

# 1. STUDIUL COMPORTĂRII DINAMICE A UNUI SCHIMBĂTOR DE CĂLDURĂ

## 1. Scopul lucrării

Studiul comportării dinamice a unui schimbător de căldură.

## 2. Considerații teoretice

Comportarea dinamică a elementelor automatizate din industria chimică depinde de caracteristicile fizico-chimice ale procesului tehnologic, de regimul de funcționare și de particularitățile constructive ale instalației. Majoritatea elementelor automatizate din tehnologia chimică au caracteristici statice neliniare. În acest caz, constantele de timp și coeficienții de transfer nu sunt constante ci depind de încărcarea instalației. În asemenea condiții, ecuațiile diferențiale liniare, folosite pentru exprimarea proprietăților dinamice, pot fi considerate cu coeficienți constanți doar în cadrul unor variații mici ale mărimilor de intrare și de ieșire.

Datorită numărului mare de parametri care influențează procesele fizico-chimice din instalații și a complexității constructive ale acestora, deducerea ecuației diferențiale pe cale analitică, pornind de la datele funcționale și constructive ale instalației este o problemă dificilă. În aceste situații este de preferat studiul experimental al comportării dinamice. Pentru aceasta se determină răspunsul elementului automatizat la un semnal de intrare standard, iar din datele experimentale obținute se deduce un **sistem ipotetic** format dintr-o anumită combinație de elemente de reglare simple, care are o comportare dinamică cât mai apropiată de cea a instalației investigate.

Principiul studiului experimental al comportării la transfer poate fi redat printr-o experiență mentală, în care se leagă în paralel elementul automatizat propriu-zis cu sistemul de elemente de reglare simple a cărui comportare la transfer urmează să fie atribuită elementului automatizat, ca în figura 1. În aceste cazuri, sistemul ipotetic este format din  $n$  elemente proporționale de ordinul I legate în serie.

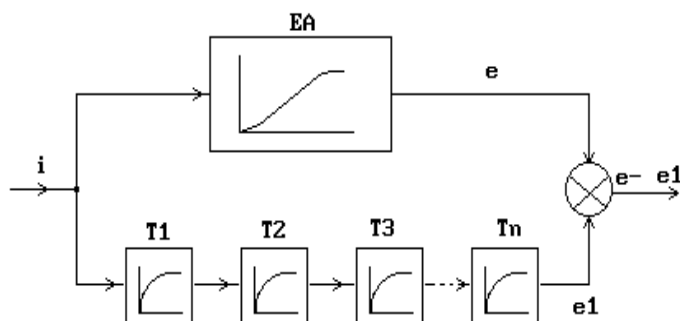


Figura 1. Sistemul ipotetic al unui element automatizat

Aproximarea va fi cu atât mai bună cu cât diferența dintre mărimile de ieșire ( $e - e_1$ ) este mai mică.

În majoritatea cazurilor se urmărește răspunsul la semnal treaptă, deoarece acesta se poate determina repede și cu mijloace experimentale simple.

Variația în salt a variabilei de intrare, urmată de păstrarea noii valori se numește **semnal treaptă** (figura 2a). Variația mărimii de ieșire după o variație în salt a mărimii de intrare constituie **răspunsul la semnal treaptă**.

În tehnologia chimică, majoritatea elementelor automatizate se comportă ca elemente proporționale de ordin superior care au răspunsul la semnal treaptă asemănător cu cel redat în figura 2b.

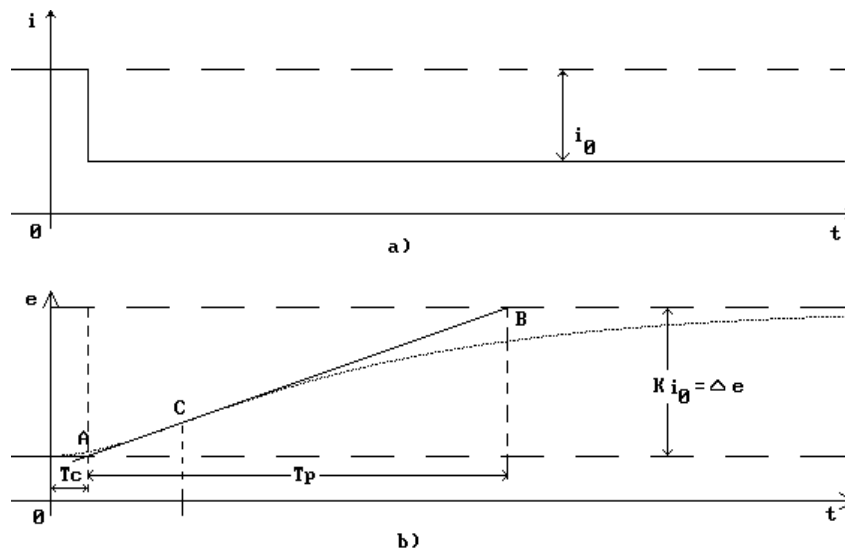


Figura 2. Răspunsul la semnal treaptă a elementelor proporționale de ordin superior

