

**METODE AVANSATE DE MASURARE, COMANDA SI
AUTOMATIZARE
ROBOTI INDUSTRIALI SI TEHNOLOGII MODERNE**

**APLICATII PRACTICE
Partea a II a**

Cuprins

Lucrarea nr. 1 – Determinarea raspunsului indicial prin metoda algebrica	pag. 4 pag. 5
Lucrarea nr. 2 – Determinarea raspunsului indicial prin metoda transformarii Laplace	pag. 10
Lucrarea nr. 3 – Determinarea raspunsului la marimea de intrare sinusoidala, prin metoda algebrica	pag. 14
Lucrarea nr. 4 – Determinarea caracteristicilor dinamice si statice ale proceselor metalurgice	pag. 17
Lucrarea nr. 5 – Metode de corespondenta dintre raspunsul indicial, locul de transfer si ecuatia instalatiei	pag. 29
Lucrarea nr. 6 – Alegerea reguletoarelor continue pentru reglarea instalatiilor cu autoreglare	pag. 38
Lucrarea nr. 7 – Alegerea reguletoarelor continue pentru reglarea instalatiilor fara autoreglare	pag. 50
Lucrarea nr. 8 – Alegerea reguletoarelor bipozionale	pag. 53
Lucrarea nr. 9 – Alegerea diafragmei si calculul caracteristicii statice a debimetrului cu cadere variabila de presiune	pag. 71

Lucrarea Nr. 1

"Determinarea Rasunsului Indicial prin Metoda Algebraica"

1.1 Baza Teoretica

Metoda algebraica consta in rezolvarea ecuatiei diferentiale liniare a sistemului (elementului):

$$a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y = b_n u \quad (1.1)$$

Raspunsul indicial ($u = C$) este format din componentele: tranzitorie y_t si stationara y_s :

$$y = y_t + y_s \quad (1.2)$$

In regim stationar ($t \rightarrow \infty$), $y = \text{const.}$ deci $d^i y / dt^i = 0$ ($i=1, \dots, n$) si din relatia (1.1) rezulta componenta stationara:

$$y_s = \frac{b_n}{a_n} C = kC \quad (1.3)$$

in care k este factorul de amplificare.

Pentru a se determina componenta tranzitorie se rezolva ecuatia caracteristica:

$$a_0 r^n + a_1 r^{n-1} + \dots + a_{n-1} r + a_n = 0 \quad (1.4)$$

si in functie de natura radacinilor acesteia, componenta tranzitorie are una din expresiile:

- radacini reale si distincte ($r_1, r_2, \dots, r_k, \dots, r_n$):

$$y_t = \sum_{i=1}^n Y_{ti} \exp(r_i t); \quad (1.5)$$

- radacini reale si partial confundate ($r_1 = r_2 = \dots = r_k = r, r_{k+1}, \dots, r_n$):

$$y_t = (Y_{t1} + Y_{t2} t + \dots + Y_{tk} t^{k-1}) \exp(r t) + \sum_{i=k+1}^n Y_{ti} \exp(r_i t) \quad (1.6)$$

De exemplu, pentru $n=2$, relatiile 1.5 si 1.6 devin:

$$y_t = Y_{t1} \exp(r_1 t) + Y_{t2} \exp(r_2 t) \quad (1.7)$$

si respectiv ($r_1 = r_2 = r$):

$$y_t = (Y_{t1} + Y_{t2} t) \exp(r t) \quad (1.8)$$

Pe langa conditiile de mai sus, pentru ca sistemul (elementul) sa fie stabil trebuie ca radacinile reale sa fie negative $r_i = -\alpha_i$ (conditia fundamentala de stabilitate); daca unele radacini sunt pozitive, sistemul este instabil si daca unele sunt nule, sistemul este pseudostabil (la limita de stabilitate).

In cazul radacinilor complexe conjugate, cu partea reala negativa (conditia de stabilitate), pentru $n=2$ ($r_{1,2} = -\alpha \pm j\omega$):

$$y_t = A \exp(-\alpha t) \sin(\omega t + \phi) \quad (1.9)$$

Constantele Y_{ti} din relatiile (1.5) si (1.6) se determina punindu-se conditiile initiale la $t=0$ raspunsului y :

$$y(0) = 0; \frac{d^i y(0)}{dt^i} = 0, \quad (i=1..n)$$

De exemplu, pentru $n=2$ si componenta tranzitorie (1.7), aceste conditii sunt:

$$\begin{cases} y(0) = Y_{n1} + Y_{n2} + kC = 0 \\ \frac{dy(0)}{dt} = r_1 Y_{n1} + r_2 Y_{n2} = 0 \end{cases}$$

si rezulta:

$$Y_{n1} = -kC \frac{r_2}{r_2 - r_1}; \quad Y_{n2} = kC \frac{r_1}{r_2 - r_1}$$

iar pentru componenta trazitorie (1.8):

$$\begin{aligned} y(0) &= Y_{n1} + kC = 0 \\ \frac{dy(0)}{dt} &= r_1 Y_{n1} + Y_{n2} = 0 \end{aligned}$$

de unde:

$$Y_{n1} = -kC; \quad Y_{n2} = rkC$$

Rezulta raspunsurile:

$$y = kC \left[1 - \frac{r_2}{r_2 - r_1} \exp(r_1 t) + \frac{r_1}{r_2 - r_1} \exp(r_2 t) \right] \quad (1.10)$$

si respectiv:

$$y = kC [1 - (1 - rt) \exp(rt)] \quad (1.11)$$

Constantele A si ϕ din relatia (1.9) se determina cu relatiile:

$$A = -2kC \sqrt{\frac{a_0 a_2}{4a_0 a_2 - a_1^2}}; \quad \phi = \arccos \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$$

si raspunsul este in acest caz:

$$y = kC \left[1 - 2 \sqrt{\frac{a_0 a_2}{4a_0 a_2 - a_1^2}} \exp(-at) \sin \left(\omega t + \arccos \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}} \right) \right] \quad (1.12)$$

Aplicarea metodei pentru elementul (sistemul) de ordinul intii este facila.

Ecuatia elementului (sistemului) de ordinul doi:

$$a_0 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_2 y = b_1 u \quad (1.13)$$

are forma uzuala:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\omega_n \zeta \frac{dy}{dt} + \omega_n^2 y = \omega_n^2 k u \quad (1.14)$$

cu notatiile:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{a_2}{a_0}} - \text{pulsatia naturala};$$

$$\zeta = \frac{a_1}{2\sqrt{a_2 a_0}} - \text{factor de amortizare};$$

$$k = \frac{b_1}{a_2} \text{ - factor de amplificare.}$$

Ecuatia caracteristica este:

$$r^2 + 2\omega_n \zeta r + \omega_n^2 = 0$$

(1.15)

cu radacinile:

$$r_{1,2} = -\omega_n \zeta \pm j\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

(1.16)

Daca $\zeta > 1$, din relatia (1.16) rezulta ca radacinile sunt reale, negative si distincte:

$$r_{1,2} = -\omega_n \zeta \pm \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}$$

(1.17, 1.18)

si raspunsul se obtine inlocuindu-se (1.17, 1.18) in (1.10). Definindu-se constantele de timp ale elementului:

$$T_1 = -\frac{1}{r_1}; \quad T_2 = -\frac{1}{r_2}$$

si introducandu-se aceste relatii in (1.10) se obtine o a doua forma uzuala a raspunsului:

$$y(t) = kC \left[1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right]$$

(1.19)

deci raspunsul elementului (sistemului) este aperiodic amortizat.

Daca $\zeta = 1$, din (1.16) rezulta ca radacinile sunt reale, negative si confundate:

$$r = r_1 = r_2 = -\omega_n$$

(1.20)

si raspunsul se obtine inlocuindu-se (1.20) in (1.11):

$$y(t) = kC [1 - (1 + \omega_n t) \exp(-\omega_n t)]$$

(1.21)

Constanta de timp a elementului este:

$$T = \frac{1}{r} = \frac{1}{\omega_n}$$

si introducandu-se aceasta relatie in (1.11) se obtine a doua forma uzuala a raspunsului:

$$y(t) = kC \left[1 - \left(1 + \frac{t}{T}\right) \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right]$$

(1.22)

deci raspunsul elementului (sistemului) este aperiodic amortizat critic (de durata minima).

Daca $0 < \zeta < 1$, din relatia (1.16) rezulta ca radacinile sunt complex conjugate, cu partea reala negativa, de forma:

$$r_{1,2} = -\alpha \pm j\omega; \quad (\alpha = \omega_n \zeta; \omega = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2})$$

Tinandu-se seama de notatiile initiale, constantele A si ϕ din relatia (1.9) sunt:

$$A = \frac{kC}{\sqrt{1 - \zeta^2}}; \quad \phi = \arccos \zeta$$

si raspunsul (1.12) devine:

$$y = kC \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} \exp(-\omega_n \zeta t) \sin(\omega_n t \sqrt{1-\zeta^2} + \arccos \zeta) \right]$$

deci este un raspuns oscilatoriu amortizat.

1.2 Exemplu de calcul

Un agregat termic vertical este descris pentru variatia caderii de presiune inferioara p , ca urmare a variatiei debitului de aer Q_a , prin ecuatie:

$$10^5 \frac{d^2 p}{dt^2} + 7.1 \cdot 10^4 \frac{dp}{dt} + 2.4 \cdot 10^3 p = Q_a \quad (1.23)$$

Se urmareste determinarea raspunsului si a caracteristicilor dinamice si statice la o variatie in treapta a debitului de aer $\Delta Q_a = 500 \text{ Nm}^3/\text{min}$.

Cuptorul fiind un element cu autoreglare, la $t \rightarrow \infty$, $\frac{d^2 p}{dt^2} = 0$ si $\frac{dp}{dt} = 0$, deci raspunsul stationar este:

$$p_s = \frac{500}{2.4 \cdot 10^3} = 0.208 \text{ daN/cm}^2.$$

Ecuatia caracteristica este:

$$10^5 r^2 + 7.1 \cdot 10^4 r + 2.4 \cdot 10^3 = 0 \quad (1.24)$$

cu radacinile: $r_1 = -0.035$; $r_2 = -0.675$. Cuptorul este deci un element stabil, cu un raspuns aperiodic supraamortizat:

$$p = 0.208 + P_1 \exp(-0.035t) + P_2 \exp(-0.675t) \quad (1.25)$$

Constantele P_1 si P_2 se determina din sistemul:

$$\begin{cases} p(0) = 0.208 + P_1 + P_2 = 0 \\ \frac{dp(0)}{dt} = -0.035P_1 - 0.675P_2 = 0 \end{cases}$$

rezultand: $P_1 = -0.219$ si $P_2 = 0.011$. Raspunsul cuptorului este deci:

$$p = 0.208 - 0.219 \exp(-0.035t) + 0.011 \exp(-0.675t) \quad (1.26)$$

sau:

$$p = 0.208 [1 - 1.05 \exp(-0.035t) + 0.053 \exp(-0.675t)] \quad (1.27)$$

Ecuatia (1.27) reprezinta raspunsul cuptorului in domeniul real.

Pentru determinarea caracteristicilor dinamice si statice ale cuptorului (aproximat ca element de ordinul intai inseriat cu element cu timp mort) se reprezinta grafic raspunsul cuptorului si se determina caracteristicile prin constructie grafica (vezi Lucrarea nr. 4).

Se pot determina constantele de timp ale cuptorului ca element de ordinul doi, cu ajutorul radacinilor ecuatiei caracteristice:

$$T_1 = -\frac{1}{r_1} = \frac{1}{0.035} = 28.5s; \quad T_2 = -\frac{1}{r_2} = \frac{1}{0.675} = 1.48s.$$

Se remarca faptul ca $T_2 \ll T_1$, deci cuptorul poate fi bine aproximat printr-un element cu raspunsul indicial:

$$p = 0.208 \left[1 - 1.05 \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right]$$

si pentru $T=28.5s$ rezulta:

$$p = 0.208 \left[1 - 1.05 \exp\left(-\frac{t}{28.5}\right) \right]$$

Se cunoaste ca:

$$1.05 \exp\left(-\frac{t}{T}\right) = \exp\left(-\frac{t}{T^*}\right)$$

in care:

$$T^* = T \ln\left(\frac{0.368}{1.05}\right)$$

Rezulta:

$$T^* = 28.5 \ln\left(\frac{0.368}{1.05}\right) = 30 s$$

si deci ecuatia cuptorului devine:

$$p = 0.208 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{30}\right) \right]$$

Factorul de amplificare este:

$$k = \frac{\Delta p}{\Delta Q_a} = \frac{0.208}{0.5} = 0.416 \left[\frac{daN/cm^2}{10^3 Nm^3/min} \right]$$

1.3 Lucrare practica

Un cuptor vertical de elaborare este descris pentru variatia caderii de presiune inferioara p , ca urmare a variatiei debitului de aer Q_a prin ecuatia:

$$a_0 \frac{d^2 p}{dt^2} + a_1 \frac{dp}{dt} + a_2 p = b_1 Q_a \quad (1.28)$$

in care:

$$a_0 = (1 + 0.01 \cdot n) \cdot 10^5$$

$$a_1 = (7.1 + 0.01 \cdot n) \cdot 10^4$$

$$a_2 = (2.4 + 0.01 \cdot n) \cdot 10^3$$

$$b_1 = 1 + 0.01 \cdot n$$

$$\Delta Q_a = 500 + 5 \cdot n^2 \quad [Nm^3/min]$$

Se cere:

- 1) Determinarea raspunsului cuptorului;
- 2) Determinarea caracteristicilor dinamice si statice la o variatie in treapta a debitului de aer ΔQ_a .

^{*)} n - numarul de ordine al studentului

Lucrarea Nr. 2

"Determinarea Raspunsului Indicial prin Metoda Transformarii Laplace"

2.1 Baza Teoretica.

a. Teoremele principale ale transformarii Laplace.

a₁. Teorema liniaritatii. Conform acesteia, daca:

$$f(t) = K \cdot f_1(t),$$

unde K este o constanta, atunci:

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = KF_1(s)$$

si daca:

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t),$$

atunci:

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = F_1(s) + F_2(s)$$

a₂. Teorema translaticii in timp. Daca:

$$f(t - T_m) = 0 \text{ pentru } 0 < t < T_m,$$

atunci:

$$\mathcal{L}[f(t - T_m)] = \exp(-sT_m)F(s),$$

in care: $F(s) = \mathcal{L}[f(t)]$, deci pentru $T_m = 0$.

a₃. Teorema derivarii. Conform acesteia:

$$\mathcal{L}\left[\frac{d^n f(t)}{dt^n}\right] = s^n F(s) - s^{n-1} f^{(1)}(0) - s^{n-2} f^{(2)}(0) \dots - f^{(n-1)}(0)$$

in care $f^{(i)}(0)$ este valoarea lui $f(t)$ pentru $t=0$ prin valori pozitive.

a₄. Teorema integrarii. Conform acesteia:

$$\mathcal{L}\left[\int_0^t f(t) dt\right] = \frac{F(s)}{s} + \frac{1}{s} \int_0^t f(0) dt$$

a₅. Teoremele valorii finale si initiale. Daca pentru $t \rightarrow \infty$ exista limita pentru $f(t)$,

atunci:

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot F(s) = \lim_{t \rightarrow \infty} f(t)$$

si respectiv, daca pentru $s \rightarrow 0$, exista limita pentru $sF(s)$, atunci:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} sF(s) = \lim_{t \rightarrow 0} f(t)$$

b. Determinarea raspunsului prin aplicarea transformarii Laplace.

Ecuatia elementului (sistemului) liniar este:

$$a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y = b_m u \quad (2.1)$$

Aplicandu-se teoremele liniaritatii si derivarii (vezi pct. a) rezulta ecuatia transformata in conditii initiale nule $y(0) = 0$ si $[d^i y(t)]/[dt^i] = 0$, ($i=1, 2, 3, \dots, n$):

$$a_0 s^n Y(s) + a_1 s^{n-1} Y(s) + \dots + a_{n-1} s Y(s) + a_n Y(s) = b_m U(s) \quad (2.2)$$

Transformata Laplace a raspunsului $Y(s)$ este:

$$Y(s) = \frac{b_m U(s)}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (2.3)$$

si poate fi pusa sub forma catului a doua polinoame:

$$Y(s) = \frac{A(s)}{B(s)} = \frac{\frac{b_m}{a_0} U(s)}{s^n + \frac{a_1}{a_0} s^{n-1} + \dots + \frac{a_{n-1}}{a_0} s + \frac{a_n}{a_0}} \quad (2.4)$$

prin impartirea cu a_0 .

Se calculeaza polii lui $Y(s)$, adica radacinile numitorului $B(s)$, ($s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n$), descompunandu-se $B(s)$ intr-un produs de factori. Rezulta:

$$Y(s) = \frac{A(s)}{B(s)} = \frac{\frac{b_m}{a_0} U(s)}{(s-s_1)(s-s_2)\dots(s-s_i)\dots(s-s_n)} \quad (2.5)$$

Raspunsul in domeniul real $y(t) = \mathcal{L}^{-1}[Y(s)]$ se calculeaza in functie de natura polilor lui $Y(s)$:

a) In cazul radacinilor distincte, se pune $Y(s)$ sub forma unei sume de fractii partiale:

$$Y(s) = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{s-s_i} \quad (2.6)$$

in care C_i sunt constante ($i=1, 2, 3, \dots, n$) date de relatia generala:

$$C_i = \left[(s-s_i) \frac{A(s)}{B(s)} \right]_{s=s_i} \quad (2.7)$$

Se calculeaza transformata inversa a fiecarei fractii partiale:

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{C_i}{s-s_i} \right] = C_i \exp(s_i t) \quad (2.8)$$

si transformata inversa totala, aplicandu-se teorema liniaritatii:

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1}[Y(s)] = \sum_{i=1}^n C_i \exp(s_i t) \quad (2.9)$$

Raspunsul este deci o suma de exponentiale. In cazul radacinilor reale, distincte si negative, rezulta un raspuns aperiodic supraamortizat. In cazul radacinilor complexe conjugate cu partea reala negativa (la $n=2$), rezulta un raspuns oscilatoriu amortizat.

b) In cazul radacinilor multiple (de exemplu $s_1 = s_2 = \dots = s_m$) se pune $Y(s)$ sub forma sumei:

$$Y(s) = \frac{C_{11}}{(s-s_m)^1} + \frac{C_{12}}{(s-s_m)^2} + \frac{C_{13}}{(s-s_m)^3} + \dots + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(s-s_i)} \quad (2.10)$$

Coefficientii C_{11}, C_{12}, C_{13} sunt:

$$C_{11} = \left[(s-s_m)^2 \frac{A(s)}{B(s)} \right]_{s=s_m}$$

$$C_{12} = \frac{1}{1!} \frac{d}{ds} \left[(s-s_m)^2 \frac{A(s)}{B(s)} \right]_{s=s_m}$$

$$C_{13} = \frac{1}{2!} \frac{d^2}{ds^2} \left[(s-s_m)^2 \frac{A(s)}{B(s)} \right]_{s=s_m}$$

iar ceilalti coeficienti C_i ($i = 4, \dots, n$) se determina cu relatia (2.7).

Transformatele inverse ale termenilor corespunzatori radacinilor multiple sunt:

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{C_{11}}{(s-s_m)^3} \right] = C_{11} \frac{1}{2!} t^2 \exp(s_m t);$$

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{C_{12}}{(s-s_m)^2} \right] = C_{12} \frac{1}{1!} t \exp(s_m t);$$

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{C_{13}}{(s-s_m)} \right] = C_{13} \exp(s_m t);$$

iar transformatele celorlalti termeni ($i = 4, \dots, n$) sunt date de relatia (2.8).

Aplicandu-se teorema liniaritatii, rezulta transformata inversa totala:

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1}[Y(s)] = \left[C_{11} \frac{1}{2!} t^2 + C_{12} \frac{1}{1!} t + C_{13} \right] \exp(s_m t) + \sum_{i=4}^n C_i \exp(s_i t)$$

In cazul radacinilor reale, negative si confundate ($s_1 = s_2 = \dots = s_i = \dots = s_n = s_m$), raspunsul este dat de exponentiala $\exp(s_m t)$, deci este un raspuns aperiodic de durata minima (amortizat critic).

2.2 Exemplu de calcul

Un agregat termic vertical este descris pentru variatia caderii de presiune inferioare p , ca urmare a variatiei debitului de aer Q_a prin ecuatia (1.23):

$$10^5 \frac{d^2 p}{dt^2} + 7.1 \cdot 10^4 \frac{dp}{dt} + 2.4 \cdot 10^3 p = Q_a$$

Se urmareste determinarea raspunsului si a caracteristicilor dinamice si statice la o variatie in treapta a debitului de aer $\Delta Q_a = 500 \text{ Nm}^3/\text{min}$.

Ecuatia transformata a cuptorului este:

$$10^5 \cdot s^2 \cdot P(s) + 7.1 \cdot 10^4 \cdot s \cdot P(s) + 2.4 \cdot 10^3 \cdot P(s) = \frac{500}{s} \quad (2.11)$$

iar transformata raspunsului rezulta:

$$P(s) = \frac{500}{s(10^5 \cdot s^2 + 7.1 \cdot 10^4 s + 2.4 \cdot 10^3)}$$

care se pune sub forma (impartind cu 10^5):

$$P(s) = \frac{0,005}{s(s^2 + 0,71 \cdot s + 0,024)}$$

Polii lui $P(s)$ sunt: $s_1 = 0$; $s_2 = -0,035$; $s_3 = -0,675$.

