

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

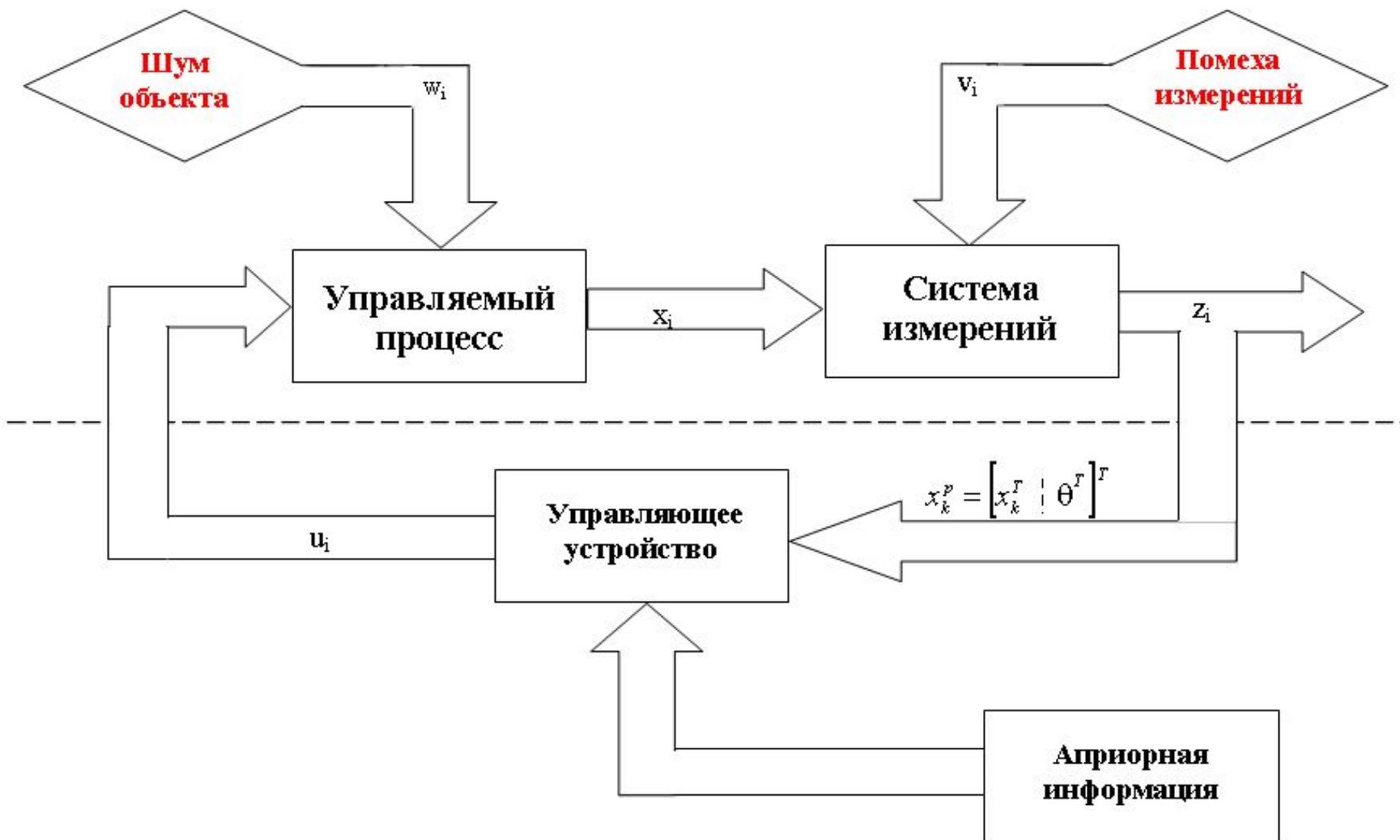
ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АБУ РАЙХАНА БЕРУНИ

АБДУРАХМАНОВА Юлдуз Мухтарходжаевна

**РЕГУЛЯРИЗОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ
ОБОБЩЕННОГО ОЦЕНИВАНИЯ
ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Ташкент - 2010

УНИФИЦИРОВАННАЯ БЛОК-СХЕМА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ



ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ОБОБЩЕННОГО ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

$$x_{k+1} = F(k, \theta)x_k + w_k, \quad z_k = H(k, \theta)x_k + v_k,$$

$$x_k^p = [x_k^T \mid \theta^T]^T, \quad x_{k+1}^p = f^p(x_k^p, k) + g^p(x_k^p, k)w_k, \quad z_k = h^p(x_k^p, k) + v_k,$$

$$f^p(x_k^p, k) \equiv [x_k^T F^T(k, \theta) \mid 0]^T, \quad g(x_k^p, k) \equiv [G^T(k, \theta) \mid 0]^T,$$

$$\hat{x}(k \mid k, k_0) = [I \mid 0] \hat{x}^p(k \mid k, k_0);$$

$$x_{k+1}^\sigma = \phi_\sigma(k+1, k, \theta_\sigma)x_k^\sigma + G_\sigma(k, \theta_\sigma)u_k + w_k^\sigma, \quad z_k = H_\sigma(k, \theta_\sigma)x_k^\sigma + v_k, \quad \sigma = 1, 2, \dots, n,$$

$$x_{k+1}^p = \phi_p(k+1, k, \theta_p)x_k^p + G_p(k, \theta_p)u_k + w_k.$$

$$z_k = H_p(k, \theta_p)x_k^p + v_k, \quad \sigma = 1, 2, \dots, n,$$

$$w_k = [w_1^T(k) \boxtimes w_2^T(k) \boxtimes \dots \boxtimes w_n^T(k)]^T, \quad x_k^p \equiv [x_1^T(k) \boxtimes \dots \boxtimes x_n^T(k)]^T,$$

$$\theta_a \equiv [\theta_1^T \boxtimes \theta_2^T \boxtimes \dots \boxtimes \theta_n^T]^T, \quad H_p(k, \theta_p) \equiv \sum_{\sigma=1}^n \beta_\sigma H_\sigma(k, \theta_\sigma).$$

$$x_{k+1}^p = \begin{bmatrix} f[x_k^p, k] \\ 0 \end{bmatrix} x_k^p + \begin{bmatrix} g[x_k^p, k] \\ 0 \end{bmatrix} u_k + \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} w_k, \quad z_k = h[x_k^p, k] + v_k,$$

$$h[x_k^p, k] \equiv H(k, \theta)x_k, \quad f[x_k^p, k] \equiv \phi(k+1, k; \theta)x_k, \quad g[x_k^p, k] \equiv H(k, \theta)x_k.$$

Слайд 3 РЕГУЛЯРИЗОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБОБЩЕННОГО
ОЦЕНИВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ
НАЛИЧИИ ОШИБОК В МОДЕЛИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

$$x_k = F_k(x_{k-1}, u_{k-1}) \quad (k=1, 2, \dots), x_k = (x_k^1, x_k^2, \dots, x_k^n), F_k = (F_k^1, F_k^2, \dots, F_k^n)$$

$$z_k = z_k(x_k, v_k) \quad (k=1, 2, \dots), z_k = (z_k^1, z_k^2, \dots, z_k^n)$$

$$u_k = u_k(\hat{x}_k), \quad \hat{x}_k = \hat{x}_{k/k-1} + K_k(y_k - \hat{z}_{k/k-1}).$$

$$\hat{x}_{k/k-1} = \hat{x}_{k/k-1}(\hat{x}_{k/k-1}, u_{k-1}), \quad \hat{z}_{k/k-1} = \hat{z}_{k/k-1}(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1})$$

$$x_k = F_k^*(x_{k-1}, u_{k-1}), \quad F_k^* = (F_k^{*1}, F_k^{*2}, \dots, F_k^{*n}), z_i = z_i^*(x_i, v_i).$$

$$x_k = \theta_k(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}) + C_k x_{k-1}, \quad z_k = E_k(\hat{x}_{k/k-1}) + H_k x_k + L_k v_k,$$

