

## EVOLUȚIA ÎN TIMP A PUTERII CONSUMATE DE UN CUPTOR ELECTRIC DE TOPIRE A STICLEI

### EVOLUTION OF CONSUMED POWER FOR A GLASS MELTING ELECTRIC FURNACE VERSUS TIME

The paper herein exhibits the methodology of obtaining an explicit relationship meant to describe the evolution of the power consumed by a glass melting electric furnace, versus time. These relationships resulted by the using of the smallest squares and of Cebîșev polynoms method are submitted to a statistical analyse in concordance with the experimental data drawn on a real furnace. Therefore, a new correlation indicator is determined based on two statistical classic indicators in view of establishing the optimum relationship.

### ЭВОЛЮЦИЯ ВО ВРЕМЕНИ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ПЛАВЛЕНИЯ СТЕКЛА

В этой статье указывается методология получения явного отношения описывающего эволюцию во времени потребляемой мощности электрической печи для плавления стекла. Полученные отношения использованием метода наименьших квадратов и полиномов Чебышев подвергаются статистическому анализу соответствия с экспериментальными данными реальной печи. В этом контексте определяется новый указатель корреляции исходя от двух классических статистических указателей для предельного оптимального отношения.

Conducerea optimală a cuptorului de topire a sticlei asigură, în general, premisele pentru obținerea topiturii de calitate, cu un consum energetic minim. Pentru aceasta se impune cunoașterea influențelor pe care o serie de parametri termotehnologici — considerați ca variabile independente — le au asupra mărimilor de performanță ale cuptorului de topire (productivitate, consum de energie etc.). În acest context prezintă interes urmărirea influenței pe care variabila timp o are asupra unor indicatori termotehnologici ai cuptoarelor.

În literatura de specialitate de la noi și din străinătate sînt indicate relații statistice care corelează consumul de combustibil cu durata de funcționare a cuptoarelor vană [1, 2], utilitatea acestora din punct de vedere tehnico-economic fiind evidentă.

În acest articol se prezintă metodologia obținerii unor relații statistice care să illustreze evoluția în timp a puterii necesare pentru obținerea sticlei într-un cuptor electric de topire.

#### 1. Caracterul dinamic al parametrilor energotehnologici ai cuptoarelor electrice

Într-o formă implicită, dependența dintre un parametru  $y$  de performanță al cuptorului de topire și parametri independenți ai procesului  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , se exprimă sub o formă generală cu relația:

$$(\text{optim}) y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

în care:  $n$  este numărul de variabile (acestea pot fi: natura chimică și compoziția granulometrică a amestecului de materii prime, procentul de cioburi din șarjă etc.).

Relația (1) este valabilă pentru un regim staționar de funcționare și relevă doar aspectul static al funcționării cuptorului. În realitate, această relație trebuie scrisă sub forma:

$$(\text{optim}) y_{\text{opt}} = f(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), t) \quad (2)$$

Relația (2) relevă caracterul dinamic al corelației variabilă de performanță — variabile independente ale procesului. Ea surprinde un dublu aspect al influenței

timpului  $t$ : pe de o parte valorile efective (la un moment dat) ale parametrilor  $x_1, x_2, \dots, x_n$  sînt variabile în timp datorită acțiunii unor influențe cu caracter aleator; pe de altă parte, funcția de performanță poate să evolueze în timp într-un mod sistematic.

Pentru un cuptor electric de elaborare a sticlei o mărime de performanță care prezintă un interes deosebit este consumul de energie necesar asigurării unei productivități impuse de sticlă cu o calitate prestabilită.

Din datele practice de exploatare tehnologică este cunoscut faptul că de-a lungul unei campanii consumul orar de căldură al unui cuptor vană avînd încălzire cu combustibil crește în timp. O variație asemănătoare este de așteptat și pentru consumul de putere al unui cuptor electric. Principala cauză o constituie creșterea pierderilor de căldură prin pereți, în mediul ambiant, datorită corodării refractarelor. Această creștere este dificil de a fi stabilită analitic, dar poate fi estimată pe cale statistică.

Importanța evidențierii timpului asupra principalelor indicatori de funcționare ai cuptoarelor electrice rezidă în stabilirea consumului specific de energie normat (pentru o perioadă dată), furnizînd date concrete pentru conducerea efectiv optimală a cuptorului în timp.