Raspunsul se poate scrie si sub forma:

$$P(s) = \frac{C_1}{s+0} + \frac{C_2}{s+0,035} + \frac{C_3}{s+0,675}$$

cu coeficientii:

$$C_1 = \left[s \frac{0,005}{s(s+0,035)(s+0,675)} \right]_{s=0} = \frac{0,005}{0,035 \cdot 0,675} = 0,212$$

$$C_2 = \left[(s+0,035) \frac{0,005}{s(s+0,035)(s+0,675)} \right]_{s=-0,035} = -\frac{0,005}{0,035 \cdot 0,64} = -0,227$$

$$C_3 = \left[(s+0,675) \frac{0,005}{s(s+0,035)(s+0,675)} \right]_{s=-0,675} = \frac{0,005}{0,675 \cdot 0,64} = 0,0115$$

Transformatele inverse ale fractiilor partiale sunt:

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{0,212}{s} \right] = 0,212$$

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{-0,227}{s+0,035} \right] = -0,227 \exp(-0,035 \cdot t)$$

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{0,0115}{s+0,675} \right] = 0,0115 \exp(-0,675 \cdot t)$$

si rezulta deci raspunsul cuptorului in domeniul real:

$$p(t) = \mathcal{L}^{-1}[P(s)] = 0,212 - 0,227 \exp(-0,035 \cdot t) + 0,0115 \exp(-0,675 \cdot t) \quad (2.12)$$

sau:

$$p = 0,212 [1 - 1,07 \exp(-0,035t) + 0,055 \exp(-0,675t)] \quad (2.13)$$

Daca se compara relatiile (2.12) respectiv (2.13) cu relatiile (1.26) si (1.27) din lucrarea Nr. 1, se observa ca rezultatele sunt apropiate, deci cele doua metode sunt compatibile.

2.3 Lucrare practica

Un cuptor vertical de elaborare este descris pentru variatia caderii de presiune inferioara p , ca urmare a variatiei debitului de aer Q_a prin ecuatie:

$$a_0 \frac{d^2 p}{dt^2} + a_1 \frac{dp}{dt} + a_2 p = b_1 Q_a \quad (2.14)$$

in care:

$$a_0 = (1 + 0,01 \cdot n) \cdot 10^5$$

$$a_1 = (7,1 + 0,01 \cdot n) \cdot 10^4$$

$$a_2 = (2,4 + 0,01 \cdot n) \cdot 10^3$$

$$b_1 = 1 + 0,01 \cdot n$$

$$\Delta Q_a = 500 + 5 \cdot n \quad [\text{Nm}^3/\text{min}]$$

Se cere:

- 1) Determinarea raspunsului cuptorului;
- 2) Determinarea caracteristicilor dinamice si statice la o variatie in treapta a debitului de aer Q_a .

Lucrarea Nr. 3

“Determinarea Raspunsului la Marime de Intrare Sinusoidala prin Metoda Algebrica”

3.1 Baza teoretica

Ecuatia elementului (sistemului) liniar este:

$$a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y = u_0 \sin \omega t \quad (3.1)$$

in care u_0 este amplitudinea marimii de intrare ($u = u_0 \sin \omega t$).

Componenta tranzitorie a raspunsului se determina ca in cazul precedent (Lucrarea Nr. 1).

Componenta stationara are expresia:

$$y_s = y_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (3.2)$$

in care: y_0 este amplitudinea raspunsului stationar:

ϕ – defazajul acestuia.

Marimile y_0 si ϕ se determina din ecuatia caracteristica:

$$a_0 r^n + a_1 r^{n-1} + \dots + a_{n-1} r + a_n = 0 \quad (3.3)$$

in care se face inlocuirea $r = j\omega$, obtinandu-se impedanta sistemului (elementului) Z:

$$Z = a_n + a_0 (j\omega)^n + a_1 (j\omega)^{n-1} + \dots + a_{n-1} (j\omega) \quad (3.4)$$

Amplitudinea y_0 a raspunsului este:

$$y_0 = \frac{u_0}{|Z|}$$

in care: $|Z|$ este modulul impedantei, iar defazajul este:

$$\phi = \arg Z \quad (3.5)$$

Pentru un element (sistem) de ordinul intai, de ecuatie caracteristica:

$$a_0 r + a_1 = 0 \quad (3.6)$$

impedanta este:

$$Z = a_1 + a_0 j\omega \quad (3.7)$$

cu modulul si argumentul:

$$|Z| = \sqrt{a_1^2 + a_0^2 \omega^2}; \quad \arg Z = \arctg \frac{a_0 \omega}{a_1} \quad (3.8)$$

si deci raspunsul stationar la marimea sinusoidala $u = u_0 \sin \omega t$ este:

$$y_s = \frac{u_0}{\sqrt{a_1^2 + a_0^2 \omega^2}} \cdot \sin(\omega t + \arctg \frac{a_0 \omega}{a_1}) \quad (3.9)$$

Pentru un element (sistem) de ordinul doi, de ecuatie caracteristica:

$$a_0 r^2 + a_1 r + a_2 = 0 \quad (3.10)$$

impedanta este:

$$Z = a_2 - a_0 \omega^2 + a_1 j\omega \quad (3.11)$$

cu modulul si argumentul:

$$|Z| = \sqrt{(a_2 - a_0 \omega^2)^2 + a_1^2 \omega^2}; \arg Z = \arctg \frac{a_1 \omega}{a_2 - a_0 \omega^2} \quad (3.12)$$

si deci raspunsul stationar la marime de intrare sinusoidala, $u = u_0 \sin \omega t$:

$$y_s = \frac{u_0}{\sqrt{(a_2 - a_0 \omega^2)^2 + a_1^2 \omega^2}} \sin \left(\omega t + \arctg \frac{a_1 \omega}{a_2 - a_0 \omega^2} \right) \quad (3.13)$$

Efectuand calculul pentru diverse valori ale pulsatiei $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ si determinand pentru fiecare pulsatie coordonatele polare ale functiei complexe de frecventa $H(j\omega)$:

$$|H(j\omega)| = \frac{y_0(\omega)}{u_0} = \frac{1}{|Z|} \quad (3.14)$$

$$\arg H(j\omega) = \varphi(\omega) = \arg Z \quad (3.15)$$

se poate trasa locul de transfer, de pe care se determina caracteristicile statice si dinamice (vezi Lucrarea Nr. 4).

3.2 Exemplu de calcul

Un cuptor de incalzire este descris, pentru temperatura din zona de incalzire, de ecuatie:

$$540 \frac{d^2 \theta}{dt^2} + 23.2 \frac{d\theta}{dt} + 0.2\theta = m \quad (3.16)$$

in care: θ este temperatura in zona de incalzire;

m - pozitia clapetei de pe conducta de gaz.

Se urmareste determinarea raspunsului la marime de intrare sinusoidala, pentru:

$$m = m_0 \sin \omega t$$

in care m_0 este amplitudinea de oscilare a clapetei ($m_0 = 20\%$ din cursa) si ω este pulsatie de oscilare ($\omega = 0.01$ rad/s).

Raspunsul stationar al cuptorului este de forma:

$$\theta = \theta_0 \sin(0.01t + \varphi) \quad (3.17)$$

in care trebuie determinate θ_0 si φ .

Aplicand relatia (3.10) ecuatie caracteristica (prin inlocuirea $r = j\omega$) este:

$$-540\omega^2 + 23.2j\omega + 0.2 = 0 \quad (3.18)$$

Impedanta cuptorului este (vezi relatia (3.11))

$$Z = (0.2 - 540\omega^2) + 23.2j\omega \quad (3.19)$$

cu modulul:

$$|Z| = \sqrt{(0.2 - 540\omega^2)^2 + (23.2)^2 \omega^2} = \sqrt{[0.2 - 540(0.01)^2]^2 + (23.2)^2 (0.01)^2}$$

$$|Z| = 0.273 \quad (\% \text{ din cursa}) / ^\circ C$$

si argumentul:

$$\varphi = \arctg \frac{23.2\omega}{0.2 - 540\omega^2} = \frac{23.2 \cdot 0.01}{0.2 - 540(0.01)^2} = 54^\circ$$

Rezulta amplitudinea raspunsului:

$$\theta_0 = \frac{m_0}{|Z|} = \frac{20}{0.273} = 73.2^\circ C$$

si defazajul in timp:

$$\varphi = \frac{54 \cdot \pi}{0.01 \cdot 180} = 102s$$

Perioada de oscilatie va fi:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{6.28}{0.01} = 628s.$$

Raspunsul cuptorului este reprezentat grafic in figura 3.1.

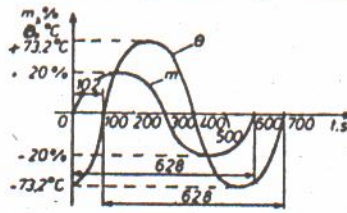


Fig. 3.1

3.3 Lucrare practica

Un cuptor de incalzire este descris, pentru temperatura in zona de incalzire de ecuatie:

$$a_0 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_2 y = m_0 \sin \omega t$$

in care:

$$a_0 = (1 + 0.1 \cdot n) \cdot 540;$$

$$a_1 = (1 + 0.1 \cdot n) \cdot 22.3;$$

$$a_2 = (1 + 0.1 \cdot n) \cdot 0.2;$$

$$m_0 = 20\% \text{ cursa};$$

$$\omega = 0.01 \text{ rad/s.}$$

Se cer:

- 1) Ecuatia caracteristica a cuptorului;
- 2) Impedanta cuptorului;
- 3) Modulul si argumentul impedantei;
- 4) Amplitudinea raspunsului (θ_0) si defazajul in timp φ ;
- 5) Reprezentarea grafica a raspunsului $\theta=f(t)$ la variatia sinusoidala a marimii de intrare.

Lucrarea Nr. 4 "Determinarea Caracteristicilor Dinamice si Statice ale Proceselor Metalurgice"

4.1 Baza teoretica

a. Identificarea proceselor pe cale experimentală la marime de intrare treaptă.

Inercarea se efectueaza dupa schema de principiu din figura 4.1, conditiile de experimentare fiind urmatoarele:

- utilizarea de dispozitive de inregistrare speciale, cu mare sensibilitate, viteza mare de inregistrare, inertie mica;
- asigurarea regimului stationar initial al procesului, pe o durata de cel puțin 2...3 min. pentru procesele cu constanta de timp mai mare și de 0.5 min. pentru procesele cu constante de timp mai mici;
- realizarea pe cat posibil a valorii ideale in treapta;
- plaja de variatie a marimii de intrare este de 5...15% din valoarea maxima posibila a acesteia.

In urma incercarii la marimea de intrare treapta, rezulta raspunsul indicial experimental al procesului, care poate fi prelucrat prin diverse metode pentru obtinerea caracteristicilor dinamice si statice ale acestuia.

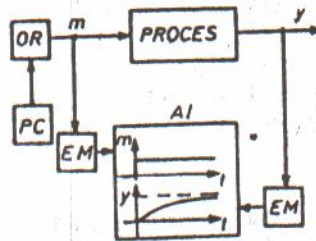


Fig. 4.1

OR-organ de reglare; EM-element de masura; AI-aparat de inregistrare;
PC-panou de comanda.

Cea mai simpla metoda consta in aproximarea procesului real cu auto-reglare printr-un proces ideal compus dintr-un element de ordinul intai inseriat cu un element de intarziere pura (fig. 4.2).

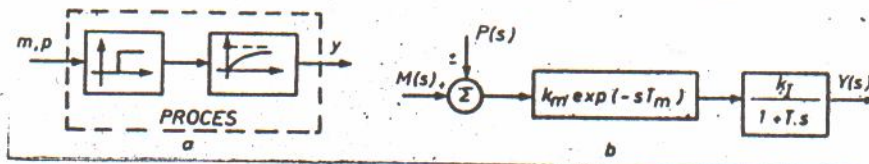


Fig. 4.2

În figura 4.3 se prezintă răspunsul indicial obținut prin înregistrare grafică (de către aparatul înregistrator AI) sau prin trasarea sa pe baza valorilor citite de pe aparatele indicatoare ale variabilelor m și y , de pe care se vor determina caracteristicile dinamice și statice ale procesului.

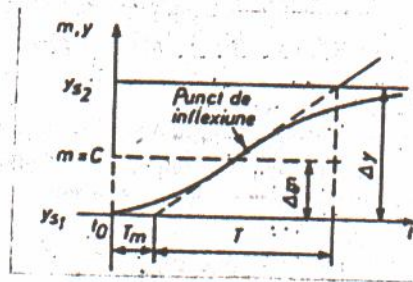


Fig. 4.3

Prin ducerea tangentei în punctul de inflexiune al curbei în "S" (fig. 4.3) se determină constanta de timp T și timpul mort, iar factorul de amplificare este:

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta m} \quad [u_{my}/u_{mm}] \quad (4.1)$$

Pentru procesele fără autoreglare, răspunsul indicial are forma din figura 4.4 și regimul staționar este considerat atins în momentul în care viteza de variație a mărimii de ieșire devine constantă.

Caracteristicile procesului sunt: factorul de amplificare, definit ca raportul vitezei de variație a mărimii de ieșire $\Delta y/\Delta t$ față de variația mărimii de execuție Δm :

$$k = \frac{\frac{\Delta y}{\Delta t}}{\Delta m} = \frac{tg \alpha}{\Delta m} \quad [u_{my}/u_{mm} \cdot u_{mt}] \quad (4.2)$$

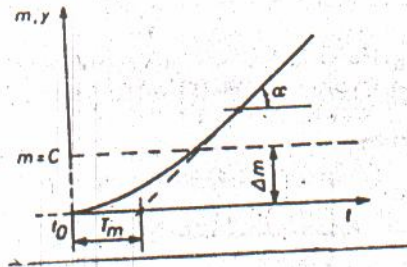


Fig. 4.4

constanta de timp T , definita ca timpul necesar pentru o variație cu o unitate a mării de ieșire Δy , ca urmare a variației cu o unitate a mării de execuție m :

$$T = \Delta t = \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta m} \right) = \frac{1}{k} \quad (4.3)$$

și timpul mort T_m (vezi fig. 4.4).

b. Identificarea proceselor prin metoda experimentală la mărime de intrare sinusoidală.

Încercările se efectuează după schema de principiu din figura 4.5, condițiile de experimentare fiind pe scurt următoarele:

- amplitudinea mării de intrare este de 5...15% din valoarea maximă posibilă a mării de intrare;

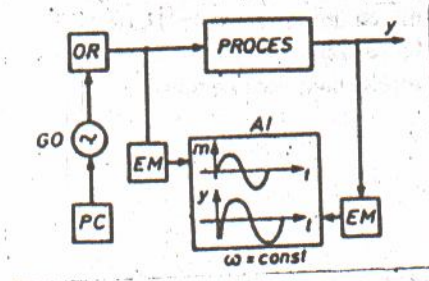


Fig. 4.5

GO -- generator de oscilații sinusoidale; PC, OR, EM ca în figura 4.1

- frecvența se variază în limitele 0.001...1 per/s pentru procese lente (de exemplu instalații termice), la 0.1...1000 per/s pentru procese rapide (0.005...10 per/s pentru debite, presiuni, nivele); în aceste domenii, frecvența variază în plajă a 2...3 decade.

Prin incercarea la marime de intrare sinusoidala de pulsatie variabila se obtine caracteristica amplitudine-faza a procesului (vezi pct. 4.2.2), reprezentata grafic sub forma locului de transfer. Prin diverse metode se determina caracteristicile dinamice si statice ale procesului de pe locul de transfer, de asemenea, se poate determina raspunsul indicial pe baza locului de transfer, etc.

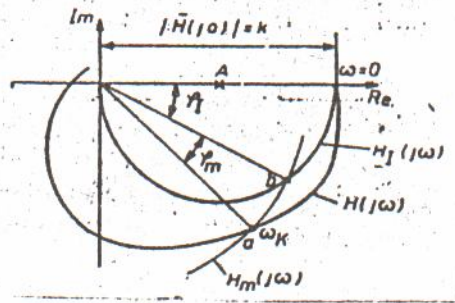


Fig. 4.6

O metoda simpla, bazata pe aproximarea procesului ca element de ordinul intai inseriat cu element cu timp mort, este ilustrata in figura 4.6: curba $H(j\omega)$ este locul de transfer real (experimental) al procesului; se traseaza semicercul $H_I(j\omega)$ cu raza $0,5 |\bar{H}(j0)|$ si centrul in A, care reprezinta locul de transfer al elementului de ordinul I; se alege pulsatia dorita ω_k pe locul $H(j\omega)$ si se traseaza prin punctul a un arc de cerc cu centrul in origine, care reprezinta locul de transfer al elementului cu intarziere pura $H_m(j\omega)$ care intersecteaza locul de transfer $H_I(j\omega)$ in b; se traseaza razele vectoriale prin a si b si se masoara unghiurile φ_I si φ_m ; rezulta constanta de timp:

$$T = \frac{tg \varphi_I}{\omega_k} \quad (4.4)$$

timpul mort:

$$T_m = \frac{\varphi_m}{\omega_k} \quad (4.5)$$

si factorul de amplificarea:

$$k = |\bar{H}(j0)| \quad [umy/umm] \quad (4.6)$$

Alegerea pulsatiei ω_k se face in functie de frecventa reala cu care intervin marimile de perturbatie in proces, pe baza unei analize a acestuia din acest punct de vedere.

4.2 Exemple de calcul

4.2.1 Identificarea experimentală prin încercare la marime de intrare în treapta.

a. Instalatie cu autoreglare

La un cuptor de încălzire care funcționează cu gaz, în domeniul $\theta = 800 \dots 1100 \text{ }^\circ\text{C}$, se determină experimental răspunsul indicial și caracteristicile dinamice și statice. Pentru aceasta la $\theta = 800^\circ\text{C}$ se deschide brusc robinetul de pe conducta de gaz cu $m = 40\%$ din cursa totală, ceea ce corespunde la o variație de debit de gaz $\Delta Q_g = 50 \text{ Nm}^3/\text{min}$. Cărbă de răspuns se determină prin puncte (măsurarea temperaturii și timpului, (vezi tabelul 4.1 și figura 4.7, scara $40\text{s} = 10\text{mm}$, $50^\circ\text{C} = 10\text{mm}$) sau se înregistrează direct.

Tabelul 4.1

Timpul, s	40	80	120	160	200	240	280	320	360
Temp., $^\circ\text{C}$	810	825	875	930	970	990	1004	1008	1010

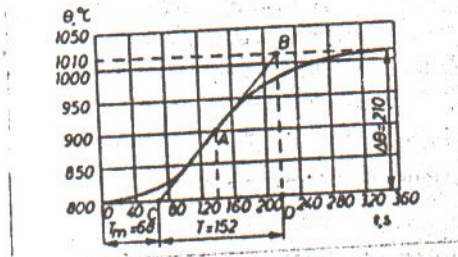


Fig. 4.7

Se trasează tangente în punctul de inflexiune A (140 s., 900°C) și se obține grafic:

$$T_m = \overline{OC} = 17\text{mm} = 68\text{s}$$

$$T = \overline{CD} = 38\text{mm} = 152\text{s}$$

Factorul de amplificare total este:

$$k = \frac{\Delta\theta}{\Delta m} = \frac{1010 - 800}{40} = 5,25^\circ\text{C} / \% \text{cursa}$$

din care factorul de amplificare al cuptorului este:

$$k_c = \frac{\Delta\theta}{\Delta Q_g} = \frac{1010 - 800}{50} = 4,20^\circ\text{C} / \text{Nm}^3 / \text{min.}$$

și cel al robinetului:

$$k_r = \frac{k}{k_c} = \frac{5,25}{4,20} = 1,25 \text{ Nm}^3 / \text{min} / \% \text{cursa}$$

b. Instalatie fara autoreglare

Pentru un bazin de racire se obtine raspunsul din figura 4.8 (utilizand datele din tabelul 4.2) sau inregistrat, pentru nivelul de apa h, la variatia in treapta a debitului de alimentare, corespunzator deschiderii bruste a robinetului de pe conducta de apa cu $\Delta m = 20\%$ din cursa totala (scara $10s = 10mm$, $20mm = 10mm$).

Tabelul 4.2

T_{impul}, s	10	20	30	40	50	60	70
h, mm	2012	2025	2035	2055	2083	2110	2135

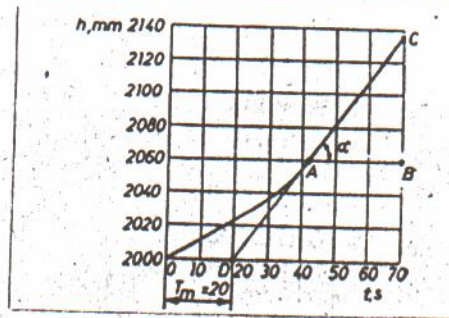


Fig. 4.8

Pe curba de raspuns se determina grafic:

$$T_m = OD = 20s,$$

$$k = \frac{tg\alpha}{\Delta m} = \frac{1.61}{20} = 0.08 \text{ mm/s/\%cursa},$$

in care din triunghiul ABC s-a determinat:

$$tg\alpha = \frac{BC}{AB} = \frac{97}{27} = 1.61 \text{ mm/s},$$

$$T = \frac{1}{k} = \frac{1}{0.08} = 12,5s$$

4.2.2 Identificare experimentală prin incercare la marime de intrare sinusoidală.

Temperatura aerului cald suflat într-un cuptor se reglează prin poziția clapetei de amestec aer cald – aer rece. Pentru determinarea locului de transfer al instalației s-au efectuat 10 încercări, clapeta de amestec primind de la un generator de oscilații, o mișcare sinusoidală cu o amplitudine de 20% din cursa și pulsații ω variabile între 0.01 și 0.1 rad/s, cărora le corespund perioade de oscilare T cuprinse între 62.8s și 628s (tabelul 4.3).

Tabelul 4.3

Nr. inc.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ω, s^{-1}	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
$T = \frac{2\pi}{\omega}, s$	628	314	209	157	125,6	104,7	90	78,5	70	62,8

Se inregistreaza variatia marimii de intrare (cursa clapetei $m = m_0 \sin \omega t$) si a celei de iesire (temperatura $\theta = \theta_0 \sin(\omega t + \phi)$) pentru toate cele 10 incercari si de pe curbe se determina amplitudinea θ_0 si defazajul ϕ , ale marimii de iesire (in figura 4.9 se exemplifica pentru incercarea Nr. 5, la $\omega = 0.05 \text{ rad/s}$ si respectiv $T = 125.6 \text{ s}$), rezultand valorile din tabelul 4.4.

