткой для повышения производительности и устойчивости технологического процесса и уменьшения затрат электроэнергии приводом мельницы.

**Ключевые слова:** перегруз мельницы; управление с прогнозирующей моделью; шаровая мельница с решеткой; виртуальный анализатор; наблюдатель возмущений; моделирование.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Закамалдин А. А., Шилин А. А. Построение системы автоматического управления шаровой мельницей с применением наблюдателя возмущений и виртуального анализатора // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022; 26(3): 112-128. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-112-128>.

Поступила в редакцию 21.07.2022

Подписана в печать 05.09.2022

Опубликована 30.09.2022

## Control Strategy of Ball Mill Based on Disturbance Observer and a Virtual Analyzer of Overload

Andrei A. Zakamaldin <sup>1</sup> ✉, Aleksandr A. Shilin <sup>2</sup>

<sup>1</sup> "Electra +" Ltd,  
6, build. 1 Malaya Bukharestskaya, St. Petersburg 195251, Russian Federation

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30 Lenin ave., Tomsk 634050, Russian Federation

✉ e-mail: aaz5@tpu.ru

### Abstract

**Purpose of research..** Increasing the ore productivity of the grinding mill under the influence of external disturbances, preventing overloading of the mill in operating conditions close to overloading.

**Methods.** To achieve this goal, it is proposed a new automatic control system (ACS) for ore volumetric filling of grate-discharge ball mill in a closed grinding cycle using model predictive control and active disturbance observer (MPC-DOB). And in addition, virtual analyzer (VA) of the ore weight in the mill based on the developed model of the grinding process is proposed for mill overload control. The ACS was tested on a laboratory installation with the mill PC-model in Simulink and the PLC based implementation of control algorithms.

**Results.** MPC-DOB was compared with other ACS based on PID, MPC controllers for various test scenarios and show high performance under the influence of sinusoidal and step disturbances by reducing relative standard deviation (RSD) by 4-7 %. The combined using of MPC-DOB and VA made it possible to increase the grinding process ore productivity by 1 % and improve the quality of mill vibration stabilization in the mode of functional instability.

**Conclusion.** The developed ACS can be used in the process control system for grinding in a ball mill with a grate to increase the productivity and stability of the technological process and reduce the energy consumption of the mill drive.

**Keywords:** mill overload; model predictive control; grate-discharge ball mill; virtual analyzer; disturbance observer; modeling.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Zakamaldin A. A., Shilin A. A. Control Strategy of Ball Mill Based on Disturbance Observer and a Virtual Analyzer of Overload. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2022; 26(3); 112-128 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2022-26-3-112-128>.

Received 21.07.2022

Accepted 05.09.2022

Published 30.09.2022

\*\*\*

### Введение

Известно, что повышение производительности барабанных шаровых мель-

ниц может значительно повысить экономическую отдачу производства. Это связано с тем, что, во-первых, увеличивается выход продукта, и, во-вторых,

что более важно, снижается удельный расход энергии на тонну измельченной руды [1]. Эксплуатируя мельницу не на максимальной производительности, процесс измельчения достаточно устойчив, изменение влажности руды и другие возмущения не выведут процесс измельчения из нормального режима. Но при увеличении производительности растет вероятность вывода процесса в режим функциональной неустойчивости – перегруза. За стабильность процесса измельчения и контроль за перегрузом отвечает система автоматического управления (САУ) заполнением мельницы материалом.

Первая проблема существующих САУ заключается в эффективности используемых методов регулирования параметра заполнения мельницы, среди которых методы, основанные на экспертных оценках, производственных правилах, ПИД законах регулирования и более современные [2, 3]. Такие подходы имеют ряд ограничений вследствие того, что имеются чувствительные возмущения по влажности исходной руды [4], поступающей на измельчение, а также значительные запаздывания по каналам управления [5], для управления в режиме эксплуатации мельницы с максимальной производительностью, когда имеется вероятность перегруза мельницы рудой. При этом управляемость усугубляется тем, что параметр заполнения мельницы измеряется не напрямую, а по косвенным параметрам: вибрация подшипника мельницы, акустический шум,

активная мощность привода мельницы и другие.

Вторая проблема заключается в том, что основной метод контроля за перегрузом в таких САУ основан на взаимном поведении параметров активной мощности электропривода мельницы и вибрации коренного подшипника у разгрузки мельницы. Большое распространение получил вибродиагностический метод [6], однако такие подходы стабильны и эффективны, но вокруг заданной номинальной рабочей точки [7] и, сравнивая с современными возможностями, уже являются устаревшими [8]. Отмечается, что управление мельницей по параметрам вибрации и мощности имеет достаточно противоречивый характер из-за возможного перегруза мельницы при высоких производительностях [9]. Это связано с тем, что перегруз наступает раньше, чем система по данным параметрам определит перегруз. Используя датчики вибрации, очень важно на аппаратном уровне настроить их на верный полезный частотный диапазон, который имеет тенденцию изменяться в ходе эксплуатации [10]. Также из-за сильной зашумленности аналоговый сигнал вибрации поддается сильной программной фильтрации – фильтрами с большим временем фильтрации. Выделение полезного сигнала активной мощности привода мельницы также может стать проблемой при эксплуатации. Изменение мощности за контрольный временной промежуток при работе с высокой производительностью

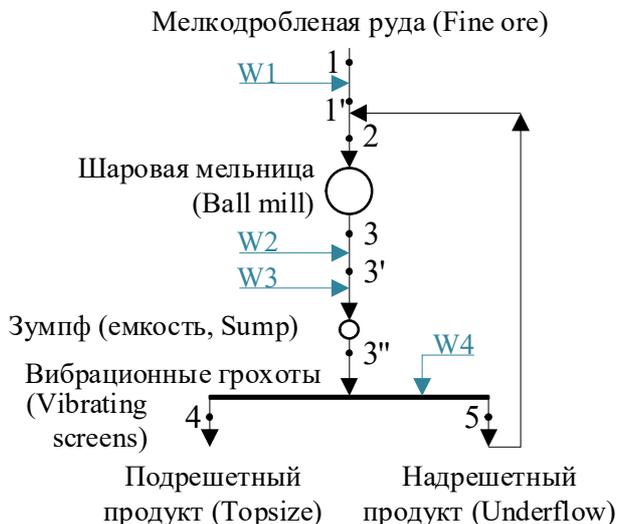
выявит перегруз только тогда, когда мельница уже находится в центрифужном режиме.

