

КОМПЕНСАЦИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЗМУЩЕНИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Статья посвящена частотному методу синтеза технологических процессов на примере автогенной плавки сульфидных материалов в печи Ванюкова. Приводятся основные показатели качества управления, описываются возмущающие воздействия, производится преобразование многомерной системы управления сложными процессами к квазисистемам (одномерным системам управления) с целью компенсации возмущений. Описанный в статье частотный метод может быть использован для синтеза систем управления другими процессами.

Clause is devoted to a frequency method of synthesis of technological processes on an example autogenous swimming trunks of sulphidic materials in furnace Vanjukova. The basic parameters of quality of management are resulted, revolting influences are described, transformation of a multivariate control system by complex processes to qvasisystem (to one-dimensional control systems) with the purpose of indemnification of indignations is made. The frequency method described in clause can be used for synthesis of control systems by other processes.

Основные показатели качества управления. Общей задачей работы цеха является достижение максимального сквозного извлечения в штейн меди, никеля и кобальта, т.е. уменьшение их потерь с отвальными шлаками [1-3].

Поддержание состава штейна и шлака на указанных уровнях является одной из главных задач управления.

Вследствие воздействия на процесс плавки в жидкой ванне (ПЖВ) случайных возмущений наблюдается вариация управляемых величин около их среднего значения. Поскольку содержание никеля в шлаке связано с содержанием железа в штейне и кремнезема в шлаке существенно нелинейной зависимостью, то среднее содержание никеля при вариации аргумента около среднего значения возрастет по сравнению с идеальным случаем, когда содержание кремнезема в шлаке и железа в штейне поддерживается строго на заданном уровне (рис.1). Этот эффект обусловлен исключительно нелинейностью статической характеристики.

В математической форме изменение средней нелинейной функции вследствие колебаний аргумента описывается выражением

$$\Delta\beta = \bar{f}(\alpha) - \bar{f}(\bar{\alpha}) = \int_{\alpha \in \Omega} \varphi(\alpha) f(\alpha) d\alpha - f(\bar{\alpha}),$$

где $\bar{\alpha}$ – математическое ожидание величины α ; $\varphi(\alpha)$ – плотность функции распределения случайной величины α ; $\beta=f(\alpha)$ – нелинейная статическая характеристика; $\bar{f}(\alpha)$ – математическое ожидание функции β ; Ω – область изменения аргумента α .

Примем равномерную плотность распределения аргумента

$$\varphi(\beta) = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{3}\sigma_{\alpha}}, & \alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}; \\ 0, & \alpha < \alpha_{\min} \text{ и } \alpha > \alpha_{\max}, \end{cases}$$

где $\alpha_{\min} = \bar{\alpha} - \sqrt{3}\sigma_{\alpha}$ и $\alpha_{\max} = \bar{\alpha} + \sqrt{3}\sigma_{\alpha}$ – минимальное и максимально возможное значение аргумента; σ_{α} – среднее квадратичное отклонение аргумента. Тогда приращение среднего значения функции за счет флуктуации аргумента

$$\Delta\beta = \frac{1}{2\sqrt{3}\sigma_{\alpha}} \int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} f(\alpha) d\alpha - f(\bar{\alpha}).$$

Сравнив изменение математического ожидания функции при уменьшении среднеквадратичного отклонения σ_{α_1} до σ_{α_2} , соответствующее изменение $\Delta\beta$ определим по формуле

$$\Delta\beta = \frac{1}{2\sqrt{3}\sigma_{\alpha_2}} \int_{\alpha_2^{\min}}^{\alpha_2^{\max}} f(\alpha) d\alpha - \frac{1}{2\sqrt{3}\sigma_{\alpha_1}} \int_{\alpha_1^{\min}}^{\alpha_1^{\max}} f(\alpha) d\alpha$$

Аналогичные зависимости имеют место и для содержания кобальта в шлаке. Следовательно, показателями качества управления можно считать дисперсии колебаний стабилизируемых величин (содержания SiO_2 в шлаке и содержания сульфида железа в штейне) относительно их среднего значения.

