

УДК 669.041(075): 621.365.2: 621.377-52.

И.Труфанов, докт.техн.наук; Д. Ярымбаш

Запорожский национальный технический университет

СЕНСОРНАЯ ПОДСИСТЕМА ЛОКАЛЬНОЙ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Проведено теоретическое описание и математическое исследование процессов формирования качественных характеристик сенсорной подсистемы локальной адаптивной системы автоматизации технологических процессов на базе датчиков больших токов Холла и Роговского. Применительно к условиям металлургических печей графитации графитированных электродов мощностью (6000 - 10000) кВА получены математические модели стохастической погрешности их динамического функционирования в составе командно-информационного комплекса при рабочих токах (10 - 100) кА.

На современном этапе развития науки и практики управления металлургическим предприятием основной задачей является создание высококачественных систем автоматизации технологических процессов и систем организационного регулирования хода производства. Системы локального уровня призваны рационально организовать тепловую работу металлургических печей, которая не только определяет высокую эффективность их работы, но и в значительной мере влияет на качество производимой продукции.

Сенсорно-измерительная подсистема обеспечивает контроль и задание параметров режима работы электротехнологического оборудования.

Ниже проводится анализ состояния и разработка системо- и схмотехнических параметров систем автоматизации электротехнических печей графитации, которые относятся к классу печей с малоокислительными и слабо- или сильновосстановительными атмосферами рабочего пространства. Сенсорная подсистема таких вещей характеризуется: большими токовыми нагрузками (до 10–20 кА); значительным поперечным сечением печи графитового токоподвода (до 160000 мм²); высокими температурами в зоне измерения (до 170 – 250 °С); ограниченным пространством в области токоподводов, где возможно размещение измерительно-информационного оборудования. Указанные факторы обуславливают *новое направление* в области измерений параметров переменного и постоянного тока посредством измерения напряженности магнитного поля на основе эффектов Холла. Точность составляет +/- (1-3)%. Нижняя граница полосы пропускания – постоянный ток; верхняя граница – (2-10) кГц, что вполне обеспечивает высокое качество сенсорной подсистемы на промышленной частоте рабочего тока.

Токовые датчики имеют электрическую и магнитную совместимость с серийными комплектами интерфейсных приборов (мультиметр, осциллограф, самописец, интерфейсы серий RS-232, RS-485 и др.).

Задачей сенсоной подсистемы локальной адаптивной системы автоматизации рафинировочной печи (как металлургической печи) является обработка и формирование блоков информации, пригодной для использования в исполнительной подсистеме. Вводя обозначения, согласно которым x – сигнал на входе, z – на выходе, k – коэффициент передачи (усиления), имеем для аналоговых каналов линейное преобразование входного сигнала $z = kx + b$ [1] (b – сигнал смещения). Нелинейные преобразователи (функциональные) обычно выполняют преобразование [1] $z = k_1 \ln x$; $z = x^n$; $z = \sqrt[n]{x}$; $z = f(x_1, \dots, x_n)$; $z = p$; $z = p^{-1} x(p) dt$; $z = p^{-1} f(p) dx$; $p \equiv d/dt$ – оператор непрерывного линейного дифференцирования Лапласа.

Нами разработана функциональная структура командно-информационного комплекса локальной системы автоматизации печи графитации как обобщенного объекта автоматизации (металлургической печи) (рис. 1).

Электрические нагрузки и пропорциональные им сигналы являются математической базой построения системы автоматизации, где сигналы являются статически детерминированными или стохастическими. В общем случае выходная величина $v(t) = x(t)$ с некоторой стохастической моделью [2] погрешности измерения и обработки сигналов: $v(t) = Au([x(t)])$; $[x(t)]$ – матрица сигналов; Au – идеализированный оператор обработки (модели) сигнала).

Для реализации системы автоматизации технологических процессов графитации применяются непрерывные или дискретные величины [2], где при разработке математических моделей используются следующие математические координаты и функции: $X(t)$ – измеряемая величина; $F(x, t)$ – одномерный закон распределения; плотность вероятности $w(x, t)$, на основании которых принимаются следующие центральные моменты [3]: $\bar{X}(t)$ – математическое ожидание; $D[X(t)] = \sigma_x^2(t)$ – дисперсия (σ_x – среднеквадратическое отклонение – СКО); $R_x(t_1, t_2)$ – автокорреляционная функция, где $R_x(t_1, t_2) = [X(t_1) - \bar{X}(t_1)][X(t_2) - \bar{X}(t_2)]$.