Для решения данных проблем в работе рассмотрена структура САУ на основе регулятора с прогнозирующей моделью (MPC) с наблюдателем возмущений (DOB) для компенсации возмущений влажности исходной руды и виртуальным анализатором (ВА) перегруза мельницы.

### Материалы и методы

ВА перегруза мельницы – модель для прогнозирования массы измельчаемого материала внутри мельницы для оперативного формирования ограничений по максимальной производительности по исходной руде. Для синтеза

оптимального корректирующего динамического элемента ВА сложно предложить обобщенную универсальную методику [11], поэтому предложена модель, сформулированная по физическим принципам измельчения. Моделирование динамики технологического процесса измельчения рассматривалось в работах [12-16]. Используемая математическая модель основана на системе уравнений, разработанной авторами в [17], средняя абсолютная ошибка в процентах которой составила 7 % при тестировании на данных реального технологического процесса. Модель описывает одностадийный замкнутый цикл мокрого измельчения в мельнице барабанного типа с разгрузкой через торцевую решетку (рис. 1).



**Рис. 1.** Одностадийная замкнутая схема измельчения: **1** – мелкодробленая руда; **1'** – мелкодробленая руда с водой **W1**; **2** – пульпа в загрузку мельницы; **3** – пульпа в сливе мельницы; **3'** – слив мельницы с водой **W2**; **3''** – пульпа на классификацию; **4** – подрешетный продукт грохочения; **5** – надрешетный продукт грохочения; **W1** – вода в загрузку мельницы; **W2** – вода в разгрузку мельницы; **W3** – вода в зумпф; **W4** – вода на классификацию

**Fig. 1.** Scheme of the one-stage closed circuit grinding: **1** – fine ore; **1'** – fine ore with water **W1**; **2** – pulp in mill feed; **3** – pulp in mill discharge; **3'** – pulp after mill discharge with water **W2**; **3''** – pulp for classification; **4** – topsize to flotation; **5** – underflow into the mill; **W1** – water in the mill feed; **W2** – water in the mill discharge; **W3** – water in the sump; **W4** – water for classification

Для модели было принято, что концентрации всех размерных фракций равномерно распределены по объему материала в мельнице  $V_m$ , соответственно, плотность пульпы одинакова по всему объему. Для расчета объема материала внутри мельницы было принято, что распределение пульпы не зависит от скорости вращения мельницы и описывается моделью неравномерного распределения от загрузочной цапфы до решетки по длине мельницы. Также было принято, что истечение жидкости из торцевой решетки с множеством конических наружу отверстий заменяется истечением из одного круглого конического отверстия площадью, соответствующей текущему уровню пульпы у торцевой решетки. Исходя из этого, расход пульпы из мельницы  $Q_3$  зависит только от уровня пульпы у загрузочной решетки и параметров решетки. Уравнение материального баланса для мельницы в таком случае имеет вид:

$$V_m(t) \frac{dp}{dt} = Q_{1'}(t) \rho_{1'}(t) + Q_5(t) \rho_5(t) - Q_3(t) \rho_3(t). \quad (1)$$

Учитывая, принятые допущения, решение уравнения материального баланса (1) позволит определить плотность пульпы в мельнице и рассчитать ее массу  $G$ . Входными данными для расчета  $G$  являются: производительность мельницы  $Q_1$ ; расходы воды  $W_1$ ,

$W_2$ ,  $W_3$ ,  $W_4$  во все точки замкнутого цикла измельчения и параметры технологического оборудования  $R$ :

$$f(Q_1, W_1, W_2, W_3, W_4, R, t) = G \rightarrow Q_{\max}.$$

Поскольку ВА необходим для предупреждения перегруза, ВА дополняет структуру разработанной САУ (рис. 2) и формирует ограничения производительности  $Q_{\max}$  для регулятора с прогнозирующей моделью MPC в момент достижения критического значения массы материала в мельнице  $G_{\max}$ , установленного заранее на основании опытно-промышленной эксплуатации.

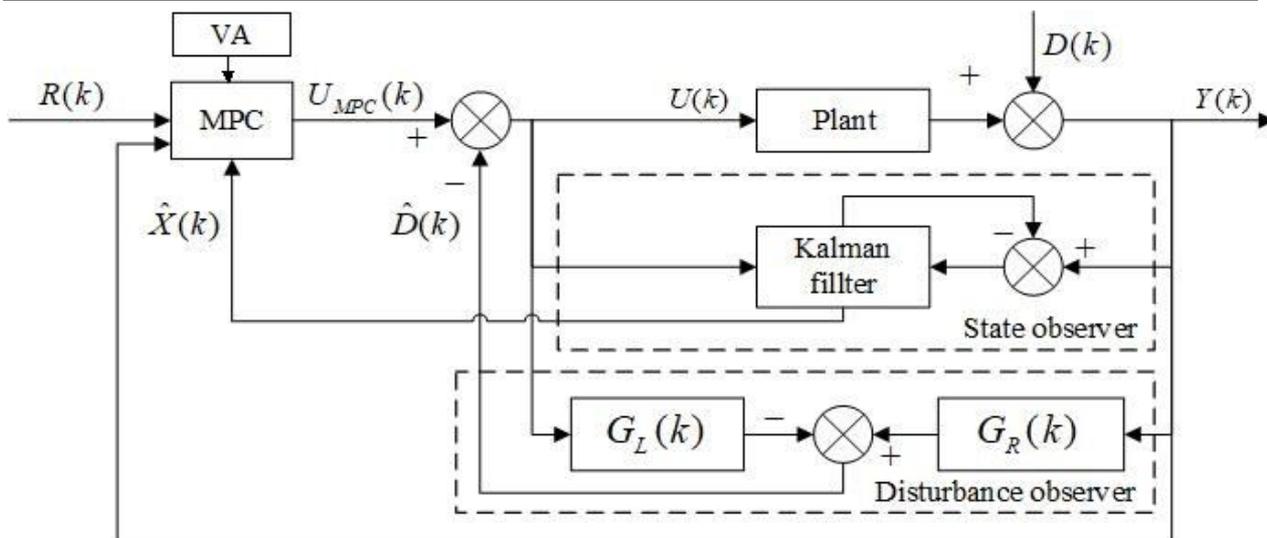
В качестве прогнозирующей модели используется линейная модель объекта управления (ОУ) с временной задержкой  $\tau$ :

$$G_n(s) = g_n(s) e^{-\tau s},$$

представленная в пространстве состояний, дискретизированная с интервалом  $T_s = 1$  с экстраполятором нулевого порядка:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B\Delta u(k - \tau_k), \\ y(k) &= Cx(k), \end{aligned}$$

где  $g_n(s)$  – линейная часть передаточной функции  $G_n(s)$ ;  $k$  – шаг дискретизации;  $x(k)$  – вектор состояний;  $u(k - \tau_k)$  – вектор входов;  $y(k)$  – вектор выходов;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – матрицы динамики системы, входов и выходов соответственно;  $\tau_k$  – целая часть от  $\tau / T_s$ .