În practică, pentru a studia experimental comportarea dinamică folosind răspunsul la semnal treaptă, se parcurg succesiv următoarele etape :

1. Determinarea răspunsului la semnal treaptă a elementului automatizat.
2. Găsirea sistemului de elemente de reglare simple care este adecvat pentru aproximarea comportării la transfer a elementului automatizat.
3. Determinarea parametrilor elementelor de reglare care compun sistemul ipotetic.
4. Verificarea dacă comportarea dinamică a sistemului ipotetic determinat se apropie în măsură suficientă de cea a elementului automatizat în cauză.

În cadrul etapei a doua, o posibilitate constă în aceea de a presupune că sistemul ipotetic considerat este alcătuit dintr-un număr de  $n$  elemente proporționale de ordinul întâi cu constante de timp egale  $T$  și legate în serie.

Ecuția diferențială a acestui sistem este de forma :

$$T^n \cdot e^{(n)}(t) + n \cdot T^{n-1} \cdot e^{(n-1)}(t) + \dots + n \cdot T \cdot e'(t) + e(t) = k \cdot i(t) \quad (1)$$

Pentru determinarea experimentală a mărimilor  $n$  și  $T$  din răspunsul la semnal treaptă al elementului automatizat proporțional de ordin superior, s-au elaborat două metode și anume metoda tangentei și metoda rapoartelor indicative. Metoda rapoartelor indicative ambele este expusă în Anexa 1.

### 3. Descrierea instalației experimentale

Instalația experimentală este prezentată în figura 3 și este compusă din următoarele elemente:

- un schimbător de căldură tip "țeavă în țevă" cu funcționare în contracurent;
- preîncălzitor electric pentru aer ( $R_i$ );
- stabilizator de tensiune, ce permite compensarea fluctuațiilor de tensiune ale rețelei;
- 4 termocuple de tip J în calitate de elemente sensibile;
- un regulator de temperatura PID electronic (model Omron E5CK);
- un element de execuție (EE) (valva solenoid, Burkert – tip 6022);
- calculator.

Dispozitivul experimental are ca parte principală un schimbător de căldură tip "țeavă în țevă" cu funcționare în contracurent, element automatizat a cărui comportare la transfer se studiază. Schimbătorul de căldură urmărește răcirea unui curent de aer cald, care trece prin țeava interioară, cu ajutorul unui curent de apă, trecută printre țevi. Mărimea reglată (mărime de intrare – variabilă dependentă) în acest caz este temperatura aerului la ieșirea din schimbător, debitul apei de răcire constituind mărimea de execuție.