Основные возмущающие воздействия на ПЖВ. Основными возмущениями, действующими на процесс ПЖВ, являются отклонения от заданных (или номинальных) значений следующих величин [2].:

- расхода руды, кварцита, кислорода, мазута, воздуха, воды на охлаждение;
- разрежения в газоходе;
- содержания O_2 в техническом кислороде;
- содержания SiO_2 в кварците;
- содержания в руде Ni, Co, Cu, Fe, S;
- влажности кварцита, руды.

Расходы исходных реагентов стабилизированы с помощью локальных средств автоматики, поэтому в их частотном спектре присутствует только остаточная высокочастотная составляющая, обусловленная качеством стабилизации этих расходов, и ультранизкочастотная, обусловленная дрейфом характеристик стабилизируемой системы во времени. Высокочастотная часть спектра этих возмущений демпфируется инерционностью самой печи, а низкочастотная часть может быть устранена корректировкой задания этим подсистемам по результатам химического анализа продуктов плавки.

Колебания температуры охлаждающей воды и содержания O_2 в техническом кислороде можно непрерывно изменять и компенсировать введением в систему управления прямой связи по возмущению.

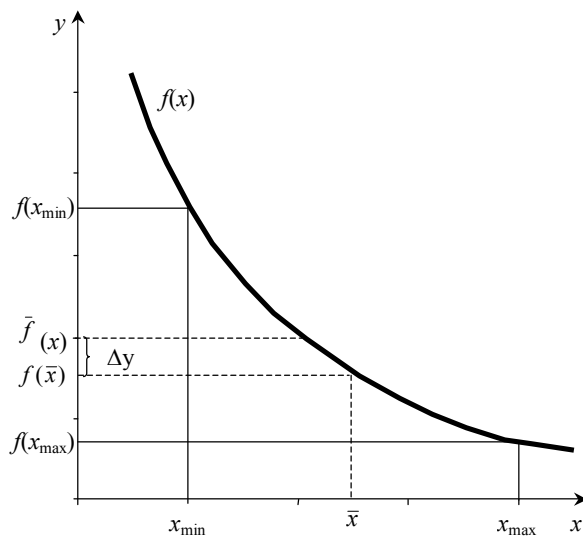


Рис.1. График управления Δy содержанием никеля в шлаке (y) за счет вариации содержания железа в штейне (x) около среднего значения (\bar{x})

$y = f(x)$ – статическая нелинейная зависимость содержания никеля в шлаке от содержания железа в штейне; x_{\min} , x_{\max} – минимальная и максимальные границы содержания железа в штейне, в пределах которых он варьируется; \bar{x} – среднее содержание железа в штейне; $f(\bar{x})$ – содержание никеля при отсутствии флуктуации железа в штейне; $\bar{f}(x)$ – среднее содержание никеля в шлаке при флуктуации аргументов

Наиболее сложен учет влияния колебаний состава исходного рудного сырья, так же определение состава может проводиться только методами аналитического контроля. Причем чрезвычайно проблематичны не организация анализа в химической лаборатории проб с заданной периодичностью, а возможности отбора представительной пробы, поскольку в проекте шихтоподготовки для ПЖВ на комбинате «Печенганикель» не предусмотрена пробоподготовительная станция.

Схема шихтоподготовки по проекту проста. Сульфидная медно-никелевая руда, доставленная из Норильска за время навигации, складирована на рудном дворе. С рудного двора машинами или думпкарами она доставляется на склад привозного сырья отделения шихтоподготовки, где имеется запас материала на 2-3 смены.

Для загрузки печных бункеров ПЖВ-рудой, кварцитом и угольным штыбом спроектирована новая нитка дробления параллельно с действующей. Предусмотрена возможность взаимозаменяемости ниток при ремонте одной из них. Каждая нитка дробления

состоит из щековой дробилки и системы транспортеров и используется для дробления как руды, так и кварцита. В проекте отсутствует также сушильное отделение.