Tabelul 4.4

Nr. inc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m_0, \% \text{Cursa}$	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
$\theta_0, ^\circ C$	114	106	100	86	60	10	22	12	10	12
ϕ, s	22,7	26,15	26,17	29,60	31,56	30,10	31,40	39,30	47,30	54,30

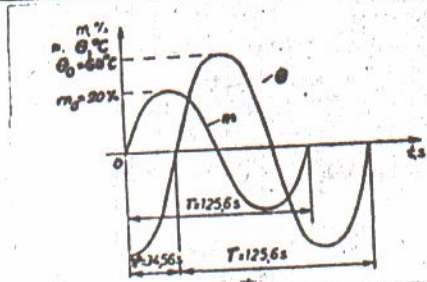


Fig. 4.9

Pentru fiecare incercare se determina atenuarea:

$$A = \frac{\theta_0(\omega)}{m_0} \quad [^\circ C / \% \text{cursa}] \quad (4.7)$$

si defazajul in grade:

$$\varphi = \phi_s \cdot \omega \cdot \frac{180}{\pi} \quad [grad] \quad (4.8)$$

obtinandu-se rezultatele din tabelul 4.5.

Tabelul 4.5										
Nr. inc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ω, s^{-1}	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
$A, ^\circ C/\%c.$	5.7	5.3	5.0	4.3	3.0	2.0	1.1	0.6	0.5	0.1
ϕ, grd	13.40	30	44.20	68.50	90	103	126	180	244	311

Pentru $\omega=0$ (regim stationar), atenuarea $A(0)$ se determina printr-o incercare la marime de intrare in treapta $\Delta m=20\%$ (inchiderea clapetei), obtinandu-se o crestere a temperaturii $\Delta\theta=120^\circ C$. Rezulta:

$$A(0) = \frac{\Delta\theta}{\Delta m} = \frac{120}{20} = 6^\circ C/\%cursa. \quad (4.9)$$

Se traseaza grafic la o scara convenabila (scara: $1^\circ C/\%cursa=10\text{mm}$) locul de transfer prin cele 10 puncte rezultate din cele 10 incercari, conform figurii 4.10. De exemplu, pentru incercarea a treia, coordonatele polare ale punctului $\omega=0.03 s^{-1}$ sunt:

$$|\bar{H}(j\omega)| = A = \frac{100}{20} = 5^\circ C/\%cursa \quad (4.10)$$

$$\arg H(j\omega) = \phi = 44^\circ 20' \quad (4.11)$$

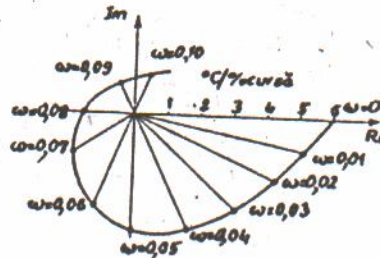


Fig. 4.10

Pentru determinarea caracteristicilor dinamice, se tine seama de frecventa cu care marimile de perturbatie apar in instalatie; de exemplu pentru $f=24$ 1/h corespunde pulsatiea:

$$\omega = 2\pi \frac{f}{3600} = 2\pi \frac{24}{3600} \approx 0,04 s^{-1}$$

Utilizand constructia grafica din figura 4.6 (pct. 4.1 b), rezulta (figura 4.11):

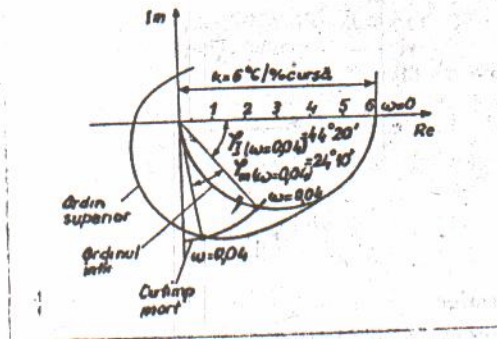


Fig. 4.11

$$\varphi_r(\omega = 0.04) = 44^\circ 20'$$

$$\varphi_m(\omega = 0.04) = 24^\circ 10'$$

si:

$$T(\omega = 0.04) = \frac{\operatorname{tg} 44^\circ 20'}{0.04} = \frac{0.970}{0.04} = 24.25s$$

$$T_m(\omega = 0.04) = \frac{\pi}{180} \cdot \frac{24^\circ 10'}{0.04} = 10.5s$$

Factorul de amplificare este $k=6^\circ\text{C}/\% \text{Cursa}$.

Considerandu-se instalatia de ordin superior, aproximata prin element de ordinul intai inseriat cu element cu timp mort, rezulta functia de transfer (pentru $\omega=0.04s^{-1}$):

- in general:

$$H_p(s) = \frac{k}{1+Ts} \exp(-sT_m) \quad (4.12)$$

- pentru cazul de fata:

$$H(s) = \frac{6}{24.25s+1} \exp(-10.5s) \quad (4.13)$$

Raspunsul indicial (pentru $\omega=0.04s^{-1}$) se construiește cu destul de buna aproximatie conform figurii 4.12. Pe axa absciselor se iau segmentele $\overline{OA} = T_m = 10.5s$, $\overline{AB} = T = 24.5s$, din punctul B ridicandu-se perpendiculara pana in punctul C de intersectie cu orizontala $\Delta\theta=120^\circ\text{C}$ (noua valoare stationara a temperaturii). Dreapta AC este tangenta in punctul de inflexiune al curbei.

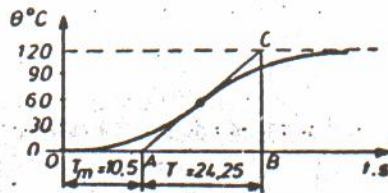


Fig. 4.12

4.3 Lucrari practice

4.3.1 Determinarea caracteristicilor dinamice si statice de pe raspunsul indicial.

a. Instalatie cu autoreglare.

Un cuptor de incalzire functioneaza cu gaz in domeniul $\theta=800\dots1100^{\circ}\text{C}$. La temperatura $\theta = 800^{\circ}\text{C}$ se deschide brusc robinetul de pe conducta de gaz cu $\Delta m=(40+n)\%$ din cursa, ceea ce corespunde la o variatie de debit de gaz $\Delta Q_g=(50+n) \text{ Nm}^3/\text{min}$. Datele de raspuns ale cuptorului sunt prezentate in tabelul 4.6:

Tabelul 4.6

Timpul, s	40	80	120	160	200	240	280	320	360
$\theta, ^{\circ}\text{C}$	810+	825+	875+	930+	970+	990+	1004+	1008+	1010+
	+2n	+2n	+2n	+2n	+2n	+2n	+3n	+3n	+3n

Se cere:

- 1) trasarea raspunsului indicial;
- 2) determinarea caracteristicilor dinamice si statice de pe raspunsul indicial.

b. Instalatie fara autoreglare.

Intr-un bazin se realizeaza o variatie in treapta a deschiderii robinetului de apa cu $\Delta m = (20+n)\%$ din cursa totala.

Curba de raspuns se va trasa prin puncte pe baza datelor din tabelul 4.7.

Tabelul 4.7

Timpul, s	10	20	30	40	50	60	70
h, mm	2012+	2025+	2035+	2055+	2083+	2110+	2135+
	+2n	+2n	+2n	+2n	+3n	+3n	+3n

Se cere:

- 1) trasarea raspunsului bazinului;
- 2) determinarea caracteristicilor dinamice si statice.

4.3.2 Determinarea experimentală a locului de transfer și a caracteristicilor dinamice și statice de pe locul de transfer.

Temperatura aerului cald suflat într-un cuptor se reglează prin poziția clapetei de amestec aer cald – aer rece. Pentru determinarea locului de transfer al instalației s-au efectuat 10 încercări, clapeta de amestec primind de la un generator de oscilații, o mișcare sinusoidală cu o amplitudine de 20% din cursa și pulsații ω variabile între 0,01 și 0,1 rad/s, la care corespund perioade de oscilare cuprinse între 62,8 și 628 s (tabelul 4.8).

Tabelul 4.8

Nr. Inc.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ω, s^{-1}	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
$T = \frac{2\pi}{\omega}, s$	628	314	209	157	125,6	104,7	90	78,5	70	62,8

Datele pentru trasarea variațiilor oscilatorii ale mării de intrare ($m = m_0 \sin \omega t$) și ale mării de ieșire ($\theta = \theta_0 \sin(\omega t + \phi)$), sunt prezentate în tabelul 4.9.

Tabelul 4.9

Nr. Inc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m_0, \%C$	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
$\theta_0, ^\circ C$	114	106	100	86	60	10	22	12	10	12
ϕ, s	22,7	26,15	26,17	29,60	31,56	30,10	31,40	39,30	47,30	54,30

Se cere:

- 1) întocmirea graficelor $m = m_0 \sin \omega t$ și $\theta = \theta_0 \sin(\omega t + \phi)$ pentru una din încercările din tabelul 4.9;
- 2) determinarea atenuării (v. relația 4.7) și defazajului în grade (v. relația 4.8) și întocmirea tabelului 4.5;
- 3) trasarea locului de transfer al cuptorului ($1^\circ C/\%$ de cursă = 10mm) folosind datele din tabelul 4.5;
- 4) determinarea caracteristicilor dinamice și statice de pe locul de transfer (vezi figura 4.6) pentru o valoare a pulsației ω aleasă din tabelul 4.8.
- 5) determinarea funcției de transfer $H(s)$ (relația 4.12)
- 6) trasarea răspunsului indicial (v. figura 4.12) pentru $\Delta\theta = 120^\circ C$ și T_m, T, k corespunzătoare pulsației ω alese.

În întocmirea graficelor (punctul 1) și trasarea locului de transfer (punctul 3), se va folosi scara: $1^\circ C = \% \text{cursă} = 10 \text{mm}$ sau scara: $1^\circ C = \% \text{cursă} = 20 \text{mm}$.

4.3.3 Determinarea caracteristicilor dinamice si statice de pe locul de transfer.

Locul de transfer al unei instalatii este determinat prin coordonatele polare indicate in tabelul 4.10, pentru pulsatii covariind intre 0 si 0.1 rad/s. Aceste coordonate au fost obtinute fie prin incercare la marime de intrare sinusoidală (vezi punctul 4.3.2), fie prin calcul, pe baza ecuatiei instalatiei (vezi lucrarea nr. 3).

Tabelul 4.10

ω , rad/s	0,0	0,01	0,03	0,05	0,07	0,1
$ H(j\omega) $	4,2	3,86	2,88	1,95	1,3	0,7
$\arg H(j\omega)$	0	30,5gr	77gr	110,5gr	137gr	172gr

Se cere:

- 1) trasarea locului de transfer,
- 2) determinarea caracteristicilor dinamice si statice de pe locul de transfer pentru o valoare a pulsatiei ω aleasa din tabelul 4.10;
- 3) trasarea raspunsului indicial pentru pulsatia aleasa si determinarea T si T_m .

Lucrarea Nr. 5

“ Metode de Corespondenta între Raspunsul Indicial, Locul de Transfer si Ecuatia Instalatiei”

5.1 Baza teoretica.

Valorile aproximative ale coeficientilor ecuatiei diferentiale a unui element (sistem) se pot determina dupa raspunsul indicial sau dupa locul de transfer.

a. Determinarea dupa raspunsul indicial.

Daca raspunsul indicial al unui proces este o exponentiala sau o curba apropiata de aceasta (figura 5.1 a), procesul poate fi considerat ca element de ordinul intai, cu ecuatiea:

$$a_0 \frac{dy}{dt} + a_1 y = u, \quad (5.1)$$

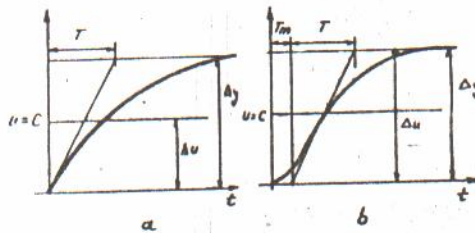


Fig. 5.1

care se pune sub forma:

$$T \frac{dy}{dt} + y = ku \quad (5.2)$$

Determinând de pe curba din figura 5.1 constanta de timp $T[s]$ si factorul de amplificarea $k=\Delta y/\Delta u$ [umy/umu] rezulta coeficientii ecuatiei (5.2) sau cei ai ecuatiei (5.1):

$$a_1 = \frac{1}{k} \frac{umu}{umy}; \quad a_0 = \frac{T}{k} \frac{s \cdot umu}{umy}$$

Daca raspunsul indicial al unui proces este o curba in S (figura 5.1 b) acesta poate fi aproximat ca un element de ordinul intai inseriat cu un element cu timp mort.

De pe figura 5.1 b se determina grafic timpul mort T_m , constanta de timp T si factorul de amplificarea $k=\Delta y/\Delta u$, care reprezinta coeficientii ecuatiei procesului, de forma:

$$T \frac{dy}{dt} + y = k(t - T_m) \quad (5.3)$$

Daca ecuatiea se scrie sub forma:

$$-a_0 \frac{dy(t)}{dt} + a_1 y(t) = u(t - T_m) \quad (5.4)$$

coeficientii a_0 si a_1 rezulta din relatiile de mai sus.

b. Determinarea de pe locul de transfer.

Locul de transfer din figura 5.2 apartine unui element de ordinul intai a carui ecuatie diferentia este:

$$T \frac{dy}{dt} + y = k \cdot u \quad (5.5)$$

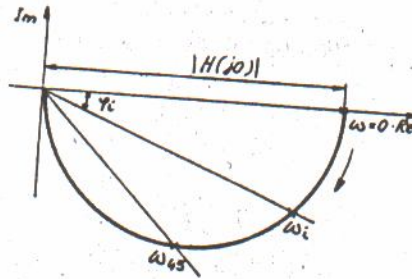


Fig. 5.2

Factorul de amplificare este:

$$k = |H(j0)| \quad [u_{my}/u_{mu}] \quad (5.6)$$

Constanta de timp este (pentru pulsatia ω_i):

$$T = \frac{\phi_i}{\omega_i} \quad [s] \quad (5.7)$$

Este evident ca pentru pulsatia ω_{45} , cu defazajul $\phi = 45^\circ$:

$$T = \frac{1}{\omega_{45}} \quad [s] \quad (5.8)$$

Pentru elementele de ordin superior, locul de transfer este reprezentat in figura 5.3.

In cazul aproximarii elementului de ordin superior prin element de ordinul intai inseriat cu element de intarziere pura, valorile caracteristicilor dinamice si statice T_m , T si k se determina direct dupa locul de transfer (vezi lucrarea nr. 4)

Daca elementul este aproximat prin doua constante de timp T_1 si T_2 si ecuatie diferentia:

$$T_2^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} + y = k \cdot u \quad (5.9)$$

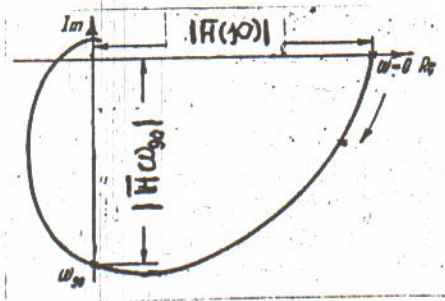


Fig. 5.3

factorul de amplificare este in acest caz:

$$k = |\overline{H}(j0)| \quad [umy/umu] \quad (5.10)$$

constanta de timp T_2 :

$$T_2 = \frac{1}{\omega_{90}} \quad [s] \quad (5.11)$$

unde ω_{90} este pulsatia corespunzatoare defazajului $\varphi=90^\circ$, iar constanta de timp T_1 este:

$$T_1 = \left(\frac{|HG0|}{|H(j\omega_{90})|} \right) \cdot T_2 \quad [s] \quad (5.12)$$

unde: $|\overline{H}(j\omega_{90})|$ este modulul pentru pulsatia $\omega=\omega_{90}$.

Daca ecuatia elementului de ordinul doi este scrisa sub forma:

$$a_0 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_2 y = u \quad (5.13)$$

coeficientii sai sunt:

$$a_2 = \frac{1}{|\overline{H}(j0)|} = \frac{1}{k} \quad \left[\frac{umu}{umy} \right] \quad (5.14)$$

$$a_1 = \left(\frac{1}{|\overline{H}(j\omega_{90})|} \right) \cdot \left(\frac{1}{\omega_{90}} \right) \quad \left[\frac{s \cdot umu}{umy} \right] \quad (5.15)$$

$$a_2 = \left(\frac{1}{|\overline{H}(j0)|} \right) \cdot \left(\frac{1}{\omega_{90}} \right)^2 = \left(\frac{1}{k} \right) \cdot \left(\frac{1}{\omega_{90}^2} \right) \quad \left[\frac{s^2 \cdot umu}{umy} \right] \quad (5.16)$$

5.2 Exemple de calcul.

5.2.1 Determinarea ecuatiei procesului dupa raspunsul indicial.

Un cuptor de incalzire are pentru variabila temperatura, raspunsul indicial din figura 5.4, realizat la o variatie in treapta a debitului de gaz $\Delta Q_g=80 \text{ Nm}^3/\text{min}$, corespunzatoare la $\Delta m=14\%$ din cursa robinetului. Cuptorul este aproximat prin element de ordinul intai inseriat cu element cu timp mort.

Se cere ecuatia cuptorului.

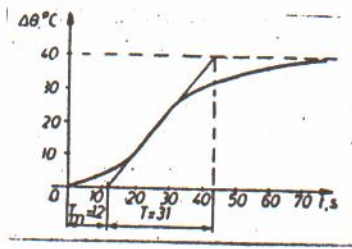


Fig. 5.4

Din figura 5.4 se determina grafic: $T_m=12s$; $T=31s$ si:

$$k_0 = \frac{\Delta\theta}{\Delta Q_g} = \frac{40}{80} = 0.5 \frac{^\circ C}{Nm^3 / min}$$

$$k = \frac{\Delta\theta}{\Delta m} = \frac{40}{14} = 2.85 \frac{^\circ C}{\%cursa}$$

Ecuatia cuptorului este:

$$31 \frac{d\theta}{dt} + \theta = 0.5(t - 12)$$

cu functia de transfer:

$$H(s) = \frac{0.5}{1 + 31 \cdot s} \exp(-12s).$$

Pentru intreaga instalatie (incluzandu-se si robinetul de reglare) se obtine similar:

$$31 \frac{d\theta}{dt} + \theta = 2.85(t - 12)$$

$$H(s) = \frac{2.85}{1 + 31s} \exp(-12s)$$

5.2.2 Determinarea ecuatiei procesului dupa locul de transfer.

Un cuptor de incalzire are, pentru temperatura spatiului de lucru, locul de transfer din figura 5.5.

Se cere ecuatia cuptorului.

Considerand cuptorul element de ordinul doi, ecuatia sa se scrie:

$$a_0 \frac{d^2\theta}{dt^2} + a_1 \frac{d\theta}{dt} + a_2\theta = m$$

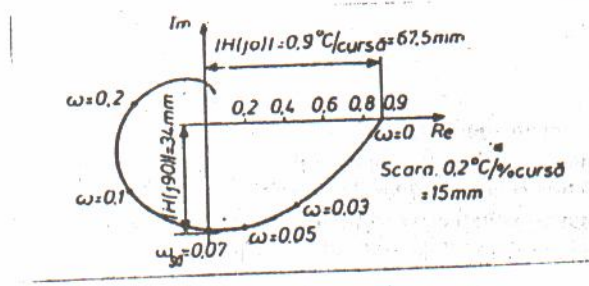


Fig. 5.5

Coeficientii ecuatiei vor fi:

(pentru: $\omega_{90} = 0.07$ 1/s; $|H(j0)| = k = 0.9$ °C/%cursă; $|H(j\omega_{90})| = 0.55$ °C/%cursă)

$$a_2 = \frac{1}{0.9} = 1.1 \frac{\%cursa}{^\circ C}$$

$$a_1 = \frac{1}{0.55} \cdot \frac{1}{0.07} = 26 \frac{s \cdot \%cursa}{^\circ C}$$

$$a_0 = \frac{1}{0.9} \cdot \left(\frac{1}{0.07}\right)^2 = 227 \frac{s^2 \cdot \%cursa}{^\circ C}$$

Ecuatia cuptorului este:

$$227 \frac{d^2\theta}{dt^2} + 26 \frac{d\theta}{dt} + 1.1\theta = m$$

Daca raspunsul indicial al procesului prezinta un timp mort T_m important (de exemplu, $T_m > 5s$), atunci procesul se aproximeaza ca element de ordinul doi inseriat cu element cu timp mort, cu ecuatia:

$$a_0 \frac{d^2\theta}{dt^2} + a_1 \frac{d\theta}{dt} + a_2\theta = m(t - T_m)$$

Coeficientii ecuatiei se determina ca mai sus.

5.3 Lucrari practice

5.3.1 Determinarea ecuatiei procesului dupa raspunsul indicial.

Un cuptor de incalzire functioneaza cu gaz in domeniul $\theta = 800 \dots 1000^\circ C$. La temperatura de $\theta = 800^\circ C$ se deschide brusc robinetul de pe conducta de gaze cu $\Delta m = (40+n)\%$ din cursa, ceea ce corespunde la o variatie de debit de gaz $\Delta Q_g = (50+n) Nm^3/min$. si se obtine variatia in timp a temperaturii din tabelul 5.1.

Tabelul 5.1

Timpul, s	40	80	120	160	200	240	280	320	360
$\theta, ^\circ C$	810+	825+	875+	930+	970+	990+	1004+	1008+	1010+
	2n	2n	2n	2n	2n	2n	3n	3n	3n

Se cere:

- 1) Trasarea raspunsului indicial;
- 2) Determinarea caracteristicilor dinamice si statice de pe acesta;
- 3) Determinarea ecuatiei cuptorului si a functiei de transfer;
- 4) Determinarea ecuatiei si functiei de transfer pentru intreaga instalatie (incluzand si robinetul de reglare).

5.3.2 Determinarea ecuatiei procesului dupa locul de transfer.

In figurile 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 si 5.11 sunt prezentate raspunsurile indiciale si locurile de transfer ale unor instalatii metalurgice. Valorile timpilor morti T_m sunt indicate in explicatiile figurilor.