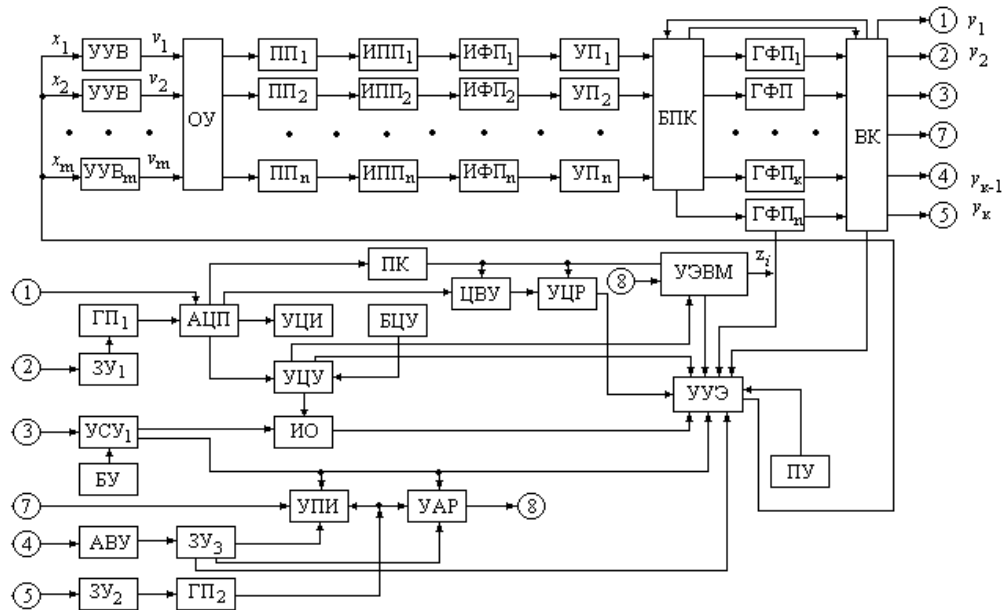


Рисунок 1 – Функциональная структура командно-информационного комплекса локальной системы автоматизации металлургических печей

ОУ – объект управления; $ПП_i$ – датчики (первичные преобразователи); $ИПП_n$ – исполнительные первичные преобразователи; $ИФП_n$ – исполнительные функциональные преобразователи; $УП_n$ – нормирующие преобразователи унификации величин сигналов; БПК – блок промежуточных коммутаторов; $ГФП_n$ – групповые функциональные преобразователи; БЦУ – блок цифровых уставок; УСУ – устройство сравнения сигналов задания с сигналами уставок; ИО – индикатор отклонений; УПИ – устройство представления информации; УУЭ – устройство управления электрическими исполнительными органами; $УУВ_n$ – устройства управления ввода информации; АБУ – аналоговое вычислительное устройство; $ЗУ_n$ – запоминающее устройство; $ГП_n$ – градуировочные преобразователи; УАР – устройство аналоговой регистрации; ПУ – пульт управления; ВК – вторичный коммутатор; УЭВМ – управляющая ЭВМ (промышленный микроконтроллер); УС – устройство синхронизации; УЦР – устройство цифровой регистрации; ЦВУ – цифровое вычислительное устройство; ПК – преобразователь кодов; УЦИ – устройство цифрового управления; УЦИ – устройство цифровой индикации.