**Рис. 2.** Структурная схема САУ с прогнозирующей моделью, наблюдателем возмущений и виртуальным анализатором перегруза (MPC-DOB+VA):  $R(k)$  – сигнал задания;  $U_{MPC}(k)$  – выход регулятора MPC;  $U(k)$  – сигнал управления;  $D(k)$  – возмущения;  $\hat{D}(k)$  – оценка возмущений;  $Y(k)$  – измеренный выходной сигнал;  $\hat{X}(k)$  – оценка состояний;  $G_L(k)$  – передаточная функция левой части DOB в дискретном времени;  $G_R(k)$  передаточная функция правой части DOB в дискретном времени;  $k$  – шаг дискретизации

**Fig. 2.** Block diagram of ACS control with model predictive controller, disturbance observer and virtual analyzer of overload (MPC-DOB+VA):  $R(k)$  – reference signals;  $U_{MPC}(k)$  – MPC controller outputs;  $U(k)$  – manipulated variables;  $D(k)$  – disturbances;  $\hat{D}(k)$  – estimated disturbances;  $Y(k)$  – current measured output signals;  $\hat{X}(k)$  – estimated states;  $G_L(k)$  – transfer function of left part of disturbance observer model in discrete time;  $G_R(k)$  – transfer function of right part of disturbance observer model in discrete time;  $k$  – sampling step

Оптимизационная задача квадратичного программирования для поиска оптимальной управляющей последовательности решается численным методом Хилдрета, в которой учитываются линейные ограничения на входные переменные:

$$u^{\min} \leq u(k) \leq u^{\max},$$

$$\Delta u^{\min} \leq \Delta u(k) \leq \Delta u^{\max},$$

где  $u^{\min}$ ,  $u^{\max}$ ,  $\Delta u^{\min}$ ,  $\Delta u^{\max}$  – минимум, максимум, минимальное и максимально приращение входной переменной. Учитывая рекомендации [18], ограничения на выходы не учитываются, так

как сходимость решение такой задачи не гарантируется. Алгоритм решения задачи оптимизации выполняется циклически, с целью минимизировать квадратическую ошибку приращения входа  $\Delta u(k)$ , между прогнозируемым выходом системы и уставкой  $R(k)$ , пока не достигается заданная точность или будет превышено заданное число итераций.

Для быстрой подстройки выхода прогнозирующей модели под текущее значение выхода ОУ используется наблюдатель состояния на основе дискретного линейного фильтра Калмана. На выходе наблюдателя получаем оцен-

ку вектора состояний системы для следующей итерации:

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + K_{ob}(y(k) - C\hat{x}(k)).$$

Весовая матрица  $K_{ob}$  наблюдателя состояний находится методом размещения полюсов [18],  $\hat{x}(k)$  – вектор состояния системы на текущей итерации  $k$ .

Наблюдатель возмущений DOB [4, 5] применен в структуре САУ в качестве компенсации как действующих внешних возмущений, так и связанных с несоответствием модели. Для этого возмущения оцениваются следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{D}(s) &= G_R(s) - G_L(s) = \\ &= H(s)g_n^{-1}(s)Y(s) - H(s)e^{-ts}U(s), \end{aligned}$$

эффективность подавления возмущений зависит от выбранного фильтра  $H(s)$ .

САУ со структурой (рис. 2) реализована в виде программного кода для ПЛК на языках стандарта МЭК 61318-3. Программа требует до 120 Кбайт памяти для хранения переменных и поддерживает модели ОУ до 4 входов и 4 выходов при максимальных горизонтах прогнозирования и управления – 200 и 4 соответственно.

Тестирование САУ на ПЛК было проведено в реальном времени в контуре с Simulink-моделью мельницы [17] посредством Modbus OPC сервера для обмена данными между PC и PLC (рис. 3). В работе использовался ПЛК Schneider Electric Modicon M580, программируемый в среде Unity Pro XL.

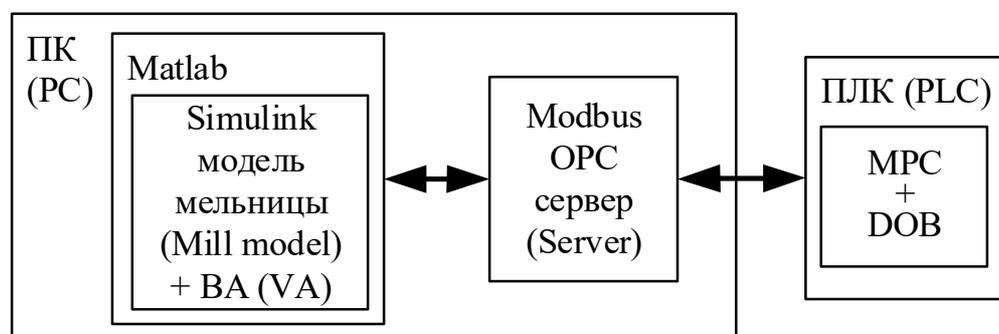


Рис. 3. Структура экспериментальной установки

Fig. 3. The schematic diagram of the experimental setup

Для оценки эффективности САУ использовались квадратичный интеграл от ошибки в замкнутой системе (Integral Squared Error, ISE), относительное среднеквадратическое отклонение (Relative Standard Deviation, RSD) и перерегулирование  $\sigma$ :

$$\begin{aligned} ISE &= \int_{t_1}^{t_2} (y(t) - y_{SP})^2 dt, \\ RSD &= \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (y(k) - y_{SP})^2}{n-1}} \cdot \frac{100\%}{y_{SP}}, \\ \sigma &= \frac{y_{max} - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100\%, \end{aligned}$$

где  $y(t)$  – значение стабилизируемого параметра во время  $t$ ;  $y(k)$  – значение стабилизируемого параметра на шаге  $k$ ;  $y_{sp}$  – уставка стабилизируемого параметра;  $t_1, t_2$  – время начала и конца расчета критерия ISE;  $y_{max}$  – максимальное значение стабилизируемого параметра;  $k$  – шаг дискретности;  $n$  – общее количество точек данных.