Исходное сырье поступает с Норильского месторождения. Среднее значение M и среднеквадратичное отклонение σ компонентов в норильской руде следующее, %:

Компонент	M	σ
Ni	3,12	0,25
Cu	2,70	0,25
Co	0,12	0,013
Fe	38,7	2,0
S	24,0	1,6
SiO ₂	11,2	1,4
CaO	4,1	1,0
Mg	2,7	0,4

Среднее значение M и среднеквадратичное отклонение σ компонентов в флюсе следующее, %:

Компонент	M	σ
SiO ₂	65,4	2,6
Al ₂ O ₃	14,9	2,0
Fe ₂ O ₃	6,8	2,0
CaO	4,1	1,2
MgO	2,7	0,6

Согласно расчетам интервал корреляции по всем компонентам менее суток.

Содержание влаги в руде и ее среднеквадратичное отклонение, по данным анализа заводской химической лаборатории, составляет 4,17 и 0,95 % соответственно. По нашему мнению, эти величины существенно занижены, поскольку в мае (по данным анализов) при средней влажности 4,9 % руда на транспортерах имела сметанообразную консистенцию. По-видимому, это объясняется трудностью отбора представительной пробы, поскольку влажность различных фракций руды по крупности существенно отличается.

Весной, когда заканчиваются запасы руды с прошлой навигации, возможна выборка накопления нижнего слоя на рудном дворе, что значительно увеличивает дисперсии содержания компонентов в руде. В частности, в апреле среднее содержание серы в руде снизилось до 22,1 %, среднеквадратичное отклонение выросло до 3,5 %.

Расчет по данным анализа содержания серы в 1988 г. с отбором проб руды 8 ч показал, что колебания содержания серы можно рассматривать как автокоррелированный случайный процесс с экспоненциальной автокорреляционной функцией вида

$$R_{\alpha\alpha}(t) = D_{\alpha} e^{-\lambda_{\alpha} t},$$

где D_{α} – дисперсия содержания компонента руды; λ_{α} – показатель спада автокорреляционной функции, $\lambda_{\alpha} = 0,125 \text{ ч}^{-1}$.

Соответственно, спектральная плотность возмущений с экспоненциальной автокорреляционной функцией описывается следующим выражением:

$$S_{\alpha}(\omega) = \frac{2D_{\alpha}\lambda_{\alpha}}{(\lambda_{\alpha}^2 + \omega^2)},$$

где ω – частота.

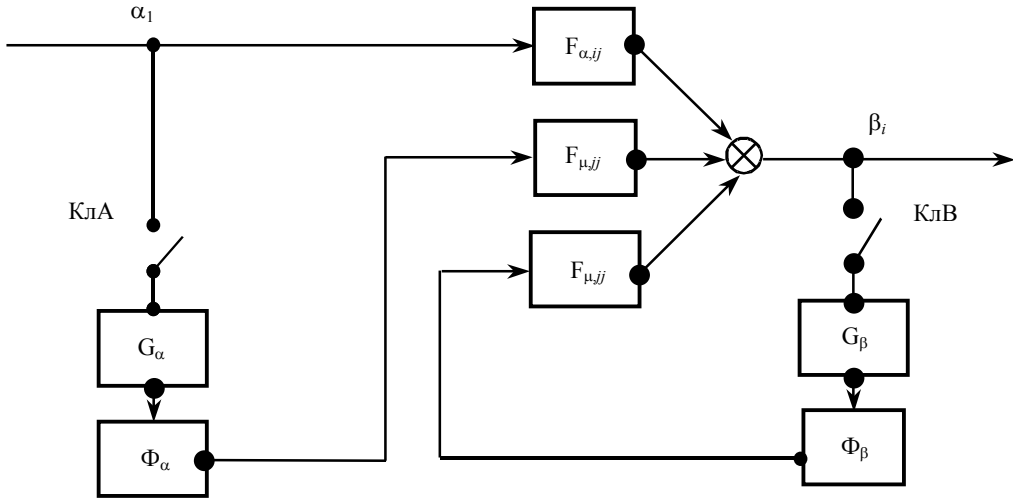
В первом приближении будем считать, что показатель спада автокорреляционной функции λ_{α} одинаков для возмущений по содержаниям всех компонентов руды. В связи с этим, были оценены интенсивность и частотные свойства возмущений по составу руды и кварцита [2].