При описании нестационарных случайных (стохастических) процессов применяются различные упрощенные модели законов распределения [3]: равномерный, нормальный, усеченный нормальный, Коши, логарифмический нормальный, Гамма-распределение, Эрланга, Накагами, односторонний нормальный, Релея, Райса, экспоненциальный, Вейбулла. Нами принимается к дальнейшему исследованию закон распределения вероятности сигналов Эрланга, как модели, описывающей процесс в дискретные промежутки времени, и имеющего следующие параметры: а) модель Эрланга ($k > 0$ – целое число); плотность вероятности

$w(t) = \frac{\lambda (\lambda x)^k}{k!} \exp(-\lambda x)$ при $x > 0$; $w(t) = 0$ при $x \leq 0$; интегральный закон распределения

$$F(t) = \frac{\exp(-\lambda x)}{k!} [-(\lambda x)^k + \sum_{i=1}^k (-1)^{i+1} \cdot k(k-1) \dots (k-i+1) (\lambda x)^{k-i}] ;$$

математическое ожидание $\bar{X}(t) = \frac{k+1}{\lambda}$; дисперсия $\sigma_x^2 = \frac{k+1}{\lambda^2}$. Из

этого следует, что поток событий (дискретных процессов опроса датчиков) по Эрлангу k -го порядка реализуется из простейшего (равномерного или нормального) при исключении $\{k\}$ следующих друг за другом по времени значений $x(t)$ и оставлении (проведении) $(k+1)$ -го, для которого $w_k = (T) = \lambda (\lambda T)^k (k!)^{-1} \exp(-\lambda T)$ при $T > 0$.

Основной характеристикой печи графитации является характеристика энергетического потока (основного параметра адсорбции), являющийся стохастическим параметром: $G_x(\omega)$ -энергетический спектр (спектральная плотность энергии) случайного процесса $X(t)$. Это неотрицательная вещественная функция частоты. Величина $G_x(\omega) d\omega / 2\pi$ - мощность спектральных составляющих процесса $X(t)$ в диапазоне $\omega - (\omega + d\omega)$; $R_x(t + \tau, t)$ -автокорреляционная функция стационарного случайного процесса $X(t)$ для моментов времени $t_i, t_i + \tau$ [2] (по А.Н. Колмогорову) будет равен

$$C_x(\tau, t_i) = [X(t_i) - X(t_i - \tau)]^2 = \sigma_x^2(t_i) + \sigma_x^2(t_i - \tau) - 2R_x(t_i, t_i - \tau) + [\bar{X}(t_i)]^2 + [\bar{X}(t_i - \tau)]^2 - 2\bar{x}(t_i)\bar{x}(t_i - \tau) \quad (1)$$

Для стационарного процесса $X(t)$ уравнение (1) принимает вид:

$$C_x(\tau) = 2\sigma_x^2 [1 - \rho_x(\tau)] = 2\sigma_x^2 [1 - \rho_x(\tau)], \quad (2)$$

где $\rho_x(\tau) = R_x(\tau) \sigma_x^{-2}$ - нормированная автокорреляционная функция.

Наряду с данными динамическими характеристиками применяются другие качественные характеристики: интервал корреляции, положение и значение максимума энергетического спектра, ширина спектра случайного процесса, граничные частоты. Последние две характеристики задаются при определенном уровне отсечки (ограничении) спектра, т.е. $G_x(\omega_c) = k_I \sup[G_x(\omega)]$, где $k \approx 0,05$ (в пределах 5%). В соответствии с [2,3] энергетический спектр и автокорреляционная функция связаны соотношениями Винера-Хинчина (для $G_x(\omega) = \sigma_x(-\omega)$) для стационарного процесса:

$$R_x(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_x(\omega) \exp(j\omega\tau) d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \sigma_x(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega; \quad (3)$$

$$G_x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau = 2 \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau. \quad (4)$$

Для $\omega = 2\pi f$ соотношения (3) и (4) принимают вид:

$$R_x(\tau) = \int_0^{\infty} G(f) \cos(2\pi f\tau) df; \quad (5)$$

$$G_x(f) = 4 \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau. \quad (6)$$

Для систем электрооборудования как комплекса управляющей электротехники входная информация $x_i(t)$ для УВВ_i (рис. 1) является несингулярным процессом, полученным при прохождении сигнала равномерной плотности через колебательный контур, для которого: автокорреляционная функция $R_x(\tau) = C^2 \cos \beta\tau \cdot \exp(-\lambda/\tau)$; дисперсия $D[X] = \sigma_x^2 = C^2$; энергетический спектр (величина энергетического потока)

$$G_x(\omega) = C^2 \lambda \left[\frac{1}{\alpha^2 + (\beta + \omega)^2} + \frac{1}{\alpha^2 + (\beta - \omega)^2} \right].$$