Эксперименты №1-3, 5 проводились с учетом случайных шумов по контролируемым величинам и их программной фильтрации на протяжении всего времени моделирования. Регулятор MPC используется максимально простой структуры SISO: выход ОУ – вибрация мельницы, %; вход ОУ – производительность мельницы, т/ч; горизонт прогнозирования  $N_p = 200$ ; горизонт управления  $N_c = 3$ ; вес для сигнала управления = 0,005; ограничение  $Q_{max} = 250$  т/ч. В ПЛК блок MPC вызывается один раз в секунду. Прогнозирующая модель требуемого качества получена методами аппроксимации ОУ лине-

аризованной моделью более низкого порядка [19]. Время задержки по каналу производительность-вибрация для модели составляет 10 мин. Передаточная функция для фильтра наблюдателя возмущений:

$$H(s) = \frac{1,1}{100s^2 + 5s + 1}.$$

Непосредственное описание реализации подхода прогнозирующего управления с наблюдателем возмущений на ПЛК и поиск оптимальных настроек параметров для данной задачи выходит за рамки статьи и будут рассмотрены в отдельной работе.

### Результаты и их обсуждение

А. Эксперимент №1 – стабилизация шума при изменении уставки (SP) с 16 % до 11 % в момент  $t = 500$  с, без внешних возмущений. Результаты и эффективность моделирования всех САУ представлены соответственно на рис. 4 и в табл. 1.

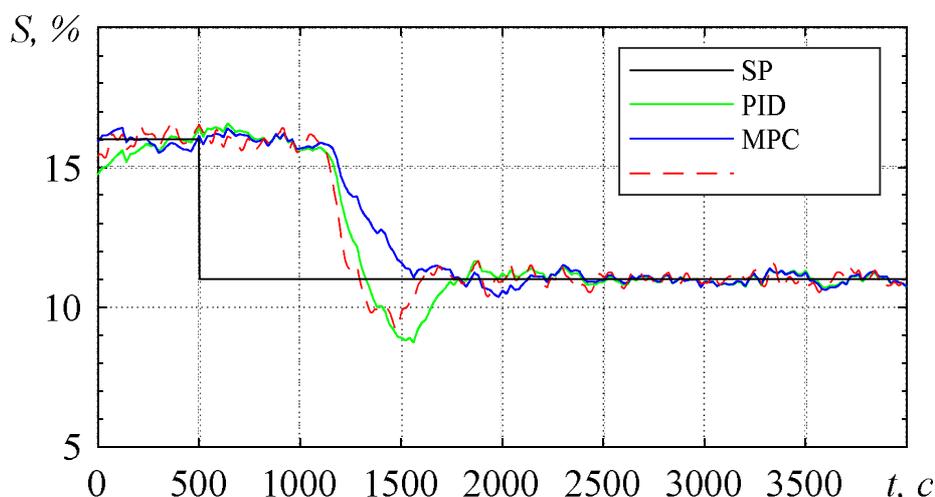


Рис. 4. Эксперимент №1: результаты моделирования

Fig. 4. Stabilization of mill vibration for various control methods in the conditions of experiment №1

**Таблица 1.** Статистическая эффективность стратегий управления на изменение уставки**Table 1.** Statistical efficiency of control methods for setpoint changes

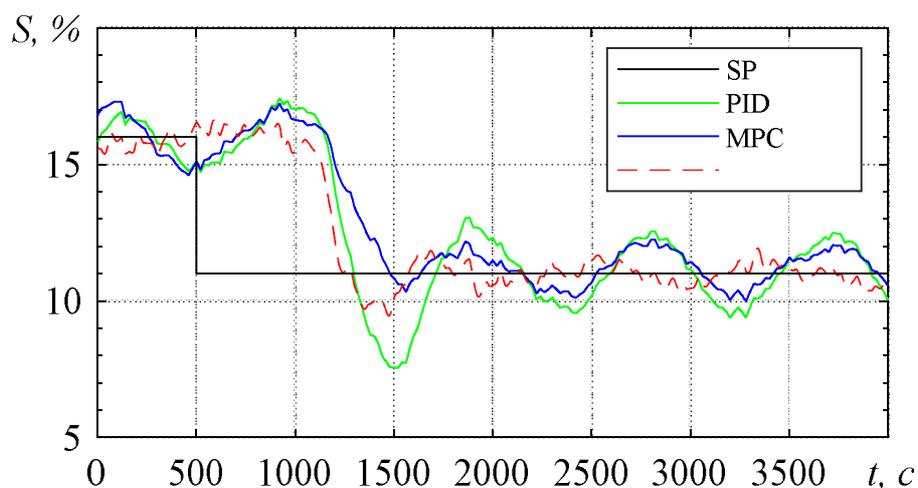
Стратегия управления / Control method	Критерии качества регулирования / Performance criteria		
	ISE	RSD, %	$\sigma$ , %
PID	5154,3	11,925	20,460
MPC	6026,3	12,894	5,748
MPC-DOB	4432,4	11,062	16,209

PID регулирование имеет нежелательное перерегулирование ( $\sigma = 20,460\%$ ) в момент  $t = 1500$  с, MPC показывает медленное но надежное регулирование ( $\sigma = 5,748\%$ ), что в данном случае важнее быстрой стабилизации с наименьшей интегральной ошибкой ISE, которую показывает MPC-DOB. Как видно из результатов, DOB не дает решающее преимущество при отсутствии возмущений.

**Б.** Эксперимент №2 – стабилизация шума при изменении уставки (SP) с 16 % до 11 % в момент времени 500 с, при воздействии синусоидальных возмущений с амплитудой 0,8 %, периодом

900 с на протяжении всего времени моделирования – 4000 с. Результаты и эффективность моделирования всех САУ представлены соответственно на рис. 5 и в табл. 2.

У ПИД-регулирования наблюдается отклонение в момент 1500 с более 3 % от уставки ( $\sigma = 31,377\%$ ), которое может привести к перегрузу мельницы. Падение шума ниже 6 % на практике зачастую является фактическим перегрузом мельницы. По ISE и RSD видно, что MPC-DOB успешно подавляет синусоидальные возмущения в отличие от PID и MPC, что также видно на рис. 6.

