

шенное потребление электроэнергии) можно компенсировать изменением угла наклона питающей насадки и наоборот. Существуют конструкции гидроциклонов, имеющие регулируемые или сменные песковые насадки различных размеров. С их помощью можно контролировать плотность и крупность песков и, таким образом, влиять на эффективность разделения. В горнорудной промышленности они не нашли широкого применения из-за высокой абразивности твердых железорудных пород [10].

Выводы и направления дальнейших исследований. Полученные результаты позволяют сказать, что рассмотрение обогатительного комплекса как децентрализованной системы, состоящей из отдельных технологических механизмов с собственными системами управления, дает возможность более эффективно управлять процессом в целом, экономя время и вычислительные ресурсы. Для более эффективного управления гидроциклоном второй стадии измельчения следует более подробно рассмотреть вопрос связи с объектами предыдущих и последующих стадий и применить современные интеллектуальные средства автоматизации.

Список литературы

1. Савицкий О.И. Управління багатостадійним збагаченням магнетитових руд за умов неповної інформації / О.И. Савицкий, В.П. Корж, С.Л. Цвіркун // Науково-дослідницький і проектний інститут «МЕХАНОБРЧЕРМЕТ». Новое в технологии и технике переработки минерального сырья. Збірник наукових праць. – Кривий Ріг –2011, С.126-135
2. Bass L. Contribution to the theory of grinding processes / L. Bass, Z. Angew / Math. Phys. – 1954 – no 5. – pp. 283–292.
3. Ragot J. Transient study of a closed grinding circuit / [Ragot J., Roesch M., Degoul P., Berube Y.] — 2-nd IFAC Symp. "Automat. Mining, Miner. and Metal. Proc." – Pretoria. – 1977.- P. 129-142.
4. Morkun V. Optimization of the second and third stages of grinding based on fuzzy control algorithms / V. Morkun, O. Savitskiy, M. Tymoshenko. // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – №8. – P. 22–25.
5. Поваров А.И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках. М., «Недра», 1978, 232 с.
6. Grainger-Allen T. J. N. Bubble generation in froth flotation machines – Trans. Inst. Mining Met., 1970, vol. 79, p. 15-2
7. Liudmyla Yefimenko, Mykhailo Tykhanskyi. Information systems in the technological processes automatic control development by technical condition criterion. Metallurgical and Mining Industry, 2015, No1, p.p. 28 – 31.
8. Торопов О.А. Расчет параметров гидроциклонов нового поколения / О.А. Торопов // Горный журнал. – 2008. – №6. – С. 105-108.
9. Schubert. H. Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. – Leipzig, 1967, Bd. 11, p. 472.
10. Моркун В. С. Энергоэффективное автоматизированное управление процессом обогащения руды с распознаванием ее технологических разновидностей / В. С. Моркун, В. В. Тронь, С. А. Гончаров, Н. С. Подгородецкий. – Кривой Рог, 2014. – 326 с.

Рукопись поступила в редакцию 07.04.16

УДК 65.011.56: 622.7.01

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф.,
Н.В. МОРКУН, В. В. ТРОНЬ, кандидаты техн. наук, доц.,
Криворожский национальный университет

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ЯДЕРНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВОЛЬТЕРРА-ЛАГЕРРА

В статье приведены результаты исследования методов идентификации нелинейных объектов управления обогатительного производства на основе ядерного преобразования Вольтерра-Лагерра в условиях неустойчивости характеристик поступающего на переработку железорудного сырья. Рассмотрены методы определения коэффициентов Лагерра при формировании модели процессов переработки железорудного сырья.

Ключевые слова: автоматизация, обогащение руд, модель Вольтерра-Лагерра

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. В условиях роста цен на энергетические ресурсы важнейшим вопросом управления горнорудными предприятиями становится снижение себестоимости и энергоемкости технологических процессов добычи и переработки сырья. Одним из крупнейших потребителей энергии на предприятиях данного типа является рудообогатительная фабрики, на долю которой приходится более 20 % расходуемой

предприятием энергии. А по расходу электроэнергии доля фабрики составляет 44 %. Среди факторов, влияющих на расход электроэнергии, следует выделить нестабильность характеристик рудного материала, поступающего на обогатительную фабрику, что усложняет поддержание в технологической линии оптимальных режимных параметров. Решение данной задачи неразрывно связано с совершенствованием систем автоматического управления технологическими процессами обогащения с применением современных моделей, критериев и методов управления.