К управляющим воздействиям следует отнести изменения расхода руды, флюса, кислорода, воздуха, мазута и воды на охлаждение. Кроме того, вследствие многосвязности объекта управляющие воздействия по различным каналам должны быть согласованы (рис.2). Динамические свойства многомерного объекта управления в целях предварительного выбора структуры системы стабилизации после линеаризации могут быть описаны матричным операторным выражением для изображений по Лапласу векторов выхода $\bar{\beta}$, управляющих воздействий $\bar{\mu}$ и возмущений $\bar{\alpha}$ (в отклонениях от номинала):

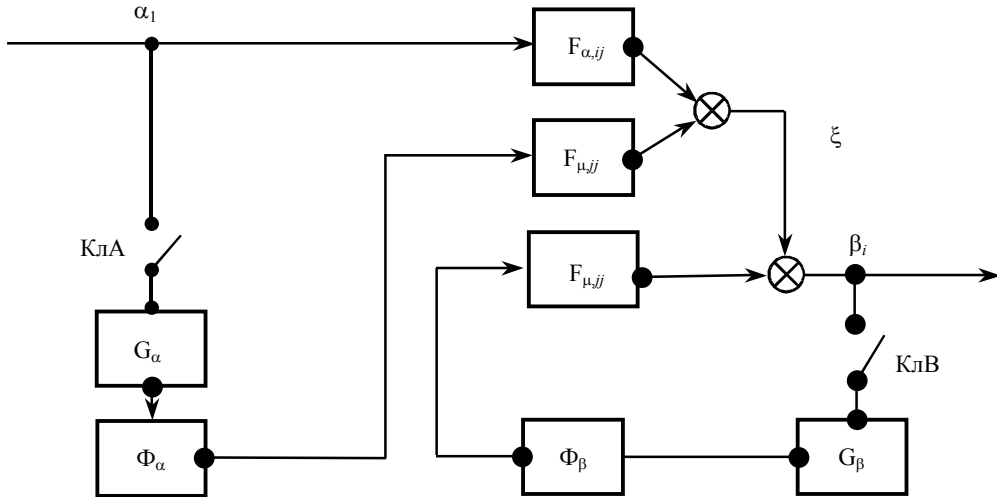
$$\bar{\beta} = F_{\alpha}\bar{\alpha} + F_{\mu}\bar{\mu},$$

где $\beta = [\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4]^T$; $\mu = [\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4]^T$; $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_4]^T$, $\beta_1 - \beta_4$ – отклонения номинального значения содержания железа в штейне $\Delta Fe_{шт}$, содержания SiO₂ в шлаке $\Delta C_{SiO_2_{шл}}$, температуры шлакоштейновой