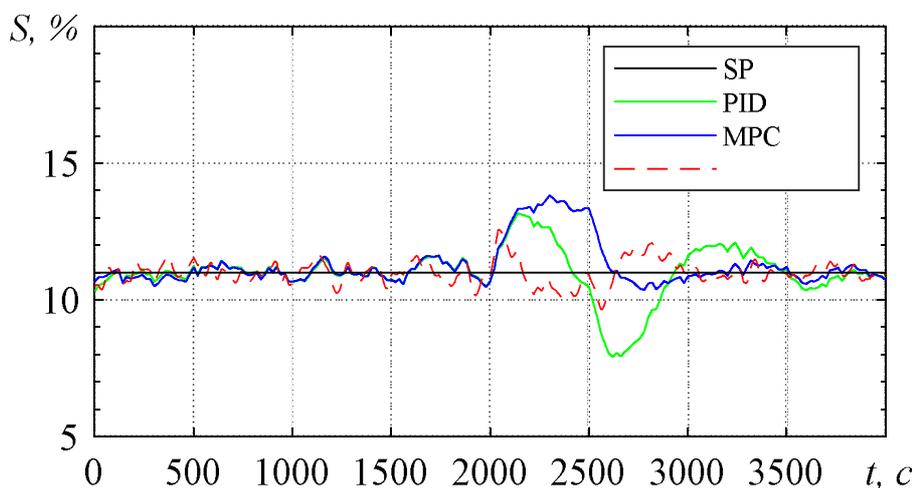
**Рис. 5.** Эксперимент №2: результаты моделирования**Fig. 5.** Stabilization of mill vibration for various control methods in the conditions of experiment №2

**Таблица 2.** Статистическая эффективность стратегий управления на изменение уставки при синусоидальных возмущениях**Table 2.** Statistical efficiency of control methods for sinusoidal disturbances

Стратегия управления / Control method	Критерии качества регулирования / Performance criteria		
	ISE	RSD, %	$\sigma$ , %
PID	10994,3	17,415	31,377
MPC	8016,51	14,872	11,234
MPC-DOB	4005,4	10,515	14,092

**В. Эксперимент №3** – стабилизация шума при воздействии постоянного возмущения 3 % в интервале времени 1700-3000 с. Результаты и эффектив-

ность моделирования всех САУ представлены соответственно на рис. 6 и в табл. 3.

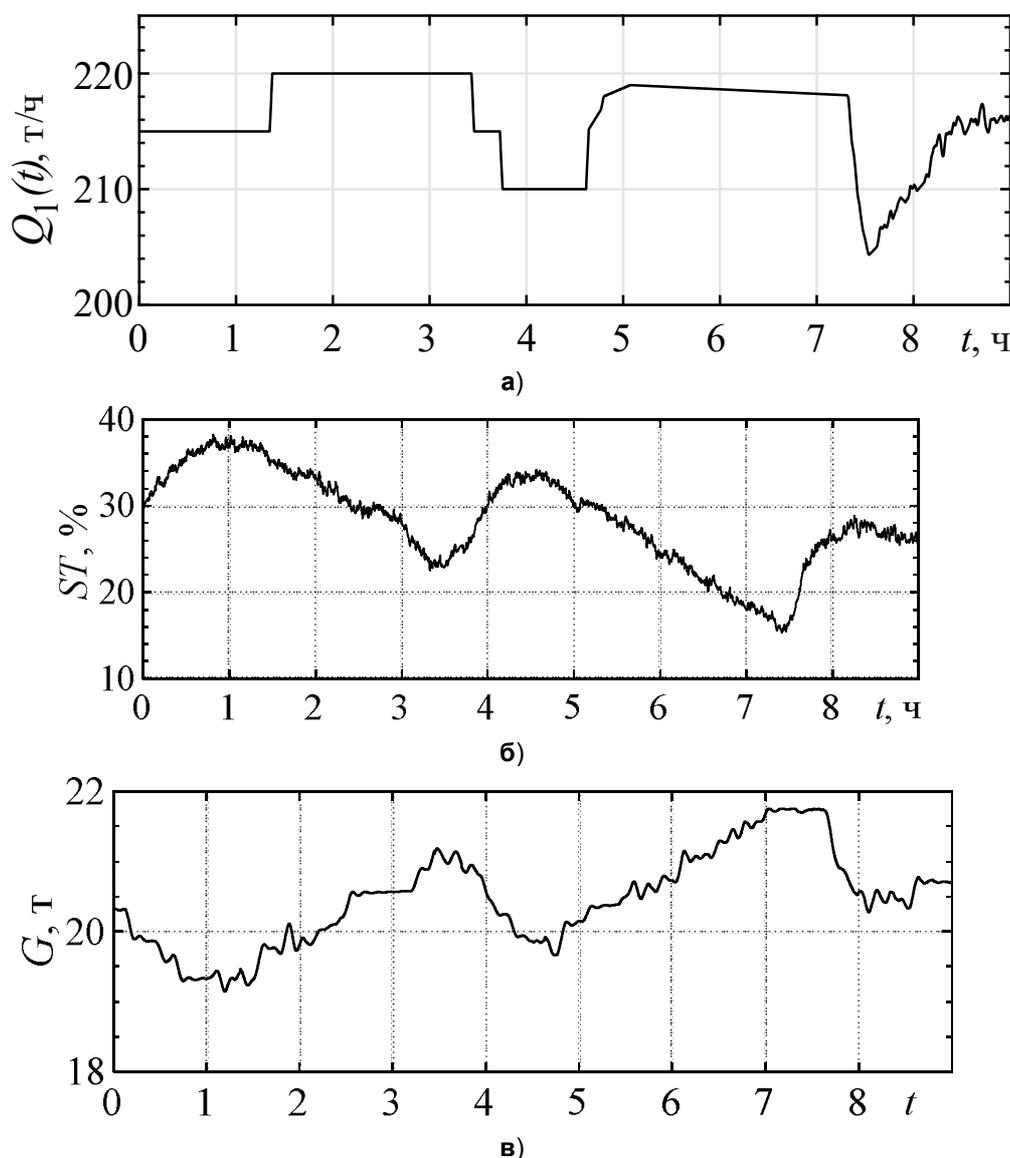
**Рис. 6.** Эксперимент №3: результаты моделирования**Fig. 6.** Stabilization of mill vibration for various control methods in the conditions of experiment №3**Таблица 3.** Статистическая эффективность стратегий управления на постоянное возмущающее воздействие (на основе моделирования)**Table 3.** Statistical efficiency of control methods for constant disturbances

