

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДЕЛИ ОБЖИГОВОЙ ПЕЧИ В ПРОЦЕССЕ НОРМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Р.Е. Леонов¹, С.С. Патраков¹

¹ Уральский государственный горный университет,
Екатеринбург, Россия, e-mail: lprep2011@mail.ru

Аннотация: Одним из основных требований эффективности автоматических систем управления на фабриках обогащения является адекватность математической модели управляемого объекта, использованная при проектировании и наладке системы управления. Однако даже при адекватной математической модели объекта управления с течением времени работа системы автоматического регулирования может стать неэффективной из-за изменения параметров объекта управления, использованных при разработке системы. Таким образом, возникает необходимость периодической актуализации параметров управляемого объекта. Особенно важной такая подстройка параметров является для объектов с возвратом части исходного вещества с выхода объекта на его вход — объектов с рециркуляцией (рециклом). Для обогащительных процессов такими объектами в некоторых случаях являются дробилки, грохоты, мельницы и целый ряд других технологических агрегатов. Кроме того, зачастую объекты с рециклом характеризуются большими транспортными запаздываниями в потоках руды и пульпы. При создании систем автоматического регулирования в этом случае нужна точная математическая модель управляемого объекта. В частности, такая модель совершенно необходима для использования регулятора Смита, рекомендуемого для работы с объектами с рециклом. Вследствие старения механизмов, изменения физических свойств руды и пульпы, а также прочих условий параметры объектов управления изменяются, и требуется их периодическая корректировка, что неоднократно указывалось в различных исследованиях. Предложено использовать аппарат теории случайных функций для актуализации математического описания обогащительных объектов с рециклом на основе уравнения Винера-Хопфа, без проведения специальных экспериментов в режиме нормальной эксплуатации.

Ключевые слова: автокорреляционная функция, взаимокорреляционная функция, технологический процесс, система автоматического регулирования, корректировка модели, уравнение Винера-Хопфа, передаточная функция, объект управления.

Для цитирования: Леонов Р. Е., Патраков С. С. Определение модели обжиговой печи в процессе нормальной эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 1-1. — С. 155—164. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_155.

Determination of a kiln model during normal operation

R.E. Leonov¹, S.S. Patravok¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia, e-mail: lprep2011@mail.ru

Abstract: One of the main requirements for the efficiency of automatic control systems at enrichment plants is the adequacy of the mathematical model of the controlled object used in the design and adjustment of the control system. However, even with an adequate mathematical

model of the control object, over time, the operation of the automatic control system may become ineffective due to changes in the parameters of the control object used in the development of the system. Thus, there is a need for periodic updating of the parameters of the controlled object. Such parameter adjustment is especially important for objects with the return of part of the initial substance from the output of the object to its input – objects with recirculation (recycle). For enrichment processes, such objects in some cases are crushers, screens, mills and a number of other process units. In addition, objects with recycle are often characterized by large transport delays in the flows of ore and pulp. When creating automatic control systems in this case, an accurate mathematical model of the controlled object is needed. In particular, such a model is absolutely necessary for using the Smith regulator recommended for working with objects with recycling. Due to the aging of mechanisms, changes in the physical properties of ore and pulp, and other conditions, the parameters of control objects change and require periodic adjustment, which has been repeatedly indicated in various studies. The paper proposes to use the apparatus of the theory of random functions to update the mathematical description of enrichment objects with recycle, based on the Wiener-Hopf equation, without conducting special experiments in normal operation mode.

Key words: autocorrelation function, intercorrelation function, technological process, automatic control system, model adjustment, Wiener-Hopf equation, transfer function, control object.

For citation: Leonov R. E., Patrakov S. S. Determination of a kiln model during normal operation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(1-1):155-164. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_155.