a



б



в

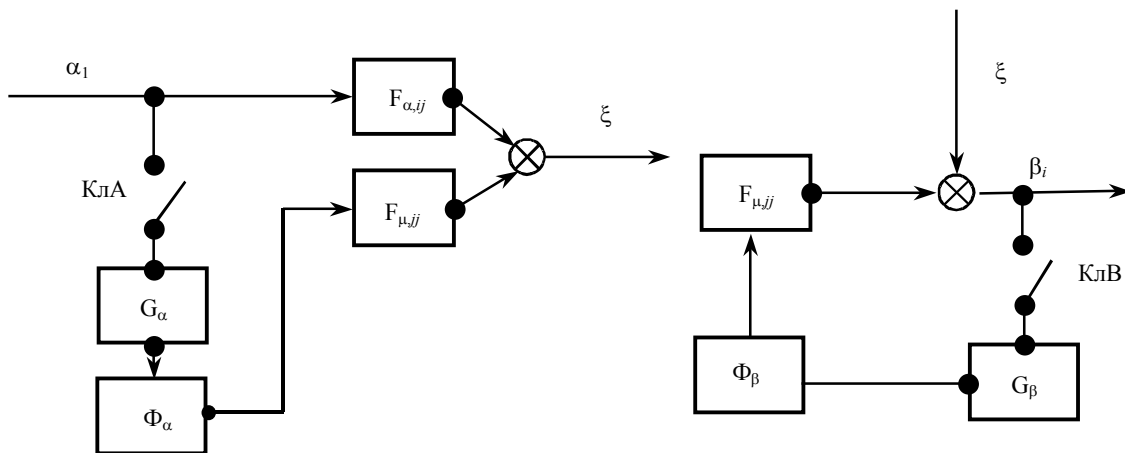


Рис.2. Структурное преобразование квазисистемы

эмульсии $\Delta\theta$, содержания SO_2 в газах $\Delta C_{\text{SO}_2\text{газ}}$ соответственно; $\mu_1-\mu_4$ – расходы технического кислорода $\Delta G_{\text{кис}}$, кварцита $\Delta G_{\text{квар}}$, мазута $\Delta G_{\text{маз}}$, воздуха $\Delta G_{\text{воз}}$ соответственно; $\alpha_1-\alpha_4$ – расход руды $\Delta G_{\text{руд}}$, содержания серы в руде $\Delta C_{\text{Sруд}}$, содержания SiO_2 в кварците $\Delta C_{\text{SiO}_2\text{квар}}$, расход воды на охлаждение кессонов $\Delta G_{\text{вод.охл}}$, влажность руды $\Delta C_{\text{H}_2\text{Oруд}}$ и кварцита $\Delta C_{\text{H}_2\text{Oквар}}$, содержания никеля ΔC_{Ni} , железа ΔC_{Fe} и меди ΔC_{Cu} в руде соответственно; F_μ и F_α – матричные передаточные функции по каналам управления и возмущения соответственно, где отдельная передаточная функция $F_{\mu,ij}$ по каналу i -е управление j -й выход аппроксимирована апериодическим звеном с запаздыванием.

Возмущение α_i рассматривается как случайный процесс с экспоненциальной автокорреляционной функцией с дисперсией $D_{\alpha,i}$ и показателем спада экспоненты λ_i [5]. Непрерывное измерение химического состава материалов и продуктов по ходу процесса невозможно, поэтому применяют ДЗК. В этом случае разомкнутая комбинированная система стабилизации может быть описана (рис.2) следующим матричным операторным выражением:

$$\bar{\beta} = [F_\alpha - F_\mu (E + \hat{O}_\mu)^{-1} \hat{O}_\alpha] \bar{\alpha} + F_\mu (E + \hat{O}_\mu)^{-1} \bar{\mu}, \quad (1)$$

где E – единичная матрица; F_μ – матрица перекрестных регуляторов объекта по каналам управлений; F_α – матрица компенсаторов возмущений.

При этом из условия инвариантности выхода $\bar{\beta}$ от входа $\bar{\alpha}$ в (1) получим матричное выражение для идеальных компенсаторов

$$\hat{O}_\alpha = (E + \hat{O}_\mu) F_\mu^{-1} F_\alpha.$$

Исходя из принципа автономности контуров обратной связи, диагонализировать квадратную матрицу

$$L = F_\mu (E + \hat{O}_\mu)^{-1}$$

с помощью соответствующего выбора матричного оператора Φ_μ . Диагональные элементы $\Phi_{\mu,ii}$ примем равными нулю, что соответствует отсутствию локальных стабилизирующих регуляторов потоков μ_i в системах с непосредственным цифровым управляющим, или весьма точной обработке локальными подсистемами команд ПК в режиме супервизерного управления. Тогда по координатной форме такой выбор операторов Φ_μ и Φ_α соответствует выражениям

$$\hat{O}_{\mu,ij} = \frac{F_{\mu,ij}}{F_{\mu,ii}}, \quad \begin{matrix} j = 1, 2, \dots, m; \\ i \neq j; \end{matrix} \quad (2)$$

$$\hat{O}_{\alpha,ij} = \frac{F_{\alpha,ij}}{F_{\mu,ii}}, \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, n; \\ j = 1, 2, \dots, m, \end{matrix} \quad (3)$$

где i – номер возмущения; j – номер выхода.