Анализ исследований и публикаций. Различным аспектам идентификации нелинейных объектов управления в условиях обогатительного производства посвящено значительное количество работ, в частности [1-6]. В общем виде описание процесса переработки железорудного сырья осуществляют на основе дифференциальных уравнений в частных производных. Для того, чтобы учесть пространственное распределение и изменчивость во времени характеристик рудного материала обозначим пространственно-временную переменную $\beta(\xi, x, t)$, описывающую содержание железа в классах крупности перерабатываемого рудного сырья, распределенного по технологической линии обогащения. В соответствии с подходом, изложенным в [7], получим

$$\frac{\partial \beta(\xi, x, t)}{\partial t} = \theta_1 \frac{\partial^2 \beta(\xi, x, t)}{\partial x^2} + \theta_2 \frac{\partial \beta(\xi, x, t)}{\partial x} + f(\beta) + wb(x)u(t), \quad (1)$$

с граничными $\beta(\xi, 0, t) = 0$ и начальными условиями $\beta(\xi, x, 0) = \beta_0(\xi, x)$. Вопросы пространственно-временной декомпозиции систем, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных первого и второго порядка, рассмотрены также в работах [8-10]. На основе принципа аппроксимации непрерывной функции с использованием ряда Фурье пространственно-временная переменная $\beta(\xi, x, t)$ системы с распределенными параметрами может быть расширена рядом пространственных базисных функций $\{\varphi_i(x)\}_{i=1}^{\infty}$, следующим образом [11]

$$\beta(\xi, x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(x) \beta_i(\xi, t), \quad (2)$$

Модель, пригодную для практического использования, предложено формировать упорядочиванием множества базисных функций по возрастанию частоты и его ограничением первыми n функциями [12]

$$\beta_n(\xi, x, t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) \beta_i(\xi, t), \quad (3)$$

В результате пространственно-временная переменная разделяется на множество пространственных базисных функций и соответствующую временную модель.

Основной задачей в данном случае является выбор оптимальных пространственных базисных функций и формирование конечномерной временной модели процесса переработки рудного материала, что позволит представить исходную систему уравнений в частных производных как конечномерную систему [7]. После чего посредством пространственно-временного синтеза необходимо восстановить пространственно-временную систему.

Для моделирования нелинейных систем с распределенными параметрами предложена пространственно-временная модель Вольтерра, которая включает стационарные ряды вида [13]

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g_1(\sigma) u(t - \sigma) d\sigma + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_2(\sigma_1, \sigma_2) u(t - \sigma_1) u(t - \sigma_2) d\sigma_1 d\sigma_2 + \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} g_n(\sigma_1, \dots, \sigma_n) u(t - \sigma_1) \dots u(t - \sigma_n) d\sigma_1 \dots d\sigma_n \quad (4)$$

В случае, когда процессы обогащения железорудного сырья являются причинными и обладают затухающей памятью предложенная зависимость может быть представлена в виде [13]

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) + y_3(t) + \dots, \quad (5)$$

где $y_n(t)$ – ядра Вольтерра n -го порядка:

$$y_n(t) = \sum_{j_1=1}^m \sum_{j_2=1}^m \dots \sum_{j_n=1}^m g_n(j_1, \dots, j_n) \prod_{k=1}^n u(t - k), \quad (6)$$

где g_n – оператор n -го порядка, содержащий m^n коэффициентов.

В работе [14,15] представлен метод уменьшения количества коэффициентов в представлении модели на основе ядер Вольтерра посредством использования ортонормированных функций Лагерра. Согласно теореме приведенной в [16] нелинейный объект управления может быть описан выражением

$$y = \sum_{i=1}^{\infty} \theta_i l_i(k), \quad (7)$$

и для любого положительного ε существует n такое, что

$$\int_0^{\infty} \left[y(t) - \sum_{i=1}^n \theta_i l_i(k) \right]^2 dt < \varepsilon, \quad (8)$$

где θ_i - коэффициенты Лагерра; ε - допустимая интегральная ошибка.