În mod concret se furnizează o bază efectivă pentru:

— stabilirea exactă a necesarului de putere referitor la campania cuptorului electric de topire;

— obținerea de informații privind încărcarea electrică a electrozilor, practic imposibil de obținut pe alte căi;

— realizarea bilanțurilor energetice normate ale cuptorului, în diferite perioade de exploatare.

În acest context pare util de a stabili o dependență cantitativă explicită între puterea consumată de un cuptor electric și durata lui de funcționare, mai ales că, după datele avute la dispoziție de autori, o astfel de relație nu este raportată în literatura de specialitate.

Obiectul studiului l-a constituit un cuptor electric vertical, de tip SORG, în funcțiune la „ROMLUX”. Cuptorul prezentat de principiu în figura 1, are o suprafață de topire de circa 8,5 m<sup>2</sup> și produce o sticlă silico-calco-sodică de tip magnezian. Cuptorul este prevăzut cu 24 de electrozi de molibden plasați pe două nivele.

## 2. Corelarea statistică a variabilelor

Pe cuptorul electric prezentat în figura 1 s-au prelevat zilnic date privind productivitatea absolută, consumul de energie etc., calculându-se valorile medii zilnice pe cele trei schimburi pe o perioadă de 80 de

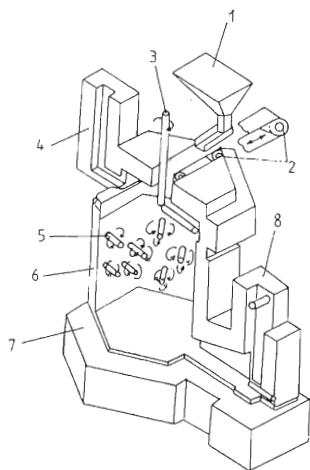


Fig. 1 - Schița de principiu a cuptorului electric analizat:  
Principle diagram of the electric furnace analysed:

1 -- pilnic de alimentare, supply funnel; 2 -- bandă de alimentare, supply band; 3 -- dispozitiv de uniformizare a amestecului de materii prime, homogenizing device of raw material mixture; 4 -- canal de evacuare a gazelor, gas outlet duct; 5 -- electrozi, electrodes; 6 -- bazin de topire, melting basin; 7 -- vatra cuptorului, furnace hearth; 8 -- bazin de lucru, operating basin.

săptămâni de la punerea lui în funcțiune. În continuare se vor face referiri în special asupra consumului energetic, considerat, în contextul actual, ca unul dintre cei mai importanți indicatori de performanță ai cuptorului.

În figura 2 se ilustrează evoluția în timp a puterii consumate  $N$ , valorile considerate reprezentând mărimi

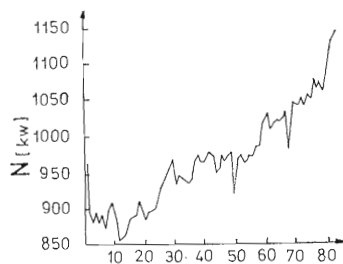


Fig. 2 - Evoluția în timp a valorilor lui  $N$ .  
Evolution of  $N$  values versus time.

mediate pe zi și apoi pentru o săptămână. Se realizează în acest fel o „netezire” care diminuează influența unor valori extreme.

Chiar după efectuarea acestei neteziri se observă o serie de oscilații ale puterii consumate pentru diferite perioade de timp. Cauzele rezidă, probabil, în schimbări tehnologice inerente pe o perioadă mai mare de timp de exploatare a cuptorului ca: modificarea raportului cioburi — amestec, sau/și a productivității cuptorului, corodarea electrozilor și, respectiv, reintroducerea lor în topitură până la adîncimea prestabilită etc. În plus, în raport cu unele date similare prezentate în literatură pentru cuptoare electrice se poate considera că valorile pentru putere luate în calcul nu prezintă abateri importante datorate unor greșeli de exploatare [3].

O primă metodă utilizată pentru stabilirea corelației cantitative între  $N$  și timpul  $t$  a fost metoda regre-

siei matematice [4, 5], expresia analitică a dependenței  $N = f(t)$  fiind dată de relația:

$$N = a (1 + bt^c) \quad [\text{kW}] \quad (3)$$

în care  $a$ ,  $b$ , și  $c$  sînt constante ce urmează a fi determinate.