$$\theta_k(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}) = F_k^*(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}) - C_k \hat{x}_{k-1}, \quad E_k(\hat{x}_{k/k-1}) = z_k^*(\hat{x}_{k/k-1}, v_k = 0) - H_k x_{k/k-1}.$$

$$\mu_k^s = \min_{k_k^s (t=1, 2, \dots, m)} \left\{ M(x_k^s - \hat{x}_{k/k-1}^s) - 2 \sum_{t=1}^m k_k^{st} \lambda_k^{st} + \sum_{t_1, t=1}^m k_k^{st_1} k_k^{st} \gamma_k^{t_1 t} \right\},$$

$$\sum_{t_1=1}^m k_k^{st} \gamma_k^{t_1 t} = \lambda_k^{st} \quad (t=1, 2, \dots, m, s=1, 2, \dots, n), K_k \Gamma_k = \Lambda_k \quad (k=1, 2, \dots).$$

$$K_k = \Lambda_k \Gamma_k^+ + Z(I - \Gamma_k \Gamma_k^+), \quad \Gamma_k^+ = \lim_{\alpha \rightarrow 0} (\Gamma_k + \alpha I)^{-1}, \quad \alpha > 0;$$

$$k_{k,r}^j = k_{k,r-1}^j - g_\alpha(\Gamma_k^T) (\Gamma_k^T k_{k,r-1}^j - \lambda_k^j), \quad r=1, 2, \dots, g_\alpha(\Gamma_k^T) = (\Gamma_k^T + \alpha I)^{-1},$$

$$g_\alpha(\lambda) = (\alpha + \lambda)^{-1}, \quad 0 \leq \lambda \leq \infty, \quad \tilde{k}_{k,r}^j = \tilde{k}_{k,r-1}^j - g_\alpha(\Gamma_k^T) (\Gamma_k^T \tilde{k}_{k,r-1}^j - \lambda_k^j) + w_{k,r}, \quad r=1, 2, \dots, \|w_{k,r}\| \leq \varepsilon,$$

$$\|\tilde{k}_{k,r}^j - k_*^j\| \leq \left\| (I - \Gamma_k^T g_r(\Gamma_k^T)) \right\| (k_0^j - k_*^j) + r\varepsilon.$$

ОЦЕНИВАНИЕ ОБОБЩЕННОГО ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА РЕГУЛЯРИЗАЦИИ

$$x^p(k+1) = \varphi[x^p(k), k] + B[x^p(k), k]w(k), \quad h(k) = z[x^p(k), k] + \eta(k),$$

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=k_0}^{k_r-1} [h(k+1) - z[x^p(k+1), k+1]]^T \times V_\eta^{-1} [h(k+1) - z[x^p(k+1), k+1]],$$

$$J_\alpha^* = \frac{1}{2} [\hat{x}^p(k_0) - x^p(k_0)]^T V_0^{-1} [\hat{x}^p(k_0) - x^p(k_0)] +$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{k=k_0}^{k_u-1} [h(k+1) - z[\hat{x}^p(k+1), k+1]]^T \times V_\eta^{-1} [h(k+1) - z[\hat{x}^p(k+1), k+1]] +$$

$$+ \frac{1}{2} \alpha \sum_{k=k_0}^{k_r-1} [\hat{x}^p(k) - \bar{x}^p(k)]^T V_x^{-1} [\hat{x}^p(k) - \bar{x}^p(k)] + \frac{1}{2} \sum_{k=k_0}^{k_r-1} \hat{w}(k)^T V_w^{-1} \hat{w}(k) + \sum_{k=k_0}^{k_r-1} \lambda^T(k+1) \times$$

$$\times \left\{ \varphi[\hat{x}^p(k), k] + B[\hat{x}^p(k), k] \hat{w}(k) - \hat{x}^p(k+1) \right\}, \quad \alpha > 0,$$

$$\rho \{h(k) - z[\hat{x}^p(k), k]\} = \eta_0 + w_0 \left\{ \Omega[\hat{x}^p(k)] \right\}^{1/2}, \quad \|\eta_k\| = \eta_0, \quad \|w_k\| = w_0,$$

$$\hat{x}^p(k+1) = \varphi[\hat{x}^p(k), k] + P(k+1) \left\{ \frac{\partial z^T[\hat{x}^p(k+1), k+1]}{\partial \hat{x}^p(k+1)} V_\eta^{-1}(k+1) [h(k+1) - z[\hat{x}^p(k+1), k+1]] - \alpha V_x^{-1} [\hat{x}^p(k+1) - \bar{x}^p(k+1)] \right\},$$

$$P(k+1) = \left\{ I - \frac{\partial M[\hat{x}^p(k+1), k+1]}{\partial \hat{x}^p(k+1)} P(k+1|k) + \alpha V_x^{-1} P(k+1|k) \right\}^{-1} P(k+1|k).$$

$$x_{i+1}^0 = f(x_i^0, u_i^0, A^0, k_i), \quad z_i = f(x_i^0), \quad x_0^0 = \bar{x}_0^0, \quad A^0 = A + \Delta A,$$

$$x_{i+1}^0 = f(x_i^0, u_i^0, A^0, k_i) + b\Delta\bar{f}(x_i^0, u_i^0, A^0, \Delta A, k_i),$$

$$x_{1,i+1} = f_1(x_i, u_i, A, k_i) + bX_i, \quad z_i^p = h(x_i^0, i) + v_i, \quad 0 \leq i \leq N-1, \quad x_{3,i+1,k} = f_2(x_{3i,k}, u_i^0, w_{2i,k}, k_i),$$

$$x_{3i,k} = \begin{bmatrix} x_{2i,k} \\ \dots \\ X_{i,k} \end{bmatrix}; \quad f_2(x_{3i,k}, u_i^0, w_{2i,k}, k_i) = \begin{bmatrix} f_1(x_{2i,k}, u_i^0, A, k_i) + bX_{i,k} \\ \dots \\ X_{i,k} \end{bmatrix} + dw_{2i,k}; \quad d = \Delta t \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ E \end{bmatrix},$$

$$\mathfrak{S}_{2k} = \sum_{i=0}^k F_2(i, k), \quad (0 \leq k \leq N-1),$$

$$F_2(i, k) = \frac{1}{2} \left\{ [z_i^p - h_2(x_{3i,k}, i)]^T V_i^{-1} [z_i^p - h_2(x_{3i,k}, i)] + w_{2i,k}^T Q_{2i} w_{2i,k} \right\} \quad (0 \leq k \leq N-1),$$

$$F_2(0, k) = \frac{1}{2} \left\{ [z_0^p - h_2(x_{3(0),k}, 0)]^T V_0^{-1} [z_0^p - h_2(x_{3(0),k}, 0)] + w_{20,k}^T Q_{20} w_{20,k} \right\} + \frac{1}{2} [\bar{x}_{30} - x_{30,k}]^T \bar{M}_{20} [\bar{x}_{30} - x_{30,k}]$$

$$h_2(x_{3i,k}, i) = h(x_{2i,k}, X = 0, i); \quad \bar{x}_{30} = \begin{bmatrix} \bar{x}_0^0 \\ \dots \\ X_0 \end{bmatrix};$$

$$\hat{x}_{3k,k} = \hat{x}_{3k,k-1} + M_{2k} h_{2s}^T(\hat{x}_{3k,k-1}, t_k) \left\{ V_k^{-1} [z_k^p - h_2(\hat{x}_{3k,k-1}, t_k)] \right\},$$

$$\hat{x}_{3k,k-1} = f_2(\hat{x}_{3k-1,k-1}, u_{i-1}^0, \hat{w}_{2k-1,k-1} = 0, k-1),$$

$$M_{2k} = [F_{2s}(k, k-1) + M_{2k,k-1}^{-1} + \alpha_k E]^{-1}, \quad \alpha_k = k^{-1}, \quad k = 1, 2, \dots,$$

$$M_{2k,k-1} = f_{2s}(k-1, k-1) M_{2,r-1} f_{2s}^T(k-1, k-1) + d Q_{2,k-1}^{-1} d^T.$$