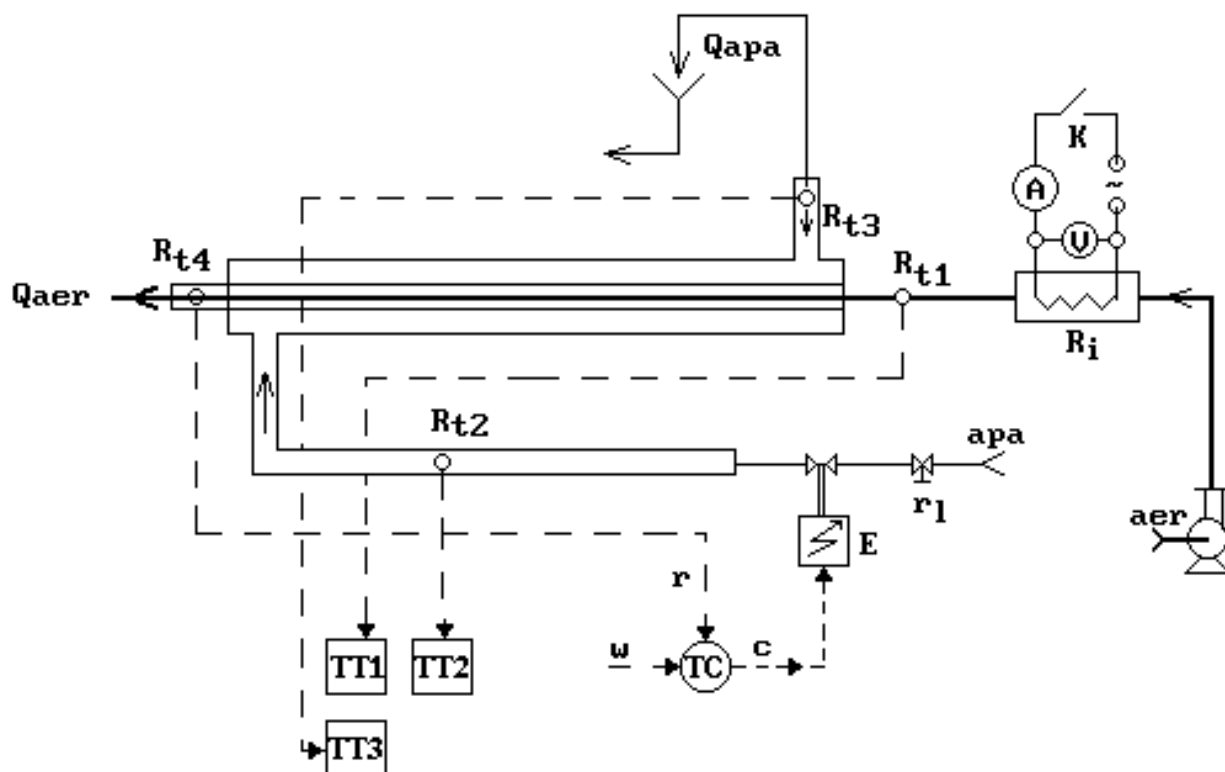


Figura 3. Dispozitivul experimental

Dispozitivul experimental cuprinde, de asemenea, un preîncălzitor electric pentru aer ( $R_i$ ). Pentru a măsura și regla puterea de încălzire a aerului, preîncălzitorul electric este prevăzut cu un voltmetru  $V$  un ampermetru  $A$  și un comutator  $K$  de selecție putere (tensiune).

Alimentarea preîncălzitorului se face de la un stabilizator de tensiune, ceea ce permite compensarea fluctuațiilor de tensiune ale rețelei.

Temperaturile se măsoară cu ajutorul unor termocuple de tip  $J$ :  $R_{t1}$ ,  $R_{t4}$  – instalate la intrarea și ieșirea aerului, respectiv  $R_{t2}$ ,  $R_{t3}$  – instalate la intrarea și ieșirea apei. Termocuplul  $R_{t4}$ , care urmărește variațiile mărimii de ieșire, are rolul de element sensibil (ES) al sistemului de reglare automată a temperaturii și este conectat direct la un regulator de temperatura PID electronic (model Omron E5CK). Semnalul astfel primit de regulator are rolul de mărime de reacție ( $r$ ) și este comparat cu mărimea de referință ( $w$ ) introdusă de către utilizator. Regulatorul prelucrează acest rezultat și generează mărimea de comandă ( $c$ ) sub forma unui semnal electric 0 – 10 V.

Mărimea de comandă este aplicată la intrarea elementului de execuție ( $E$ ) (valva solenoid, Burkert – tip 6022) aflat pe conducta de alimentare cu apă de răcire a schimbătorului de căldură. Astfel, ventilul de reglare al elementului de execuție variază mărimea de execuție ( $m$ ) care este debitul de apă de răcire. Debitul apei de răcire ( $Q_{ap\grave{a}}$ ) se măsoară cu ajutorul unui cilindru gradat și a unui cronometru.

Regulatorul montat în sistemul de reglare automată a temperaturii este prevăzut cu un soft de comunicație și configurare (Sys-config versiunea 2.1) care permite monitorizarea parametrilor (mărime de referință –  $w$ , mărime de reacție –  $r$  și mărime de comandă –  $c$ ) și salvarea valorilor acestora sub formă de fișiere Excel.

Temperaturile în celelalte trei puncte de măsurare ( $R_{t1}$ ,  $R_{t2}$ ,  $R_{t3}$ ) sunt urmărite prin intermediul unor traductoare de temperatură (model TTM-004):  $TT_1$ ,  $TT_2$ ,  $TT_3$ . Cu ajutorul softului de comunicație ZEP Monitor v1.2.3, datele pot fi înregistrate sub formă de fișiere Excel.