Введение

Одной из задач, которые постоянно приходится решать в производственной деятельности, является повышение качества управления технологическими процессами. Не последнюю роль при этом выполняют системы автоматического управления технологическими объектами. Значительную долю на горнообогатительных фабриках составляют непрерывные процессы. Сюда относятся процессы дробления руды, поступающей на обогащение, процессы помола в мельницах, обезвоживания и осаднения твердого вещества в пульпе, процессы флотации. На некоторых обогатительных фабриках заключительными операциями являются обжиг, получение агломерата, окатышей выщелачивания и ряд других технологических процессов, различающихся в зависимости от вида полезного ископаемого.

Автоматическое управление такими процессами не потеряло своей актуаль-

ности с внедрением цифровой вычислительной техники. С развитием промышленной автоматике появились новые возможности в создании и эксплуатации систем автоматического управления технологическими процессами.

Далее рассматривается один из возможных подходов, и приведены результаты решения некоторых задач, возникающих при разработке важного класса таких систем — систем с рециркуляцией.

С внедрением систем управления технологическими процессами на базе цифровой техники повышаются требования к надежности и качеству автоматических систем, в частности, к времени переходного процесса, перерегулированию, величине ошибки в установившемся режиме. Особое внимание уделяется компенсации возмущающих воздействий [1, 2].

Горно-обогатительные процессы как объекты автоматического управления имеют особенность: большую инерцион-

ность, кроме того, многие горно-обога- тительные процессы характеризуются рециркуляционными потоками (рецик- лами) [3 – 5]. Обратная связь по матери- альному потоку представляет собой воз- врат в технологический процесс части вещества на повторную переработку и с точки зрения автоматического управле- ния является положительной обратной связью. В горной промышленности реци- клы характеризуются большим вре- менем транспортного запаздывания, ко- торое ухудшает устойчивость систем. Возврат в систему управления части ма- териального потока приводит к тому, что может произойти превышение допустим- ого значения объема подаваемого про- дукта, в результате чего объект управ- ления становится неустойчивым. Неус- тойчивость технологического объекта с рециклом на практике компенсируется технологическим персоналом, который корректирует подачу входного потока и возврат подаваемого продукта [6 – 8].

Влияние рецикла на качество авто- матических систем для объектов горной промышленности изучено недостаточно, и управление объектами с рециклами представляет в этой связи актуальную задачу.

Особого внимания заслуживают объ- екты с рециклом при наличии возмуще- ний. С точки зрения автоматического управления возмущениями являются лю- бые неконтролируемые изменения объ- екта управления. Сюда, в частности, следует отнести старение агрегатов, из- нос шаровой или стержневой загрузки мельниц, неконтролируемые изменения физических параметров поступающей руды и других величин, от которых из- меняется эффективность технологиче- ского процесса.

Неконтролируемое изменение таких величин изменяет нормальную работу объекта управления и при отсутствии систем автоматического регулирования

требует вмешательства технологическо- го персонала. Устойчивость объекта уп- равления и системы управления в целом зависит от таких параметров объекта, как: время транспортного запаздывания τ , постоянная времени T и коэффициент передачи k [9, 10]. Изменение этих пара- метров (τ , T , k) в ходе нормальной экс- плуатации оборудования может быть об- условлено изменением неконтролируе- мых условий работы (влиянием возму- щающих факторов). В частности, в гор- но-обогажительной промышленности для процессов дробления и измельчения ус- тойчивость объектов управления может быть нарушена при изменении качества подаваемого сырья.

Настройка регуляторов систем авто- матики базируется на математическом описании управляемого объекта (модели объекта). Таким образом, для нормаль- ного хода технологического процесса воз- никает необходимость в актуализации численных значений параметров объ- екта управления (τ , T , k). Одним из ме- тодов, которые используют для этого, является подача пробного воздействия на вход объекта управления (обычно в виде ступенчатой функции), запись вы- ходной величины (переходной кривой) и определение параметров математиче- ской модели, описывающей объект уп- равления (ОУ) по виду кривой переход- ного процесса [11, 12].

Однако такой метод коррекции моде- ли ОУ имеет существенный недостаток. Он требует прерывания текущей рабо- ты ОУ, что чаще всего технологически невозможно на действующих предприя- тиях. Альтернативой является коррек- тировка модели в процессе нормальной эксплуатации. Одним из методов в этом случае является использование автокор- реляционных и взаимокорреляционных функций, которые получают из записей входных и выходных величин ОУ в про- цессе нормальной эксплуатации [11, 12].