Слайд 6 АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ ВЕКТОРА ВОЗМУЩЕНИИ
В ЗАДАЧАХ ОБОБЩЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

$$x_k^p = f_k(x_k^p, u_{k-1}, w(k)), \quad k = 1, 2, \dots,$$

$$\omega^{(n)}, n = 1, 2, \dots, N: w(k) = \sum_{n=1}^{N_1} \omega^{(n)} q_n(k), \quad k = 1, 2, \dots, \quad w = (\omega^{(1)}, \omega^{(2)} \dots \omega^{(N_1)}).$$

$$z_k = f_k^*(x_k^p, W(k)), \quad k = 1, 2, \dots,$$

$$W(k) = \sum_{n=1}^{N_2} W^{(n)} q_n^*(k) \quad W = (W^{(1)}, W^{(2)}, \dots, W^{(N_2)}),$$

$$\hat{V} = \arg \min_{V \in \Omega_I} J_0(V) = \arg \min_{V \in \Omega_I} \sum_{n=1}^N b_n V^2, \quad V = (x_k^p, w_k),$$

$$\psi(V) = Sp(B^* e e^T), \quad e = z - z_0, \quad \tilde{V} = \min_V [\psi(V) + \beta J_0(V)], \quad \beta \geq 1,$$

$$\Psi(V) = a + \sum_{n=1}^N \beta^{(n)} V^{(n)} + \sum_{n=1}^N \gamma^{(n)} (V^{(n)})^2, \quad a \geq 0, \gamma < 1,$$

$$V_{r+1} = P_Q(V_r - \alpha_r (\Psi'(V_r) + \varepsilon_r V_r)),$$

$$\alpha_r = (1+r)^{-1/2}, \quad \varepsilon_r = (1+r)^{-p}, \quad 0 < p < 1.$$

Слайд 7 РЕГУЛЯРИЗОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ КОРРЕКЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ОБОБЩЕННОГО ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ И ПАРАМЕТРОВ

$$x_{k+1}^p = f_k(k, x_k^p, u_k, \psi_k), k \in [k_0, T], z_k = g_k(k, x_k^p, d_k, \varphi_k), z = z_k \in R^n,$$

$$\hat{X}_{k+1} = F_k^X(k, X_k, z_k, V_k, K_k), K_{k+1} = F_k^K(k, X_k, z_k, V_k, K_k), X_k = [\hat{x}_k^T, y_k^T]^T, k \in [k_0, T],$$

$$\|x^{*p} - x\| < \|\hat{x}^p - x\|, \quad \Omega(k, x_k^*, u_k, c) = 0 \quad \forall k \in [k_0, T],$$

$$\Omega_\varepsilon(k, x_k^*, u_k, c_\varepsilon) = \Delta c_\varepsilon(k), \quad |\Delta c_\varepsilon(k)| \leq \varepsilon \quad \forall k \in [k_0, T],$$

$$\|\Omega(k, x_k^{*p}, u_k, c)\| < \|\Omega(k, \hat{x}_k^p, u_k, c)\|, \quad \|\Omega_\varepsilon(k, x_k^{*p}, u_k, c_\varepsilon)\| < \|\Omega_\varepsilon(k, \hat{x}_k^p, u_k, c_\varepsilon)\|,$$

$$\{s_k^\varepsilon\} \rightarrow \min_{\{s\}} \nabla_4(s) = \min_{\{s\}} \|\Omega_\varepsilon(k, \hat{x}_k^p - s_k, u_k, c_\varepsilon)\|^2;$$

$$\{s_k^\varepsilon, c_\varepsilon\} \rightarrow \min_{\{s, c_\varepsilon\}} \nabla_5(s, c_\varepsilon) = \min_{\{s, c_\varepsilon\}} \|\Omega_\varepsilon(k, \hat{x}_k^p - s_k, u_k, c_\varepsilon)\|^2,$$

$$\nabla(D) = H^T(D)H(D),$$

$$H(D) = [H_i(D), i = \overline{1, n_0 N}]^T = [h_i[\hat{x}_{k_0}^p, D], \dots, h_i[\hat{x}_{k_{N-1}}^p, D], i = \overline{1, n_0}]^T,$$

$$\frac{\partial \nabla(D)}{\partial D} = \zeta^T(D)H(D) = 0,$$

$$\zeta(D) = \partial H(D) / \partial D = [\partial H_i(D) / \partial D_j, i = \overline{1, n_0 N}, j = \overline{1, l}],$$

$$\bar{D}_{(j)} = \bar{D}_{(j-1)} + \lambda_j (\zeta_{(j-1)}^T \zeta_{(j-1)} + \alpha_j I)^{-1} \zeta_{(j-1)}^T H(\bar{D}_{(j-1)}), \quad j = \overline{1, J_0},$$

$$\bar{D}_{(j)} = \bar{D}_{(j-1)} + \lambda_j (\zeta_{(j-1)}^T \zeta_{(j-1)} + \alpha_j \Gamma_j)^{-1} \zeta_{(j-1)}^T H(\bar{D}_{(j-1)}),$$

$$\Gamma_j = \text{diag}(\zeta_{(j-1)}^T \zeta_{(j-1)}), \quad \alpha_j = B(j+1)^{-1}, \quad B \gg 0.$$

Слайд 8 РЕГУЛЯРНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ОБОБЩЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ АСИМПТОТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

$$x_{k+1}^p = f(x_k^p, k) + G(x_k^p, k) w_k, \quad z_k = y(x_k^p, k) + v_k, \quad k \in [0, k_N],$$

$$V_{wj}(\eta) \approx \exp\left(-\frac{|\eta|}{\eta_w}\right) \sum_{e=1}^{m_w} a_{je} \cos(\beta_{je} \eta); \quad V_{nj}(\eta) \approx \exp\left(-\frac{|\eta|}{\eta_n}\right) \sum_{k=1}^{m_n} b_{ie} \cos(\omega_{ki} \eta),$$

$$\Psi_{\omega j}(\eta) = V_{wj}(\eta) \exp(|\eta| / \eta_w); \quad \Psi_{nj}(\eta) = V_{nj}(\eta) \exp(|\eta| / \eta_n),$$

$$w_{jk} = \sum_{e=1}^{y_w} \hat{z}_{je}(k) + o(\varepsilon^2), \quad k \in [\alpha, k_N], \quad v_{ik} = \sum_{l=1}^{y_v} \hat{q}_{il}(k) + o(\varepsilon^2), \quad k \in [\alpha, k_N], \quad \alpha = o(\varepsilon),$$

$$\hat{z}_{je}(k) = \left(1 + \eta_w^2 \beta_{je}^2\right)^{-0.5} \xi_{je}(k), \quad \hat{q}_{ik}(k) = \left(1 + \eta_n^2 \beta_{ik}^2\right)^{-0.5} \psi_{ik}(k),$$

$$\hat{x}_{k+1}^p = f(\hat{x}_k^p, k) + K(\hat{x}_k^p, k) [z_k - y(\hat{x}_k^p, k)],$$

$$K(\hat{x}_k, k) = V_x(k) H(\hat{x}_k, k)^T N^{-1},$$

$$V_x(k+1) = F(\hat{x}_k, k) V_x(k) + V_x(k) F(\hat{x}_k, k)^T - \\ - V_x(k) H(\hat{x}_k, k)^T N^{-1} H(\hat{x}_k, k)^T V_x(k) + G(\hat{x}_k, k) R G(\hat{x}_k, k)^T.$$

РЕГУЛЯРНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ И ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КВАЗИЛИНЕАРИЗАЦИИ