Стратегия управления / Control method	Критерии качества регулирования / Performance criteria		
	ISE	RSD, %	$\sigma$ , %
PID	3348,7	9,603	28,036
MPC	2814,1	8,803	25,644
MPC-DOB	673,7	4,308	14,249

Результаты эксперимента №3 в условиях ступенчатого возмущения, которое на практике может быть результатом изменения влажности исходной руды, похожи на результаты с синусоидальным возмущением. Лучшие показатели ( $ISE = 673,7$ ,  $RSD = 4,308\%$ ,  $\sigma = 14,249\%$ ) у САУ с наблюдателем возмущений (MPC-DOB). ПИД-регулирование отличается опасным отклоне-

нием в момент 2700 с, а MPC медленным, но безопасным регулированием.

Г. Эксперимент №4 – проверка адекватности ВА веса материала в мельнице по данным расходов воды, производительности (рис. 7, а) и шума (рис. 7, б), полученных с комплекса измельчения апатито-нефелиновой руды с мельницей типа МШР 4,5х5,0.



**Рис. 7.** Эксперимент №4: результаты моделирования веса материала в мельнице  $G$ :  
 а – производительность (реальные данные); б – вибрация мельницы (реальные данные); в – вес материала в мельнице (данные моделирования)

**Fig. 7.** Quality verification of the VA of mill overload: а – ore productivity (real data); б – mill vibration (real data); в – weight of material in the mill (VA output)

На рис.7 видно, что рост графика ST приводит к падению графика G и наоборот, что говорит о сильной зависимости между переменными – отрицательной корреляции. С точки зрения технологии процесса измельчения, при наполнении мельницы материалом, а именно росте массы материала в мельнице, должна снижаться вибрация, что видно по полученным графикам (рис. 7) и подтверждает адекватность модели и возможности оценки перегруза по параметру G.

Д. Эксперимент №5 – моделирование работы САУ в режиме, близком к перегрузу, – из установившегося режима при ручном управлении производительностью мельницы  $Q = 225$  т/ч, включается САУ с уставкой шума  $ST = 7\%$  в момент  $t = 3,92$  ч. В эксперименте рассмотрены САУ с ПИД, MPC и MPC-DOV+BA, На протяжении всего времени моделирования учитываются синусоидальные возмущения с амплитудой  $0,3\%$ , периодом  $1200$  с. Данный эксперимент необходим для демонстрации преимущества предлагаемой стратегии САУ с MPC-DOV+BA и принятые в эксперименте настройки актуальны для конкретного рассмотренного случая. Критическая масса  $G_{max} = 93\%$  ( $28,8$  т) принята из оценки, что перегруз для мельницы с износом  $30\%$  при нормальной руде (влажность  $3\%$ , небедная по хим. составу) наступил бы при производительности  $Q \approx 245-250$  т/ч, что соответствует  $G = 100\%$  ( $32$  т). При достижении  $G_{max}$ , BA обновляет действу-

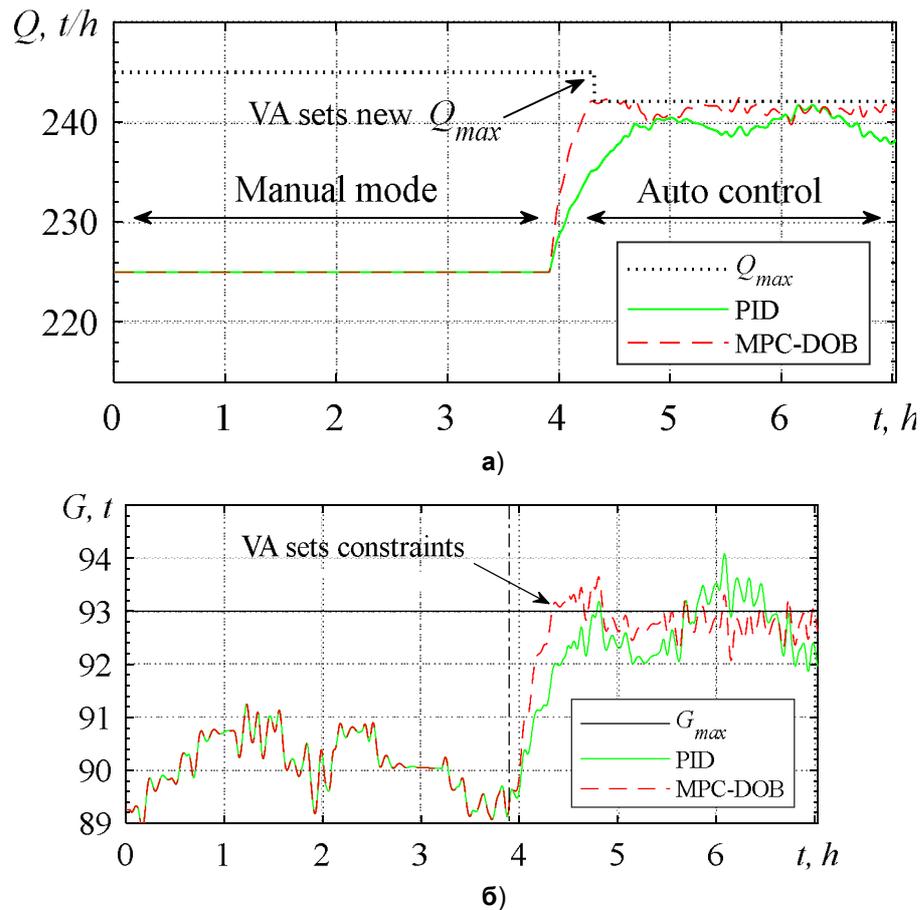
ющее ограничение  $Q_{max}$  для MPC на величину текущей производительности. Результаты и эффективность САУ представлены соответственно на рис. 8.

На  $1\%$  (рис. 8, а) увеличилась средняя производительность в автоматическом режиме с MPC-DOV+BA –  $240,67$  т/ч по сравнению с ПИД –  $238,01$  т/ч. На рис. 8 можно видеть функционирование BA – в момент  $t = 4,32$  ч при превышении  $G_{max}$  было установлено новое ограничение  $Q_{max} = 243$  т/ч для регулятора MPC.