Постановка задачи. Задачей работы является исследование методов идентификации нелинейных объектов управления в условиях обогащательного производства на основе ядерного преобразования Вольтерра-Лагерра.

Изложение материала и результаты. Как объекты управления технологические агрегаты обогащательного производства могут быть представлены в виде некоторых операторов, преобразующих векторы входных переменных в векторы выходных параметров. Влияние на характеристики рудного материала оказывается в определенных точках технологической линии – стадиях. На k -й стадии технологического процесса, $k=1, \bar{K}$, осуществляется изменение характеристических функций заданного физического свойства: массовой доли $\gamma_k(\xi)$ и содержания полезного компонента $\beta_k(\xi)$. Например, функции крупности $\xi \equiv d$ характеризуют гранулометрический состав частиц рудного материала $\gamma(d)$ и содержание полезного компонента в классах крупности $\beta(d)$. Для общности рассуждений обозначим характеристики исходного сырья технологической линии обогащения индексом 0: $\gamma_0(\xi)$, $\beta_0(\xi)$. Таким образом, характеристики выходного продукта технологической линии будут иметь индекс последней технологической операции $k=K$: $\gamma_K(\xi)$, $\beta_K(\xi)$.

Следует отметить значительное количество параметров технологического процесса обогащения железорудного сырья, что существенно усложняет синтез модели.

Например, в условиях РОФ параметры технологического процесса обогащения железорудного сырья по промпродукту контролировались в 16 точках начиная от питания исходной рудой: стадии классификации в гидроциклоне, стадии магнитной сепарации, стадии дешламации, стадия контрольной классификации. Параметры технологического процесса обогащения железорудного сырья по хвостам контролировались в 12 точках начиная от питания исходной рудой. На рис. 1 представлены распределенные по стадиям технологической характеристики перерабатываемой руды: содержание железа в промпродукте (рис. 1а) и в хвостах (рис. 1б)

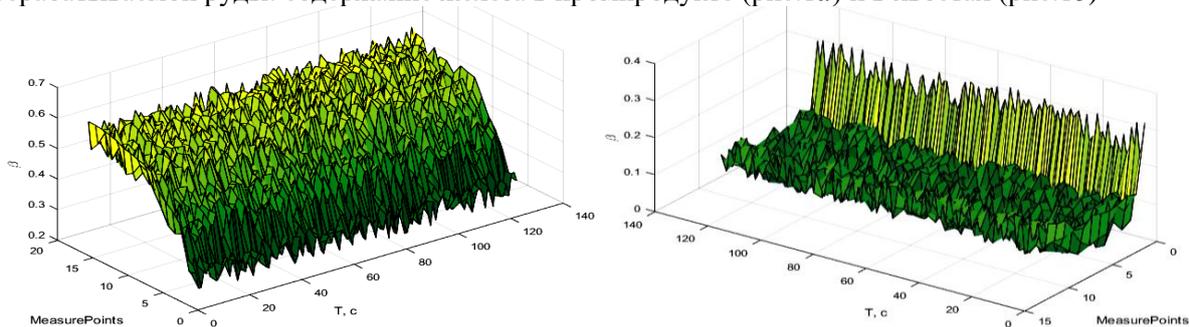


Рис 1. Распределенные по технологической линии обогащения характеристики перерабатываемой руды

Для формирования модели процессов переработки железорудного сырья использованы следующие методы определения коэффициентов Лагерра: корреляционный метод и метод наименьших квадратов. Корреляционный метод [13,15] предполагает, что входом является гауссов шум, и согласно ему вычисление коэффициентов осуществляется из выражения

$$\hat{\theta}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y(kT) l_i(kT). \quad (9)$$

Согласно второму подходу [13,16] коэффициенты вычисляют с использованием метода наименьших квадратов, а выход системы представляют в виде

$$Y = \Phi^T \theta + \Phi_u^T \theta_u + W, \tag{10}$$

где $\Phi^T \theta$ - модель: $\Phi^T = [\phi(T), \dots, \phi(nT)]$, $\phi^T = [l_1(kt), \dots, l_n(kt)]$; $\Phi_u^T \theta_u$ - разложение Лагерра для немоделируемой динамики: $\Phi_u^T = [\phi_u(T), \dots, \phi_u(nT)]$; W - воздействие случайного шума на процесс.