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= f[x_k, k] + w_k, & z_k &= h[x_k, k] + v_k, \\ E\{w_k w_j^T\} &= Q_k \delta_{k-j}, & E\{v_k v_j^T\} &= R_k \delta_{k-j},\end{aligned}$$

$$z'_{k_j} = C_{k_j}^i x_{k_j}^{i+1} + v_{k_j}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad z'_{k_j} = z_{k_j} - h[\hat{x}_{k_j}^i, k_j] + C_{k_j}^i \hat{x}_{k_j}^i, \quad C_{k_j}^i = \frac{\partial h[\hat{x}_k^i, k_j]}{\partial \hat{x}_k^i}$$

$$J = \sum_{j=1}^m \left\| z_{k_j} - h[\hat{x}_{k_j}^i, k_j] - \frac{\partial h[\hat{x}_k^i, k_j]}{\partial \hat{x}_k^i} [\hat{x}_{k_j}^{i+1} - \hat{x}_{k_j}^i] \right\|_{R_{k_j}}^2 = \sum_{j=1}^m \left\| z'_{k_j} - C_{k_j}^i \hat{x}_{k_j}^{i+1} \right\|_{R_{k_j}}^2.$$

$$M^{i+1} \hat{x}_{k_0}^{i+1} = N^{i+1},$$

$$M^{i+1} = \sum_{j=1}^m [\Omega_{k_j}^{i+1}]^T C_{k_j}^T Q_{k_j} C_{k_j} \Omega_{k_j}^{i+1}, \quad N^{i+1} = \sum_{j=1}^m [\Omega_{k_j}^{i+1}]^T C_{k_j}^T Q_{k_j} [z_{k_j} - C_{k_j} p_k^{i+1}], \quad \hat{x}_k^{i+1} = \Omega_k^{i+1} \hat{x}_{k_0}^{i+1} + p_k^{i+1},$$

$$\Omega_k^{i+1} = \frac{\partial f[\hat{x}_k^i, k]}{\partial \hat{x}_k^i} \Omega_k^{i+1}, \quad \Omega_{k_0}^{i+1} = I, \quad p_k^{i+1} = f[\hat{x}_k^i, k] - \frac{\partial f[\hat{x}_k^i, k]}{\partial \hat{x}_k^i} [\hat{x}_k^i - p_k^{i+1}]$$

$$\hat{x}_{k_0}^{i+1} = [M^{i+1} + \alpha I]^{-1} N^{i+1}.$$

$$G^\alpha[\hat{x}_{k_0}^{i+1}] = \|M^{i+1} \hat{x}_{k_0}^{i+1} - N^{i+1}\|^2 + \alpha \|\hat{x}_{k_0}^{i+1}\|^2, \quad \alpha > 0.$$

$$G^r[\hat{x}_{k_0}^{i+1}] = r \|M^{i+1} \hat{x}_{k_0}^{i+1} - N^{i+1}\|^2 + \|\hat{x}_{k_0}^{i+1}\|^2, \quad r > 0, \quad \alpha = 1/r$$

$$\inf_{\hat{x}_{k_0}^{i+1} \in X} G^r[\hat{x}_{k_0}^{i+1}] = G^r[\hat{x}_{k_0}^{i+1(r)}], \quad \hat{x}_{k_0}^{i+1(r)} = \hat{x}_{k_0}^{i+1(\alpha)}, \quad \rho_0(r) = \|M^{i+1} \hat{x}_{k_0}^{i+1(r)} - N^{i+1}\|,$$

$$r_{i+1, \gamma+1} = r_{i+1, \gamma} + \frac{\rho_0(r_{i+1, \gamma})(\theta - \rho_0(r_{i+1, \gamma}))}{\theta \rho_0(r_{i+1, \gamma})}, \quad \gamma = 0, 1, \dots,$$

АЛГОРИТМЫ ОБОБЩЕННОГО ОЦЕНИВАНИЯ НА ОСНОВЕ КУСОЧНО- ГАУССОВСКОЙ АППРОКСИМАЦИИ АПОСТЕРИОРНОЙ ПЛОТНОСТИ

$$\theta_{k+1} = \theta_k, \quad x_k^p = \psi_k(\theta) + \Phi_k x_k^p + w_k, \quad z_k = \chi_k(\theta) + H_k x_k^p + V_k, \quad k = 1, 2, \dots$$

$$\Psi_k(\theta) = \Psi_k(\theta_k^j) + \Psi_k^j(\theta - \theta_k^j), \quad \chi_k(\theta) = \chi_k(\theta_k^j) + \chi_k^j(\theta - \theta_k^j),$$

$$\hat{x}_i^j = \hat{x}_{i/i-1}^j + \tilde{K}_i^j (y_i - \tilde{H}_i^j \hat{x}_{i/i-1}^j - \chi_i(\theta_i^j) + \Psi_i^j \theta_i^j), \quad \hat{x}_{i/i-1}^j = \tilde{\Phi}_i^j \hat{x}_{i-1}^j + \Psi_i(\theta_i^j) - \Psi_i^j \theta_i^j,$$

$$\hat{\theta}_i = \sum_{j=1}^M \iint_{\Omega^j} \alpha_i^j \theta N^j(\tilde{x}_i, \hat{x}_i^j \tilde{P}_i^j) d\theta dx_i, \quad \hat{x}_i = \sum_{j=1}^M \iint_{\Omega^j} x_i \alpha_i^j N^j(\tilde{x}_i, \hat{x}_i^j \tilde{P}_i^j) d\theta dx_i,$$

$$b_i^j = \int_{\Omega^j} \theta f^j(\theta / Y_i) d\theta,$$

$$\hat{\theta}_i = \sum_{j=1}^M \alpha_i^j b_i^j, \quad \hat{x}_i = \sum_{j=1}^M \hat{x}_i^j \alpha_i^j + (P_i^{\theta x})^j (P_i^{xj})^{-1} b_i^{-j}.$$

РЕГУЛЯРНЫЕ АЛГОРИТМЫ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОГО РАЗДЕЛЕННОГО ОЦЕНИВАНИЯ

$$x_{k+1} = F_k(x_k, \theta, w_k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad x(0) = x_0,$$

$$z_k = G_k(x_k, \theta, v_k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad z(0) = z_0,$$

$$\hat{x}_k = E(x_k | z^k), \quad P_k = E[(\hat{x}_k - x_k)(\hat{x}_k - x_k)^T | z^k], \quad p(\theta_1 | z^k), \dots, p(\theta_N | z^k),$$

$$\hat{x}_k = \sum_{i=1}^N \hat{x}_k(\theta_i) p(\theta_i | z^k), \quad P_k = \sum_{i=1}^N \left\{ P_k(\theta_i) + [\hat{x}_k(\theta_i) - \hat{x}_k][\hat{x}_k(\theta_i) - \hat{x}_k]^T \right\} p(\theta_i | z^k),$$

$$p(\theta_i | z^{k+1}) = \frac{p(z_{k+1} | z^k, \theta_i)}{\sum_{j=1}^N p(z_{k+1} | z^k, \theta_j) p(\theta_j | z^k)} p(\theta_i | z^k),$$

$$x_{k+1} = f_k(x_k, \theta) + g_k(x_k, \theta)w_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad z_k = h_k(x_k, \theta) + q_k(\theta)v_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

$$\hat{x}_{k+1|k}(\theta_i) = f_k(\hat{x}_k(\theta_i), \theta_i),$$

$$K_{k+1}(\theta_i) = P_{k+1|k}(\theta_i) H_{k+1}(\theta_i)^T \left[H_{k+1}(\theta_i) P_{k+1|k}(\theta_i) H_{k+1}(\theta_i)^T + q_{k+1}(\theta_i) R_{k+1} q_{k+1}(\theta_i)^T + \alpha E \right]^{-1},$$

$$P_{k+1|k}(\theta_i) = \frac{\partial f_k(\hat{x}_k(\theta_i), \theta_i)}{\partial \hat{x}_k} P_k(\theta_i) \frac{\partial f_k(\hat{x}_k(\theta_i), \theta_i)^T}{\partial \hat{x}_k} + g_k(\hat{x}_k(\theta_i), \theta_i) Q_k g_k(\hat{x}_k(\theta_i), \theta_i)^T,$$

$$P_{k+1}(\theta_i) = P_{k+1|k}(\theta_i) - K_{k+1}(\theta_i)^T H_{k+1}(\theta_i) P_{k+1|k}(\theta_i).$$

РЕГУЛЯРИЗОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ НА ОСНОВЕ ФОРМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ОБЪЕКТА

$$y(t) = \sum_{s=0}^{S-1} d_s \theta_s(t) \quad z_{lp} = y_p^{(l)} + v_{lp}, \quad l = \overline{0, L-1}, \quad p = \overline{0, P-1}, \quad y_p^l(t) = d^l y(t) / dt^l \Big|_{t=t_p}.$$

$$J = \|z - y\|^2 = [z - \Theta d]^T [z - \Theta d],$$

$$z = \{z_0, z_1, \dots, z_{L-1}\}^T, \quad z_j = \{z_{j0}, z_{j1}, \dots, z_{j, P-1}\}, \quad j = \overline{0, L-1}, \quad \Theta = \{\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{L-1}\}^T,$$

$$\theta_j = \{\theta_{ps}^{(j)}, p = \overline{0, P-1}, s = \overline{0, S-1}\}^T, \quad j = \overline{0, L-1},$$

$$y = \{y_0, y_1, \dots, y_{L-1}\}^T, \quad y = \{y_0^{(j)}, y_1^{(j)}, \dots, y_{P-1}^{(j)}\}^T, \quad j = \overline{0, L-1}, \quad d = \{d_0, d_1, \dots, d_{S-1}\}^T.$$

$$\Theta d = z,$$

$$\|\theta - \bar{\theta}\| \leq h, \quad \|z - \bar{z}\| \leq \delta,$$

$$\|\Theta_h d_1 - z_\delta\| \leq \|\Theta_h d_1 - \Theta d_1 + z - z_\delta\| \leq \delta + h \|d_1\|$$

РЕГУЛЯРИЗОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ НА ОСНОВЕ ФОРМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ОБЪЕКТА

$$d_\alpha = B_{\alpha h} z_\delta, \quad \bar{d}_\alpha = \bar{B}_{\alpha h} z_\delta,$$

$$B_{\alpha h} = g_\alpha (\Theta_h^T \Theta_h) \Theta_h^T = (\Theta_h^T \Theta_h + \alpha I)^{-1} \Theta_h^T, \quad \bar{B}_{\alpha h} = B_{\alpha h} \Theta_h B_{\alpha h}.$$

$$d_{n,\alpha} = (\Theta_h^T \Theta_h + \alpha I)^{-1} (\alpha d_{n-1,\alpha} + \Theta_h^T z_\delta), \quad n = 1, \dots, m,$$

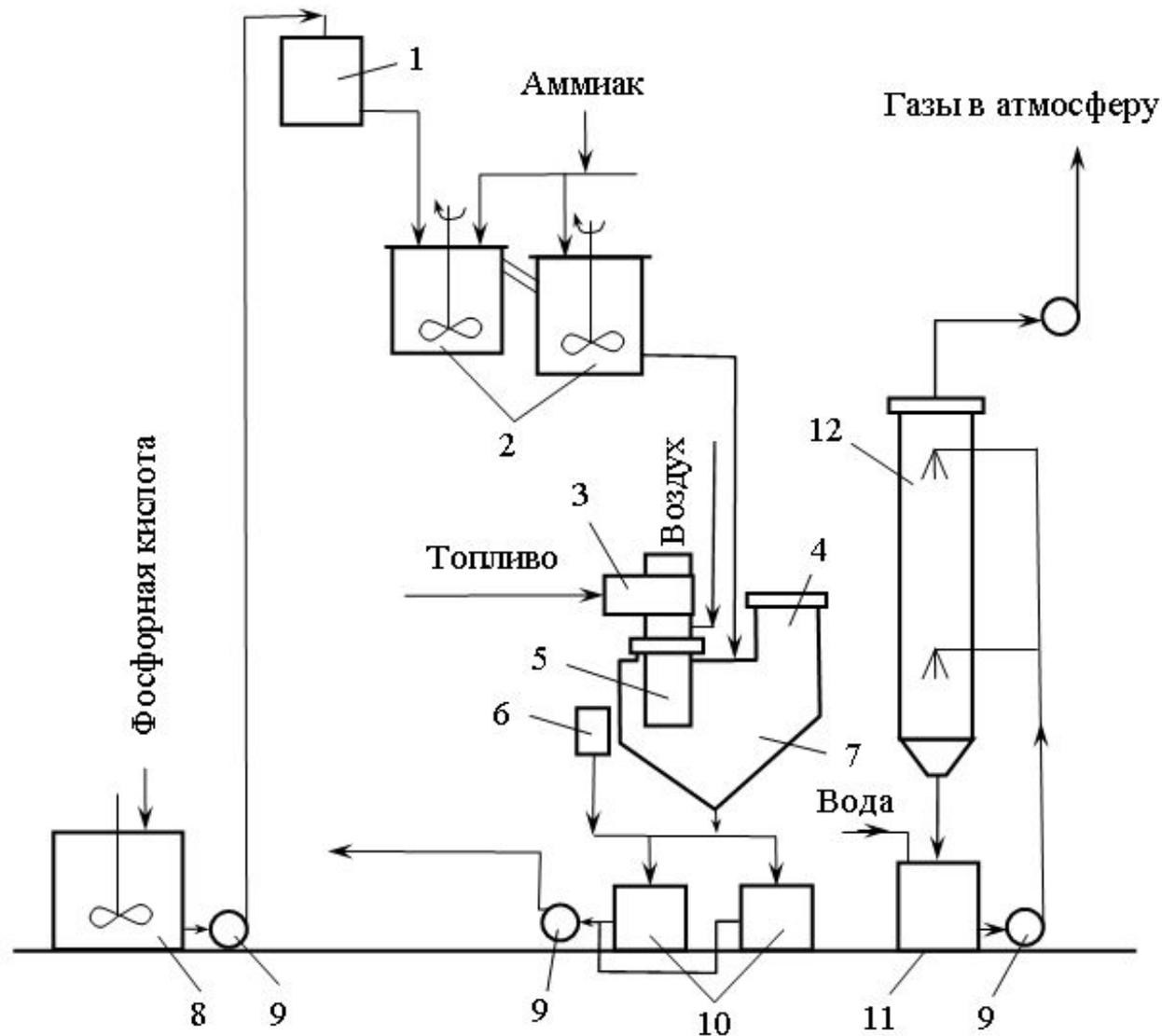
$$\bar{d}_{n,\alpha} = (\Theta_h^T \Theta_h + \alpha I)^{-1} (\alpha \bar{d}_{n-1,\alpha} + \Theta_h^T \Theta_h d_{m,\alpha}), \quad n = 1, \dots, m, \quad d_r = d_{m,\alpha}, \quad \bar{d}_r = \bar{d}_{m,\alpha} \quad (r = \alpha^{-1}),$$

$$g_r(\lambda) = \sum_{j=0}^{m-1} \frac{\alpha^j}{(\alpha + \lambda)^{j+1}} = \frac{1}{\lambda} \left[1 - \frac{1}{(1 + r\lambda)^m} \right], \quad r = \alpha^{-1},$$

$$B_{rh} = B_{\alpha h}^{(m)} = \sum_{j=2}^{m-1} \alpha^j (\Theta_h^T \Theta_h + \alpha I)^{-(j+1)} \Theta_h^T, \quad \bar{B}_{rh} = \bar{B}_{\alpha h}^{(m)} = B_{\alpha h}^{(m)} \Theta_h B_{\alpha h}^{(m)},$$