## Выводы

В данной работе была представлена новая система автоматического управления заполнением шаровой мельницы с постоянной скоростью вращения, с разгрузкой через торцевую решетку в замкнутом цикле измельчения, отличающаяся совместным использованием прогнозирующего управления, наблюдателя возмущений, виртуального анализатора веса материала в мельнице для повышения производительности, устойчивости к внешним возмущениям, устойчивости работы в режиме функциональной неустойчивости.

Применение MPC-DOV при синусоидальных и ступенчатых возмущениях позволило сократить RSD на  $4-7\%$  по отношению к ПИД и MPC (рис. 4-6, табл. 1-3). В сравнении с MPC без наблюдателя возмущений в [20], который позволил сократить RSD на  $1-2\%$ , применение MPC-DOV показывает свое преимущество.



**Рис. 8.** Сравнение САУ с ПИД и MPC-DOB+ВА: **а** – производительность по руде; **б** – масса материала в мельнице (выход ВА)

**Fig. 8.** Comparison of ACS with PID and MPC-DOB+VA performance: **a** – ore productivity; **b** – weight of material in the mill (VA output)

Применение MPC-DOB+ВА позволило повысить производительность мельницы на 1 % (рис. 8, а) по сравнению с ПИД регулированием. Дополнительное применение ВА для оперативного формирования ограничений производительности по спрогнозированному значению веса материала в мельнице позволяет эксплуатировать технологи-

ческое оборудование цикла измельчения в режимах высокой производительности (рис. 8), избегая перегрузки мельницы. Предложенные модели и алгоритмы могут являться основой для внедрения усовершенствованной САУ в АСУТП обогатительных фабрик с возможностью повысить производительность передела измельчения.

### Список литературы

1. Energy efficiency analysis of copper ore ball mill drive systems / P. Bortnowski, L. Gładysiewicz, R. Król, M. Ozdoba // *Energies*. 2021; 14(6): 1786-1799. <https://doi.org/10.3390/en14061786>.

2. Control strategy of cement mill based on bang-bang and fuzzy PID self-tuning / Q. Meng, Y. Wang, F. Xu, X. Shi // 2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). IEEE; 2015; 1977-1981. DOI: 10.1109/CYBER.2015.7288250.

3. Expert system based adaptive dynamic matrix control for ball mill grinding circuit / X. S. Chen, S. H. Li, J. Y. Zhai, Q. Li // Expert systems with Applications. 2009; 36(1): 716-723. DOI: 10.1016/j.eswa.2007.10.008.

4. Composite control for raymond mill based on model predictive control and disturbance observer / D. Niu, X. Chen, J. Yang, X., Wang X. Zhou // Advances in Mechanical Engineering. 2016; 8(3): 1–10. <https://doi.org/10.1177/1687814016639825>.

5. Process Control of Ball Mill Based on MPC-DO / X. Chen, J. Yang, Z. Zhong, J. Zhai // Mathematical Problems in Engineering. 2021; 2021: 1-14. <https://doi.org/10.1155/2021/9994666>.

6. Gavrilin A. N., Moyzes B. B., Cherkasov A. I. Research methods of milling technology elements // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd; 2015; 756: 35-40. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.756.35>.

7. McClure K. S., Gopaluni R. B. Overload detection in semi-autogenous grinding: a nonlinear process monitoring approach // IFAC-PapersOnLine. 2015; 48(8): 960-965. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.094>.

8. Semi-Autogenous (SAG) Mill Overload Forecasting / R. Hermosilla, C. Valle, H. Allende, E. Lucic, P. Espinoza // Iberoamerican Congress on Pattern Recognition. Springer: Cham; 2021; 392-401. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-93420-0\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-030-93420-0_37).

9. Zakamaldin A. A., Shilin A. A. Neural simulation of ball mill grinding process // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing; 2020; 795(1): 012010-012017. DOI:10.1088/1757-899X/795/1/012010.

10. Байзакова Г. А., Томилин А. К. Электромагнитный способ подстройки частоты вибрметра // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. 55(6-2): 244-247. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/161606946.pdf>.

11. Методика постановки эксперимента в среде CoDeSys на примере системы управления вентиляцией / С. В. Прохоров, Н. В. Выонг, А. А. Шилин, Г. И. Однокопылов, В. А. Шевчук // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2019; 22(4): 109-115. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-postanovki-eksperimenta-v-srede-codesys-na-primere-sistemy-upravleniya-ventilyatsiy>.

12. Le Roux J. D., Craig I. K. Requirements for estimating the volume of rocks and balls in a grinding mill // IFAC-PapersOnLine. 2017; 50(1): 1169-1174. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.403.

13. Faria P. M. C., Rajamani R. K., Tavares L. M. Optimization of solids concentration in iron ore ball milling through modeling and simulation // Minerals. 2019; 9(6): 366-380. <https://doi.org/10.3390/min9060366>.

14. De Oliveira A. L. R., Tavares L. M. Modeling and simulation of continuous open circuit dry grinding in a pilot-scale ball mill using Austin's and Nomura's models // *Powder technology*. 2018; 340: 77-87.

15. Liu Y., Spencer S. Dynamic simulation of grinding circuits // *Minerals Engineering*. 2004; 17(11-12): 1189-1198. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.05.018>.

16. le Roux J. D., Craig I. K. State and parameter identifiability of a non-linear grinding mill circuit model // *IFAC-PapersOnLine*. 2016; 49(20): 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.087>.

17. Закамалдин А. А., Шилин А.А. Моделирование замкнутого цикла измельчения в шаровой барабанной мельнице с разгрузкой через торцевую решетку // *Технология машиностроения*. 2021; 8: 12-20.

18. A low-cost pole-placement MPC algorithm for controlling complex dynamic systems / Z. Zhang, L. Xie, S. Lu, J. A. Rossiter, H. Su // *Journal of Process Control*. 2022. 111: 106-116. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2022.02.001>

19. Букреев В. Г., Шандарова Е. Б., Рулевский В. М. Многомерная модель системы электропитания погружного технологического оборудования // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018; 329(4): 119-131. URL: [https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/47202/1/bulletin\\_tpu-2018-v329-i4-11.pdf](https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/47202/1/bulletin_tpu-2018-v329-i4-11.pdf)

20. Закамалдин А. А., Шилин А. А. Построение системы автоматического управления с прогнозирующей моделью для стабилизации плотности и уровня при перемешивании пульпы в горно-обоганительном оборудовании // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2021; 58: 77-83. DOI: 10.36807/1998-9849-2021-58-84-77-83.