Отсюда следует, что для разработки алгоритма обработки информации и построения модели случайного процесса, реализуемого системой (рис. 1), как сенсорной подсистемой локальной адаптивной системы автоматизации печи графитации для обработки графитированных электродов, применяемых в электрометаллургии, будет необходима следующая последовательность математических операций:

- 1) Исходный статистический материал (информация $x_i(t)$) сводится в таблицы, где каждая строка соответствует одной реализации $x_i(t)$ (измеряемого процесса), а каждый столбец – значениям процесса, имевшим место во всех реализациях в данный отрезок времени измерения.
- 2) Вычисляется эмпирическая плотность вероятности в форме гистограммы или полигона в тех временных диапазонах, где объем выборки позволяет это сделать.
- 3) Строится временной ряд выборочных оценок первых двух моментов распределения на всем протяжении реализаций.
- 4) Для одномерных законов распределения, близких к нормальному, вычисляются значения функций (5) и (6) по соотношениям (с помощью рядов) Лагерра или Эджворта [3] и по ним строятся эмпирические законы распределения в аналитической форме.
- 5) На основе проверки параметрических и непараметрических гипотез [4] проверяется правильность выбора и группирования исходного статистического материала $x_i(t)$. Если в системе (рис. 1)

II міжнародна науково-технічна конференція

применено детерминированное (принудительное) разбиение реализаций $x_i(t)$, то законность такой процедуры также должно быть проверена с помощью критерия Аббе [3]. Если исходный материал $\{x_i(t)\}$ был выбран из нескольких произвольных замеров, то проверка проводится с помощью критерия Н.В. Смирнова [4].

6) Производится проверка соблюдения гипотез об эргодичности и статической стационарности исследуемого процесса $\{x_i(t)\}$.

7) Вычисляются выборочные оценки автокорреляции, структурной функции (1) и текущего спектра (4).

Исследуемый объект является энергонагруженным (на токи до 12 кА), поэтому применяются датчики больших токов, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Датчики больших токов на основе датчиков Холла различных модификаций

Системная характеристика	Тип датчика			
	ДБТ-10	ДБТ-25	ДБТ-50	ДБТ-100
Номинальный измеряемый ток, кА	10	25	50	100
Величина выходного сигнала, А	1,0	2,5	5	10
Приведенная погрешность, %	0,5			
Масса измерительного блока, кг	50			
Масса блока питания, кг	50			
Диапазон рабочих температур, °С	-50...+50			
Напряжение источника питания, В	220(50 Гц)			
Цена одного образца, долл. США	от 1000			

«Короткие сети» электрических металлургических печей имеют широкий класс схемотехнических решений, основными признаками которых являются конструктивные воплощения триангуляции ее элементов: компенсаторов, шинных пакетов, неподвижных «башмаков», пакетов гибких проводников, подвижных «башмаков», проводников и токопроводящих конструкций электродержателей, контактных щек, электродов. Параметры этих элементов оказывают основное влияние на активное и индуктивное сопротивление, поверхностный эффект, эффект близости, внешний поверхностный

эффект, перенос мощности между фазами, потери энергии в металлических конструкциях и др.

Для работы с шинами большого размера и сложной формы используется «пояс Роговского», представляющий собой электрическую вторичную обмотку намотанную на немагнитном сердечнике (соленоид на немагнитном шнуре) и замыкаемую вокруг рабочей шины с током. При замыкании обмотки соленоида на рабочее сопротивление нагрузки дифференциальное уравнение электрического равновесия будет иметь вид

$$L \frac{dI}{dt} + (r + R_n) I = \frac{L}{N} \frac{dI_0}{dt}; I = \mu \mu_0 S N^2 / \ell, \quad (7)$$

где L, r – индуктивность и сопротивление «пояса»; N – число витков обмотки «пояса»; μ, μ_0 – магнитная проницаемость сердечника «пояса» и вакуума; S, ℓ – площадь сечения и длина сердечника; I_0 – рабочий (измеряемый) ток.