Следует отметить, что при нулевом математическом ожидании сигналов входа и возмущения второе и третье слагаемое стремятся к нулю. Оценку θ по методу наименьших квадратов представляют таким образом

$$\hat{\theta} = [\Phi \Phi^T]^{-1} \Phi Y. \tag{11}$$

После подстановки модель Вольтерра-Лагерра примет вид

$$\tilde{y}(k) = \sum_{n=1}^N \sum_{j_1=1}^r \dots \sum_{j_n=1}^r \theta_n(j_1, \dots, j_n) \prod_{k=0}^n \sum_{i_k}^m l_{j_k}(i_k) u(k - i_k), \tag{12}$$

где n - порядок ряда Вольтерра; r - порядок приближения Лагерра; m - горизонт прогнозирования. Применительно к аппроксимации ядер Вольтерра первые два элемента разложения записывают следующим образом

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t), \tag{13}$$

где

$$y_1(t) = \sum_{i=1}^p g_1(i) u(t-i); y_2(t) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p g_2(i, j) u(t-i) u(t-j), \tag{14}$$

где $y_i(t)$ - ядро Вольтерра i -го порядка; g_i - оператор i -го порядка, содержащий p^i коэффициентов. Аппроксимация Лагерра для ядра Вольтерра второго порядка имеет вид

$$g_2(\tau_1, \tau_2) = L^T(\tau_1) D L(\tau_2), \tag{15}$$

где $D = \{\theta_{ij} \mid i = \overline{1, r}, j = \overline{1, r}\}$, $L^T(\tau) = \{\psi_i(\tau) \mid i = \overline{1, r}\}$

Таким образом, формула ядра Вольтерра второго порядка выглядит таким образом [13]

$$y_2(t) = \sum_{i_1=0}^p \sum_{i_2=0}^p u(t-i_1) u(t-i_2) L^T(t-i_1) D L(t-i_2). \tag{16}$$

При $U^T = \{u(t), u(t-T), \dots, u(t-pT)\}$ и учитывая, что $\Phi = \{\psi_{ij}(jT) \mid i = \overline{1, r}, j = \overline{1, p}\}$ выражения для ядра Вольтерра второго порядка с горизонтом прогнозирования в один интервал примет вид

$$y_2(t) = U^T \Phi D \Phi^T U. \tag{17}$$

Для идентификации модели Вольтерра-Лагерра второго порядка по данным входа-выхода вначале получены значения $y_1(t)$ посредством линейной идентификации (рис. 2).

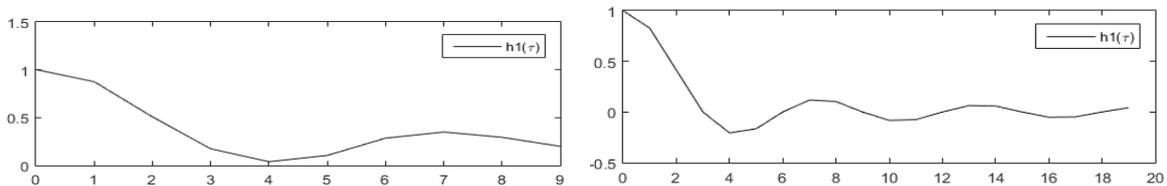


Рис. 2. Результаты идентификации ядер первого порядка

Затем разность $y(t) - y_1(t)$ использована как исходные данные идентификации ряда второго порядка. С учетом изложенного выражения для $y_2(t)$ найдено решение для матрицы D .

Задача идентификации представлена в виде [13]

$$\left\| \sum_{r=p}^{NS} y_2(t) - (\Phi^T U)^T D (\Phi^T U) \right\|_2 \rightarrow \min \tag{18}$$

где NS - количество точек в исходных данных «вход-выход». Полагая, что существует точное решение для $y_2(t)$, уравнение запишется

$$y_2(t) = (\Phi^T U)^T D (\Phi^T U) \quad (19)$$

Умножив обе части на $(\Phi^T U)$ и решив относительно D получим решение для одной точки данных

$$D = \left[(\Phi^T U) (\Phi^T U)^T \right]^{-1} (\Phi^T U) y_2(t) (\Phi^T U)^T \left[(\Phi^T U) (\Phi^T U)^T \right]^{-1}. \quad (20)$$

Результаты идентификации ядер модели Вольтерра-Лагерра представлены на рис. 3.