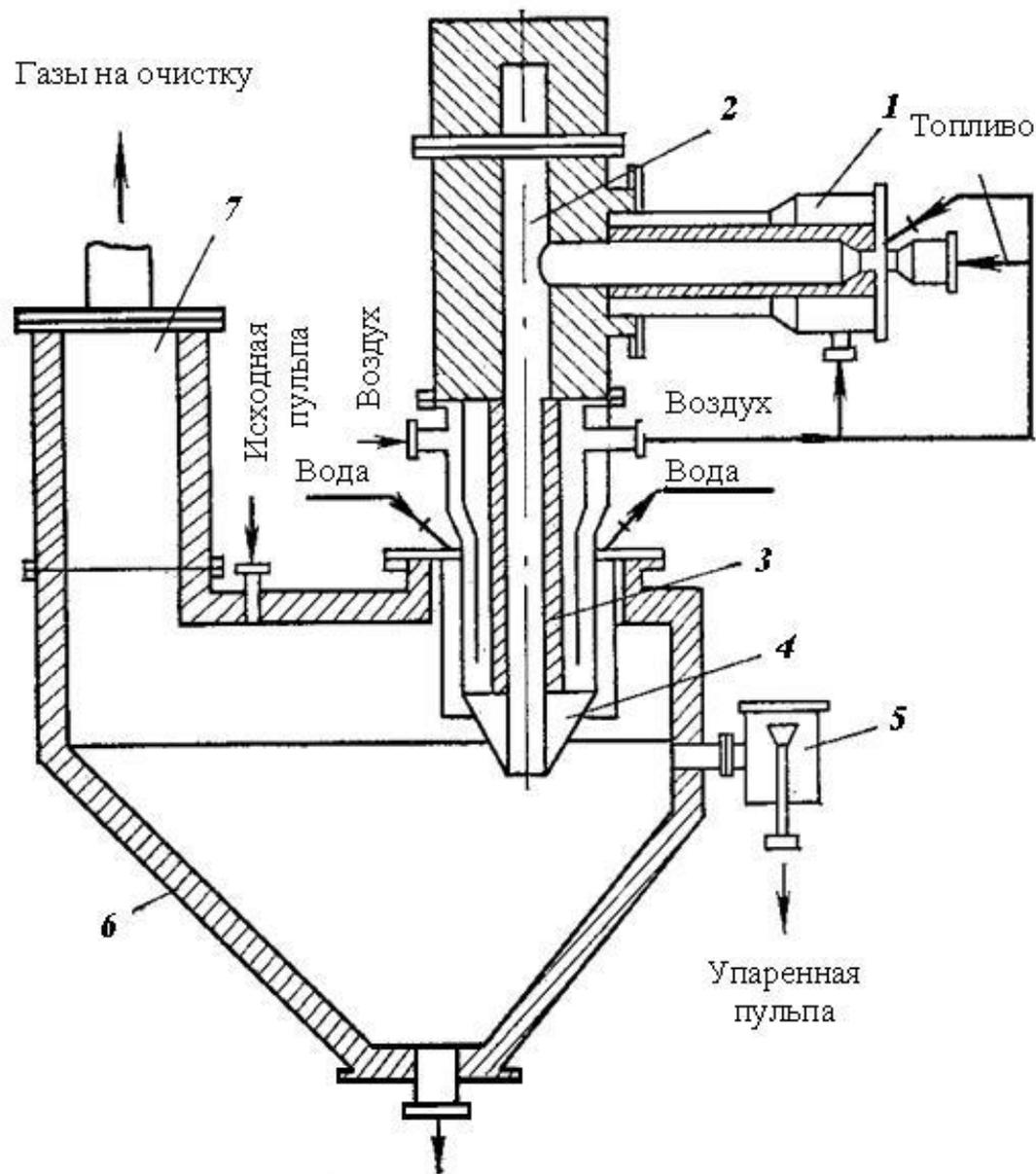
$$\|\Theta_h d_r - z_\delta\| = b(\delta + \|d_r\| h), \quad b > 1.$$

СХЕМА УСТАНОВКИ ДЛЯ ВЫПАРИВАНИЯ ПУЛЬПЫ АММОФОСА



1 – напорный бачок; 2 – аммонизаторы; 3 – топка; 4 – брызгоуловитель; 5 – барботажная труба; 6 – регулятор уровня; 7 – выпарной аппарат; 8 – хранилище исходной кислоты; 9 – центробежные насосы; 10 – сборники; 11 – сборник циркуляционного раствора; 12 – полый скруббер

КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА ВЫПАРНОГО АППАРАТА БАРБОТАЖНОГО ТИПА



1- топка; 2- газоход; 3- барботажная труба; 4- водоохлаждаемый наконечник барботажной трубы; 5- регулятор уровня; 6- корпус аппарата; 7- брызгоуловитель

ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ВЫПАРНОГО АППАРАТА БАРБОТАЖНОГО ТИПА

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Производительность, т/ч по исходной пульпе по выпаренной воде | 32-36 8-10 |
| Влажность пульпы, % исходной упаренной | 60-65 35-40 |
| Расход природного газа ($Q=34.8$ МДж/ м ³), м ³ /ч | 700-800 |
| Удельный расход на выпаривание 1 т воды природного газа, м ³ /т электроэнергии, кВт · ч | 90 16-20 |
| Влагосъем, кг/ч с 1 м ³ рабочего объема аппарата с 1 м ² зеркала испарения | 600-700 330-400 |
| Температура, °С топочных газов в барботажной трубе отходящих газов из аппарата исходной пульпы упаренной пульпы | 600-800 90-95 85-90 80-90 |
| Глубина погружения барботажной трубы, мм | 250 |
| Скорость газа в барботажной трубе, м/с | 60-80 |
| Давление, кПа, в барботажной трубе в аппарате | 440-540 98.1 |
| Содержание в отходящих газах, мг/ м ³ аммиака фтора | 50-70 10-15 |

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫПАРКИ АММОФОСНОЙ ПУЛЬПЫ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Управляющие параметры $U=(u_1, u_2)$, где u_1 – расход пульпы на упарку;
 u_2 – расход природного газа;

Выходные параметры $Y = (y_1, y_2)$, где y_1 – плотность упаренной пульпы; y_2 – температура упаренной пульпы;

Возмущающие воздействия $W = (w_1, w_2)$, где w_1 – плотность пульпы на входе в аппарат; w_2 – влажность исходной пульпы.

$$x_{k+1} = A_k^0 x_k + B_k^0 u_k + w_k, \quad x_{k_0} = x_0, \quad y_k = C_k x_k + v_k, \quad k \in \{k_0, k_1, \dots, k_T\},$$

$$A_k^0 = \begin{bmatrix} a_{11,k}^0 & a_{12,k}^0 \\ a_{21,k}^0 & a_{22,k}^0 \end{bmatrix}, \quad B_k^0 = \begin{bmatrix} b_{11,k}^0 & b_{12,k}^0 \\ b_{21,k}^0 & b_{22,k}^0 \end{bmatrix}, \quad C_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$M[x_0] = 0, \quad M[x_0 x_0^T] = X_0, \quad M[v_k] = 0, \quad M[x_0 v_k^T] = 0, \quad M[x_0 w_k^T] = 0,$$

$$M \left[\begin{pmatrix} w_k \\ v_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_l^T & v_l^T \end{pmatrix} \right] = \begin{bmatrix} W & G \\ G^T & V \end{bmatrix} \delta_{k-l}.$$

$$\theta^T = [a^T \quad b^T], \quad \theta_{k+1} = \theta_k + w_k^\theta, \quad a^T = (a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}), \quad b^T = (b_{11}, b_{12}, b_{21}, b_{22})$$

$$x_{k+1} = A_k^0 x_k + B_k^0 u_k + w_k, \quad x_{k_0} = x_0, \quad \theta_{k+1} = \theta_k + w_k^\theta, \quad y_k = C_k x_k + v_k,$$

$$M[w_k, w_l^T] = Q_k^x \delta_{kl}, \quad M[w_k^\theta, w_l^{\theta T}] = Q_k^\theta \delta_{kl}, \quad Q_k^x = R_k,$$