Решение дифференциального уравнения позволяет определить время изменения тока и режим работы датчика («пояса Роговского»). Если постоянные времени датчика больше постоянной времени измерительной цепи, то датчик Роговского работает в режиме трансформатора тока, т.е. реализуется режим интегрирования сигнала на собственной индуктивности «пояса» и рекомендуется к использованию на практике электрометаллургии.

Процесс, описываемый системой (7), подразумевает стационарность процесса Эрланга и его линейность. В реальной системе (рис. 1) место нелинейности. Рассматривая каждый блок УУВ_i (рис. 1) как нелинейный блок с одним входом и одним выходом. Желательная функция v_i может быть записана в виде ряда (степенного

[1]): $v_i = \sum_{i=1}^{\ell} a_i x^i$, где реальная функция v_i описывается с учетом

искажения (ошибки) Y_{ex} соотношением $Z_{вых} = \sum_{j=0}^n b_j (x + Y_{ex})^j; n \neq \ell$.

Дисперсия погрешности на выходе будет равна $\bar{V} = \sum_{i=0}^{\ell} a_i \bar{X}^i$;

$\sigma_v^2 = \sum_{i=0}^{\ell} \sum_{j=0}^{\ell} a_i a_j [\overline{X^{i+j}} - (\bar{X}^i)(\bar{X}^j)]$. Для стационарного нормального

закона распределения $X(t)$ при $\bar{X}(t) = 0$ величина дисперсии равна

$$\sigma_v^2 = \begin{cases} \sum_{i=1}^{\ell} \sum_{j=1}^{\ell} a_i a_j [\overline{X^{i+j}} - (\bar{X}^i)(\bar{X}^j)] & \text{при четной сумме } i + j \\ 0 & \text{при нечетной сумме } i + j \end{cases} \quad (8)$$

Для печных трансформаторов со «звездой» на трансформаторе или «треугольником на подвижном башмаке» при числе элементов $\ell=7$ для системы (рис.1) величина дисперсии σ_v^2 для элементной базы на основе датчиков Холла (табл.1) и величине токов 50 – 100 кА по (8) будет иметь вид ряда Лагерра [3]:

$$\begin{aligned} \sigma_v^2 = & a_1^2 \sigma_x^2 + 2a_2^2 \sigma_x^4 + 3a_3 \sigma_x^4 (2a_1 + 5a_3 \sigma_x^2) + 24a_4 \sigma_x^6 (a_2 + 3a_4 \sigma_x^2) + \\ & + 15a_5 \sigma_x^6 (2a_1 + 14a_3 \sigma_x^2 + 63a_5 \sigma_x^4) + 20a_6 \sigma_x^8 (6a_2 + 90a_4 \sigma_x^2 + 509a_6 \sigma_x^4) + \\ & + 210a_7 \sigma_x^8 (a_1 + 9a_3 \sigma_x^2 + 99a_5 \sigma_x^4), \end{aligned} \quad (9)$$

где a_i – текущее значение выходного сигнала датчика Холла (табл. 1).

Выражение (9) имеет то достоинство, что при условии раскрытия скобок в (9) и $\ell < 7$ пренебрегается соответствующим числом последних слагаемых.

Для оценки σ_{vz6yx}^2 принимаются выражения (3),(4),(8) в виде:

$$\sigma_{vz6yx}^2 = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n b_j b_k \left[\sum_{m=0}^{j+k} C_{j+k}^m R_{x^{j+k-m} y^{m_{6x}}} - \left(\sum_{m=0}^j C_j^m R_{x^{j-m} y^{m_{6x}}} \right) \left(\sum_{m=0}^k C_k^m R_{x^{k-m} y^{m_{6x}}} \right) \right];$$

$$\begin{aligned} R_{vz6yx} &= a_1 \sum_{m=0}^j b_j \sum_{m=0}^j C_j^m [\overline{X^{j-m+1} Y_{6x}^m} - \bar{X} (\overline{X^{j-m} Y^m})], \text{ откуда} \\ R_{vz6yx} &= \sum_{i=0}^{\ell} b_j \sum_{j=0}^{\ell} a_i b_j \left[\sum_{m=0}^j C_j^m (\overline{X^{i+j-m}}) - (\bar{X}^i) \sum_{m=0}^j C_j^m (\overline{X^{j-m} Y^m}) \right]. \end{aligned}$$