Formele locurilor de transfer indica elemente de ordinul doi de ecuatie:

$$a_0 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_2 y = m(t - T_m)$$

Sa se aleaga un loc de transfer, cu ajutorul caruia sa se determine:

- 1) Coeficientii ecuatiei;
- 2) Expresia ecuatiei;
- 3) Factorul de amortizare, folosind relatiile:

$$\xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 \cdot a_2}} \quad \text{sau} \quad \xi = \frac{1}{2} \frac{|H(j0)|}{|H(j\omega_{0.7})|}$$

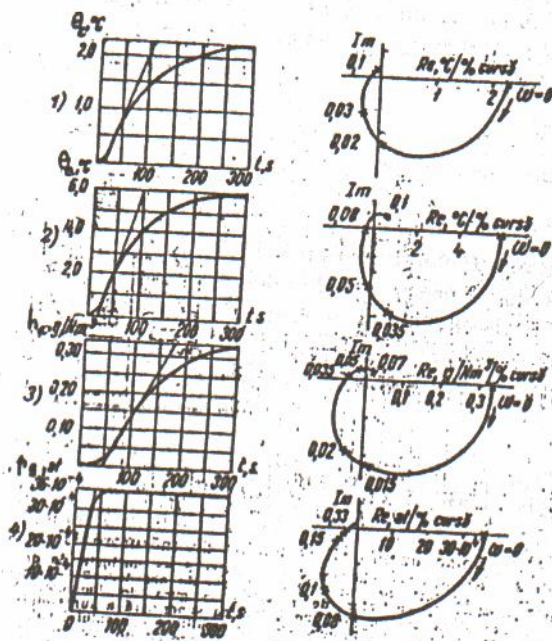


Fig. 5.6.

θ_c - temperatura cupolei cuptorului, $T_m = 5$ s;
 θ_a - temperatura aerului cald suflat in furnal, $T_m = 5$ s;
 h_a - umiditatea aerului suflat in furnal, $T_m = 22$ s;
 p_g - presiunea gazului la gura de incarcare, $T_m = 0$ s.

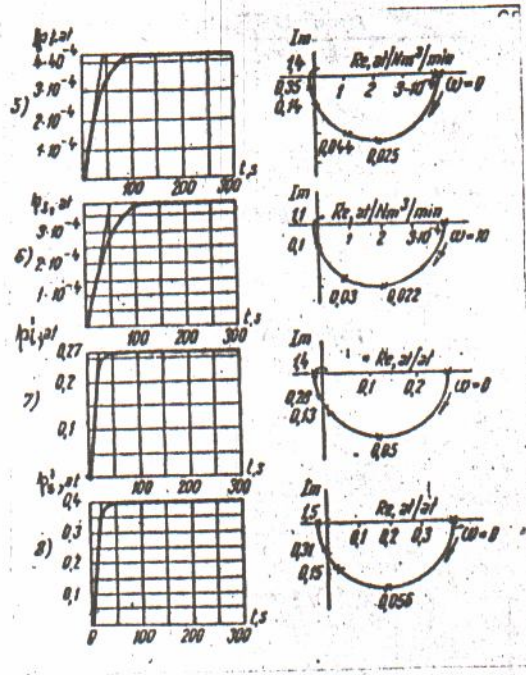


Fig. 5.7. p_1 - caderea de presiune inferioara (variatia debitului de aer), $T_m = 0$;
 p_a - caderea de presiune superioara (variatia debitului de aer), $T_m = 0$;
 p_i - caderea de presiune inferioara (variatia presiunii la gura), $T_m = 0$;
 p_a' - caderea de presiune superioara (variatia presiunii la gura), $T_m = 0$.

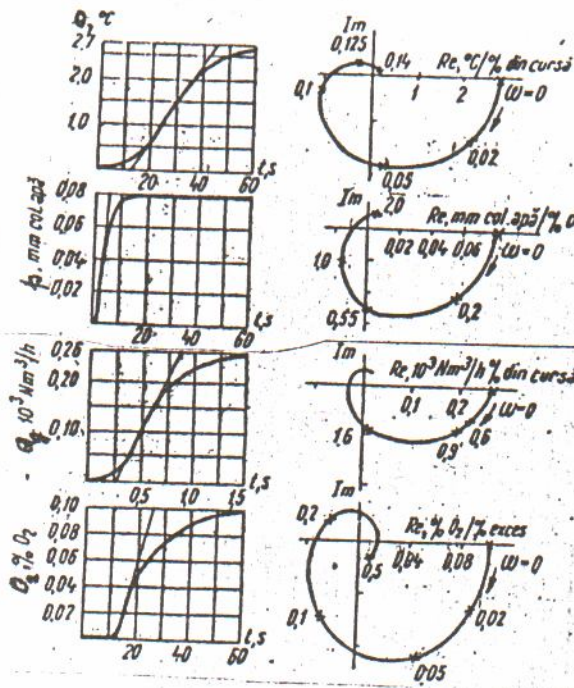


Fig. 5.8.
 θ - temperatura boltei
 cuptorului, $T_m = 4$ s;
 p - presiunea in spatiul
 de lucru, $T_m = 0$;
 Q_g - debitul de gaz pe
 conducta, $T_m = 0,07$ s;
 O_2 - continutul de oxigen
 in gazele arse, $T_m = 10$ s.

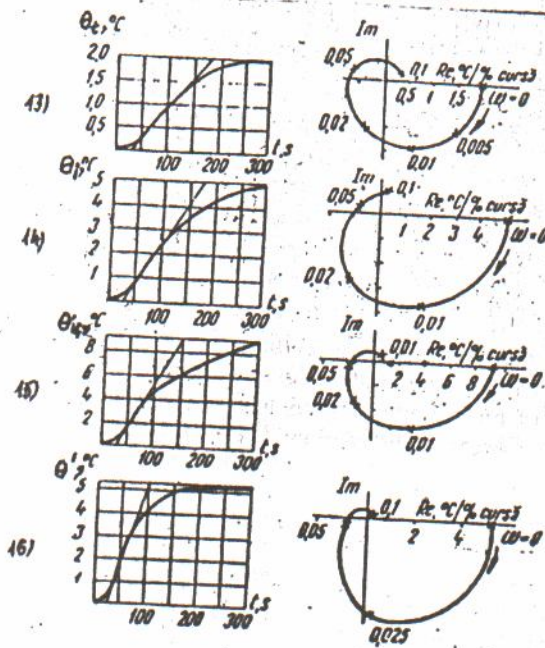


Fig. 5.9.
 θ_e - temperatura in zona
 de preincalzire, $T_m = 18$ s;
 θ_p - temperatura in zona
 de incalzire, $T_m = 18$ s;
 θ_{ir} - temperatura in zona
 inferioara, $T_m = 18$ s;
 θ' - temperatura in zona
 de incalzire, $T_m = 10$ s;

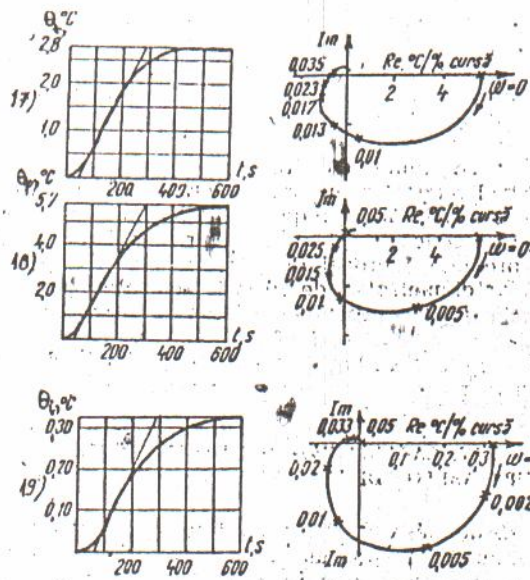


Fig. 5.10. θ_t - temperatura in zona de temperare, $T_m = 30$ s;
 θ_p - temperatura in zona de preincalzire, $T_m = 25$ s;
 θ_i - temperatura in prima zona de incalzire, $T_m = 10$ s.

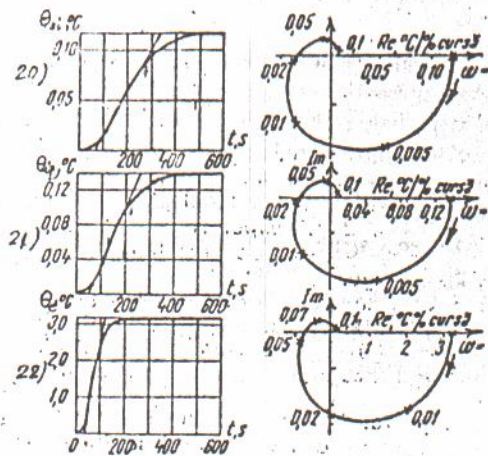


Fig. 5.11. θ_{21} - temperatura in a doua zona de incalzire, $T_m = 40$ s;
 θ_{11} - temperatura in zona inferioara, $T_m = 30$ s;
 θ_e - temperatura in zona de egalizare, $T_m = 20$ s.

Lucrarea Nr. 6

“Alegerea Regulatorilor Continue pentru Reglarea Instalatiilor cu Autoreglare”

6.1 Baza teoretica.

Determinarea algoritmului de reglare, deci stabilirea structurii regulatorului si a acordurilor acestuia, se efectueaza prin diverse metode, dintre care se prezinta metoda practica (experimentală), suficient de precisa, bazata pe aproximarea instalatiei prin element de ordinul intai, inseriat cu element cu timp mort.

a) Datele initiale necesare sunt:

- caracteristicile dinamice si statice ale instalatiei: T_m , T , k ;
- performantele necesare sistemului de reglare, impuse de procesul tehnologic din instalatie: Δ_{max} , t_0 , ϵ_s .

b) Alegerea unui regulator continuu de tip PID pentru reglarea unei variabile cuprinde:

b₁) stabilirea tipului de regulator necesar;

b₂) determinarea valorilor acordurilor (K_R , T_i , T_d) ale regulatorului continuu liniar.

b₁) Stabilirea tipului de regulator.

Pentru stabilirea tipului de regulator se folosesc diverse criterii teoretice si practice, dintre care cele mai simple, rezultate din examinarea performantelor sistemelor de reglare, sunt urmatoarele:

- **Valoarea raportului T_m/T ;**

- pentru $T_m/T < 0.2$ se poate folosi un regulator continuu liniar de tip PID sau un regulator bipozitional; peste aceasta valoare, amplitudinea de oscilare a reglării bipozitionale creste inadmisibil;
- pentru $T_m/T < 1$ se pot folosi regulatoare continue liniare de tip PID; peste aceasta valoare, coeficientul dinamic al reglării si deci si eficacitatea acestuia scad inacceptabil;
- pentru $T_m/T > 1$ se folosesc sisteme de reglare speciale.

Este cunoscut ca procesele industriale metalurgice au raportul $T_m/T < 1$, deci variabilele lor pot fi reglate de regulatoare industriale de tip PID.

- **Functia de transfer a instalatiei automatizate;**

- pentru instalatii cu o constaanta de timp si timp mort, cu functia de transfer:

$$\frac{k \cdot e^{-T_0 s}}{1 + T \cdot s}$$

- se folosesc regulatoare P sau regulatoare PI, daca nu se admite abatere stationara; daca variatiile perturbatiei sunt mari, este indicat regulatorul PI, (daca regulatorul P cu K_R mare nu satisface valoarea abaterii stationare);

- pentru instalatii cu doua constante de timp si timp mort, deci cu functia de transfer de tipul:

$$\frac{k \cdot e^{-T_m s}}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)}$$

- se folosesc regulatoare PI sau regulatoare PID daca timpul mort este neglijabil;
- pentru instalatii cu multe constante de timp se folosesc regulatoare PI si PID.
- **Natura variabilei reglate.**
 - **temperatura:** se pot utiliza regulatoare P, PI, PID sau bipozionale;
 - **presiune:** de regula se utilizeaza regulatorul PI; se poate utiliza si regulatorul P, daca T_m este mic si se accepta abatere stationara; regulatorul PID se foloseste numai in cazuri speciale;
 - **debit:** constanta de timp fiind mica si factorul de amplificarea mare, se recomanda utilizarea reguletoarelor PI;
 - **nivel:** deoarece raportul T_m/T este in general mic, se poate utiliza regulatorul bipozitional, regulatorul P, sau regulatorul PI, in cazul in care nu se admite abatere stationara;
 - **viteza de rotatie:** regulatoare P (daca T_m/T este mic), PI sau PID.

La alegerea tipului de regulator dupa criteriile de mai sus, este util sa se aibe in vedere efectele actiunilor P, I, D asupra performantelor:

Regulatorul bipozitional

- este utilizat daca se admite oscilarea continua a valorii variabilei reglate si daca amplitudinea de oscilare nu depaseste valoarea admisibila;

Regulatorul P

- se utilizeaza daca procesul reglat admite abatere stationara si daca aceasta nu depaseste valoarea admisibila; de asemenea este indicat in cazurile in care reglarea se face cu consemn fix si marimile de perturbatie au durata redusa;

Adaugarea actiunii I

- la regulatorul P (regulatorul PI) este indicata pentru anulara abaterii stationare, daca frecventa perturbatiilor nu este prea mare, daca marimea de referinta se modifica des sau reglarea se efectueaza cu consemn programat;

Adaugarea actiunii D

- la reguletoarele PI (regulatorul PID) urmareste marirea gradului de amortizare si a rapiditatii reglarii, in special cand marimile de perturbatie sunt bruste si daca prin actiunea D se poate mari acordul K_R ; nu este utila daca marimile de perturbatie au frecventa foarte mare, deoarece amplifica influenta acestora.

Dupa cum rezulta din cele de mai sus, factorii principali ce trebuie avuti in vedere la alegerea tipului de regulator sunt:

- comportare dinamica si statica a instalatiei automatizate (numarul constantelor de timp si valoarea acestora, timpul mort, valoarea factorului de amplificare);
- valoarea si frecventa marimilor de perturbatie;
- natura variabilei reglate;
- performantele impuse la reglarea acestora.

b₂) Determinarea acordurilor reglatoarelor.

Dupa alegere tipului de regulator, acesta trebuie acordat cu instalatia automatizata, in scopul obtinerii unui proces de reglare cu performantele impuse de proces.

Trebuie retinut faptul ca diversele procese tehnologice necesita performante foarte diferite; unele necesita abateri dinamice maxime mici, altele durate limitate ale reglarilor, etc.

Ca urmare, s-au stabilit diverse criterii, corespunzatoare necesitatilor proceselor tehnologice, de definire a procesului optim de reglare; dintre acestea sunt larg utilizate in practica:

Criteriul suprafetei minime (Ziegler-Nichols)

- conform caruia acordurile trebuie determinate astfel, incat (figura 6.1 a):

$$\int_0^{\infty} |e| dt = \min; \quad \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_1} = 4; \quad \rho = 1 - \frac{\Delta_2}{\Delta_{\max}} = 0,8$$

obtinandu-se astfel un proces de reglare oscilatoriu amortizat, cu durata mica si suprareglare relativ mica; este criteriul cel mai folosit pentru procesele tehnologice la care suprareglarea, cat si timpul de reglare, trebuie sa fie relativ mici;

Criteriul suprareglarii minime

- conform caruia acordurile trebuie determinate astfel, incat (figura 6.1 b) $\Delta_{\max} = \min$, obtinandu-se astfel un proces de reglare cu abatere dinamica maxima minima, (uzual, suprareglarea $S = (\Delta_{\max} / r) \cdot 100 = 20\%$), insa cu timp de reglare mare; este criteriul folosit pentru procesele tehnologice care nu admit abateri dinamice mari, chiar de scurta durata.

Tabelul 6.1

Relatii pentru calculul acordurilor reguletoarelor

Nr. Crt.	Criteriul de acordare	Tipul Regulatorului		
		P	PI	PID
1	Ziegler-Nichols	$K_R = \frac{1}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$	$K_R = \frac{0.9}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$	$K_R = \frac{1.5}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$ $T_i = 2.5T_m$ $T_d = 0.5T_m$
2	$t_r = \text{min}$	$K_R = \frac{0.3}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$	$K_R = \frac{0.6}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$ $T_i = 0.8 + 0.5T_m$	$K_R = \frac{0.95}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$ $T_i = 2.4T_m$ $T_d = 0.4T_m$
3	S=20%	$K_R = \frac{0.7}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$	$K_R = \frac{0.7}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$ $T_i = T_m + 0.3T$	$K_R = \frac{1.2}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$ $T_i = 2T_m$ $T_d = 0.4T_m$
4	$T_r = \text{min}$, acordare la variatia marimii de referinta	$K_R = \frac{0.3}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$	$K_R = \frac{0.35}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$ $T_i = 1.2T_m$	$K_R = \frac{0.6}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$ $T_i = T_m$ $T_d = 0.5T_m$
5	Idem, acordare la variatia marimii de perturbatie	$K_R = \frac{0.3}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$	$K_R = \frac{0.6}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$ $T_i = 4T_m$	$K_R = \frac{0.95}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$ $T_i = 2.4T_m$ $T_d = 0.42T_m$
6	S=20%, acordare la variatia marimii de referinta	$K_R = \frac{0.7}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$	$K_R = \frac{0.6}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$ $T_i = T_m$	$K_R = \frac{0.95}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$ $T_i = 1.35T_m$ $T_d = 0.47T_m$
7	Idem, acordare la variatia marimii de perturbatie	$K_R = \frac{0.7}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$	$K_R = \frac{0.7}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$ $T_i = 2.3T_m$	$K_R = \frac{1.2}{k} \cdot \frac{T}{T_m}$ $T_i = 2T_m$ $T_d = 0.42T_m$

Criteriul duratei de reglare minime

- conform caruia acordurile se determina astfel, incat $t_t = \min$. (figura 6.1 c), rezultand un proces de reglare aperiodic de durata minima, in sa cu abatere dinamica maxima de valoare mare; acest criteriu se foloseste pentru procesele tehnologice la care durata reglarii este performanta cea mai importanta.

Acordurile se determina conform tabelului 6.1.

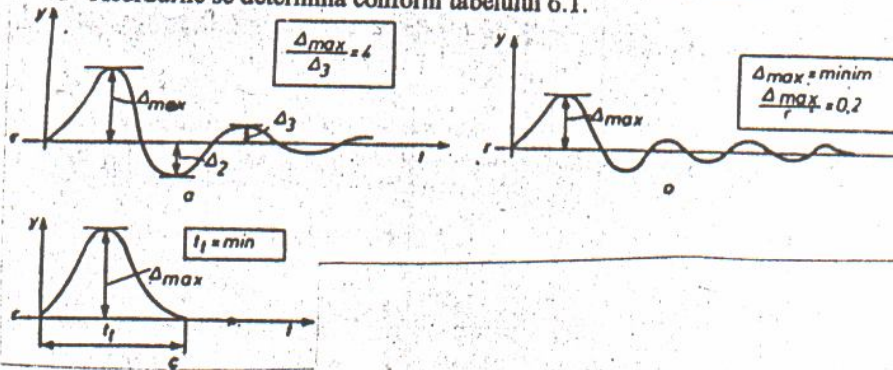


Fig. 6.1. Criterii de definire a procesului de reglare optim: Ziegler-Nichols (a), suprareglare minima (b) si durata de reglare minima (c).

Etapile de calcul pentru alegerea unui regulator continuu de tip PID sunt urmatoarele:

1. Se alege tipul de proces de reglare care realizeaza imbinarea cea mai convenabila a performantelor (indicatorilor de calitate ai reglarii).

Procesele optime de reglare prezentate in figura 6.1 realizeaza: valori medii ale timpului tranzitoriu de reglare t_t si ale suprareglarii S (tipul a), suprareglare S minima; uzual 20% (tipul b), timp tranzitoriu de reglare minim t_t (tipul c). Se alege unul dintre aceste trei procese tip de reglare (a, b sau c) in functie de cerintele tehnologice.

2. Se calculeaza succesiv valorile performantelor sistemului Δ_{max} , t_t si ϵ_s realizate cu fiecare tip de regulator PID.

Pentru procesele cu autoreglare se utilizeaza diagramele $\Delta_{max}/\Delta y = f(T_m/T)$ din figurile 6.2 a, b si c, in functie de tipul procesului optimal de reglare, si diagrama $\epsilon_s = f(T_m/T)$ din figura 6.3; pentru t_t se utilizeaza tabelul 6.2.

Tabelul 6.2

Tipul de regulator	Procesul de reglare de tip		
	a	b	C
P	6.5	9.0	4.5
PI	12.0	16.0	8.0
PID	7.0	10.0	5.5

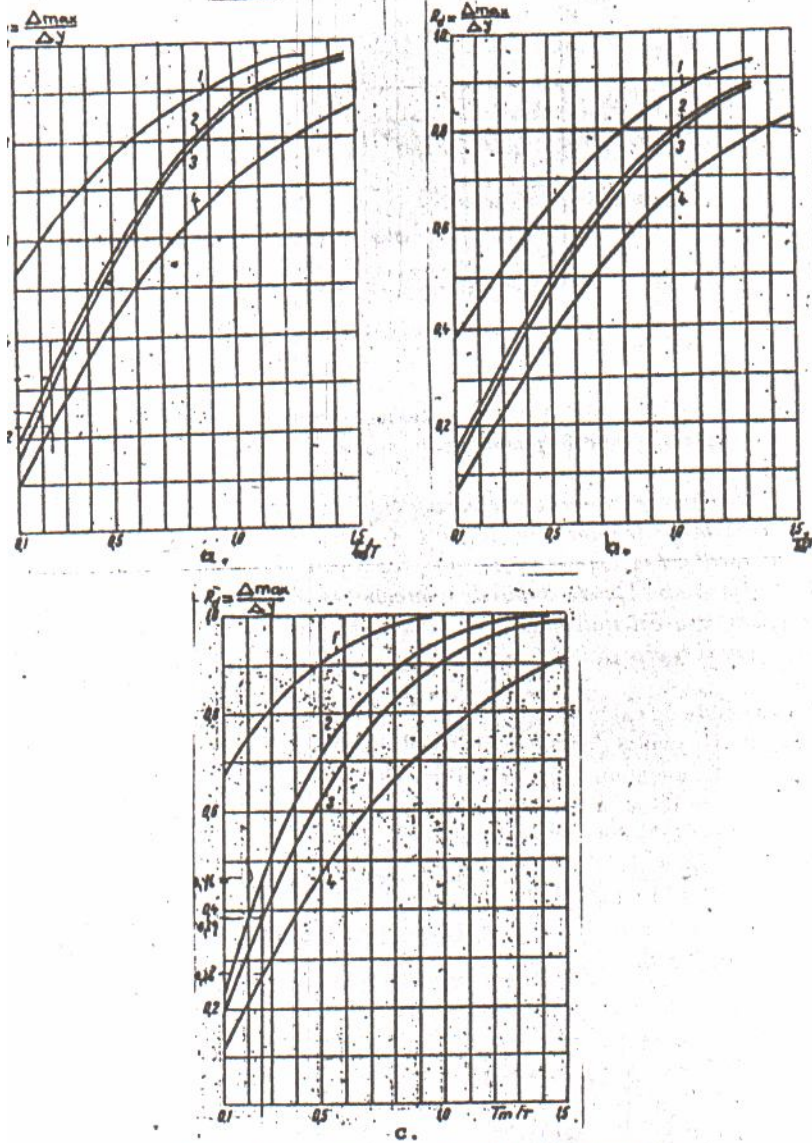


Fig. 6.2 Raportul $(\Delta_{max}/\Delta y)=f(T_m/T)$ pentru:
 proces cu performante medii, $\rho=0.8$ (a); suprareglare minima (b); durata de
 eglare minima (c); 1-regulator I; 2-regulator P; 3-regulator PI; 4-regulator PID.