Обсуждение результатов

Записи основных параметров объекта по заданным каналам управления, осуществляемых приборами контроля, которые установлены на объекте управления, позволяют предотвратить аварийные режимы агрегатов и процессов. Одновременно эти записи работы объекта в режиме нормальной эксплуатации можно использовать для оперативного расчета передаточной функции объекта управления и подстройки параметров системы автоматического регулирования.

При использовании способов коррекции модели объекта управления в режиме нормальной эксплуатации вычисляют взаимокорреляционную (1) и автокорреляционную (2) функции [13, 14], которые позволяют оперативно скорректировать передаточную функцию по показаниям проборов контроля на входе и выходе объекта управления по заданному каналу:

$$R_{xy}(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T y(t+\tau)x(t)dt, \quad (1)$$

$$R_x(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T x(t+\tau)x(t)dt, \quad (2)$$

где $x(t)$ — эргодический, стационарный случайный процесс на входе объекта; $y(t)$ — эргодический, стационарный случайный процесс на выходе объекта; T — промежуток времени записи случайного процесса.

На основе полученных $R_{xy}(\tau)$ и $R_x(\tau)$ рассчитывают импульсную переходную функцию ОУ $k(\vartheta)$ из основного уравнения Винера-Хопфа (3), и, следовательно, появляется способ оперативной коррекции модели [15–17]:

$$R_{yx}(\tau) \approx \int_0^{\infty} R_x(\tau - \vartheta)k(\vartheta)d\vartheta. \quad (3)$$

В общем виде процесс определения передаточных функций по автокорреляционной и взаимокорреляционной функ-

циям можно представить в виде следующего алгоритма:

1. Находим по атласу корреляционных функций [17] тип автокорреляционной функции (АКФ), идентичный полученному на действующем объекте, и его математическое выражение.

2. Находим тип взаимокорреляционной функции (ВКФ), идентичный полученному, и его математическое выражение.

3. По фактическим значениям АКФ и ВКФ определяем параметры для математических выражений п. 1 и п. 2.

4. Определяем виды автокорреляционной и взаимокорреляционной функций в положительных и отрицательных полуплоскостях R_{xx}^+ , R_{xx}^- , R_{yx}^+ , R_{yx}^- .

5. Имея математические выражения для полуплоскостей автокорреляционной и взаимокорреляционной функций, находим их преобразования Лапласа.

6. Вычисляем передаточную функцию ОУ:

$$W = \frac{(R_{xy}^+ - R_{xy}^-)}{(R_{xx}^+ - R_{xx}^-)}. \quad (4)$$

Следует отметить, что п.п. 1–6 выполняются однократно при исследовании конкретного технологического процесса. При этом нужно учесть, что большинство технологических процессов обогатительных фабрик хорошо аппроксимируются инерционным звеном первого порядка, что существенно упрощает расчеты.

7. Для ОУ горнообогатительной промышленности часто в первом приближении АКФ и ВКФ имеют следующий вид:

$$\begin{cases} R_{xx} = Ae^{-\alpha|\tau|} \\ R_{yx} = Be^{-\beta|\tau|} \end{cases} \quad (5)$$

Тогда в пределах значимости АКФ и ВКФ имеет место

$$R_{xx}(\tau) = \begin{cases} R_{xx}^+ = Ae^{-\alpha(\tau)}, \tau \geq 0 \\ R_{xx}^- = Ae^{+\alpha(\tau)}, \tau < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$R_{yx}(\tau) = \begin{cases} R_{yx}^+ = Be^{-\beta(\tau)}, \tau \geq 0 \\ R_{yx}^- = Be^{+\beta(\tau)}, \tau < 0 \end{cases} \quad (7)$$

С использованием преобразования Лапласа [18], при выбранном виде $R_{yx}(\tau)$, $R_{yx}(\tau)$ и с учетом реализуемости полученная передаточная функция $W(p)$ [17, 18]:

$$W(p) = \frac{B}{A} \cdot \frac{\alpha + \beta}{2\alpha} \cdot \frac{p + \alpha}{p + \beta} \quad (8)$$

Значения A , B , α , β определяют в этом случае по графикам автокорреляционной и взаимокорреляционной функций. Подставляя эти значения в (8), получаем передаточную функцию $W(p)$ с действующими в данный момент параметрами.