#### 4. Modul de lucru

Pentru efectuarea determinărilor experimentale se parcurg etapele:

1. Se deschide robinetul de alimentare cu apă a vasului de preaplin.
2. Se conectează încălzirea (autotransformatorul și comutatorul K în poziția corespunzătoare unei tensiuni de ieșire de 200 V).
3. Se conectează regulatorul de temperatură și traductoarele. Se deschide și configurează softul Sys-config versiunea 2.1. Se fixează o anumită valoare a mărimii de referință ( $w = 35^{\circ}\text{C}$ ). Se realizează o autoacordare a regulatorului.
4. Se așteaptă instalarea regimului staționar (temperatura constantă în toate punctele de măsurare). Se determină valoarea debitului de apă (cu cilindru gradat și cronometru).
5. Se mărește brusc mărimea de referință  $w$  a regulatorului ( $w = 40\text{-}45^{\circ}\text{C}$ ). Acesta va comanda practic instantaneu scăderea debitului (semnal treaptă).
6. Se urmărește variația temperaturii la ieșirea din schimbător înregistrată de soft. Variația temperaturii în celelalte puncte, indicată de traductoarele de temperatură TTM-004, se urmărește prin efectuarea de citiri la intervale de 30 de secunde. Când, spre sfârșitul regimului tranzitor, variațiile de temperatură devin din ce în ce mai mici, intervalele de citire vor fi alese corespunzător mai mari (1 min. respectiv 3 min.).
7. Se determină debitul apei de răcire ca la punctul 4.

#### 5. Prelucrarea și interpretarea rezultatelor

1. Se reprezintă grafic variația temperaturii aerului la ieșirea din schimbător ( $R_{t4}$ ) în funcție de timp și, aplicând metoda rapoartelor indicative prezentată în Anexa 1, se determină ordinul  $n$  și constantele de timp  $T^i$  ale sistemului ipotetic care este indicat pentru aproximarea comportării la transfer a schimbătorului de căldură. Exactitatea cu care sistemul ipotetic reflectă comportarea la transfer a schimbătorului de căldură studiat se apreciază comparând răspunsul la semnal treaptă determinat experimental cu cel calculat în baza relației :

$$e(t) = k \cdot i_0 \left( 1 - \varepsilon^{-t/T} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \frac{t^i}{i! \cdot T^i} \right); \quad 0! = 1 \quad n! = 1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot (n-1) \quad (2)$$

Relația (2) exprimă răspunsul la semnal treaptă a sistemului ipotetic și se obține prin integrarea ecuației (1) considerând  $i(t) = i_0$ .

Dacă sistemul conține pe lângă  $n$  elemente proporționale de ordinul I și un element de întârziere pură, relația (2) se modifică (pentru  $t > T_m$ ) în felul următor :

$$e(t) = k \cdot i_0 \left( 1 - \varepsilon^{-(t-T_m)/T} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(t-T_m)^i}{i! \cdot T^i} \right) \quad (3)$$

Dacă **sistemul ipotetic obținut rezultă de ordinul 2, cu constante de timp neegale**, răspunsul la semnal treaptă se calculează cu expresia:

$$e(t) = k \cdot i_0 \cdot \left( 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \varepsilon^{-t/T_1} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \varepsilon^{-t/T_2} \right) \quad (4)$$

în care :  $T_1 = T$  și  $T_2 = b \cdot T$ .

2. Pe baza modelului ipotetic dedus, se calculează valoarea mărimii de ieșire pentru diverse valori ale variabilei timp, și se reprezintă în graficul care redă răspunsul la semnal treaptă. Se calculează diferența între valoarea reală și valoarea ipotetică pentru verificarea exactității cu care sistemul adoptat reflectă comportarea dinamică a schimbătorului de căldură.

## Anexa 1. Metoda rapoartelor indicative

Din caracteristica de răspuns la semnal treaptă se determină în felul indicat în figura 1, timpul necesar mărimii de ieșire pentru a efectua 10%, 30%, 50%, 70% și 90% din variația totală. Valorile respective ale timpului se notează cu  $t_1$ ,  $t_3$ ,  $t_5$ ,  $t_7$  și  $t_9$ .