## References

1. Bortnowski P., Gładysiewicz L., Król R., Ozdoba M. Energy efficiency analysis of copper ore ball mill drive systems. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 6, pp. 1786-1799. <https://doi.org/10.3390/en14061786>.

2. Meng Q., Wang Y., Xu F., Shi X. Control strategy of cement mill based on bang-bang and fuzzy PID self-tuning. *2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*. IEEE, 2015, pp. 1977-1981. DOI: 10.1109/CYBER.2015.7288250.

3. Chen X. S., Li S. H., Zhai J. Y., Li Q. Expert system based adaptive dynamic matrix control for ball mill grinding circuit. *Expert systems with Applications*, 2009, vol. 36, no. 1, pp. 716-723. DOI: 10.1016/j.eswa.2007.10.008.

4. Niu D., Chen X., Yang J., Wang X., Zhou X. Composite control for raymond mill based on model predictive control and disturbance observer. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, vol. 8, no. 3, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1177/1687814016639825>.

5. Chen X., Yang J., Zhong Z., Zhai J. Process Control of Ball Mill Based on MPC-DO. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021, vol. 2021, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1155/2021/9994666>.
6. Gavrilin A. N., Moyzes B. B., Cherkasov A. I. Research methods of milling technology elements. *Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd*, 2015, vol. 756, pp. 35-40. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.756.35>.
7. McClure K. S., Gopaluni R. B. Overload detection in semi-autogenous grinding: a nonlinear process monitoring approach. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 48, no. 8, pp. 960-965. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.094>.
8. Hermosilla R., Valle C., Allende H., Lucic E., Espinoza P. Semi-Autogenous (SAG) Mill Overload Forecasting. *Iberoamerican Congress on Pattern Recognition. Springer, Cham*, 2021, pp. 392-401. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-93420-0\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-030-93420-0_37).
9. Zakamaldin A. A., Shilin A. A. Neural simulation of ball mill grinding process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing*, 2020, vol. 795, no. 1, pp. 012010-012017. DOI:10.1088/1757-899X/795/1/012010.
10. Bajzakova G.A., Tomilin A.K. Elektromagnitnyi sposob podstroiki chastoty vibrometra [Electromagnetic way to adjust the frequency of the vibrometer]. *Fizika = Physics*, 2012, vol. 55, no. 6-2, pp. 244-247. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/161606946.pdf>.
11. Prokhorov S. V., Vyong N. V., Shilin A. A., Odnokopylov G. I., Shevchuk V. A. Metodika postanovki eksperimenta v srede CoDeSys na primere sistemy upravleniya ventilyatsiei [Methodology for setting up an experiment in the CoDeSys environment on the example of a ventilation control system]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 109-115. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-postanovki-eksperimenta-v-srede-codesys-na-primere-sistemy-upravleniya-ventilyatsiei>.
12. Le Roux J. D., Craig I. K. Requirements for estimating the volume of rocks and balls in a grinding mill. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol. 50, no. 1, pp. 1169-1174. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.403.
13. Faria P. M. C., Rajamani R. K., Tavares L. M. Optimization of solids concentration in iron ore ball milling through modeling and simulation. *Minerals*, 2019, vol. 9, no. 6, pp. 366-380. <https://doi.org/10.3390/min9060366>.
14. De Oliveira A. L. R., Tavares L. M. Modeling and simulation of continuous open circuit dry grinding in a pilot-scale ball mill using Austin's and Nomura's models. *Powder technology*, 2018, vol. 340, pp. 77-87.
15. Liu Y., Spencer S. Dynamic simulation of grinding circuits. *Minerals Engineering*, 2004, vol. 17, no. 1-12, pp. 1189-1198. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.05.018>.

16. Le Roux, J. D., Craig, I. K. State and parameter identifiability of a non-linear grinding mill circuit model. *FAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49, no. 20, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.087>.

17. Zakamaldin A. A., Shilin A. A. Modelirovanie zamknutogo tsikla izmel'cheniya v sharovoi barabannoi mel'nitse s razgruzkoi cherez tortsevuyu reshetku [Simulation of a closed grinding cycle in a ball drum mill with grate discharge]. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Engineering technology*, 2021, vol. 8, pp. 12-20 (In Russ.).

18. Zhang Z., Xie L., Lu S., Rossiter J. A., Su, H. A low-cost pole-placement MPC algorithm for controlling complex dynamic systems. *Journal of Process Control*, 2022, vol. 111, pp. 106-116. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2022.02.001>

19. Boukreev V. G., Shandarova E. B., Rulevskiy V. M. Mnogomernaya model' sistemy elektropitaniya pogruzhnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya [Multidimensional model of the power supply system for submersible processing equipment]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering*, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 119-131. Available at: [https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/47202/1/bulletin\\_tpu-2018-v329-i4-11.pdf](https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/47202/1/bulletin_tpu-2018-v329-i4-11.pdf)

20. Zakamaldin A. A., Shilin A. A. Postroenie sistemy avtomaticheskogo upravleniya s prognoziruyushchei model'yu dlya stabilizatsii plotnosti i urovnya pri peremeshivanii pul'py v gorno-obogatitel'nom oborudovanii [Construction of an automatic control system with a predictive model for density and level stabilization during pulp mixing in mining and processing equipment]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta) = News of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*, 2021, vol. 58, pp. 77-83. <https://doi.org/10.36807/1998-9849-2021-58-84-77-83>.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Закамалдин Андрей Андреевич**, главный специалист, ООО "Электра +", г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: [aaz5@tpu.ru](mailto:aaz5@tpu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4781-236X>

**Andrei A. Zakamaldin**, Chief Specialist, "Electra +" Ltd., St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: [aaz5@tpu.ru](mailto:aaz5@tpu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4781-236X>

**Шилин Александр Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, ОЭЭ ИШЭ НИТПУ, г. Томск, Российская Федерация, e-mail: [shilin@tpu.ru](mailto:shilin@tpu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4761-7249>

**Aleksandr A. Shilin**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Power Engineering School, Department of Electric Power and Electrical Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation, e-mail: [shilin@tpu.ru](mailto:shilin@tpu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4761-7249>