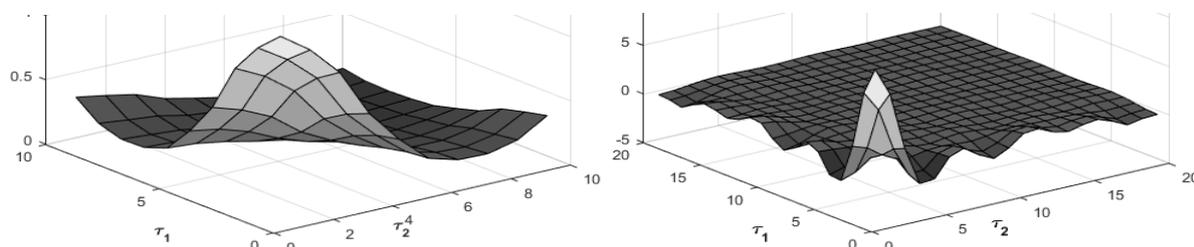


Рис. 3. Результаты идентификации ядер второго порядка

Для получения полного горизонта прогнозирования системы второго порядка применена нелинейная оптимизация.

Пример результата прогнозирования распределенных технологических показателей процессов обогащения представлены на рис. 4.

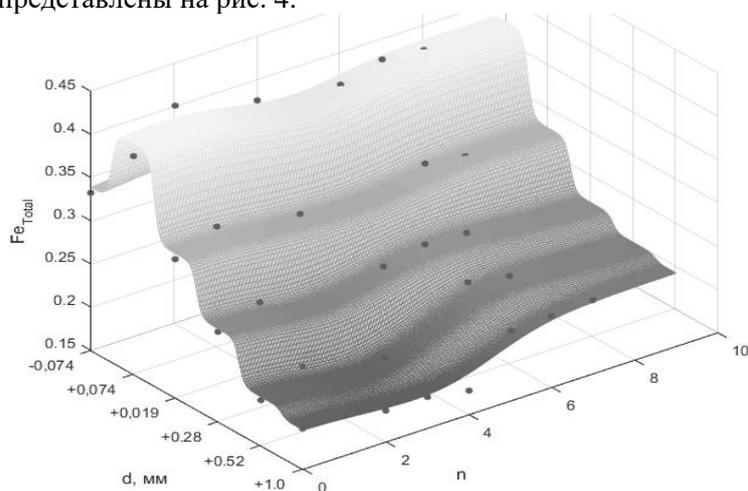


Рис. 4. Прогнозирование распределенного показателя содержания железа в классах крупности

Для поиска решения задачи нелинейной оптимизации были исследованы методы [17] нелинейной оптимизации с ограничениями: внутренней точки, итерационного квадратичного программирования, активных множеств.

В результате проведенного анализа был выбран метод активных множеств.

В частности, указанный метод показал лучшие результаты поиска оптимального решения при различных начальных условиях, в то время как другие исследуемые методы требовали дополнительных расчетов для определения начальных условий.

Выводы и направления дальнейших исследований. Анализ результатов исследования методов идентификации систем управления технологическими агрегатами обогатительного производства на основе непараметрических ядерных оценок показал целесообразность идентификации нелинейных объектов управления в условиях обогатительного производства на основе ядерного преобразования Вольтерра-Лагерра.

Дальнейшие исследования целесообразно проводить в области повышения точности и скорости сходимости рассмотренных методов идентификации.

Список литературы

1. Morkun V., Morkun N. and Tron V. (2015), "Formalization and frequency analysis of robust control of ore beneficiation technological processes under parametric uncertainty", Metallurgical and Mining Industry, Vol. 5, pp. 7-11.