Для проверки возможности использования предложенного алгоритма применительно к горнообогатительным процессам нами использованы данные по обжигу окатышей в режиме нормальной эксплуатации ОУ. В качестве примера по данным температуры T и расхода газа Q при обжиге окатышей, являющемся заключительным процессом обогатительной фабрики, были построены графики изменения параметров, представленные на рис. 1 и 2.

На основе этих данных вычислены нормированная автокорреляционная функция расхода газа (входная величина) при обжиге окатышей и нормированная взаимокорреляционная функция температуры и расхода газа, где температура над постелью окатышей рассматривалась как выходная величина. Графики автокорреляционной функции расхода газа и взаимокорреляционной функции для параметров газа и температуры представлены на рис. 3 и 4.

Из предварительного анализа было установлено, что передаточная функция ОУ по заданному каналу управления может быть описана инерционным звеном первого порядка. В данном случае идентификация ОУ сводится к определению численных значений параметров передаточной функции. Вышеописанный алгоритм использован для определения действующих параметров передаточной функции ОУ.

С учетом доверительного интервала для АКФ и ВКФ, а также предварительных данных о представлении передаточной функции в виде звена первого порядка нами использован вид АКФ и ВКФ в соответствии с (6) и (7).

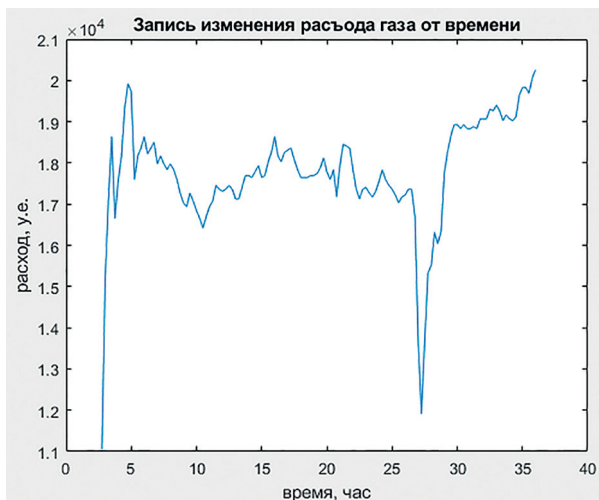


Рис. 1. Запись расхода газа при обжиге окатышей
Fig. 1. Recording of gas consumption during pellet firing

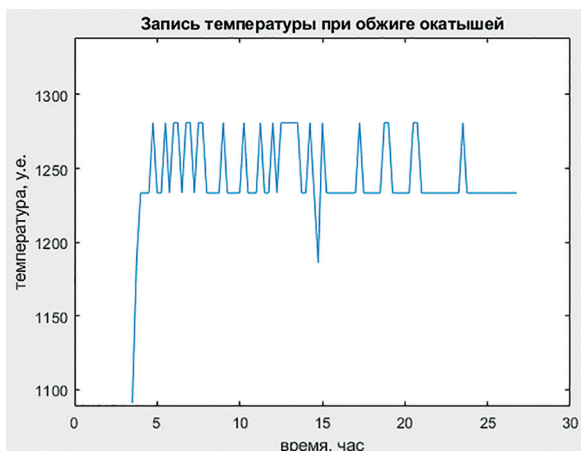


Рис. 2. Запись температуры при обжиге окатышей

Fig. 2. Recording of temperature during pellet firing

Из графиков АКФ и ВКФ видно, что в моменты времени $\alpha_1 = 0$ и $\alpha_2 = -10$, $\beta_1 = 4$ и $\beta_2 = -46$ их значения соответственно равны $R_{xx}^+ = 1$ и $R_{xx}^- = 0,1$; $R_{yx}^+ = 100,6$ и $R_{yx}^- = 5$