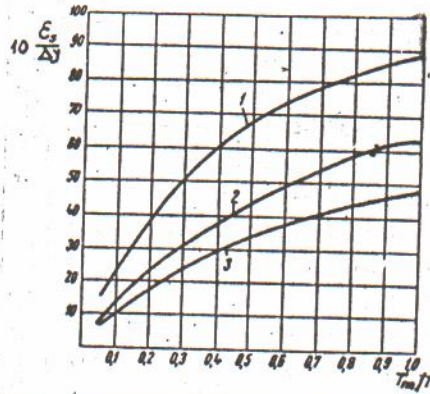


Fig. 6.3 Abaterea stationara; 1-proces cu $t_r = \min$;
2-proces cu performante medii; 3-proces cu suprareglare minima.

3. Se compara valorile performantelor realizate de fiecare tip de regulator cu valorile performantelor impuse de instalatia tehnologica si se alege regulatorul cel mai simplu care satisface valorile impuse.
4. Daca nu se poate stabili de la inceput procesul tip de reglare convenabil, se efectueaza calculul pentru toate cele trei procese tip (a, b, c) si se alege regulatorul si procesul cel mai avantajos.

6.2 Exemple de calcul

- a. Un cuptor de tratamente termice cu gaz are urmatoarele caracteristici:
 - temperatura de referinta $\theta_0 = 1000^\circ\text{C}$;
 - marimea de perturbatie maxima echivalenta cu o marime de executie $m = 25\%$ din cursa robinetului;
 - caracteristicile dinamice si statice (figura 6.4, curba 1); $T_m = 30\text{s}$, $T = 125\text{s}$; $T_m/T = 0.24$; $k = 77/25 = 3.1^\circ\text{C}/\%$ de cursa;
 - performantele impuse (figura 6.4, curba 2): $\Delta_{\max} < 20^\circ\text{C}$; $t_r < 300\text{s}$; $\epsilon_s < 5^\circ\text{C}$.

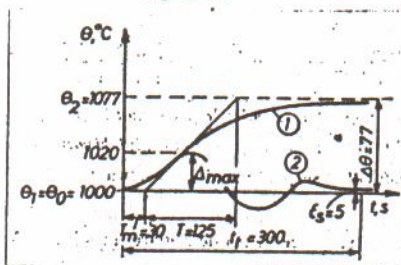


Fig. 6.4

Intrucat se impune o valoare mica a suprareglarii, se alege procesul de reglare tip *b*, cu suprareglare minima. Pentru acest tip de proces:

1) conditia $\Delta_{max}/\Delta\theta$: valoarea impusa este:

$$\left(\frac{\Delta_{max}}{\Delta\theta}\right)_{max} = \frac{20}{77} = 0.26$$

iar valorile realizate de reglatoarele pentru $T_m/T=0.24$ rezulta din figura 6.2 b:

$$\left(\frac{\Delta_{max}}{\Delta\theta}\right)_P = 0.32; \quad \left(\frac{\Delta_{max}}{\Delta\theta}\right)_{PI} = 0.26; \quad \left(\frac{\Delta_{max}}{\Delta\theta}\right)_{PID} = 0.22;$$

deci in concluzie, conditia este satisfacuta de reglatoarele PI si PID;

2) conditia t_r/T_m : valoarea impusa:

$$\left(\frac{t_r}{T_m}\right)_{max} = \frac{300}{30} = 10$$

iar valorile realizate de catre reglatoarele rezulta din tabelul 6.2:

$$\left(\frac{t_r}{T_m}\right)_P = 9; \quad \left(\frac{t_r}{T_m}\right)_{PI} = 16; \quad \left(\frac{t_r}{T_m}\right)_{PID} = 10;$$

deci in concluzie, conditia este satisfacuta de reglatoarele P si PID;

3) conditia erorii stationare nu se mai pune intrucat regulatorul P a iesit din competitie, (dupa conditia 1);

CONCLUZIE Regulatorul P nu corespunde intrucat ar realiza o suprareglare $\Delta_{max}=0,32 \cdot 77=24,64^\circ\text{C}>20^\circ\text{C}$; regulatorul PI nu corespunde nici el intrucat realizeaza un timp de reglare $t_r=16 \cdot 30=480\text{s}>300\text{s}$; se alege deci, regulatorul PID care asigura o reglare cu performantele: $\Delta_{max\text{ PID}}=16,94^\circ\text{C}$; $t_r=10 \cdot 30=300\text{s}$; $\epsilon_s=0$ care corespund celor impuse: $\Delta_{max}<20^\circ\text{C}$; $t_r<300\text{s}$; $\epsilon_s<5^\circ\text{C}$.

Acordurile regulatorului se stabilesc conform tabelului 6.1, criteriile numarul 3 si 6. Pentru criteriul numarul 3 ($S=20\%$): $K_R=0.94$ (regulatorul P); $K_R=0.94$ si $T_i=67.5$ (regulatorul PI); $K_R=1.55$, $T_i=60$ si $T_d=12$ (regulatorul PID), iar pentru criteriul numarul 6 ($S=20\%$, acordare la variatia marimii de referinta) $K_R=0.402$ (regulatorul P); $K_R=0.806$ si $T_i=120$ (regulatorul PI); $K_R=1.55$, $T_i=60$ si $T_d=21.6$ (regulatorul PID).

b. La reglarea debitului de gaz pe conducta de alimentare a unui arzator de cuptor se cunosc urmatoarele:

- valoarea de referinta a debitului $Q_{g0}=8 \cdot 10^3 \text{ Nm}^3/\text{h}$;
- marimea de perturbatie maxima echivalenta cu o marime de executie $m=5\%$ di cursa robinetului de reglare;
- caracteristici dinamice si statice (figura 6.5, curba 1): $T=1.9\text{s}$, $T_m=0.5\text{s}$, $T_m/T=0.26$, $k=1.3 \cdot 10^3 \text{ Nm}^3/\text{h}/\%$ de cursa;
- performante impuse (figura 6.5, curba 2): $\Delta_{max}<0.5 \cdot 10^3 \text{ Nm}^3/\text{h}$; $t_r<5\text{s}$; $\epsilon_s<0.1 \cdot 10^3 \text{ Nm}^3/\text{h}$;

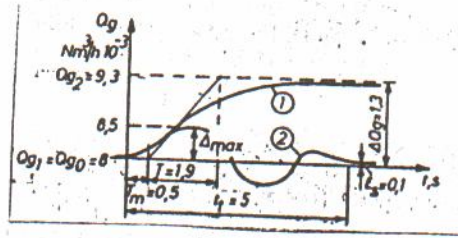


Fig. 6.5

Deoarece se cere o valoare mica a duratei regimului tranzitoriu de reglare se alege procesul de reglare de tip c care realizeaza $t_t = \min$. Pentru acest proces:

1) conditia $\Delta_{\max}/\Delta Q_g$: valoarea impusa este:

$$\left(\frac{\Delta_{\max}}{\Delta Q_g}\right)_{\max} = \frac{0.5}{1.3} = 0.384$$

valori realizate la $T_m/T=0.26$ (vezi figura 6.2 c):

$$\left(\frac{\Delta_{\max}}{\Delta Q_g}\right)_P = 0.46; \quad \left(\frac{\Delta_{\max}}{\Delta Q_g}\right)_{PI} = 0.38; \quad \left(\frac{\Delta_{\max}}{\Delta Q_g}\right)_{PID} = 0.28;$$

deci, ca prima concluzie, regulatorul P se exclude;

2) conditia t_t/T_m : valoarea impusa:

$$\left(\frac{t_t}{T_m}\right)_{\max} = \frac{5}{0.5} = 10$$

iar valorile realizate de catre regulatoarele rezulta din tabloul 6.2:

$$\left(\frac{t_t}{T_m}\right)_P = 4.5; \quad \left(\frac{t_t}{T_m}\right)_{PI} = 8; \quad \left(\frac{t_t}{T_m}\right)_{PID} = 5.5;$$

deci in concluzie, conditia este satisfacuta de regulatoarele PI si PID;

CONCLUZIE Se alege regulatorul PI, care regleaza cu performantele admisibile: $\Delta_{\max,PI} = 0.38 \cdot 1.3 \cdot 10^3 = 0.49 \cdot 10^3 \text{ Nm}^3/\text{h}$; $t_{t,PI} = 8 \cdot 0.5 = 4 \text{ s}$; $\epsilon_s = 0$.

Acordurile regulatoarelor se aleg ca in exemplul de mai sus.

c. Intr-un cuptor de incalzire se regleaza presiunea in spatiul de lucru prin strangularea canalului de gaze arse. Caracteristicile cuptorului sunt:

- valoarea de referinta a suprapresiunii: $P_0 = 200 \text{ Pa}$;
- marimea de perturbatie maxima echivalenta cu o marime de executie $m = 10\%$ din cursa registrului pe canalul de fum;
- caracteristicile dinamice si statice (figura 6.6, curba 1): $T_m = 0.9 \text{ s}$; $T = 4.5 \text{ s}$; $T_m/T = 2/10 = 0.2 \text{ Pa}/\% \text{ cursa}$;

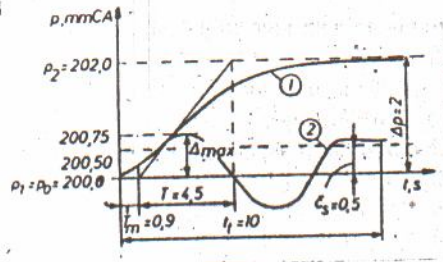


Fig. 6.6

- performantele impuse (figura 6.6, curba 2): $\Delta_{\max} < 0.75 \text{ Pa}$; $t_i = 10 \text{ s}$; $\epsilon_s = 0.5 \text{ Pa}$.

Se alege procesul de reglare de tipul α , care asigura valori medii ale performantelor. Pentru acest proces:

- 1) conditia $\Delta_{\max}/\Delta p$: valoarea impusa:

$$\left(\frac{\Delta_{\max}}{\Delta P}\right)_{\max} = \frac{0.75}{2} = 0.375$$

valori realizate la $T_m/T = 0.20$ (vezi figura 6.2 a):

$$\left(\frac{\Delta_{\max}}{\Delta P}\right)_P = 0.29; \quad \left(\frac{\Delta_{\max}}{\Delta P}\right)_{PI} = 0.27; \quad \left(\frac{\Delta_{\max}}{\Delta P}\right)_{PID} = 0.19;$$

in concluzie, toate tipurile de regatoare satisfac conditia;

- 2) conditia t_i/T_m : valoarea impusa:

$$\left(\frac{t_i}{T_m}\right)_{\max} = \frac{10}{0.9} = 11.1$$

iar valorile realizate de catre regatoare rezulta din tabelul 6.2:

$$\left(\frac{t_i}{T_m}\right)_P = 6.5; \quad \left(\frac{t_i}{T_m}\right)_{PI} = 12.0; \quad \left(\frac{t_i}{T_m}\right)_{PID} = 7.0;$$

deci in concluzie, conditia este satisfacuta de regatoarele P si PID;

- 3) conditia $\epsilon_s/\Delta P$: valoarea impusa:

$$\left(\frac{\epsilon_s}{\Delta P}\right)_{\max} = 0.24$$

deci si regulatorul P satisface conditia;

CONCLUZIE Se alege regulatorul P care regleaza cu performantele admisibile:

$$\Delta_{\max, P} = 0.29 \cdot 2 = 0.58 \text{ Pa}; \quad t_{i, P} = 6.5 \cdot 0.9 = 5.85 \text{ s}; \quad \epsilon_{s, P} = 0.24 \cdot 2 = 0.48 \text{ Pa}.$$

Acordurile regatoarelor se aleg ca in exemplul de mai sus.

6.3 Lucrari practice

- a. Un cuptor de tratamente termice cu gaz are urmatoarele caracteristici:
- temperatura de referinta $\theta_0=1000^\circ\text{C}$;
 - marimea de perturbatie maxima echivalenta cu o marime de executie $m=25\%$ din cursa robinetului;
 - caracteristicile dinamice si statice (figura 6.7, curba 1): $T_m = 30$ s; $T = 110$ s; $k=(1075+2\cdot n-\theta_0)/m$; [$^\circ\text{C}/\%$ cursa]
 - performantele impuse (figura 6.7, curba 2): $\Delta_{\max} < 20+0.5\cdot n$ [$^\circ\text{C}$]; $t_t < 300+4\cdot n$ [s]; $\epsilon_s < 5+0.2\cdot n$ [$^\circ\text{C}$].

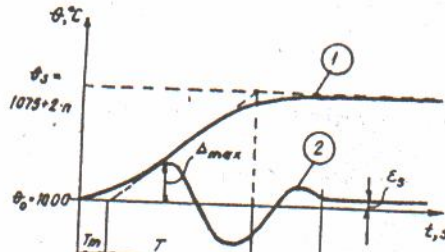


Fig. 6.7

Se cere:

- 1) alegerea tipului de regulator pentru procesul de reglare de tip *b*, deci cu suprareglare minima;
- 2) acordare r gulatorului la cerintele procesului (vezi tabelul 6.1, criteriile numerele 3 si 6).

b. La reglarea debitului de gaz pe conducta de alimentare a unui arzator de cuptor se cunosc urmatoarele:

- valoarea de referinta a debitului $Q_{g0}=8\cdot 10^3$ Nm^3/h ;
- marimea de perturbatie maxima echivalenta cu o marime de executie $m=5\%$ din cursa robinetului de reglare;
- caracteristici dinamice si statice (figura 6.8, curba 1): $T = 0,6$ s; $T = 2,3$ s; $k=[(9+x\cdot n)\cdot 10^3-8\cdot 10^3]/m$ [$\text{Nm}^3/\text{h}/\%$ cursa]; ($x=0,2$ pentru $n<10$, $x=0,02$ pentru $n>10$);
- performantele impuse (figura 6.8, curba 2): $\Delta_{\max} < 0.5\cdot 10^3+10\cdot n$ [Nm^3/h]; $t_t < 5+0,1\cdot n$ [s]; $\epsilon_s < 0,1\cdot 10^3+n$ [Nm^3/h].

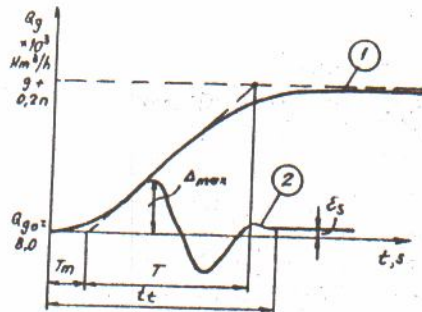


Fig. 6.8

Se cere:

- 1) alegerea regulatorului pentru procesul de reglare de tip c, deci cu timp de reglare minim;
- 2) acordarea regulatorului la cerintele procesului (vezi tabelul 6.1, criteriile numerice 3 si 6).

c. Intr-un cuptor de incalzire se regleaza presiunea in spatiul de lucru prin strangularea canalului de gaze arse. Caracteristicile cuptorului sunt:

- valoarea de referinta a presiunii: $P_0 = 200 \text{ Pa}$;
- marimea de perturbatie maxima echivalenta cu o marime de executie $m = 10\%$ din cursa registrului pe canalul de fum;
- caracteristicile dinamice si statice (figura 6.9, curba 1): $T_m = 1,1 \text{ s}$; $T = 4,5 \text{ s}$; $k = (202 + 0,1 \cdot n - P_0) / m$ [Pa/%cursa];
- performante impuse (figura 6.9, curba 2): $\Delta_{\max} < 0,75 + 0,001 \cdot n$ [Pa]; $t_t < 10 + 0,1 \cdot n$ [s]; $\epsilon_s < 0,5 + 0,01 \cdot n$ [Pa].

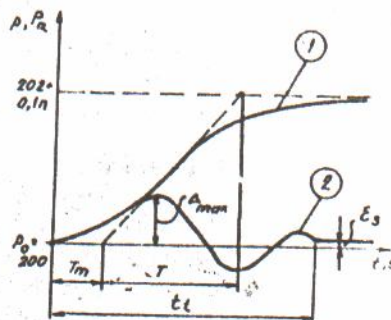


Fig. 6.9

Se cere:

- 1) alegerea regulatorului pentru procesul de reglare de tip a, deci cu valori medii ale performantelor;
- 2) acordarea regulatorului la cerintele procesului (vezi tabelul 6.1, criteriile numerice 3 si 6).

Lucrarea Nr. 7

"Alegerea Reguletoarelor Continue pentru Reglarea Instalatiilor fara Autoreglare"

7.1 Baza teoretica.

Pe langa elementele prezentate la lucrarea numarul 6, pentru procesele fara autoreglare, se utilizeaza tabelul 7.1 (pentru Δ_{max} si t_i) si diagrama $\epsilon_s/\Delta m = f(T_m/T)$ di figura 7.1, pentru fiecare tip de regulator PID si fiecare tip de reglare (a, b, c).

Tabelul 7.1

Tipul de regulator	Procesul de reglare tip					
	a		b		c	
	$\frac{\Delta_{max}}{k \cdot m \cdot T_m}$	$\frac{t_i}{T_m}$	$\frac{\Delta_{max}}{k \cdot m \cdot T_m}$	$\frac{t_i}{T_m}$	$\frac{\Delta_{max}}{k \cdot m \cdot T_m}$	$\frac{t_i}{T_m}$
P	1,4	8,0	-	-	2,9	6,0
PI	1,3	16,0	0,9	18,0	1,4	14,0
PID	1,1	12,0	0,8	13,0	1,3	9,0

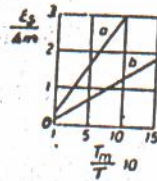


Fig. 7.1 Abaterea stationara ϵ_s , a regulatorului P (processe fara autoreglare), pentru doua procese tip de reglare (a, b)

7.2 Exemplu de calcul.

Nivelul de apa intr-un bazin de racire se regleaza prin variatia debitului de alimentare. Bazinul are caracteristicile:

- valoarea de referinta a nivelului $h_0 = +3000\text{mm}$;
- marimea de perturbatie maxima echivalenta cu o marime de executie $m = 20\%$ din cursa robinetului de reglare;
- caracteristicile dinamice si statice (figura 7.2, curba 1): $T_m = 10\text{s}$; $k = \text{tg}\alpha/\Delta m = 1/20 = 0,05 \text{ mm/s}/\% \text{ cursa}$; $T = 1/k = 20\text{s}$; $T_m/T = 0,5$;
- performantele impuse (figura 7.2, curba 2): $\Delta_{max} < 100\text{mm}$; $t_i < 80\text{s}$; $\epsilon_s < 30\text{mm}$.

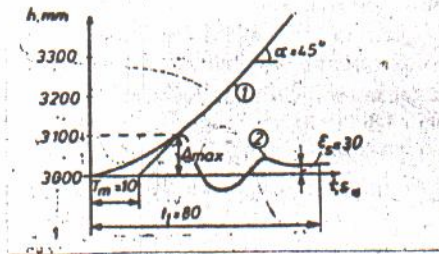


Fig 7.2

Dat fiind timpul de reglare relativ scurt, se alege procesul de reglare de tip c. Pentru acest proces:

1) conditia $\Delta_{max}/k \cdot \Delta m \cdot T_m$: valoarea impusa:

$$\left(\frac{\Delta_{max}}{k \cdot \Delta m \cdot T_m}\right)_{max} = \frac{100}{0.05 \cdot 20 \cdot 10} = 10,$$

valori realizate de reglatoare (vezi tabelul 7.1):

$$\left(\frac{\Delta_{max}}{k \cdot \Delta m \cdot T_m}\right)_P = 2,9; \quad \left(\frac{\Delta_{max}}{k \cdot \Delta m \cdot T_m}\right)_{PI} = 1,4; \quad \left(\frac{\Delta_{max}}{k \cdot \Delta m \cdot T_m}\right)_{PID} = 1,3;$$

deci toate tipurile de reglatoare satisfac conditia;

2) conditia: t_i/T_m : valoarea impusa:

$$\left(\frac{t_i}{T_m}\right)_{max} = \frac{80}{10} = 8;$$

valori realizate de reglatoare (vezi tabelul 7.1):

$$\left(\frac{t_i}{T_m}\right)_P = 6; \quad \left(\frac{t_i}{T_m}\right)_{PI} = 14; \quad \left(\frac{t_i}{T_m}\right)_{PID} = 9;$$

deci numai regulatorul P satisface conditia;

3) conditia $\epsilon_s/\Delta m$: valoarea impusa:

$$\left(\frac{\epsilon_s}{\Delta m}\right)_{max} = 1,4$$

deci regulatorul P satisface toate conditiile;

CONCLUZIE Regulatorul P satisface toate conditiile si realizeaza un proces de reglare cu performantele admisibile: $\Delta_{max} = 2,9 \cdot 0,05 \cdot 20 \cdot 10 = 29 \text{ mm}$ $t_r = 6 \cdot 10 = 60 \text{ s}$; $\epsilon_s = 1,4 \cdot 20 = 28 \text{ mm}$.

7.3 Lucrare practica

Nivelul de apa intr-un bazin de racire se regleaza prin variatia debitului de alimentare. Bazinul are caracteristicile:

- valoarea de referinta a nivelului $h_0=+3000\text{mm}$;
- marimea de perturbatie maxima echivalenta cu o marime de executie $m=20\%$ din cursa robinetului de reglare;
- caracteristicile dinamice si statice (figura 7.2, curba 1): $T_m=10\text{s}$;
 $k=\text{tg}\alpha/\Delta m=1/20=0.05\text{mm/s}/\% \text{cursa}$; $T=1/k=20\text{s}$; $T_m/T=0.5$;
- performantele impuse: $\Delta_{\text{max}}<100-3\cdot n$ [mm]; $t_r<80-n$ [s]; $\epsilon_r<30+0,5\cdot n$ [mm].