В частности при $\ell = n = 2$ имеем:

$$\begin{aligned} R_{vz6yx} = & a_1 b_1 [\overline{X^2} + R_{xy6x} - \bar{X} (\bar{X} + \bar{Y}_{6x})] + a_1 b_2 [\overline{X^3} + 2 \overline{X^2 Y_{6x}} + \overline{X Y_{6x}^2} - \\ & - \bar{X} (\overline{X^2} + 2 R_{xy6x} + \overline{Y_{6x}^2})] + a_2 b_1 [\overline{X^3} + 2 \overline{X^2 Y_{6x}} - \bar{X}^2 (\bar{X} + \bar{Y}_{6x})] + \\ & + a_2 b_2 [\overline{X^4} + 2 \overline{X^3 Y_{6x}} + \overline{X^2 Y_{6x}^2} - \bar{X}^2 (\overline{X^2} + 2 R_{xy6x} + \overline{Y_{6x}^2})]. \end{aligned} \quad (10)$$

Если в (10) $\bar{X} = \bar{Y} = 0$, то

$$\begin{aligned} R_{vz6yx} = & a_1 b_1 (\sigma_x^2 + R_{xy6x}) + a_1 b_2 (\overline{X^3} + 2 \overline{X^2 Y_{6x}} + \overline{X Y_{6x}^2}) + a_2 b_1 (\overline{X^3} + 2 \overline{X^2 Y_{6x}}) + \\ & + a_2 b_2 [\overline{X^4} + 2 \overline{X^3 Y_{6x}} + \overline{X^2 Y_{6x}^2} - \sigma_x^2 (\sigma_x^2 + 2 R_{xy6x} + \sigma_{y6x}^2)]. \end{aligned}$$

Если законы распределения X, Y_{6x} – нормальные, то R_{vz6yx} будет иметь вид:

$$R_{y_{\text{вблх}}} = a_1 b_1 (\sigma_x^2 + R_{xy_{\text{вблх}}}) + a_2 b_2 [3 \sigma_x^4 + 6 \sigma_x^2 2 R_{xy_{\text{вблх}}} + \sigma_x^2 \sigma_{y_{\text{вблх}}}^2 + 2 R_{xy_{\text{вблх}}}^2 - \sigma_x^2 (\sigma_x^2 + 2 R_{xy_{\text{вблх}}} + \sigma_{y_{\text{вблх}}}^2)] = a_1 b_1 (\sigma_x^2 + R_{xy_{\text{вблх}}}) + 2 a_2 b_2 (\sigma_x^2 + R_{xy_{\text{вблх}}})^2.$$

Для $\ell = n = 2$, $\bar{X} = \bar{Y} = 0$ и условия независимости X и $Y_{\text{вблх}}$ имеем выражение для дисперсии выходного сигнала датчика Холла:

$$\sigma_{y_{\text{вблх}}}^2 = \sigma_x^2 (a_1 - b_1)^2 + 2 \sigma_x^4 (a_2 - b_2)^2 + \sigma_{y_{\text{вблх}}}^2 [b_1^2 + 2 b_2^2 (2 \sigma_x^2 + \sigma_{y_{\text{вблх}}}^2)];$$

$$R_{y_{\text{вблх}}} = (a_0 + a_1 \bar{X})^2 + a_2 \sigma_x^4 (3 a_2 - 2 b_2) + \sigma_x^4 [a_1 (a_1 - b_1) + 2 a_2 (a_0 + a_1)],$$

где $j = 1, 2, \dots, n$; $a_1 = b_1$; $a_2 = b_2$; $\sigma_{b_1}^2 = \sigma_{b_2}^2$.

В данном случае будем иметь модель датчика Холла как одноканального звена с «гладкой» характеристикой (без тренда), приводимой к полиномиальной форме (8). Во всех вышеприведенных соотношениях a_i – величина входного сигнала датчика Холла; b_i – выходного сигнала при соответствующих $k_1(k+1)_i$ -измерении.