Тогда параметры автокорреляционной функции равны:

$$\begin{cases} 0,1 = Ae^{-10\alpha} \\ 1 = Ae^{0\alpha} \end{cases}, \begin{cases} \ln 0,1 = \ln A - 10\alpha \\ 1 = Ae^{0\alpha} \end{cases}, \\ \begin{cases} -2,3 = -10\alpha \\ A = 1 \end{cases}, \begin{cases} \alpha = 0,23 \\ A = 1 \end{cases}.$$

Параметры взаимокорреляционной функции равны:

$$\begin{cases} 100,6 = Be^{-4\beta} \\ 5 = Be^{-46\beta} \end{cases}, \begin{cases} \ln 100,6 = \ln B - 4\beta \\ \ln 5 = \ln B - 46\beta \end{cases}, \\ \begin{cases} 4,61 = \ln B - 4\beta & 42\beta = 3, \\ 1,61 = \ln B - 46\beta \end{cases}, \beta = 0,071, \\ 4,61 = \ln B - 4 \cdot (0,071), \\ \ln B = 4,61 - 0,284, \ln B = 4,326, \\ B = e^{4,326}, B = 75,64.$$

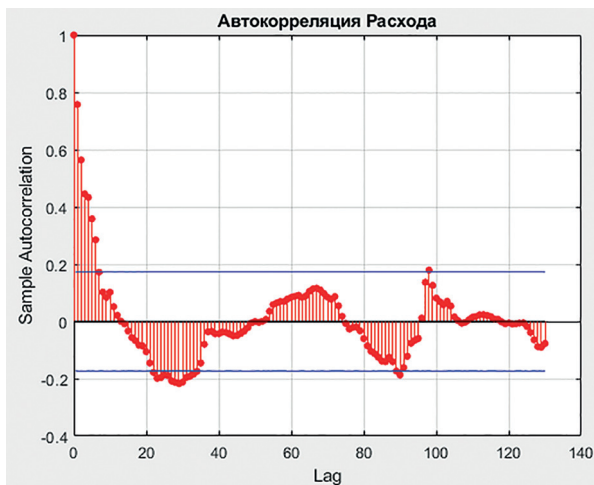


Рис. 3. Автокорреляционная функция расхода газа

Fig. 3. Autocorrelation function of gas flow



Рис. 4. Взаимокорреляционная функция расхода газа и температуры
 Fig. 4. The intercorrelation function of gas flow and temperature

Подстановкой значений параметров в (12), получена скорректированная передаточная функция ОУ:

$$W(p) = \frac{49,33p + 11,35}{p + 0,071} \quad (9)$$

График нормированного переходного процесса вычисленной переда-

точной функции (ПФ) представлен на рис. 5.

Из графиков изменения температуры вычисленной ПФ (1) и при обжиге окатышей (2) видно, что вычисленные значения соответствует наблюдаемым с достаточной точностью для практического применения.

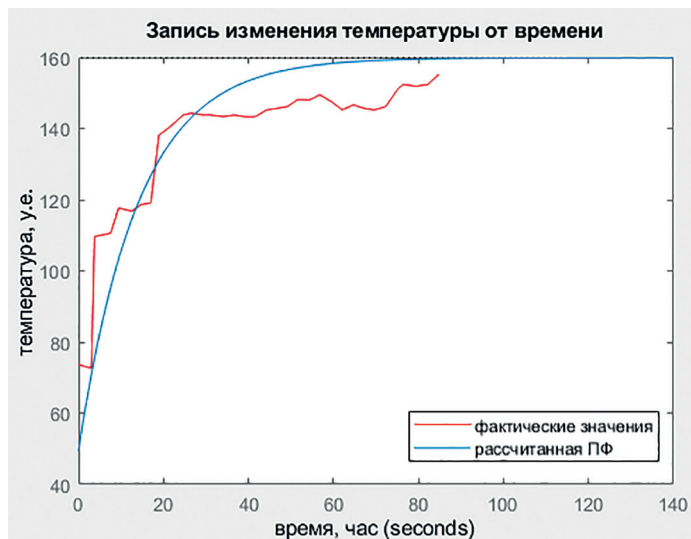


Рис. 5. График переходного процесса, снятый с реального объекта, и вычисленной передаточной функции