Se cere:

- 1) alegerea regulatorului.

Lucrarea Nr. 8 "Algerca Reglatoarelor Bipozionale"

3.1 Baza teoretica.

Cea mai utilizata varianta de reglare bipozionale a temperaturii in cuptoarele electrice cu rezistori este reglarea "tot sau nimic", adica pe treptele de putere 100% (elementele de incalzire cuplate in triunghi) si 0% (elemente decuplate). In figura 8.1 se prezinta schema de reglare a temperaturii cu regulator bipozalional; regulatorul are un singur circuit de comanda prevazut cu contactul K_R care este deschis pentru abatere negativa ($\theta_c > \theta_0$) si inchis pentru abatere pozitiva ($\theta_c < \theta_0$).

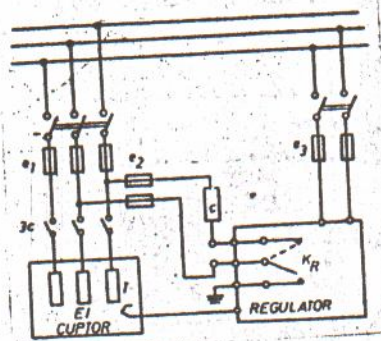


Fig. 8.1

Cand temperatura scade sub valoarea de referinta ($\theta_c < \theta_0$), contactul K_R inchide circuitul bobinei contactorului, care inchide contactele 3c si elementele de incalzire EI, legate in triunghi, sunt cuplate la retea (putere 100%); invers daca temperatura ($\theta_c > \theta_0$), contactul K_R deschide circuitul bobinei c si elementele de incalzire sunt decuplate de la retea (0%).

Aplicandu-se teoria reglarii bipozionale, rezulta ca marimea de executie este puterea cuptorului ($m=P_c$), iar domeniul de reglare este:

$$d_r = \frac{\theta_{max}}{\theta_0} = \frac{P_{cN}}{P_{co}} = \frac{t_{cR}}{t_c}$$

in care:

P_{cN} - puterea nominala instalata a cuptorului;

P_{co} - puterea necesara pentru mentinerea temperaturii la valoarea de referinta;

θ_{max} - temperatura maxima stationara realizata la puterea P_{cN} la conectare permanenta;

θ_0 - temperatura de referinta, corespunzatoare la P_{co} ;

t_{cR} - durata ciclului de reglare;

t_c - durata perioadei de conectare a cuptorului la retea.

Considerand captorul un element de ordin superior cu timp mort, curba c reglare a temperaturii pentru domeniul de reglare $d_r=2$ este prezentata in fig 8.2. Amplitudinea de oscilare a variabilei reglate si durata ciclului de reglare se calculeaza cu relatiile de mai jos:

$$x_0 = 1 + \frac{T_m}{T} \cdot \frac{y_{max}}{2}, \quad t_c = t_D = \frac{4iT}{y_{max}} + 2T_m$$

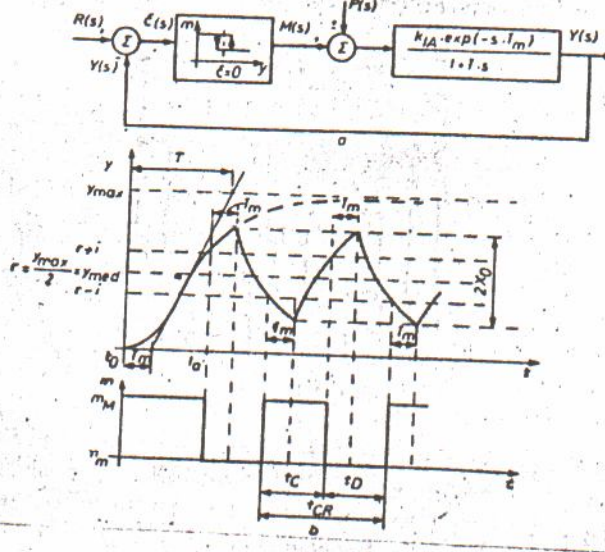


Fig. 8.2

Pentru alegerea unui regulator bipozitional, calculul se desfasoara astfel:

- 1) Se verifica raportul T_m/T al instalatiei; daca $T_m/T < 0.2$ este posibila utilizarea regulatorului bipozitional; daca $T_m/T > 0.2$ in general performantele realizate sunt sub cele necesare.
- 2) Se calculeaza valorile performantelor sistemului: X_0 , ϵ , t_{CR} realizate cu regulatorul utilizat, caracterizat prin domeniul de insensibilitate i . Acest calcul se efectueaza:

- pentru procesele cu autoreglare, fie cu relatiile 8.1...8.6, fie utilizand diagramele $X_0/\Delta y = f(T_m/T)$ din figura 8.3, $\epsilon/X_0 = f(1/d_r)$ din figura 8.4 si $t_{CR}/T_m = f(1/d_r)$ din figura 8.5;

- amplitudinea de oscilatie: $x_0 = 1 + \frac{T_m}{T} \cdot \frac{y_{max}}{2}$ (8.1)

- eroarea stationara: $\epsilon_s = \frac{T_m}{T} \cdot \frac{2 - d_r}{d_r} \cdot \frac{y_{max}}{2}$ (8.2)

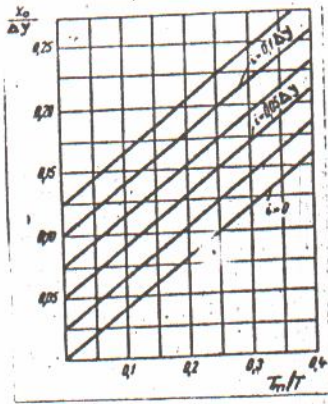


Fig. 8.3

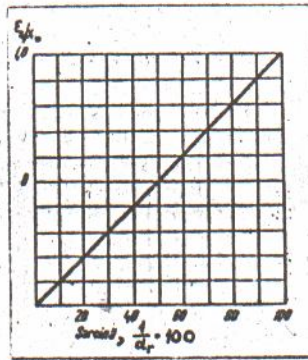


Fig. 8.4

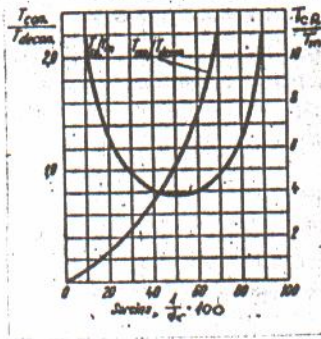


Fig. 8.5

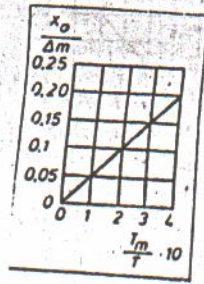
- timp de conectare: $t_c = \left(T_m + \frac{2iT}{y_{\min}} \right) \cdot \frac{d_r}{d_r - 1}$ (8.3)

- timp de deconectare: $t_D = \left(T_m + \frac{2iT}{y_{\min}} \right) d_r$ (8.4)

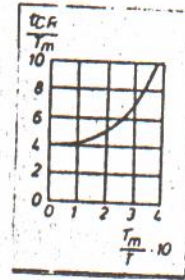
- durata ciclului de reglare: $t_{cR} = \left(T_m + \frac{2iT}{y_{\min}} \right) \frac{d_r^2}{d_r - 1}$ (8.5)

- timp de amorsare: $t_s = T_m + T \frac{r+i}{y_{\min}} \cdot \frac{d_r}{d_r - 1}$ (8.6)

- pentru procese fara autoreglare se utilizeaza diagramele $X_0/\Delta m = f(T_m/T)$ din figura 8.6 a si $t_{cR} = f(T_m/T)$ din figura 8.6 b sau relatiile indicate in 8.2.2..



a.



b.

Fig 8.6

3. Se compara valorile performantelor realizate de regulator cu valorile performantelor impuse de instalatia tehnologica si se conchide asupra posibilitatilor de utilizare a regulatorului bipozitional.

4. Daca performantele instalatiei nu sunt satisfacute, se poate actiona asupra valorilor i (regulator) sau d_r pentru a le satisface.

8.2 Exemple de calcul

8.2.1 Alegerea regulatorului pentru reglarea proceselor cu autoreglare.

a. Intr-un cuptor electric cu rezistoare, reglarea temperaturii se realizeaza cu regulator bipozitional pe treptele de putere 100% (cuplare in triunghi) si 0% (decuplare). Se cunosc:

- caracteristicile dinamice si statice (figura 8.7, curba 1): $T_m = 1.5 \text{ min}$; $T = 50 \text{ min}$; $T_m/T = 0.03$;
- domeniul de insensibilitate al regulatorului $i = \pm 2^\circ\text{C}$;
- temperatura de referinta $\theta_0 = 900^\circ\text{C}$ (reglare cu consemn programat), la care se cere $X_0 < 30^\circ\text{C}$ (figura 8.7, curba 2);
- temperatura de referinta variabila in domeniul $\theta_0 = 600 \dots 900^\circ\text{C}$ (reglare cu consemn programat);
- posibilitatea de crestere a puterii, astfel ca θ_{\max} sa creasca cu 50%.

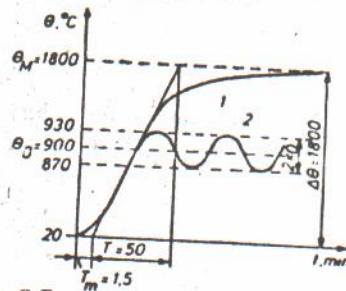


Fig. 8.7

Se cere verificarea posibilității de utilizare a regulatorului și calculul performanțelor.

Performanțele sistemului pentru reglarea la $\theta_0=900^\circ\text{C}$. În acest caz $d_r=1800/900=2$.

- în principiu este posibilă utilizarea regulatorului, deoarece $T_m/T=0,03 < 0,2$, cu condiția verificării performanțelor impuse ($X_0=30^\circ\text{C}$);
- din diagrama prezentată în figura 8.3, pentru raportul $T_m/T=0,03$ și $i/\Delta\theta=2/1800=0,0011$, rezulta:

$$\frac{X_0}{\Delta\theta} = 0,0161; \quad X_0 = 0,0161 \cdot 1800 = 29^\circ\text{C}$$

Același rezultat este obținut și cu relația 8.1:

$$X_0 = i + \frac{T_m}{T} \cdot \frac{y_{\max}}{2} = 2 + 0,03 \cdot \left(\frac{1800}{2}\right) = 29^\circ\text{C}$$

- durata ciclului de reglare: din diagrama 8.5, pentru $d_r=2$ (adică, $100/2=50$), rezulta $t_{cr}/T_m=4$ și:

$$t_{cr} = 4 \cdot 1,5 = 6 \text{ min}$$

sau același rezultat se obține și cu relația 8.5:

$$t_{cr} = \left(\frac{4}{1}\right) \left[1,5 + \frac{2 \cdot 2 \cdot 50}{1800}\right] = 4 \cdot 1,61 = 6,44 \text{ min};$$

- abaterea staționară $\epsilon_s=0$, deoarece $d_r=2$.

În principiu, regulatorul satisface performanțele impuse ($X_0=30^\circ\text{C}$) și reglează cu performanțele: $X_0=29^\circ\text{C}$; $t_{cr}=6 \text{ min}$; $\epsilon_s=0$.

Performanțele sistemului pentru reglarea la $\theta_0=600\dots 900^\circ\text{C}$. Se efectuează calculul pentru $\theta_0=600^\circ\text{C}$:

- domeniul de reglare este:

$$d_r = \frac{\theta_{\max}}{\theta_0} = \frac{1800}{600} = 3;$$

- apare deci o abatere staționară, care se determină din figura 8.4, pentru $d_r=3$:

$$\frac{\epsilon_s}{X_0} = -0,31; \quad \epsilon_s = -0,31 \cdot 29 = -9^\circ\text{C}$$

sau cu relația 8.2:

$$\epsilon_s = \frac{1,5}{50} \cdot \frac{2-3}{3} \cdot \frac{1800}{2} = -9^\circ\text{C}$$

- durata ciclului de reglare este în acest caz (din diagrama 8.5 sau relația 8.5):

$$t_{cr} = 7,5 \text{ min}.$$

Amplitudinea de oscilație X_0 nu este influențată de domeniul de reglare d_r .

În concluzie, la reglarea cu consemn programat în domeniul $\theta_0=600\dots 900^\circ\text{C}$, performanțele sunt: $X_0=29^\circ\text{C}$; $\epsilon_s=0\dots -9^\circ\text{C}$; $t_{cr}=7,5 \text{ min}$.

Abaterile temperaturii fata de valoarea de referinta sunt nesimetrice anume:

- abatere superioara:

$$X_1 = X_0 + |\varepsilon_s| = 29 + 9 = 38^\circ C$$

- abatere inferioara:

$$X_2 = X_0 - |\varepsilon_s| = 29 - 9 = 20^\circ C$$

Performantele sistemului la $\theta_{max}=2700^\circ C$ si $\theta_0=900^\circ C$.

- domeniul de reglare este:

$$d_r = \frac{\theta_{max}}{\theta_0} = \frac{2700}{900} = 3;$$

- amplitudinea de oscilare X_0 rezulta din relatia 8.1:

$$X_0 = -2 + 0.03 \cdot \frac{2700}{2} = 42.5^\circ C$$

- apare o abatere stationara care rezulta fie din diagrama 8.4 pentru $d_r=3$:

$$\frac{\varepsilon_s}{X_0} = -0.31; \quad \varepsilon_s = -0.31 \cdot 42.5 = -13.5^\circ C,$$

fie din relatia 8.2:

$$\varepsilon_s = \frac{1.5}{50} \cdot \frac{2-3}{3} \cdot \frac{2700}{2} = -13.5^\circ C$$

- durata ciclului de reglare rezulta din diagrama din figura 8.5 pentru $d_r=3$:

$$\frac{t_{cr}}{T_M} = 4.5; \quad t_{cr} = 4.5 \cdot 1.5 = 7 \text{ min}$$

sau din relatia 8.5:

$$t_{cr} = \frac{9}{2} \cdot \left(1.5 + \frac{2 \cdot 2 \cdot 50}{2700} \right) = 4.5 \cdot 1.57 = 7 \text{ min}$$

Abaterca superioara a temperaturii fata de valoarea de referinta este:

$$X_1 = X_0 + |\varepsilon_s| = 42.5 + 13.5 = 56^\circ C$$

$$X_2 = X_0 - |\varepsilon_s| = 42.5 - 13.5 = 29^\circ C$$

In concluzie, marirea domeniului de reglare la $d_r = 3$ conduce la inrautatarea performantelor.

b. Un cuptor camera cu rezistori, de putere $P_{nom\Delta}=30kW$ are caracteristicile rezultate din figura 8.8:

$$\theta_{max\Delta} = 1600^\circ C; \quad \theta_{max\lambda} = 530^\circ C$$

$$T_m = 1.5 \text{ min}; \quad T = 40 \text{ min}$$

$$k = \frac{\theta_{max\Delta}}{P_{nom\Delta}} = \frac{1600}{30} = 53.3^\circ C / kW$$

In cuptor se executa un tratament termic de mentinere la temperatura $\theta_0=950^\circ C$. Se cer performantele regulatorului bipozitional, la reglarea Δ -decuplat, λ - Δ si λ -

decuplat, cu un regulator avand domeniul de insensibilitate $i = \pm 2^\circ\text{C}$ si curbele de reglare in aceste cazuri.

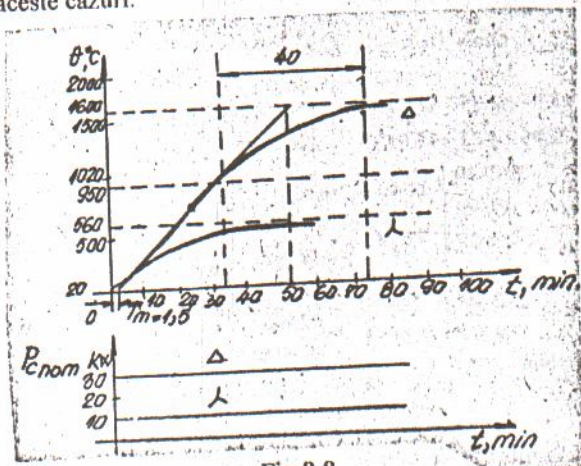


Fig 8.8

1) In cazul reglării Δ -decuplat, performantele sunt, pentru $d_r = 1600/950 = 1,68$:

$$X_0 = 2 + \frac{1,5}{40} \cdot \frac{1600}{2} = 32^\circ\text{C}$$

$$e_r = \frac{1,5}{40} \cdot \frac{2 - 1,68}{1,68} \cdot \frac{1600}{2} = 5,63^\circ\text{C}$$

$$X_1 = 32 - 5,63 = 26,37^\circ\text{C}$$

$$X_2 = 32 + 5,63 = 37,63^\circ\text{C}$$

$$t_n = \left[1,5 + \frac{2 \cdot 2 \cdot 40}{1600} \right] \cdot 1,68 = 2,7 \text{ min}$$

$$t_c = \left[1,5 + \frac{2 \cdot 2 \cdot 40}{1600} \right] \cdot \frac{1,68}{1,68 - 1} = 3,93 \text{ min}$$

$$t_{c,r} = \left[1,5 + \frac{2 \cdot 2 \cdot 40}{1600} \right] \cdot \frac{1,68^2}{1,68 - 1} = 6,63 \text{ min}$$

$$t_A = 1,5 + \frac{950 + 2}{(1,68 - 1) \cdot 950} \cdot 40 = 60,1 \text{ min}$$

2) Deoarece $\theta_{\max\lambda} < \theta_0 < \theta_{\max\Delta}$, pentru imbunatatirea performantelor se poate efectua reglarea λ - Δ , pentru care se aplica aceleasi relatii in conditiile:

$$\theta_{\min} = 1600 - 530 = 1070^\circ\text{C}$$

$$\theta_0 = 950 - 530 = 420^\circ\text{C}$$

$$d_r = \frac{\theta_{\min}}{\theta_0} = \frac{1070}{420} = 2,54$$

Se obtin performantele:

$$X_0 = 2 + \frac{1.5}{40} \cdot \frac{1070}{2} = 22.06^\circ C$$

$$\varepsilon_s = \frac{1.5}{40} \cdot \frac{2 - 2.54}{2.54} \cdot \frac{1070}{2} = -4.25^\circ C$$

$$X_1 = 22.06 + 4.25 = 26.31^\circ C$$

$$X_2 = 22.06 - 4.25 = 17.81^\circ C$$

$$t_{c1} = \left[1.5 + \frac{2 \cdot 2 \cdot 40}{1070} \right] \cdot 2.54 = 4.2 \text{ min}$$

$$t_{c2} = \left[1.5 + \frac{2 \cdot 2 \cdot 40}{1070} \right] \cdot \frac{2.54}{2.54 - 1} = 2.72 \text{ min}$$

$$t_{c3} = \left[1.5 + \frac{2 \cdot 2 \cdot 40}{1070} \right] \cdot \frac{2.54^2}{2.54 - 1} = 6.92 \text{ min}$$

$$t_A = 60.1 \text{ min}$$

3) In figurile 8.9 si 8.10 se prezinta curbele de reglare pentru cele doua cazuri. Comparand performantele pentru aceste doua cazuri (formule si figuri), rezulta ca reglarea λ - Δ este mult mai avantajoasa ca cea Δ -decuplat, pentru ca:

- abaterea superioara X_1 ramane aceeași, dar supraîncalzirea pieselor are o durata foarte scurta (t_c este micșorat de la 3.93min la 2.72min); abaterea X_2 se micșoreaza sensibil;
- durata ciclului de reglare, deci frecvența de conectare a regulatorului ramane practic aceeași;
- structura ciclului de reglare se amelioreaza, pentru ca se diminueaza timpul de conectare, iar consumul de energie crește ușor de la:

$$3.93 \cdot \frac{30}{60} = 1.965 \text{ kWh / ciclu}$$

la:

$$2.72 \cdot \frac{30}{60} + 4.2 \cdot \frac{10}{60} = 2.06 \text{ kWh / ciclu}$$

- timpul de amorsare t_A ramane același, pentru ca pornirea se face întotdeauna pe $P_{nom\Delta}$.

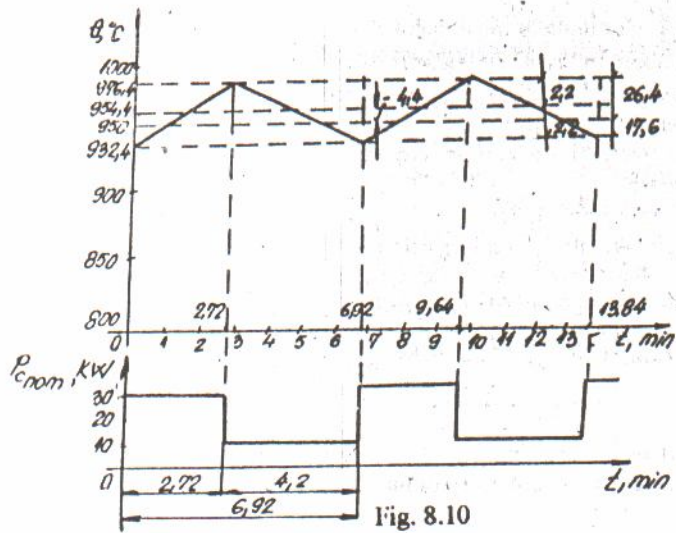
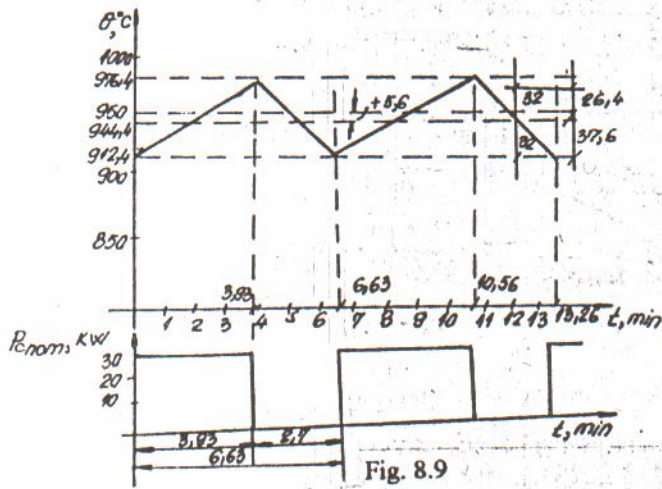
4) Reglarea λ -decuplat nu este posibilă pentru ca $\theta_0 > \theta_{max\lambda}$.

c. Un cuptor camera cu rezistoare realizeaza $\theta_{max\Delta} = 2200^\circ C$ si $\theta_{max\lambda} = 725^\circ C$. Experimental s-au determinat caracteristicile dinamice ale cuptorului: $T_m = 2 \text{ min}$ si $T = 53 \text{ min}$ (figura 8.11). Pentru a realiza in acest cuptor o recoacere la $\theta_0 = 620^\circ C$, se cere sa se precizeze care din variantele de reglare bipozitionala este mai avantajoasa: (regulatorul are un domeniu de insensibilitate $i = \pm 0.8^\circ C$).