При использовании соотношения (10) на практике следует провести оценку точностных параметров датчиков в динамике. В этом случае датчик, в первом приближении, рассматривается как блок с одним входом и одним выходом, работа которого описывается с помощью линейного оператора (2). В соответствии с данными табл. 1 погрешность на выходе датчика в любой момент времени t зависит не только от $x(t) + Y_{\text{вблх}}(t)$, но и от предшествующих значений сигнала на выходе при условии, что случайные процессы $X(t)$ и $Y_{\text{вблх}}(t)$ являются непрерывными и стационарными. Это условие позволяет использовать математический аппарат операционного исчисления в виде операторной передаточной функции [5]. Обозначая идеальную $W_u(j\omega)$ и реальную $W_p(j\omega)$ (ω – круговая частота) частотную передаточную функцию при $\bar{X} = 0$ и $\bar{Y}_{\text{вблх}} = 0$, $\bar{Y}_{\text{вблх}}(t) = 0$ для значения сигнала (8), дисперсия на выходе будет иметь вид:

$$\sigma_{y_{\text{вблх}}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_y(\omega) d\omega, \quad (11)$$

где $G_{y_{\text{вблх}}}(\omega)$ – энергетический спектр случайного процесса $y_{\text{вблх}}(t)$.

Этот спектр выражается через характеристики сигнала на входе и реальную и идеальную передаточные функции. Из определения корреляционной функции (3) будем иметь [5]:

$$R_{y_{\text{ввх}}}(\tau) = R_{z_{\text{вх}}}(\tau) + R_v(\tau) - R_{z_{\text{ввх}}v}(\tau) - R_{vz_{\text{ввх}}}(\tau). \quad (12)$$

Применяя теорему Винера – Хинчина [5] для левой и правой части равенства (12), имеем:

$$G_{y_{\text{ввх}}}(\omega) = G_{z_{\text{ввх}}}(\omega) + G_v(\omega) - G_{z_{\text{ввх}}v}(\omega) - G_{vz_{\text{ввх}}}(\omega), \quad (13)$$

где $G_{z_{\text{ввх}}v}(\omega)$ - взаимный энергетический спектр процессов $z_{\text{ввх}}(t)$ и $v(t)$.

Процессы $z_{\text{ввх}}(t)$ и $v(t)$ - стационарно связанные процессы. Согласно [5] имеем:

$$\begin{aligned} G_{z_{\text{ввх}}}(\omega) &= |W_p(j\omega)|^2 [G_x(\omega) + G_{y_{\text{вх}}}(\omega) + G_{xy_{\text{вх}}}(\omega) + G_{y_{\text{вх}}x}(\omega)]; \\ G_v(\omega) &= |W_u(j\omega)|^2 G_x(\omega); \\ G_{vz_{\text{ввх}}}(\omega) &= W_u(j\omega)W_p(-j\omega)[G_x(\omega) + G_{xy_{\text{вх}}}(\omega)]; \\ G_{z_{\text{ввх}}v}(\omega) &= W_p(j\omega)W_u(-j\omega)[G_x(\omega) + G_{y_{\text{вх}}x}(\omega)]. \end{aligned} \quad (14)$$

При подстановке (13) и (14) в (11) вычисляется выражение для дисперсии ошибки (погрешности) на выходе датчика.

Для датчиков серии ДБТ (табл. 1) величина $R_x(\tau)$ равна [2]:

$$R_x(\tau) = \sigma_x^2 \exp(-\alpha|\tau|) \quad (15)$$

и аддитивная погрешность, накопленная на предыдущих элементах (звеньях системы управления) $y_{\text{вх}}(t)$ с автокорреляционной функцией

$$R_{y_{\text{вх}}}(\tau) = C^2 \delta(\tau), \quad (16)$$

где $\delta(\tau)$ - дельта-функция Дирака [5].