Fig. 5. Graph of the transient process taken from a real object and the calculated transfer function

Выводы

Значительная часть объектов горной промышленности, в частности, объектов с рециркуляцией продукции и объектов с большим запаздыванием, требует при создании систем автоматического регулирования учета периодической подстройки модели. В настоящей работе рассмотрено создание модели по записи расхода газа на обжиг и температуры в зоне обжига на примере одного из объектов горной промышленности. На основе рассмотрения входа и выхода процесса обжига как эргодических случайных процессов, альбома видов типовых автокорреляционных и взаимокорреляционных функций и уравнения Винера-Хопфа показана возможность актуализации модели печи в зоне обжига.

Использование точной модели обязательно необходимо при применении си-

стем с регулятором Смита, что неоднократно отмечено в технической литературе [19–21].

В случае невозможности производить периодические корректировки передаточной функции объекта управления традиционными методами целесообразно использовать автокорреляционные и взаимокорреляционные функции, рассчитанные при помощи уравнения Винера-Хопфа на основе параметров, полученных в режиме нормальной эксплуатации. Это позволяет периодически корректировать модель объекта управления без нарушения нормального режима его работы.

В свою очередь учет изменения модели объекта управления в период его эксплуатации позволяет подстраивать настройку системы автоматики при управлении объектом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муконин А. К., Медведев В. А., Трубецкой В. А., Тонн Д. А., Горемыкин С. А., Ситников Н. В. Повышение надежности систем автоматического управления технологическими процессами // Вестник ВГТУ. — 2020. — № 4. — С. 56–63. DOI: 10.25987/VSTU.2020.16.4.007.
2. Логинов Е. Л., Логинов А. Е. Повышение качества и надежности управления сложными системами критической энергетической инфраструктуры в ЭЭС России // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. — 2012. — № 38. — С. 31–37.
3. Нагиев М. Ф. Учение о рециркуляционных процессах в химической технологии. — М.: Изд-во АН СССР, 1958. — 243 с.
4. Цыпин Е. Ф. Предварительное обогащение // Известия вузов. Горный журнал. — 2001. — № 4-5. — С. 82–104.
5. Козин В. З., Комлев А. С., Волков П. С. Эффективность использования операций обогащения в схемах подготовки проб // Горный журнал. — 2017. — № 3. — С. 83–87.
6. Прокофьев Е. З., Ефремов В. Н., Лапин Э. С. Разработка алгоритмических структур моделей технологических комплексов процессов подготовки и обогащения полезных ископаемых // Известия УГГУ. — 2000. — № 9. — С. 47–56.
7. Марасанов В. М., Дылдин Г. П. Математическое описание процесса дробления в щековой дробилке // Известия вузов. Горный журнал. — 2017. — № 8. — С. 82–91. DOI: 10.21440/0536-1028-2017-8-82-91.
8. Утеуш З. В., Утеуш Э. В. Управление измельчительными агрегатами. — М.: Машиностроение, 1973. — 280 с.
9. Леонтьев А. А., Таугер В. М., Волков Е. Б. Динамика груженого скипа шахтной пневмоподъемной установки в период разгона // Известия вузов. Горный журнал. — 2021. — № 1. — С. 115–121. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-115-121.
10. Морозовский В. Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. — М.: Энергия, 1970.
11. Stanisławski R. Modified Mikhailov stability criterion for continuous-time noncommensurate fractional-ordersystems // Journal of the Franklin Institute. 2022, vol. 359, no. 4, pp. 271–283. DOI: 10.1016/j.jfranklin.2022.01.022.

12. Kundrata J., Fujimoto D., Hayashi Yu., Baric A. Comparison of Pearson correlation coefficient and distance correlation in correlation power analysis on digital multiplier / 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), 2020. DOI: 10.23919/MIPRO48935.2020.9245325.