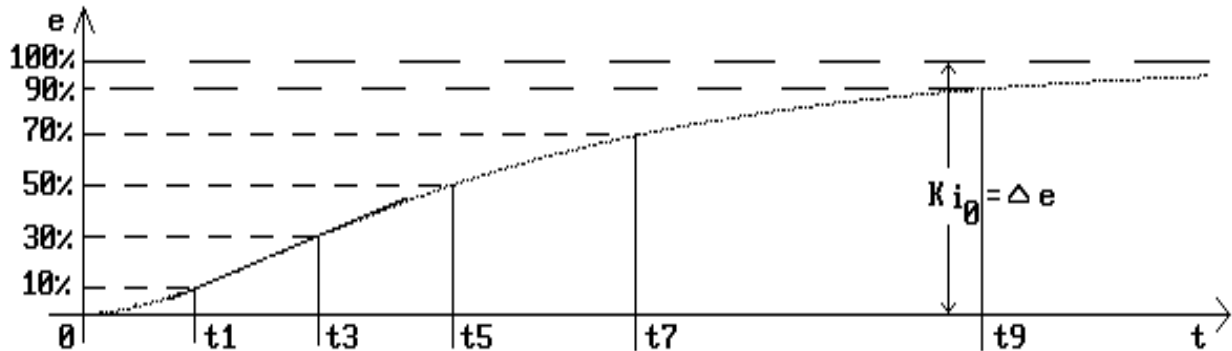


Figura 1. Determinarea rapoartelor indicative

Se calculează rapoartele indicative  $t_1/t_9$ ,  $t_1/t_7$ ,  $t_1/t_5$ ,  $t_1/t_3$ ,  $t_3/t_7$  și  $t_3/t_5$  și în baza lor folosind graficul din figura 2 se **determină ordinul sistemului (n)**. Dacă răspunsul la semnal treaptă a fost corect determinat, toate rapoartele trebuie să ducă aproximativ același n.

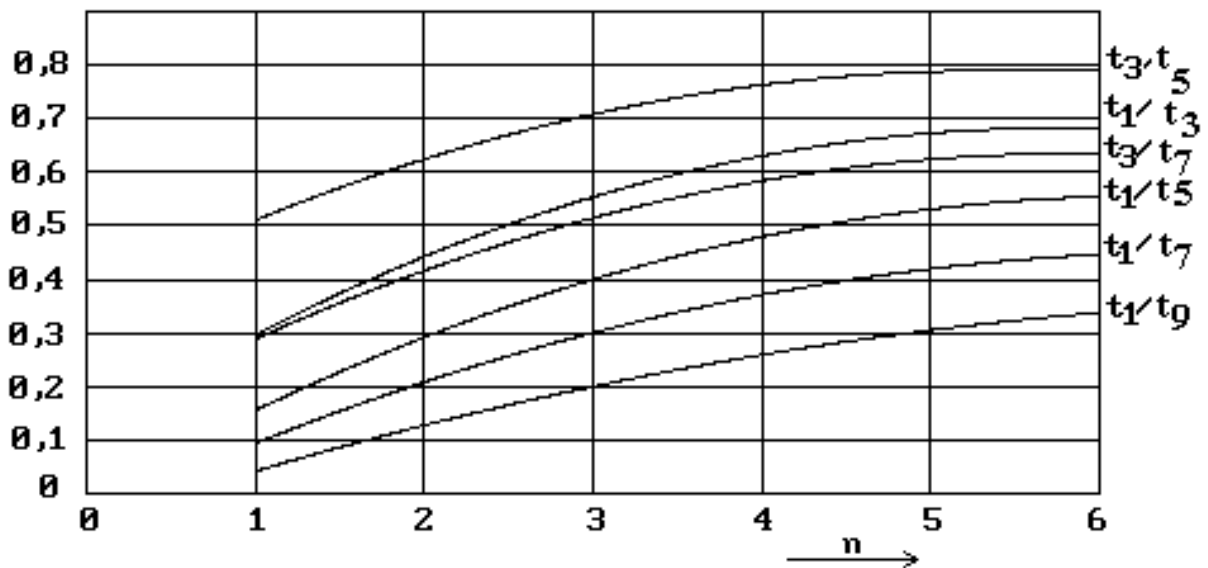


Figura 2. Determinarea lui n

Dacă rapoartele indicative corespund unui ordin n mai mic decât 2, elementul trebuie totuși aproximat printr-un sistem de ordinul doi, însă cu constante de timp diferite. Cele două constante de timp se notează:

$$T_1 = T \text{ și } T_2 = b \times T.$$

Pentru determinarea coeficientului b se folosește dependența lui de rapoartele indicative, redată în figura 3, iar valoarea constantei de timp T se găsește în figura 4, în baza valorii obținută pentru b.