Идеальная передаточная функция $W_u(j\omega) = K_u$. Реальный датчик обладает инерционностью, поэтому он представляется аperiодическим звеном первого порядка $W_p(j\omega) = K_p / (1 + T_p j\omega)$. Из условия аддитивности процессов $X(t)$ и $y_{\text{вх}}(t)$ следует $R_{xy_{\text{вх}}}(\tau) = R_{y_{\text{вх}}}(\tau) = 0$ [2]. Косинус-преобразование Фурье [5] от R_x и $R_{y_{\text{вх}}}$ определяет следующие значения параметров системы (T_p – постоянная времени):

$$\begin{aligned}
 G_x(\omega) &= \frac{2\alpha\sigma_x^2}{\alpha^2 + \omega^2}; G_{y_{\text{вх}}}(\omega) = C^2; \\
 \sigma_{y_{\text{вих}}}^2 &= \frac{\alpha\sigma_x^2 K_p^2}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{(1 + \omega^2 T_p^2)(\alpha^2 + \omega^2)} + \frac{C^2 K_p^2}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{(1 + \omega^2 T_p^2)} + \\
 &+ \frac{\alpha^2 \sigma_x^2 K_u^2}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{2\alpha\sigma_x^2 K_p K_u}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{(\alpha^2 + \omega^2)(1 + \omega^2 T_p^2)} = \\
 &= \frac{\sigma_x^2 K_p (K_p - 2K_u)}{1 + \alpha T_p} + \frac{C^2 K_p^2}{2T_p} + \sigma_x^2 K_u^2.
 \end{aligned} \quad (17)$$

Из (17) следует, что дисперсия погрешности возрастает с ростом величин σ_x^2 и C^2 , которые характеризуют мощность процессов $X(t)$ и $Y_{\text{вх}}(t)$. Дисперсия погрешности на выходе датчика растет с ростом дисперсий истинного значения $X(t)$ и $Y_{\text{вх}}(t)$. При $K_u = K_p$ и $T_p = 0$ (в случае идеального датчика) дисперсия погрешности на выходе равна $C^2 = K^2 \sigma_{y_{\text{вх}}}^2$.

Оптимальное значение реального коэффициента усиления датчика серии ДБТ, обеспечивающее минимум дисперсии погрешности на выходе датчика при фиксированном значении T_p :

$$K_{p.\text{opt}} = \frac{K_u \sigma_x^2}{1 + \alpha T_p} \left(\frac{\sigma_x^2}{1 + \alpha T_p} + \frac{C^2}{2T_p} \right)^{-1}. \quad (18)$$

Если дисперсия погрешности на входе стремится к нулю $C^2 \rightarrow 0$, то $K_{p.\text{opt}} = K_u$. В реальных условиях $C^2 \neq 0$ и $T_p \neq 0$ оптимальное значение K_p реализуется только при условии $K_p > 2K_u$.

Для практических расчетов (в соответствии данными табл. 1 и [1,2]) принимаются значения $C^2 \approx (5-10) \text{ кА}^2$; $\alpha = 0,05$; $T_p = 0,001 \text{ с}$; $\sigma_x^2 \approx 0,5 \%$; $K_u = 10$.

В заключение следует отметить: 1) на основе существующей приборной базы для измерения сильных токов рекомендуются информационно-сенсорные подсистемы на датчиках Холла и Роговского; 2) применение датчиков Холла и Роговского позволяет реализовать дифференциальные режимы сильноточных измерений по сравнению с существующими системами интегрального типа; для верификации информационной стохастической картины «короткой

II міжнародна науково-технічна конференція

сети» следует проводить измерения во всех токоподводах одновременно (по 18 каналам).

The theoretical description and mathematical research of the processes of qualitative characteristic formation of a touch subsystem of local adaptive system of automation of technological processes on the basis of greater current gauges by Hall and Rogovsky is lead. With the reference to conditions of metallurgical graphitation furnaces of graphitated electrodes with the capacity of (6000 - 10000) kVA mathematical models of a stochastic error of their dynamic functioning in the structure of a command-information at working currents (10 - 100) kA are received.

Литература

1. Расщепляев Ю.С., Фандиенко В.Н. Синтез моделей случайных процессов для исследования автоматических систем управления. – М.: Энергия, 1981. – 144 с.
2. Четвериков В.Н., Баканович Э.А. Стохастические вычислительные устройства систем моделирования. – М.: Машиностроение, 1989. – 272 с.
3. Боровиков В.П. STATISTIKA: искусство анализа данных на компьютере. – СПб.: Питер, 2001. – 656 с.
4. Дьяконов В.П. MATHCAD 8/2000 : Специальный справочник. – СПб.: 2001. – 592 с.
5. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. – М.: Наука, 1967. – 780 с.