2. **Morkun V., Morkun N. and Tron V.** (2015), "Distributed closed-loop control formation for technological line of iron ore raw materials beneficiation", *Metallurgical and Mining Industry*, Vol. 7, pp. 16-19.
3. **Поркун О.В.** Керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних виробництв на основі гібридних моделей Гамерштейна: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец 05.13.07. – КТУ, Кривий Ріг, 2009. – 36 с.
4. **Купін А. І.** Узгоджене інтелектуальне керування стадіями технологічного процесу збагачення магнетитових кварцитів в умовах невизначеності: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец 05.13.07. – КТУ, Кривий Ріг, 2009. – 36 с.
5. **Моркун В. С.** Ультразвукової контроль характеристик измельчених матеріалів в АСУ ТП обогатительного виробництва / В. С. Моркун, В. Н. Потапов, Н. В. Моркун, Н. С. Подгородецкий. – Кривой Рог: Изд. центр КТУ, 2007. – 283 с.
6. **Тронь В. В.** Енергоефективне автоматизоване керування процесом збагачення руди з термографічним розпізнаванням її технологічних різновидів : дис. ... кандидата техн. наук : 05.13.07 / Тронь Віталій Валерійович. – Кривий Ріг, 2013. – 226 с.
7. **Han-Xiong Li, Chenkun Qi.** (2010), Modeling of distributed parameter systems for applications – A synthesized review from time–space separation, *Journal of Process Control*, No20, p.p. 891-901.
8. **P. Sooraksa, G. Chen,** (1998), Mathematical modeling and fuzzy control of a flexiblelink robot arm, *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 27 (6), pp. 73–93.
9. **M.A. Demetriou, F. Fahroo** (2006), Model reference adaptive control of structurally perturbed second-order distributed parameter systems, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 16, pp. 773-799.
10. **S.O.R. Moheimani, H.R. Pota, I.R. Petersen** (1999), Spatial balanced model reduction for flexible structures, *Automatica*, 35 269–277.
11. **D.G. Zill, M.R. Cullen** (2001), *Differential Equations with Boundary-Value Problems*, 5th ed., Brooks/Cole Thomson Learning, Pacific Grove, CA; Australia.
12. **C.A.J. Fletcher** (1984), *Computational Galerkin Methods*, 1st ed., Springer, New York.
13. **Dale A. Smith.** Identification of nonlinear control models using Volterra-Laguerre series (2010), PhD dissertation, Department of Chemical Engineering, The University of Utah, USA.
14. **Dumont, G. A. and Ye Fu** (1993) Non-linear adaptive control via Laguerre expansion of Volterra kernels. *Int. J. of Adaptive Control and Signal Processing*, 7, 367-382.
15. **Zheng, Q., Zafiriou, E.,** (1995) Nonlinear system identification for control using Volterra-Laguerre expansion. Presented at American Control Conference.
16. **Dumont, G. A., Ye Fu, and A.L.Elshafei,** (1991) Functions in identification and adaptive control. IFAC Int. Symp., Singapore, 193-198.
17. **Трифонов А. Г.** Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения / А. Г. Трифонов. - [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book 2/index.php>. Рукопись поступила в редакцию 18.04.16

УДК 681.513.54:622.788

Д.О.КЛИМЕНКО, магістрант, Криворізький національний університет

АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ОБКОТИШІВ НА ФАБРИЦІ ОГРУДКУВАННЯ

У статті розглянуто актуальні питання ефективності термічної обробки залізородних обкотишів на конвеєрних випалювальних машинах. Розглянуто існуючі підходи та методи автоматичного керування процесом термічної обробки обкотишів, на основі розглянутої інформації виділено основні переваги та недоліки представлених систем автоматичного керування. Виявлено, що способи та методи керування процесом термічної обробки обкотишів вичені не повною мірою та знаходяться на стадії дослідження. На основі аналізу існуючих робіт, а також перспективних методів керування інерційними процесами, що характеризуються нестаціонарністю параметрів в часі, визначено напрямки подальших досліджень – розвиток методів адаптивного прогноуючого керування процесом термічної обробки обкотишів в умовах коливань гранулометричного складу та порозності шару, зміни параметрів технологічного устаткування. Запропоновано варіант структури системи керування температурним режимом випалювання обкотишів для окремої газоповітряної камери конвеєрної випалювальної машини, де пропонується здійснювати оперативне оцінювання параметрів моделі процесу для подальшої адаптації параметрів прогноуючого регулятора.