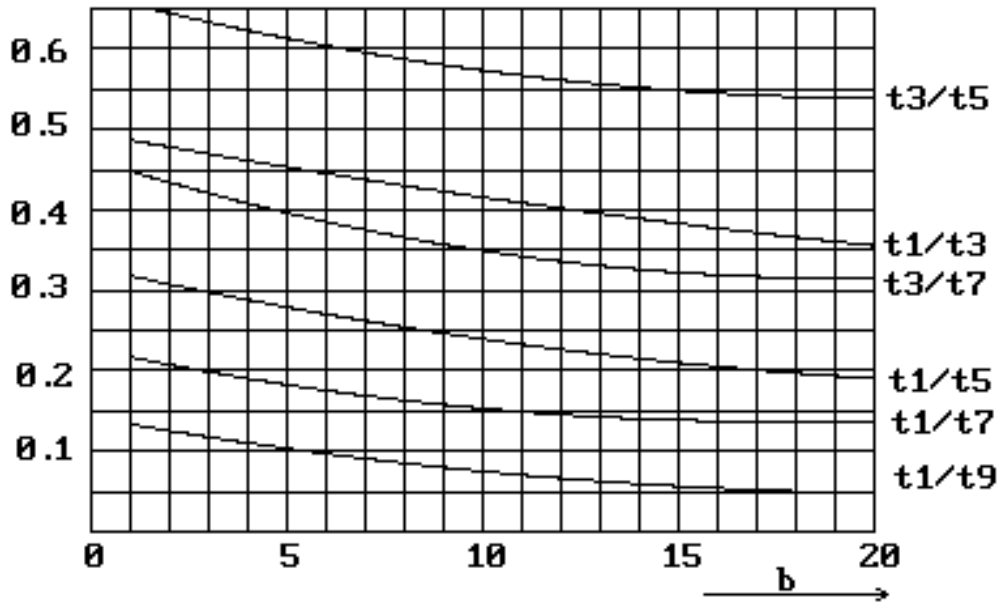


Figura 3. Determinarea lui b

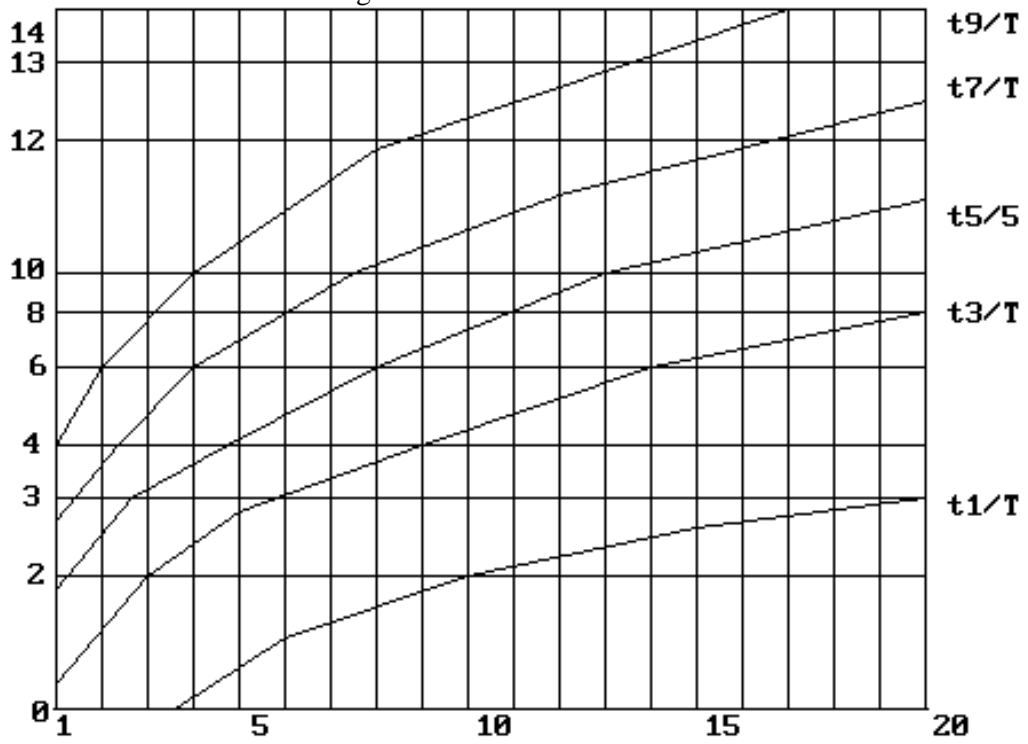


Figura 4. Determinarea lui T