$$x^{pT} = [x^T \mid \theta^T], \quad x_{k+1}^p = f^p [x_k^p, u_k, k] + w_k^p, \quad z_{k+1} = h[x_k^p, u_k, k] + w_k,$$

$$x_k^p = \begin{bmatrix} x_k \\ \theta_k \end{bmatrix}, \quad f^p = \begin{bmatrix} f[x_k, \theta_k, u_k, k] \\ \theta_k \end{bmatrix}, \quad w_k^p = \begin{bmatrix} w_k \\ w_k^\theta \end{bmatrix},$$

$$x_{1,k+1} = x_{3,k}x_{1,k} + x_{4,k}x_{2,k} + x_{7,k}u_{1,k} + x_{8,k}u_{2,k} + w_{1,k}$$

$$x_{2,k+1} = x_{5,k}x_{1,k} + x_{6,k}x_{2,k} + x_{9,k}u_{1,k} + x_{10,k}u_{2,k} + w_{2,k},$$

$$x_{3,k+1} = a_{11,k+1} = a_{11,k} + w_{a_{11},k},$$

$$x_{4,k+1} = a_{12,k+1} = a_{12,k} + w_{a_{12},k},$$

$$x_{5,k+1} = a_{21,k+1} = a_{21,k} + w_{a_{21},k},$$

$$x_{6,k+1} = a_{22,k+1} = a_{22,k} + w_{a_{22},k},$$

$$x_{7,k+1} = b_{11,k+1} = b_{11,k} + w_{b_{11},k},$$

$$x_{8,k+1} = b_{12,k+1} = b_{12,k} + w_{b_{12},k},$$

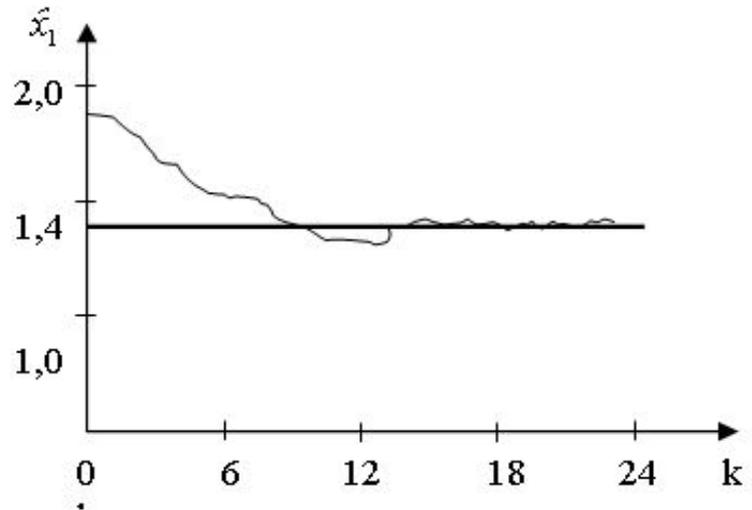
$$x_{9,k+1} = b_{21,k+1} = b_{21,k} + w_{b_{21},k},$$

$$x_{10,k+1} = b_{22,k+1} = b_{22,k} + w_{b_{22},k},$$

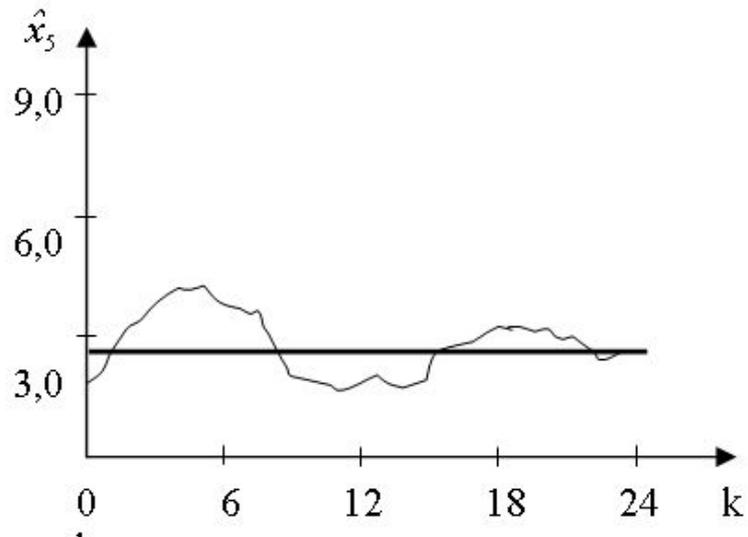
$$y_{1,k} = x_{1,k} + w_{1,k},$$

$$y_{2,k} = w_{2,k}.$$

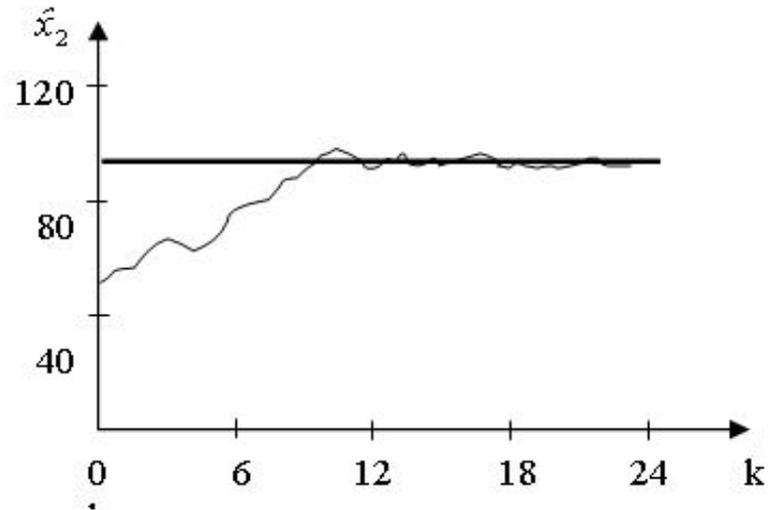
КАРТИНА НАСТРОЙКИ ПЕРЕМЕННЫХ И ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВЫПАРКИ ПУЛЬПЫ



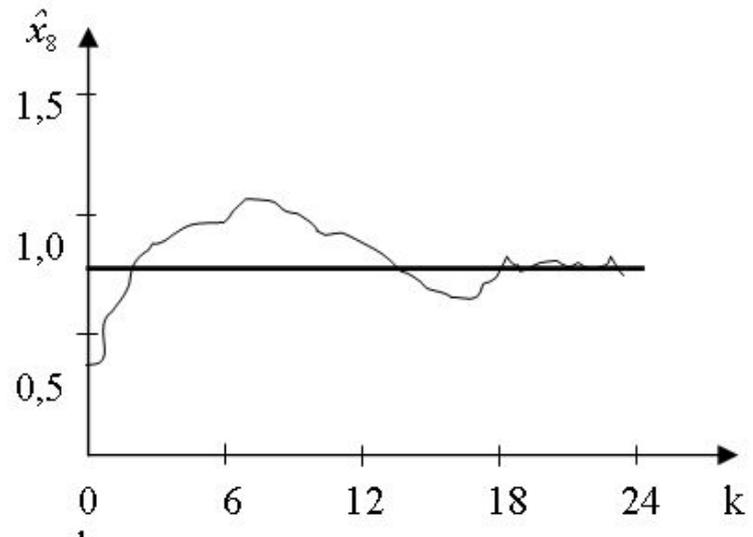
а)



в)



б)



г)