Таким образом, при выполнении соотношений (2) и (3) возможны не только наилучшие условия стабилизации величины β , но и независимость выбора параметров контуров компенсации влияния каждого возмущения на каждую управляемую координату как при идеальном, так и при реальном комбинированном управлении с неидеальной компенсацией. Отличия реального компенсатора от идеального (или отсутствие компенсатора) могут быть отдельно исследованы для каждого из многочисленных ($n \times m$) каналов компенсации и учтены при независимом синтезе каждого из m -контуров обратной связи. Исследование многомерной системы (рис.2, а) заменяем исследованием $n \times m$ каналов компенсации (рис.2, б) и m независимых контуров обратной связи (рис.2, в), к выходу которых приложен суммарный сигнал недокомпенсации по соответствующему каналу. Каждую из квазисистем можно исследовать по одной и той же методике, что значительно упрощает всю задачу оценки качества стабилизации многовзаимосвязанной системы и позволяет алгоритмизировать решение этой задачи с такой степенью формализации, которая допускает автоматизацию синтеза целесобразного варианта системы на стадии ее проектирования.

Таким образом, вычисление спектральной плотности $S_{\beta,j}(\omega)$ на выходе системы распадается на две задачи:

1. Определение суммарной спектральной плотности по каналу j управления $S_{\xi,j\Sigma}(\omega)$ для сигналов недокомпенсации ξ_{ij} при заданных значениях периода $T_{A,i}$ замыкания ключа А(КлА) (рис.2, а) и запаздывания $\tau_{A,i}$ дискретного контроля возмущения α_i , заданных операторов $F_{\alpha,ij}$ и $F_{\mu,ij}$ и заданной спектральной плотности $S_{\alpha,i}(\omega)$ случайных колебаний величины α_i по выражению

$$S_{\xi,j\Sigma}(\omega) = \sum_i^n S_{\xi,ij}(\omega).$$

2. Определение спектральной плотности $S_{\beta,j}(\omega)$ и дисперсии $D_{\beta,j}$ на выходе системы при заданных значениях периода $T_{B,j}$ замыкания ключа В(КлВ) и запаздывания $\tau_{B,j}$ дискретных измерений величины β_j , заданном операторе $F_{\mu,ij}$ и функции спектральных плотностей $S_{\xi,j\Sigma}(\omega)$, найденной в результате решения предыдущей задачи, при параметрической оптимизации оператора $\Phi_{\beta,j}$ из условия получения минимальной дисперсии $D_{\beta,j}$ выхода β_j при заданном значении устойчивости:

$$D_{\beta,j} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S_{\beta,j}(\omega) d\omega \Rightarrow \min.$$

Однако наличие в контуре обратной связи дискретного и запаздывающего контроля делает невозможным строгое вычисление спектральной плотности $S_{\beta,j}(\omega)$. Поэтому в настоящей работе предложено для приближенного расчета $S_{\beta,j}(\omega)$ вместо дискретного контура (рис.2, в) рассматривать аппроксимирующий непрерывный контур (рис.2, г), использующий зависимость эквивалентного запаздывания от параметров ДЗК в контуре обратной связи.

Сначала запишем матричную передаточную функцию многосвязного объекта управления по каналу управления:

$$F_{\mu} = \begin{bmatrix} F11 & 0 & F31 & F41 \\ F12 & F22 & 0 & F42 \\ F13 & F23 & F33 & F43 \\ F14 & 0 & F34 & F44 \end{bmatrix}$$

и по каналу возмущения:

$$F_{\alpha} = \begin{bmatrix} F11 & F21 & 0 & F41 & 0 & F61 & F71 & F81 \\ 0 & F22 & F32 & F42 & F52 & 0 & 0 & 0 \\ F13 & F23 & F33 & F43 & F53 & 0 & 0 & 0 \\ F14 & F24 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где $F_{\mu 11}$ – передаточная функция по каналу отклонения расхода кислорода от номинального $\Delta G_{\text{кис}}$ – отклонения содержания железа от номинального значения $\Delta C_{\text{Фешт}}$; $F_{\mu 31}$ – отклонения расхода мазута от номинального $\Delta G_{\text{маз}} - \Delta C_{\text{Фешт}}$; $F_{\mu 41}$ – по каналу $\Delta G_{\text{маз}} - \Delta C_{\text{Фешт}}$; $F_{\mu 12}$ – по каналу $\Delta G_{\text{кис}}$ – отклонения содержания кремнезема в шлаке $\Delta C_{\text{SiO}_2, \text{шл}}$; $F_{\mu 22}$ – по каналу отклонения расхода кварцита $\Delta G_{\text{квар}} - \Delta C_{\text{SiO}_2, \text{шл}}$; $F_{\mu 42}$ – по каналу отклонения расхода воздуха $\Delta G_{\text{воз}} - \Delta C_{\text{SiO}_2, \text{шл}}$; $F_{\mu 13}$ – по каналу $\Delta G_{\text{кис}}$ – отклонения температуры процесса от номинального $\Delta \theta$; $F_{\mu 23}$ – по каналу $\Delta G_{\text{квар}} - \Delta \theta$; $F_{\mu 33}$ – по каналу $\Delta G_{\text{маз}} - \Delta \theta$; $F_{\mu 43}$ – по каналу $\Delta G_{\text{воз}} - \Delta \theta$; $F_{\mu 14}$ – по каналу $\Delta G_{\text{кис}}$ – отклонения содержания SO_2 в отходящих газах от номинального $\Delta C_{\text{SO}_2, \text{газ}}$; $F_{\mu 34}$ – по каналу $\Delta G_{\text{маз}} - \Delta C_{\text{SO}_2, \text{газ}}$; $F_{\mu 44}$ – по каналу $\Delta G_{\text{воз}} - \Delta C_{\text{SO}_2, \text{газ}}$; $F_{\alpha 11}$ – передаточная функция по каналу возмущения колебания расхода руды от номинального $\Delta G_{\text{руд}} - \Delta C_{\text{Фешт}}$; $F_{\alpha 21}$ – по каналу возмущения колебания содержания серы в руде $\Delta C_{\text{Sруд}} - \Delta C_{\text{Фешт}}$; $F_{\alpha 51}$ – по каналу возмущения колебания содержания влаги в руде $\Delta C_{\text{влаг.руд}} - \Delta C_{\text{Фешт}}$; $F_{\alpha 61}$ – по каналу возмущения колебания содержания никеля в руде $\Delta C_{\text{Niруд}} - \Delta C_{\text{Фешт}}$; $F_{\alpha 71}$ – по каналу возмущения $\Delta C_{\text{Феруд}} - \Delta C_{\text{Фешт}}$; $F_{\alpha 81}$ – по каналу возмущения $\Delta C_{\text{Суруд}} - \Delta C_{\text{Фешт}}$.

Состав штейна определяется соотношением расхода кислорода дутья к расходу руды. Регулирование содержания в шлаке кремнезема осуществляется изменением соотношения расходов кварцита и руды. Регулирование температуры ванны целесообразно осуществлять при неизменном содержании в штейне железа. Эффективное управление в этом случае можно получить согласованным изменением расходов воз-

духа и топливе или изменением состава дутья (содержания в нем кислорода) при неизменности соотношения расхода кислорода и расхода шихты.

«Ручное» управление процессом включает операции корректировки подачи шихты, топлива, дутья, интенсивности отопления сифонов и штейнового миксера. Старший плавильщик визуально следит за характером барботажа ванны и брызгами расплава, определяя по ним, не нарушается ли соотношение дутья-шихта и не происходит ли переокисления шлака, и при необходимости корректирует загрузку и режим дутья. Качественный контроль за температурным режимом оператор установки выполняет, прослеживая ха-

рактер изменения температуры воды на выходе из кессонов и частоту срыва настывлей с устьев фурм по характерному звуку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автогенные процессы в цветной металлургии / В.В.Мечев, В.П.Быстров, А.В.Тарасов и др. М.: Металлургия, 1991. 413 с.
2. Ванюков А.В. Плавка в жидкой ванне / А.В.Ванюков, В.П.Быстров. М.: Металлургия, 1988. 208 с.
3. Левин М.В. Алгоритмическое обеспечение оптимального управления металлургическими процессами / М.В.Левин, А.О.Иванов. ЛГИ. Л., 1986. 83 с.
4. Мееров М.В. Многосвязные системы управления. М.: Радио и связь, 1990. 325 с.