Pentru a putea aplica metoda celor mai mici pătrate pentru determinarea constantelor  $a$ ,  $b$  și  $c$  din relația (3), aceasta a fost liniarizată prin efectuarea unor schimbări de variabile.

Aplicîndu-se această metodologie s-au obținut dependențele explicite în funcție de timp pentru  $N$ .

Rezultatele sînt prezentate în tabelul 1, în care se indică valorile coeficientului de corelație  $r$  pentru ecuațiile obținute, precum și numărul de puncte experimentale

Tabelul 1

Relații empirice de corelație  
Empirical relationships of correlation

Nr. crt.	Tipul corelației Correlation type	Relația statistică Statistical relationship	$r$	Observații Remarks
1	Puterea consumată-timp	$N = 855 (1 + 3,065 \cdot 10^{-3} \cdot t)$	—	s-au considerat 80 de puncte (săptămîni)
		$N = 870 (1 + 2,845 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,9556})$	0,82	s-au considerat 80 de puncte
		$N = 870 (1 + 2,015 \cdot 10^{-4} \cdot t^{1,6447})$	0,93	s-au considerat 68 de puncte (prin eliminarea primelor 12 săptămîni de la punerea în funcțiune)

(săptămîni) considerate. Se relevă prin valorile lui  $r$  apropiate de 1, existența unei puternice corelații între  $N$  pe de o parte și durata  $t$  de funcționare a cuptorului, pe de altă parte.

O a doua metodă de corelație utilizată a fost aceea a polinoamelor ortogonale Cebîșev  $p_i(x)$  [4], care furnizează în cazul unei dependențe de tipul  $y = f(x)$  gradul optim al unui polinom care descrie cel mai exact interdependența variabilelor.

Alegerea mai multor metode de corelare a mărimilor  $N$  și  $t$  a fost motivată de necunoașterea formei analitice de dependență a lor, date concrete în acest sens practic, lipsind din literatură.

Față de problema clasică de regresie multiplă, metoda polinoamelor ortogonale Cebîșev aduce simplificări importante în cazul în care valorile alese pentru variabila independentă  $x_j$  sînt dispuse simetric față de media lor  $\bar{x}$ . În plus, oferă avantajul folosirii unor tabele precalculate.

Pentru început, s-a pus problema aplicării acestei metode pentru un număr  $k = 9$  de puncte experimentale ( $j = 3, 5, 7, \dots, 19 - j$  fiind indice pentru numărul de luni de la punerea în funcțiune a cuptorului), care să acopere în mod uniform durata de 80 de săptămîni cît a fost urmărită funcționarea cuptorului.

În tabelul 2 sînt sistematizate datele necesare calculării coeficienților  $c_i$  din relația lui Cebîșev precum și valorile acestora.

Calculul coeficienților  $c_i$   
Calculation of  $c_i$  coefficients

Timp $t$ [luni] Time $t$ (months)	Putere (Power) $N$ [kW]	$(N - \bar{N})^2$	$p_1^*$	$N \cdot p_1^*$	$p_2^*$	$N \cdot p_2^*$	$p_3^*$	$N \cdot p_3^*$	$p_4^*$	$N \cdot p_4^*$	$p_5^*$	$N \cdot p_5^*$
3	887	6 944,4	-4	-3 548	28	24 836	-14	-12 418	14	12 418	-4	-3 548
5	896	5 525,4	-3	-2 688	7	6 272	7	6 272	-21	-18 816	11	9 856
7	953	300,4	-2	-1 906	-8	-7 624	13	12 389	-11	-10 483	-4	-3 812
9	954	266,8	-1	-954	-17	-16 218	9	8 586	9	8 586	-9	-8 586
11	963	53,8	0	0	-20	-19 260	0	0	18	17 334	0	0
13	968	5,4	1	968	-17	-16 456	-9	-8 712	9	8 712	9	8 712
15	1 018	2 272,1	2	2 036	-8	-8 144	-13	-13 234	-11	-11 198	4	4 072
17	1 026	3 098,8	3	3 078	7	7 182	-7	-7 182	-21	-21 546	-11	-11 286
19	1 068	9 538,8	4	4 272	28	29 904	14	14 952	14	14 952	4	4 272
$\Sigma$	8 733	28 005,9	-	1 258	-	492	-	653	-	-41	-	-320
$\gamma_i$			60		924		1 188		3 432		3 120	
$c_i$	970,3			209,6		0,5		0,5		0,0		0,0