Слайд 19 АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО СУБОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВЫПАРКИ АММОФОСНОЙ ПУЛЬПЫ

$$J(x, u) = \frac{1}{2} M \left[x_{k_T}^T F x_{k_T} + \sum_{k=k_0}^{k_T-1} x_k^T u_k^T \begin{pmatrix} Q & 0 \\ 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_k \\ u_k \end{pmatrix} \right],$$

$$x^{\rho T} = [x^T \mid \theta^T],$$

$$u_k = -R^{-1} B_k^{\phi T} S_k^{\phi} \hat{x}_k,$$

$$\hat{x}_{k+1} = A_k^{\phi} \hat{x}_k + B_k^{\phi} u_k + K_k^{\phi} [z_k - C \hat{x}_k], \quad \hat{x}_0 = 0,$$

$$\text{tr} M \left[\{z_k - C \hat{x}_k\} z_{k_0}^T \right] = 0, \quad k_0 \leq k_1 < k,$$

$$\alpha_{k+1}^{\phi} = \alpha_k^{\phi} + \text{tr} \left\{ M \left[(z - C \hat{x})_k z_{k_1}^{k_T} \right] \right\} M \left[\left(\frac{\partial C \hat{x}}{\partial \alpha^{\phi}} \right)_k z_{k_1} \right], \quad \alpha_{k_0}^{\phi} = 0,$$

$$\beta_{k+1}^{\phi} = \beta_k^{\phi} + \text{tr} \left\{ M \left[(z - C \hat{x})_k z_{k_1}^k \right] \right\} M \left[\left(\frac{\partial C \hat{x}}{\partial \beta^{\phi}} \right)_k z_{k_1} \right], \quad \beta_{k_0}^{\phi} = 0,$$

$$\kappa_{k+1}^{\phi} = \kappa_k^{\phi} + \text{tr} \left\{ M \left[(z - C \hat{x})_k z_{k_1}^k \right] \right\} M \left[\left(\frac{\partial C \hat{x}}{\partial \kappa^{\phi}} \right)_k z_{k_1} \right], \quad \kappa_{k_0}^{\phi} = 0,$$

$$\hat{x}_{k+1} = A_k^{*\phi} \hat{x}_k + B_k^{*\phi} u_k + K_k^{*\phi} [z_k - C \hat{x}_k], \quad \hat{x}_0 = 0,$$

$$\Phi \hat{x} + \psi u = 0, \quad \Phi = A^0 - A^{*\phi}, \quad \psi = B^0 - B^{*\phi},$$

$$\hat{x}_{k+1} = A^0 \hat{x}_k + B^0 u_k + w_k - \Phi \hat{x}_k - \psi u_k = A^{*\phi} x_k + B^{*\phi} u_k + w_k + \Phi \epsilon_k,$$

$$\tilde{x}_{k+1} = A_k^\phi \tilde{x}_k + B_k^\phi \tilde{u}_k, \quad \tilde{x}_{k_0} = 0,$$

$$J(\tilde{x}, \tilde{u}) = \frac{1}{2} \left[\tilde{x}^T (N) F \tilde{x} (N) + \sum_{k=k_0}^{k_T-1} \tilde{x}_k^T \tilde{u}_k^T \begin{pmatrix} Q & 0 \\ 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{x}_k \\ \tilde{u}_k \end{pmatrix} \right],$$

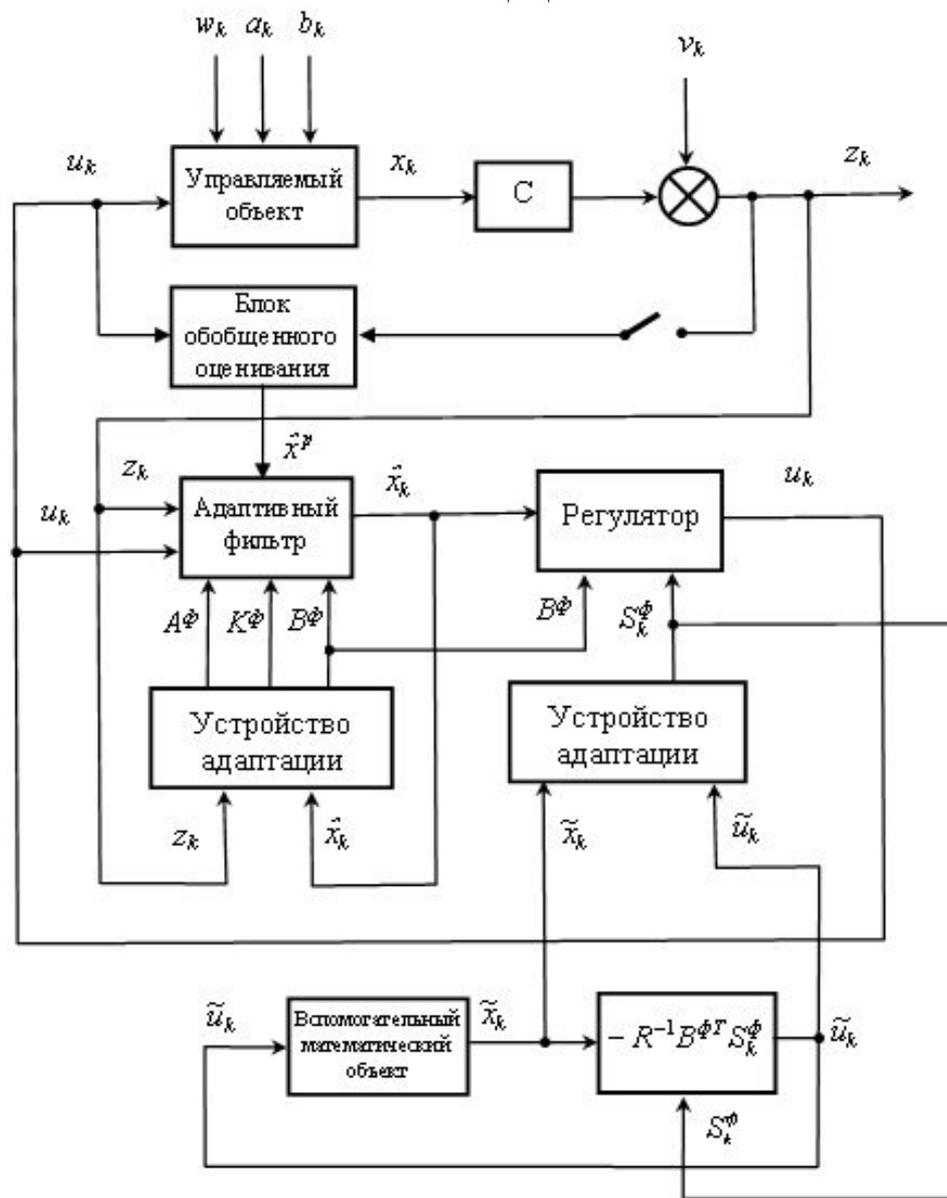
$$\tilde{u}_k = -R^{-1} B_k^{\phi T} S_k^\phi \tilde{x}_k,$$

$$S_{k+1}^\phi = -H(\tilde{x}_k, \tilde{u}_k, S_k^\phi) \frac{\partial H(\tilde{x}_k, \tilde{u}_k, S_k^\phi)}{\partial S_k^\phi},$$

$$S_{k_0}^\phi = S_0^\phi, \quad H(\tilde{x}_k, \tilde{u}_k, S_k^\phi) = 0,5 \tilde{x}_k^T Q \tilde{x}_k + 0,5 \tilde{u}_k^T R \tilde{u}_k + \tilde{x}_k^T S_k^\phi \tilde{x}_k,$$

$$J(\hat{x}, u) = J(\tilde{x}, \tilde{u}) + 0,5 \text{tr} \sum_{k=k_0}^{k_T-1} S_k^\phi K_k^\phi V K_k^{\phi T}.$$

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ВЫПАРИВАНИЯ АММОФОСНОЙ ПУЛЬПЫ С АДАПТИВНЫМ КООРДИНАТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ



Таким образом, в работе на основе концепций системного анализа, идентификации, динамической фильтрации и методов решения некорректных задач разработаны регуляризованные единые алгоритмы координатного и параметрического оценивания технологических объектов управления в условиях априорной неопределенности, позволяющие существенно повысить эффективность функционирования систем управления технологическими объектами.