1) In varianta Δ -decuplat, pentru care:

$$\theta_{\max} = 2200^{\circ}\text{C}; \quad \theta_0 = 620^{\circ}\text{C}; \quad d_r = \frac{\theta_{\max}}{\theta_0} = \frac{2200}{620} = 3.54$$

aplicand aceleasi formule ca in cazul precedent, obtinem performantel tabelul 8.1 (pentru Δ -decuplat).



2) Deoarece $\theta_0 < \theta_{\max\lambda}$, a doua varianta posibila este λ -decuplat, pentru care:

$$\theta_{\max} = 725^\circ\text{C}; \quad \theta_0 = 620^\circ\text{C}; \quad d_r = \frac{\theta_{\max}}{\theta_0} = \frac{725}{620} = 1.17$$

Se obtin performantele din tabelul 8.1 (pentru λ -decuplat).

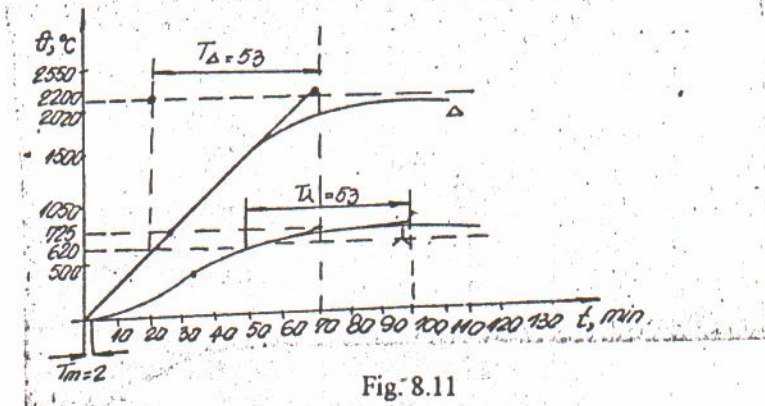


Fig. 8.11

Tabelul 8.1

Performantele Reglării

Performante	X_0 [°C]	e_s [°C]	X_1 [°C]	X_2 [°C]	t_D [min]	t_c [min]	T_{CR} [min]	T_A [min]
Δ -decuplat	42,3	-18,1	60,4	24,2	7,23	2,84	10,87	22,8
λ -decuplat	14,5	9,7	4,8	24,2	2,48	14,57	17,05	314

3) Comparand performantele din tabelul 8.1 rezulta ca reglarea λ -decuplat are avantajele urmatoare in raport cu reglarea Δ -decuplat:

- reducerea substantiala a supraincalzirii X_1 de circa 10 ori, pentru aceeași valoare X_2 ;
- durata ciclului de reglare crește, deci se diminuează frecvența de conectare;

Dezavantajele sunt urmatoarele:

- structura ciclului de reglare este mai rea, din cauza creșterii importante a timpului de conectare t_c ceea ce conduce la o creștere a consumului de energie cu circa 70% (raportul $P_{c\text{nom}\lambda}/P_{c\text{nom}\Delta}=3$):

$$\frac{P_{c\text{nom}\lambda} \cdot 14.57 \cdot \frac{1}{60} - P_{c\text{nom}\Delta} \cdot 2.84 \cdot \frac{1}{60}}{P_{c\text{nom}\Delta} \cdot 2.84 \cdot \frac{1}{60}} \cdot 100 = \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{14.57}{2.84} - 1 \right] \cdot 100 \cong 70\%$$

- timpul de amorsare t_A crește până la o valoare practic inadmisibilă (>5h) pentru un cuptor discontinuu.

d. Un cuptor camera cu rezistoare, are caracteristicile:

$$\theta_{\max} = 1830^{\circ}\text{C}, \quad T_m = 2.2 \text{ min}, \quad T = 48 \text{ min}.$$

In acest cuptor se efectueaza un tratament termic cu trei mentineri la $\theta_{0(1,2,3)} = 1180, 830, 650^{\circ}\text{C}$.

Se cer performantele reglării cuplat-decuplat și curbele de reglare, neglijând domeniul de insensibilitate al regulatorului.

Pentru cele trei cazuri, domeniul de reglare este:

$$d_{r1} = \left[\frac{\theta_{\max}}{\theta_{01}} \right] = \frac{1830}{1180} = 1.55; \quad d_{r2} = \left[\frac{\theta_{\max}}{\theta_{02}} \right] = \frac{1830}{830} = 2.20; \quad d_{r3} = \left[\frac{\theta_{\max}}{\theta_{03}} \right] = \frac{1830}{650} = 2.81.$$

Aplicând formulele de mai sus obținem valorile performanțelor din tabelul 8.2 și curbele de reglare din figura 8.12.

Tabelul 8.2

Performanțele reglării

Performanțe	X_0 [°C]	ϵ_s [°C]	X_1 [°C]	X_2 [°C]	t_D [min]	t_C [min]	T_{CR} [min]	T_A [min]
Cazul 1	42	12,2	29,8	54,2	3,4	6,2	9,6	89,5
Cazul 2	42	-3,8	45,8	38,2	4,84	4	8,84	42,2
Cazul 3	42	-12,1	54,1	29,9	6,2	3,4	9,6	28,7

Se observă că performanțele au valori medii pentru cazul 2 și variațiile au sensuri inverse pentru cazurile 1 și 3.

e. Un cuptor este utilizat pentru un tratament termic de revenire la $\theta_0 = 780^{\circ}\text{C}$ a diverselor sortimente de piese, ceea ce conduce la variația masei pieselor și deci la variația temperaturii maxime θ_{\max} , la aceeași putere a cuptorului. Identificarea cuptorului (figura 8.13) a condus la rezultatele următoare:

$$\theta_{\max 1} = 1700^{\circ}\text{C} \text{ (pentru sarcina minima)}$$

$$\theta_{\max 2} = 1250^{\circ}\text{C} \text{ (pentru sarcina maxima)}$$

$$T_m = 1.2 \text{ min}; \quad T = 30.5 \text{ min}.$$

Se cer: domeniul de variație al performanțelor în domeniul de variație a încălzirii (se consideră $i=0$) și curbele de reglare.

1) Pentru cazul 1 (sarcina minima):

$$d_{r1} = \frac{\theta_{\max 1}}{\theta_0} = \frac{1700}{780} = 2.189$$

și rezulta performanțele:

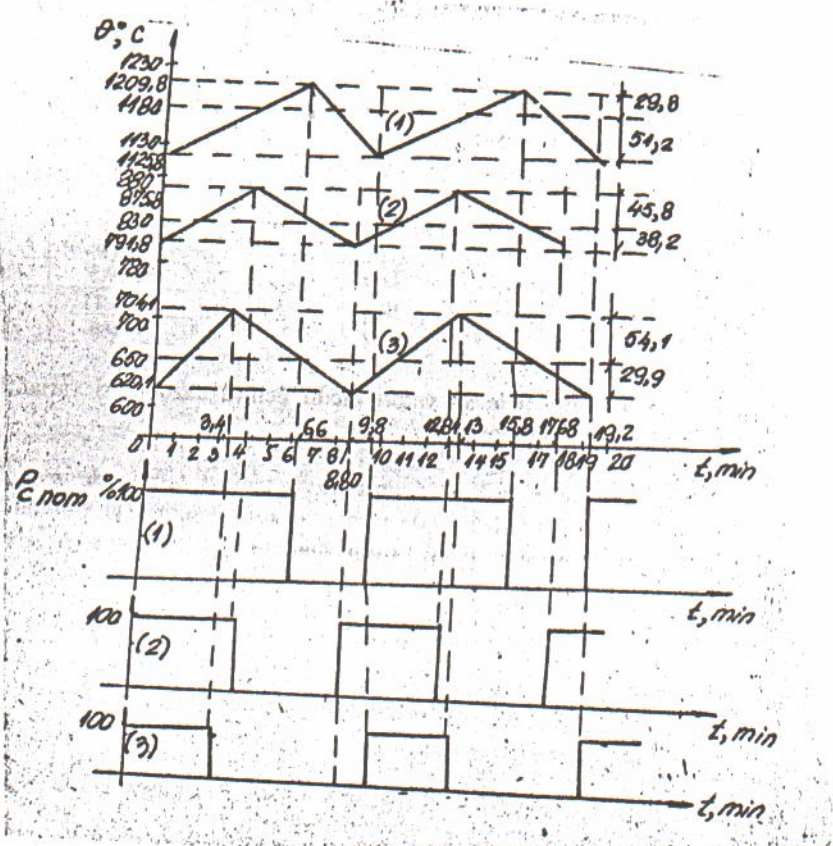


Fig. 8.12

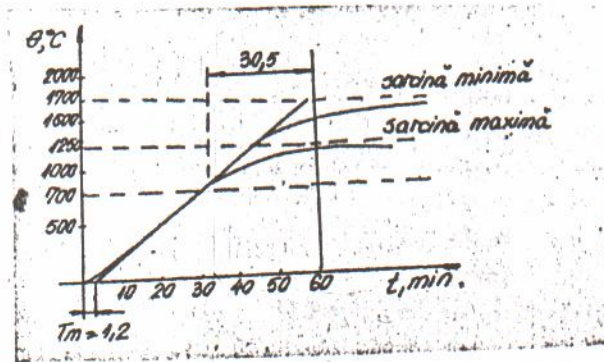


Fig. 8.13

$$X_{01} = \frac{1.2}{30.5} \cdot \frac{1700}{2} = 33.44^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon_{r1} = \frac{1.2}{30.5} \cdot \frac{2 - 2.18}{2.18} \cdot \frac{1700}{2} = -2.76^\circ\text{C}$$

$$X_{11} = 33.44 + 2.76 = 36.2^\circ\text{C}$$

$$X_{21} = 33.44 - 2.76 = 30.7^\circ\text{C}$$

$$t_{D1} = 1.2 \cdot 2.18 = 2.61 \text{ min}$$

$$t_{C1} = 1.2 \cdot \frac{2.18}{2.18 - 1} = 2.21 \text{ min}$$

$$t_{CR1} = t_{D1} + t_{C1} = 4.82 \text{ min}$$

2) Pentru cazul 2 (sarcina maxima):

$$d_{r2} = \frac{\theta_{\max 2}}{\theta_0} = \frac{1250}{780} = 1.6$$

si rezulta performantele:

$$X_{02} = \frac{1.2}{30.5} \cdot \frac{1250}{2} = 24.6^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon_{r2} = \frac{1.2}{30.5} \cdot \frac{2 - 1.6}{1.6} \cdot \frac{1250}{2} = 6.13^\circ\text{C}$$

$$X_{12} = \frac{1.2}{30.5} \cdot (1250 - 780) = 18.5^\circ\text{C}$$

$$X_{22} = \frac{1.2}{30.5} \cdot 780 = 30.7^\circ\text{C}$$

$$t_{D2} = 1.2 \cdot 1.6 = 1.92 \text{ min}$$

$$t_{C2} = 1.2 \cdot \frac{1.6}{1.6 - 1} = 3.2 \text{ min}$$

$$t_{CR2} = t_{D2} + t_{C2} = 5.12 \text{ min}$$

3) Obținem domeniul de variație a performanțelor în domeniul de variație a sarcinii cuptorului:

$$X_0 = 24.6 \dots 33.4 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

$$\varepsilon_s = -2.8 \dots 6.13 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

$$X_1 = 18.5 \dots 36.2 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

$$X_2 = 30.7 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

$$t_{cx} = 4.8 \dots 5.1 \text{ } [\text{min}]$$

$$t_D = 1.9 \dots 2.6 \text{ } [\text{min}]$$

$$t_c = 2.2 \dots 3.2 \text{ } [\text{min}]$$

ilustrat de curbele de reglare din figura 8.14:

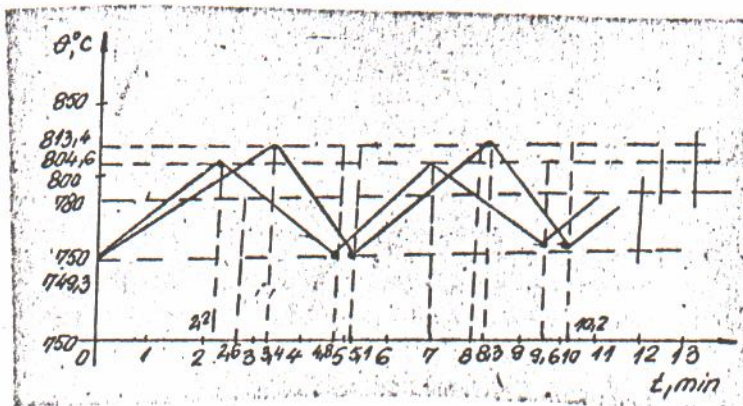


Fig. 8.14

f. Se realizează proiectul unui cuptor continuu cu rezistoare pentru încălzirea pișcilor la $\theta_0 = 1230^{\circ}\text{C}$; cuptorul urmează să fie reglat cu ajutorul unui regulator bipozitional cu $i = \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Performanțele impuse sunt:

$$X_{11} = 8^{\circ}\text{C}; \quad X_{21} = 15^{\circ}\text{C}; \quad t_{cx} = 1.5 \text{ min.}$$

Se cer valorile necesare θ_{\max} , T_m și T_m/T , obținute din proiect pentru satisfacerea performanțelor impuse.

1) Prima condiție $X_2 < X_{21}$ se scrie:

$$X_2 = i + \frac{T_m}{T} \cdot \theta_0 \leq X_{21}$$

de unde:

$$\frac{T_m}{T} \leq \frac{X_{21} - i}{\theta_0} = \frac{15 - 0.5}{1230} \approx 0.01$$

2) A doua condiție $X_1 < X_{li}$ se scrie:

$$X_1 = i + \frac{T_m}{T} \cdot [\theta_{max} - \theta_0] \leq X_{li}$$

de unde:

$$\theta_{max} \leq \frac{T}{T_m} \left[X_{li} + \frac{T_m}{T} \cdot \theta_0 - i \right] \approx \frac{1}{0.01} \cdot (8 + 0.01 \cdot 1230 - 0.5) \approx 1980^\circ C$$

3) A treia condiție $t_C < t_{C1}$ se scrie:

$$t_C \approx T_m \cdot \frac{\frac{\theta_{max}}{\theta_0} - 1}{\theta_0} \leq t_{C1}$$

de unde:

$$T_m \leq t_{C1} \cdot \frac{\frac{\theta_{max}}{\theta_0} - 1}{\frac{\theta_{max}}{\theta_0}} = 1.5 \cdot \frac{1230 - 1}{1230} = 0.57 \text{ min}$$

Rezulta ca valorile impuse ale performantelor pot fi obtinute simultan din conditiile urmatoare:

- temperatura maxima la incalzirea sarjei nominale:

$$\theta_{max} = 1980^\circ C$$

- raportul: $\frac{T_m}{T} = 0.01$

- timpul mort: $T_m = 0.57 \text{ min}$

- constanta de timp: $T = \frac{T_m}{0.01} = \frac{0.57}{0.01} = 57 \text{ min}$

8.2.2 Alegerea regulatorului pentru reglarea proceselor fara autoreglare.

a. Nivelul apei intr-un bazin de racire, alimentat la un debit maxim $Q_{amax} = 2.8 \text{ m}^3/\text{s}$, este reglat la inaltimea de $h_0 = 2 \text{ m}$ cu un regulator bipozitional "tot sau nimic" cu $i = \pm 0.02 \text{ m}$. Se cer performantele si curbele de reglare.

1. Identificarea bazinului se poate efectua prin urmatoarele metode:

1.1 Daca se cunoaste sectiunea bazinului $A = 15 \text{ m}^2$, debitul de evacuare (sarcina procesului) $Q_e = 0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ si timpul mort $T_m = 3 \text{ s}$, atunci:

- factorul de amplificare este: $k = \frac{1}{A} = \frac{1}{15} = 0.067 \text{ m}^{-2}$

- marimea de executie maxima este: $m_M = Q_{amax} = 2.8 \text{ m}^3/\text{s}$

- si domeniul de reglare: $d_r = \frac{m_M}{|p|} = \frac{Q_{amax}}{Q_e} = \frac{2.8}{0.8} = 3.5$

- respectiv rezerva de putere: $(d_r - 1) \cdot 100 = 250\%$

1.2 Dacă nu se cunosc sarcina Q_0 și timpul mort T_m , se identifică procesul pentru variația în treapta a mării de execuție $m=m_M=Q_{umax}$. Se obține răspunsul din figura 8.15, a care permite să se determine:

- timpul mort: $T_m = 3s$
- domeniul de reglare: din: $tg\alpha = k \cdot m_M(1-f)$ se obține pentru $\alpha=7^\circ31'$:

$$d_r = \frac{1}{f} = \frac{1}{1 - \frac{tg\alpha}{k \cdot m_M}} = \frac{1}{1 - \frac{0.132}{0.067 \cdot 2.8}} = 3.5$$

1.3 Dacă nu se cunoaște k , se identifică procesul pentru variația în treapta inversă a mării de execuție ($m=Q_a=0$) și pentru $\beta=3^\circ$ (figura 8.15b), rezulta:

$$- \text{domeniul de reglare: } d_r = \frac{tg\alpha}{tg\beta} + 1 = \frac{0.132}{0.0528} + 1 = 3.5$$

- și factorul de amplificare:

$$k = \frac{tg\beta}{m_M} \cdot d_r = \frac{tg\alpha}{m_M} \cdot \frac{d_r}{d_r - 1} = \frac{0.0528}{2.8} \cdot 3.5 = 0.067m^{-2}$$

2. Performanțele reglării sunt:

$$X_0 = 1 + \frac{T_m}{2} \cdot k \cdot m_M = 0.02 + \frac{3}{2} \cdot 0.067 \cdot 2.8 = 0.297m$$

$$\epsilon_s = \frac{T_m}{2} \cdot k \cdot m_M \cdot \frac{2-d_r}{d_r} = \frac{3}{2} \cdot 0.067 \cdot 2.8 \cdot \frac{2-3.5}{3.5} = -0.118m$$

$$t_{cr} = \frac{2i + T_m \cdot k \cdot m_M}{k \cdot m_M} \cdot \frac{d_r^2}{d_r - 1} = \frac{2 \cdot 0.02 + 3 \cdot 0.067 \cdot 2.8}{0.067 \cdot 2.8} \cdot \frac{3.5^2}{3.5 - 1} = 15.76s$$

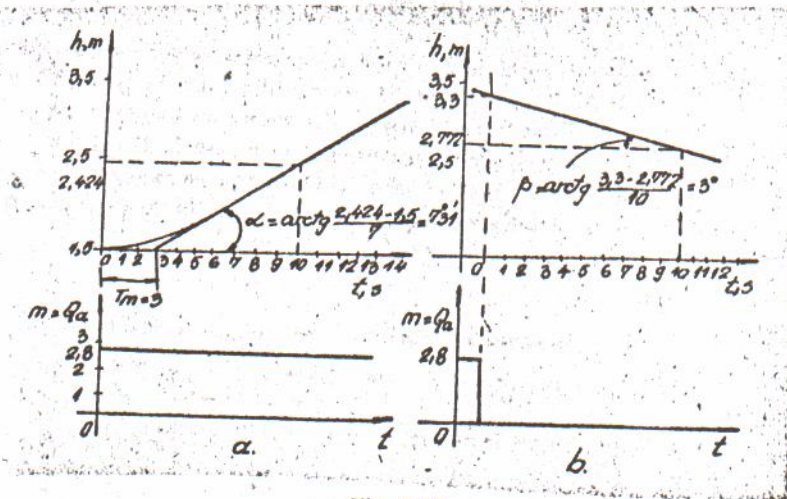


Fig. 8.15

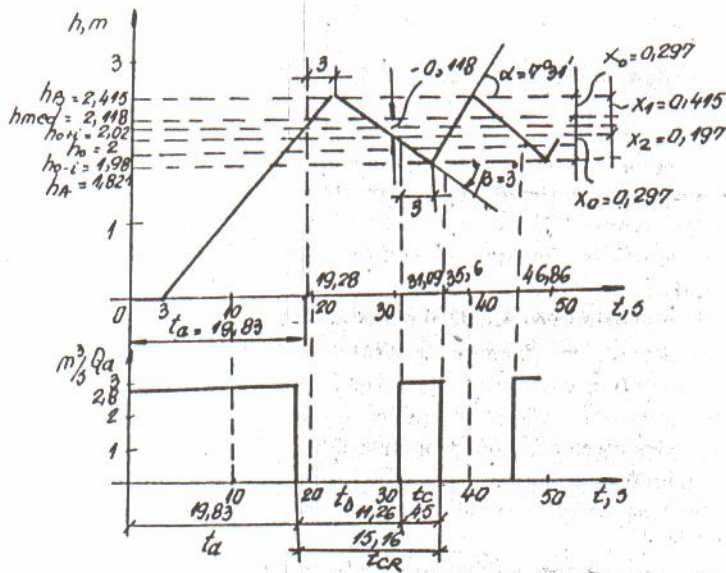


Fig.8.16

$$t_C = \frac{2i + T_m \cdot k \cdot m_M}{k \cdot m_M} \cdot \frac{d_r}{d_r - 1} = \frac{2 \cdot 0.02 + 3 \cdot 0.067 \cdot 2.8}{0.067 \cdot 2.8} \cdot \frac{3.5}{3.5 - 1} = 4.50s$$

$$t_D = \frac{2i + T_m \cdot k \cdot m_M}{k \cdot m_M} \cdot d_r = \frac{2 \cdot 0.02 + 3 \cdot 0.067 \cdot 2.8}{0.067 \cdot 2.8} \cdot 3.5 = 11.25s$$

$$t_A = T_m + \frac{i + h_0}{k \cdot m_M} \cdot \frac{d_r}{d_r - 1} = 3 + \frac{0.02 + 2}{0.067 \cdot 2.8} \cdot \frac{3.5}{3.5 - 1} = 18.30s$$

si rezulta curbele de reglare din figura 8.16.