13. Русакова Ю. О., Плавник А. Г., Вашурина М. В., Храмцова А. Л. Анализ основных факторов, определяющих значение удельного дебита водозаборной скважины // Известия Уральского государственного горного университета. — 2023. — № 1 (69). — С. 78 — 87. DOI: 10.21440/2307-2091-2023-1-78-87.

14. Солодовников В. В., Усков А. С. Статистический анализ объектов регулирования. Статистические методы определения динамических характеристик объектов автоматического регулирования в процессе их нормальной эксплуатации. — М.: Машгиз, 1960. — 131 с.

15. Смагин В. А. Решение интегрального уравнения Винера–Хопфа методом гипердельтной аппроксимации // Интеллектуальные технологии на транспорте. — 2016. — № 1. — С. 39 — 45.

16. Maurya G., Sharma B. L. Scattering by two staggered semi-infinite cracks on square lattice: an application of asymptotic Wiener–Hopf factorization // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik. 2019, vol. 70, article 133. DOI: 10.1007/s00033-019-1183-2.

17. Анисимов С. А., Зайцева И. С., Райбман Н. С., Яралов А. А. Типовые линейные модели объектов управления. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 264 с.

18. Дейч А. М. Методы идентификации динамических объектов. — М.: Энергия, 1979. — 240 с.

19. Baskys A. Switched-delay smith predictor for the control of plants with response-delay asymmetry // Sensors. 2023, vol. 23, article 258. DOI: 10.3390/s23010258.

20. Luo Y., Xue W., He W., Nie K., Mao Y., Guerrero J. M. Delay-compound-compensation control for photoelectric tracking system based on improved smith predictor scheme // IEEE Photonics Journal. 2022, vol. 14, no. 3. DOI: 10.1109/JPHOT.2022.3164202.

21. Потемкин В. Г. MATLAB 6: Среда проектирования инженерных приложений. — М.: Диалог МИФИ, 2003. — 448 с. **PLAB**

REFERENCES

1. Mukonin A. K., Medvedev V. A., Trubetsky V. A., Tonyan D. A., Goremykin S. A., Sitnikov N. V. Improving the reliability of automatic process control systems. *Bulletin of Vitebsk State Technological University*. 2020, no. 4, pp. 56 — 63. [In Russ]. DOI: 10.25987/VSTU.2020.16.4.007.

2. Loginov E. L., Loginov A. E. Improving the quality and reliability of management of complex systems of critical energy infrastructure in the UES of Russia. *National Interests: Priorities and Security*. 2012, no. 38, pp. 31 — 37. [In Russ].

3. Nagiev M. F. *Uchenie o retsirkulyatsionnykh protsessakh v khimicheskoy tekhnologii* [The doctrine of recycling processes in chemical technology], Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1958, 243 p.

4. Tsylin E. F. Preliminary concentration. *Minerals and Mining Engineering*. 2001, no. 4-5, pp. 82 — 104. [In Russ].

5. Kozin V. Z., Komlev A. S., Volkov P. S. Concentration operations efficiency in the schemes of samples preparation. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 3, pp. 83 — 87. [In Russ].

6. Prokofiev E. Z., Efremov V. N., Lapin E. S. Development of algorithmic structures of models of technological complexes of processes of preparation and enrichment of minerals. *News of the Ural State Mining University*. 2000, no. 9, pp. 47 — 56. [In Russ].

7. Marasanov V. M., Dyldin G. P. Mathematical description of the crushing process in a jaw crusher. *Minerals and Mining Engineering*. 2017, no. 8, pp. 82 — 91. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2017-8-82-91.

8. Uteush Z. V., Uteush E. V. *Upravlenie izmel'chitel'nyimi agregatami* [Control of grinding units], Moscow, Mashinostroenie, 1973, 280 p.

9. Leontiev A. A., Tauger V. M., Volkov E. B. The dynamics of a laden skip of the shaft pneumatic winding plant during acceleration. *Minerals and Mining Engineering*. 2021, no. 1, pp. 115 — 121. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-115-121.