3. In concluzie se pot preciza urmatoarele:

- nivelul apei in bazin oscileaza in jurul valorii medii:

$$h_{med} = h_0 + |\varepsilon_i| = 2 + 0.118 = 2.118m$$

cu abaterea superioara:

$$X_1 = X_0 + |\varepsilon_i| = 0.297 + 0.118 = 0.415m$$

si abaterea inferioara:

$$X_2 = X_0 - |\varepsilon_i| = 0.297 - 0.118 = 0.179m$$

intre doua limite:

$$\text{inferioara: } h_A = 1.821m \text{ si}$$

$$\text{superioara: } h_B = 2.415m;$$

- structura ciclului de reglare este avantajoasa, cu durata relativa de conectare:

$$C_R = \frac{t_C}{t_{CR}} \cdot 100 = \frac{4.5}{15.76} \cdot 100 = 28\%$$

ceea ce conduce la economie de energie;

- timpul de amorsare este mic ($t_A < 20s$), datorat rezervei mari de putere.

8.3 Lucrare practica

Intr-un cuptor electric cu rezistoare, reglarea temperaturii se realizeaza cu regulator bipozitional pe treptele de putere 100% (cuplare in triunghi) si 0% (decuplare). Se cunosc:

- caracteristicile dinamice si statice: $T_m = 1,5 + 0,1 \cdot n$ [min]; $T = 50 + 2 \cdot n$ [min];
- domeniul de insensibilitate al regulatorului $i = \pm 2^\circ C$;
- temperatura de referinta $\theta_0 = 900 + 5 \cdot n$ [$^\circ C$] (reglare cu consemn programat), la care se cere $X_0 < 25 + 0,5 \cdot n$ [$^\circ C$];
- temperatura de referinta variabila in domeniul $\theta_0 = 600 + 5 \cdot n \dots 900 + 5 \cdot n$ [$^\circ C$] (reglare cu consemn programat);
- posibilitatea de crestere a puterii, astfel ca θ_{max} sa creasca cu 50%.

Se cere verificarea posibilitatii de utilizare a regulatorului si calculul performantelor:

- performantele sistemului pentru reglarea la $\theta_0 = 900 + 5 \cdot n$ [$^\circ C$], $d_r = 2$;
- performantele sistemului pentru reglarea la $\theta_0 = 600 + 5 \cdot n \dots 900 + 5 \cdot n$ [$^\circ C$];
- performantele sistemului la $\theta_{max} = 2700 + 5 \cdot n$ [$^\circ C$] si $\theta_0 = 900 + 5 \cdot n$ [$^\circ C$].

Lucrarea Nr. 9

“Alegerea Diafragmei si Calculul Caracteristicii Statice a Debitmetrului cu Cadere Variabila de Presiune”

9.1 Elemente teoretice.

a) Caracteristica statica a debitmetrului la diferenta de presiune variabila este:

$$Q = \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{\gamma_f} \cdot [p_1 - p_2]} \quad [m^3/s] \quad (9.1)$$

unde:

- α - coeficient de debit;
- β - coeficient de rugozitate;
- ε - coeficient de expansiune;
- A_0 - sectiunea orificiului diafragmei, m^2 ;
- γ_f - greutatea specifica a fluidului, N/m^3 ;
- p_1, p_2 exprimate in N/m^2 .

Coeficientul α depinde de valoarea lui Re :

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \gamma_f}{g \cdot \eta_f} \quad (9.2)$$

unde:

- v - viteza fluidului, m/s ;
- D - diametrul conductei, m ;
- η_f - viscozitatea dinamica a fluidului, Ns/m^2 ;

si de raportul:

$$m = \frac{A_0}{A}$$

unde A este sectiunea conductei.

In tabelele 9.1, 9.2 si 9.3 se dau valorile greutatii specifice γ_f , densitatii ρ_f , viscozitatii dinamice η_f si cinematice δ_f pentru apa, aer si vapori la diverse temperaturi si la presiunea atmosferica normala pentru aer si vapori.

Tabel 9.1

Valorile $\gamma_f, \rho_f, \eta_f, \delta_f$ pentru apa

Temp. [°C]	0	10	20	40	60	80	100
γ_f [N/m^3]	10000	10000	9980	9920	9830	9720	9580
ρ_f [kg/m^3]	1019	1019	1017	1011	1002	991	978.5
η_f [$Pa \cdot s$]	1820	1330	1020	665	479	363	288
δ_f [m^2/s]	1.79	1.31	1.01	0.658	0.478	0.366	0.295

Tabel 9.2

Valorile γ_f , ρ_f , η_f , δ_f pentru aer la presiunea de 760mmHg

Temp. [°C]	-20	0	20	40	60	80	100	200	500
γ_f [N/m ³]	14	12.9	12	11.2	10.6	10	9.5	7.46	3.93
ρ_f [kg/m ³]	1.42	1.32	1.23	1.15	1.08	1.02	0.96	0.76	0.40
η_f [Ns/m ²]	16.5	17.5	18.5	19.5	20.4	21.3	22.2	26.6	38.68
δ_f [m ² /s]	11.6	13.3	15.1	16.9	18.9	20.9	23.1	35	96.7

Tabel 9.3

Valorile γ_f , ρ_f , η_f , δ_f pentru vapori la presiunea atmosferica

Temp. [°C]	100	150	200	250	300	350	400	450	500
γ_f [N/m ³]	5.98	5.24	4.67	4.21	3.84	3.53	3.26	3.04	2.84
ρ_f [kg/m ³]	0.61	0.58	0.48	0.43	0.39	0.36	0.33	0.31	0.29
η_f [Ns/m ²]	12.96	14.86	16.79	18.75	20.71	22.67	24.68	26.68	28.7
δ_f [m ² /s]	21.27	27.88	35.30	48.65	52.80	68	74.20	86.10	99.1

Caracteristica statica (9.1) se poate scrie in mai multe moduri echivalente:

- introducand in (9.1): $A_c = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4}$ se obtine:

$$Q = 3.478 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon \cdot d_0^2 \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\gamma_f}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (9.4)$$

unde: $3.478 = \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot g}$; d_0 in m;

- introducand in (9.4) d_0 in [mm] si calculand Q in [m³/h], se obtine:

$$Q = 0.01252 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon \cdot d_0^2 \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\gamma_f}} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (9.5)$$

unde: $0.01252 = 3.478 \cdot 3600 \cdot 10^{-6}$, d_0 in mm;

- pentru calcularea debitului masic Q [kg/h], relatia (9.5) se multiplica prin ρ_f [kg/m³] si se obtine:

$$Q = 0.01252 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon \cdot d_0^2 \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\gamma_f}} \cdot \rho_f \quad [\text{kg}/\text{h}] \quad (9.6)$$

In tabelele 9.4...9.9 sunt date valorile coeficientilor α , β si ε pentru diafragme si ajutaje.

Tabelul 9.4

Valorile α pentru diafragme

Valorile α in functie de valorile R_e si m								
m	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Pentru $Re > Re_1$	13000	25000	50000	75000	100000	125000	150000	175000
	0,598	0,602	0,615	0,634	0,661	0,696	0,742	0,84
Pentru $Re < Re_1$								
Re								
100000	0,598	0,602	0,615	0,634	0,661	0,697	0,745	0,811
50000	0,598	0,602	0,615	0,636	0,664	0,702	0,752	0,821
30000	0,598	0,602	0,617	0,638	0,668	0,708	0,760	-
20000	0,598	0,603	0,619	0,641	0,672	0,714	0,772	-
10000	0,599	0,605	0,622	0,646	0,681	0,729	0,788	-
8000	0,600	0,606	0,625	0,652	0,690	0,735	-	-
6000	0,601	0,608	0,628	0,658	0,702	-	-	-
5000	0,602	0,610	0,635	-	-	-	-	-

Tabelul 9.5

Valorile α pentru ajutaje normale

Valorile α in functie de valorile R_e si m								
m	0,5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65
Pentru $Re > Re_1$	70000	73000	81000	110000	170000	190000	200000	200000
	0,987	0,989	0,999	1,048	1,041	1,081	1,142	1,183
Pentru $Re < Re_1$								
Re								
100000	0,987	0,989	0,999	1,016	1,039	1,077	1,142	1,183
70000	0,987	0,989	0,999	1,015	1,037	1,073	1,142	-
50000	0,987	0,987	0,997	1,012	1,034	1,064	-	-
40000	0,984	0,983	0,995	1,010	1,030	-	-	-
30000	0,978	0,976	0,989	1,006	1,026	-	-	-
20000	0,953	0,964	0,979	0,998	1,019	-	-	-
10000	0,914	0,937	0,960	0,981	1,006	-	-	-

Tabel 9.6

Valorile α pentru diafragme si ajutaje

m	Diafragme	Ajutaje
0,05	0,598	0,987
0,10	0,602	0,989
0,15	0,608	0,993
0,20	0,615	0,999
0,25	0,624	1,007
0,30	0,634	1,016
0,35	0,646	1,028
0,40	0,661	1,041
0,45	0,677	1,059
0,50	0,696	1,081
0,55	0,717	1,108
0,60	0,742	1,142
0,65	0,770	1,183
0,70	0,804	-

Tabel 9.7

Coeficientul de rugozitate β pentru diafragme

D, [mm]	m							
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,75
50	1,024	1,023	1,023	1,024	1,025	1,026	1,028	1,031
100	1,019	1,016	1,014	1,014	1,014	1,015	1,016	1,018
200	1,011	1,008	1,005	1,004	1,004	1,005	1,006	1,007
300	1,006	1,003	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabel 9.8

Coeficientul de rugozitate β pentru ajutaje normale

D, [mm]	m							
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65
50	1,000	1,000	1,000	1,000	1,003	1,008	1,014	1,017
100	1,000	1,000	1,000	1,000	1,002	1,005	1,010	1,012
200	1,000	1,000	1,000	1,000	1,001	1,002	1,005	1,007

Tabel 9.9

Corectia de expansiune $1-\epsilon$, pentru $p_1-p_2/p_1=0,01$

Tipul strangularii	c_p/c_v	m						
		0,0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Diafragma	1,31	0,033	-	0,036	-	0,041	0,044	0,049
	1,41	0,031	-	0,033	-	0,038	0,041	0,045
Ajutaj	1,31	0,062	0,064	0,068	0,075	0,082	0,098	-
	1,41	0,056	0,059	0,063	0,068	0,076	0,090	-

In figura 9.1 se prezinta o varianta constructiva de ajutoraj (a) si de diafragma (b), indicandu-se dimensiunile principale ale strangularii; D-diametrul interior al conductei; d_0 -diametrul orificiului diafragmei sau al ajutorajului.

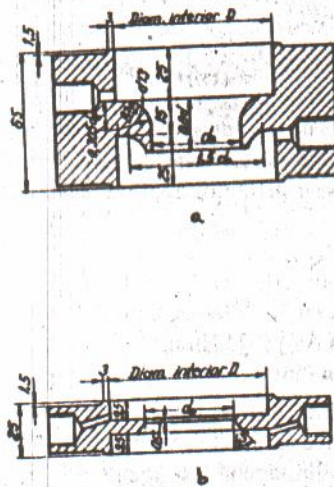


Fig. 9.1

9.2 Exemple de calcul

a. Pe o conducta de diametru $D=100\text{mm}$ se scurge un debit de aer $Q=10\text{m}^3/\text{min}$, la 20°C si presiune normala.

Daca se masoara acest debit cu o diafragma si un manometru in U cu apa, se cer:

- diametrul d_0 al orificiului diafragmei;
- diferenta de presiune Δp [N/m^2] in manometru pentru valoarea d_0 rezultata;

1) se alege $m=0,4$ si rezulta:

$$d_0 = D \cdot \sqrt{m} = 100 \sqrt{0,4} = 63,24\text{mm}$$

2) se determina viteza fluidului in conducta:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 10}{\pi \cdot 0,1^2 \cdot 60} = 21,22\text{m/s}$$

si pentru $\gamma_f=12\text{N/m}^3$ si $\eta_f=18,5 \cdot 10^{-6}\text{Ns/m}^2$ rezulta:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot D \cdot \gamma_f}{g \cdot \eta_f} = \frac{21,22 \cdot 0,1 \cdot 12}{9,81 \cdot 18,5 \cdot 10^{-6}} = 1,4 \cdot 10^5$$

3) din tabelele 9.4, 9.7 si 9.9 rezulta pentru $m=0,4$ valorile:

$$\alpha=0,661; \quad \beta=1,014; \quad \epsilon=0,965;$$

4) aplicand relatia (9.5):

$$10 \cdot 60 = 0,01252 \cdot 0,661 \cdot 1,014 \cdot 0,965 \cdot 63,24^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{12}} \sqrt{p_1 - p_2} = 9,28 \cdot \sqrt{p_1 - p_2}$$

se obtine:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \left(\frac{10 \cdot 60}{9,28} \right)^2 = 4180\text{N/m}^2 = 418\text{mmCA}$$

5) in concluzie, cu o diafragma cu $m=0,4$ ($d_0=63\text{mm}$) pe conducta cu $D=100\text{mm}$, se poate masura un debit de aer $Q=10\text{m}^3/\text{min}$, cu un manometru cu apa, diferenta maxima a nivelului apei din bratele tubului in forma de U fiind $\Delta h_{\text{max}}=418\text{mm}$.

b. Se cere debitul de aer la 40°C si presiunea normala care se poate masura pe o conducta cu $D=200\text{mm}$, cu o diafragma cu $m=0,3$ si un manometru in U cu mercur pentru $\Delta h_{\text{max}}=150\text{mm}$.

1) diametrul orificiului diafragmei este, pentru $m=0,3$:

$$d_0 = D \cdot \sqrt{m} = 200 \cdot \sqrt{0,3} = 109,54\text{mm}$$

2) pentru ca nu se cunoaste debitul, nu se poate calcula viteza v si Re ; atunci, se determina valoarea α din tabelul 9.6, rezultand pentru $m=0,3$ valoarea $\alpha=0,634$. Din tabelele 9.7 si 9.9 rezulta: $\beta=1,004$ si $\epsilon=0,967$.

3) aplicand relatia (9.5) se obtine (pentru $\gamma_f=11,2\text{N/m}^3$, din tabelul 9.2):

$$3600 \cdot Q = 0,01252 \cdot 0,634 \cdot 1,004 \cdot 0,967 \cdot 109,5^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{11,2}} \sqrt{p_1 - p_2}$$

si:

$$Q = 0.00794 \cdot \sqrt{p_1 - p_2} \text{ [m}^3/\text{s]}$$

Diferența de presiune Δp este:

$$\Delta p = (p_1 - p_2) \cdot \frac{10^3}{\gamma_{Hg}} \text{ [mmcolHg]}$$

unde: $\gamma_{Hg} = 135.4 \cdot 10^3 \text{ N/m}^3$.

Din condiția $\Delta p = 150 \text{ mmcolHg}$ se obține:

$$p_1 - p_2 = 150 \cdot 135.4 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} = 20310 \text{ N/m}^2$$

și debitul care poate fi măsurat este:

$$Q = 0.00794 \cdot \sqrt{20310} = 1.13155 \text{ m}^3/\text{s}$$

c. Pe o conductă cu diametrul $D=150 \text{ mm}$ se scurge un debit de aer $Q=900 \text{ m}^3/\text{h}$ la 60°C și presiune normală. Se măsoară debitul cu o diafragmă și un element elastic cu burduf. Se cer:

- dimensiunile diafragmei;
- desenul la scară al diafragmei;
- diferența de presiune maximă Δp a manometrului cu burduf.

1) pentru $m=0,5$ rezultă:

$$d_0 = D \cdot \sqrt{m} = 150 \cdot \sqrt{0,5} = 106 \text{ mm}$$

2) cunoscând $d_0=106 \text{ mm}$ și $D=150 \text{ mm}$, se desenează diafragma la scară, după exemplul din figura 9.16, celelalte dimensiuni fiind date.

3) viteza fluidului este:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 900}{\pi \cdot 0,15^2} \cdot \frac{1}{3600} = 14,14 \text{ m/s}$$

4) cu datele din tabelul 9.2 ($\gamma_f=10,6 \text{ N/m}^3$ și $\eta_f=20,4 \cdot 10^{-4} \text{ Ns/m}^2$), rezultă:

$$R_e = \frac{v \cdot D \cdot \gamma_f}{\rho \cdot \eta_f} = \frac{14,14 \cdot 0,15 \cdot 10,6}{9,81 \cdot 20,4 \cdot 10^{-4}} = 1,124 \cdot 10^4$$

din tabelele 9.4, 9.7 și 9.9 rezultă pentru $m=0,5$:

$$\alpha = 0,6965 \quad \beta = 1,010 \quad \epsilon = 0,962$$

5) aplicând relația (9.5) se obține:

$$900 = 0,01252 \cdot 0,6965 \cdot 1,010 \cdot 0,962 \cdot 106^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{10,6}} \cdot \sqrt{p_1 - p_2} = 29,2 \cdot \sqrt{p_1 - p_2} \text{ [m}^3/\text{h]}$$

rezultând:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \left(\frac{900}{29,2} \right)^2 = 950 \text{ N/m}^2$$

d. Se cere determinarea debitelor de apă Q la 20°C ce pot fi măsurate pe o conductă cu $D=50 \text{ mm}$, cu ajutorul unor diafragme cu $m=0,2$ și $m=0,6$ și un manometru în U cu apă, pentru $\Delta h_{\max}=500 \text{ mm}$.

1) diametrul orificiului diafragmei este pentru $m=0,2$:

$$d_0 = D \cdot \sqrt{m} = 50 \cdot \sqrt{0,2} = 22,36 \text{ mm}$$

și pentru $m=0,6$:

$$d_0 = D \cdot \sqrt{m} = 50 \cdot \sqrt{0.6} = 38.72 \text{ mm}$$

2) din tabelul 9.6 se aleg valorile lui α :

pentru $m=0,2$: $\alpha=0,615$

pentru $m=0,6$: $\alpha=0,742$

si se considera: $\beta=1$ (conducta lisa) si $\epsilon=1$ (apa)

3) debitul rezulta din formula (9.5):

$$Q = 0.01252 \cdot \alpha \cdot d_0^2 \cdot \sqrt{p_1 - p_2} \cdot 10^{-3}$$

unde: $\Delta p = p_1 - p_2$ in mm col apa.

Pentru $m=0,2$:

$$Q = 0.01252 \cdot 0.615 \cdot 22.36^2 \cdot \sqrt{500 \cdot 10^{-3}} = 2.63 \text{ m}^3 / \text{h}$$

si pentru $m=0,6$:

$$Q = 0.01252 \cdot 0.742 \cdot 38.7^2 \cdot \sqrt{500 \cdot 10^{-3}} = 9.85 \text{ m}^3 / \text{h}$$

4) In concluzie, cu cat valoarea m este mai mare, se poate masura un debit Q mai mare pentru aceeasi diferenta de presiune Δp , sau altfel spus, se poate masura acelasi debit pentru diferente de presiune mai mici.

5) **Observatie:** In relatia debitului Q , γ_f este greutatea specifica a fluidului al carui debit se masoara, deci, in acest caz, a apei la 20°C ($\gamma_f = 9980 \text{ N/m}^3$, vezi tabelul 9.1). In cazul masurarii diferentei de presiune Δp cu un manometru de asemenea cu apa, relatia (9.5) devine:

$$Q = 0.01252 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \epsilon \cdot d_0^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\gamma_{\text{apa}}}} \cdot \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{\gamma_f} \cdot \gamma_{\text{apa}} \cdot 10^{-3}} \quad [\text{m}^3 / \text{h}]$$

unde: $\Delta p = p_1 - p_2$ in mm c.a., deci:

$$Q = 0.01252 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \epsilon \cdot d_0^2 \cdot \sqrt{(p_1 - p_2) \cdot 10^{-3}} \quad [\text{m}^3 / \text{h}]$$

9.3. Lucrare practica

Pe o conducta cu diametrul $D = 100 + 10 \cdot n$ [mm] se scurge un debit de aer $Q = 800 + 10 \cdot n$ [m^3/h] la 40°C si presiune normala. Debitul se masoara cu o diafragma cu $m = 0,4$ si un element elastic cu membrana.

Se cer:

1. Dimensiunile diafragmei.
2. Desenul la scara al diafragmei.
3. Diferenta de presiune maxima in elementul elastic.
4. La aceeasi diferenta de presiune de la pct. 3, valoarea debitului de apa la 20°C care se poate masura.

Bibliografie

1. I. Oprescu – Automatisation des processus metallurgiques: Exercices, Lubumbashi, Zaire, 1977.
2. I. Vircolacu, I. Oprescu, C. Balescu, V. Mirca, A. Semenescu – Controlul, comanda si reglarea automata a parametrilor proceselor metalurgice. Indrumar de laborator, vol. I, UPB, 1993.
3. A. Semenescu, I. Oprescu, I. Vircolacu, C. Balescu, V. Mirca – Controle et regulation automatique des variables des processus. Travaux de laboratoire et problemes. UPB, 1994.
4. E. Scheiber, D. Lixandroi – MathCAD - Prezentare si probleme rezolvate. Ed. Tehnica, 1994.
5. I. Oprescu, A. Semenescu, I. Vircolacu, C. Balescu, V. Mirca -- Controlul si reglarea automata a variabilelor proceselor metalurgice. Lucrari de laborator si probleme, vol. II. UPB, 1996