10. Morozovskiy V. T. *Mnogosvyaznye sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya* [Multiconnected automatic control systems], Moscow, Energiya, 1970.

11. Stanisławski R. Modified Mikhailov stability criterion for continuous-time noncommensurate fractional-order systems. *Journal of the Franklin Institute*. 2022, vol. 359, no. 4, pp. 271 — 283. [In Russ]. DOI: 10.1016/j.jfranklin.2022.01.022.

12. Kundra J., Fujimoto D., Hayashi Yu., Baric A. Comparison of Pearson correlation coefficient and distance correlation in correlation power analysis on digital multiplier. *43rd International Conference on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*, 2020. DOI: 10.23919/MIPRO48935.2020.9245325.

13. Rusakova Yu. O., Plavnik A. G., Vashurina M. V., Khramtsova A. L. Analysis of the main factors determining the value of the specific flow rate of a water intake well. *News of the Ural State Mining University*. 2023, no. 1 (69), pp. 78–87. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2023-1-78-87.

14. Solodovnikov V. V., Uskov A. S. *Statisticheskiiy analiz ob"ektov regulirovaniya. Statisticheskie metody opredeleniya dinamicheskikh kharakteristik ob"ektov avtomaticheskogo regulirovaniya v protsesse ikh normal'noy ekspluatatsii* [Statistical analysis of regulatory objects. Statistical methods for determining the dynamic characteristics of automatic control facilities during their normal operation], Moscow, Mashgiz, 1960, 131 p.

15. Smagin V. A. Solution of the Wiener-Hopf integral equation by the hyperdelt approximation method. *Intellectual Technologies on Transport*. 2016, no. 1, pp. 39–45.

16. Maurya G., Sharma B. L. Scattering by two staggered semi-infinite cracks on square lattice: an application of asymptotic Wiener–Hopf factorization. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*. 2019, vol. 70, article 133. DOI: 10.1007/s00033-019-1183-2.

17. Anisimov S. A., Zaytseva I. S., Raybman N. S., Yarov A. A. *Tipovye lineynye modeli ob"ektov upravleniya* [Typical linear models of control objects], Moscow, Energoatomizdat, 1983, 264 p.

18. Deych A. M. *Metody identifikatsii dinamicheskikh ob"ektov* [Methods of identification of dynamic objects], Moscow, Energiya, 1979, 240 p.

19. Baskys A. Switched-delay smith predictor for the control of plants with response-delay asymmetry. *Sensors*. 2023, vol. 23, article 258. DOI: 10.3390/s23010258.

20. Luo Y., Xue W., He W., Nie K., Mao Y., Guerrero J. M. Delay-compound-compensation control for photoelectric tracking system based on improved smith predictor scheme. *IEEE Photonics Journal*. 2022, vol. 14, no. 3. DOI: 10.1109/JPHOT.2022.3164202.

21. Potemkin V. G. *MATLAB 6: Sreda proektirovaniya inzhenernykh prilozheniy* [MATLAB 6: Environment for designing engineering applications], Moscow, Dialog MIFI, 2003, 448 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Леонов Рафаил Ефимович¹ — канд. техн. наук,
доцент, профессор, e-mail: lprep2011@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2531-8336,

Патраков Семен Сергеевич¹ — аспирант,
e-mail: patrakov.sema@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0007-9173-6935,

¹ Уральский государственный горный университет.

Для контактов: Леонов Р.Е., e-mail: lprep2011@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

R.E. Leonov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Professor, e-mail: lprep2011@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2531-8336,

S.S. Patrakov¹, Graduate Student,
e-mail: patrakov.sema@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0007-9173-6935,

¹ Ural State Mining University,
620144, Ekaterinburg, Russia.

Corresponding author: R.E. Leonov, e-mail: lprep2011@mail.ru.

Получена редакцией 16.07.2024; получена после рецензии 06.12.2024; принята к печати 10.12.2024.
Received by the editors 16.07.2024; received after the review 06.12.2024; accepted for printing 10.12.2024.