În continuare se calculează valorile dispersiilor  $s_n^2$  cu relația:

$$s_n^2 = \frac{S_{n-1} - c_n^2 H_n}{k - n - 1} \quad (4)$$

în care:  $n$  este gradul variabil al polinomului;

$H_n$  — tabelat [2, 4];

$c_n$  — coeficienții  $c_i$  ( $i = n$ ) din relația lui Cebîșev [4].

$S_0$  — (necesar pentru a se cunoaște  $S_1, S_2, \dots$ ) se calculează cu relația:

$$S_0 = \sum_{j=1}^k (y_k - \bar{y})^2 \quad (5)$$

Gradul optim  $l$  al polinomului este dat de condiția:

$$s_l^2 = \min. (s_1^2, s_2^2, \dots, s_l^2, s_{l+1}^2, \dots) \quad (6)$$

Ținând seama de relațiile (4) — (6) și de tabelul 2 rezultă  $l = 1$ , iar în final, pentru dependența  $N = f(t)$  se obține o expresie care se poate scrie sub forma:

$$N = 855 (1 + 3,065 \cdot 10^{-3} \cdot t) \quad [\text{kW}] \quad (7)$$

Relația (7) a fost luată în considerație împreună cu relațiile stabilite prin metoda celor mai mici pătrate:

$$N = 870 (1 + 2,015 \cdot 10^{-4} t^{1,6447}) \quad [\text{kW}] \quad (8)$$

$$N = 870 (1 + 2,845 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,9556}) \quad [\text{kW}] \quad (9)$$

În relațiile (7) — (9) timpul  $t$  este dat în săptămîni.

Relațiile (7) — (9) sînt în continuare analizate pentru a stabili forma analitică optimă pentru aproximarea dependenței  $N = f(t)$ .

### 3. Aprecierea concordanței model statistic — date experimentale

În general, pentru aplicații industriale curente, modelele statistice trebuie, pe cît posibil, să conducă la relații explicite ușor de utilizat și care să aproximeze cît mai fidel datele experimentale. Relațiile (7) — (9) determinate aici par a răspunde bine primului deziderat. În continuare se pune problema de a aprecia gradul de concordanță reflectat de aceste expresii în raport

cu datele experimentale. Pentru aceasta există atît criterii statistice clasice [4—6], cît și, mai recent, aparținînd statisticii informaționale [7]. În această lucrare se propune și se folosește cu criteriu mixt.

În conformitate cu statistica matematică, estimarea dispersiei valorilor calculate dintr-o dependență funcțională de tipul  $y = f(x)$  în raport cu valorile experimentale este redată de dispersia de concordanță  $s_{conc}^2$ , exprimată de relația [4]:

$$s_{conc}^2 = \frac{1}{k-2} \sum_{j=1}^k (y_{jc} - y_j)^2 \quad (10)$$

în care,  $y_{jc}$  reprezintă valoarea de pe curba  $y = f(x)$  corespunzînd punctului experimental  $x_j$ , restul notațiilor fiind cunoscute.

Dispersia de concordanță a fost considerată ca un prim criteriu de stabilire a relației optime dintre mărimile analizate, cu cît valoarea acesteia este mai mică, gradul de corelare fiind mai puternic.

În același timp însă, acest indicator nu furnizează nici o precizare privind uniformitatea repartiției punctelor experimentale în raport cu curbele calculate. În acest context nu se pot face precizări dacă nu există intervale pe care să se înregistreze abateri importante între mărimile  $y_{jc}$  și  $y_j$ , ceea ce ar prezenta neajunsuri la utilizarea în practică a relației respective la un moment dat.

Din acest motiv s-a considerat necesară folosirea unui indicator care să furnizeze o indicație cantitativă și asupra gradului de uniformitate al repartiției datelor experimentale de-a lungul curbei teoretice. Un astfel de indicator îl oferă energia informațională  $E_s$ , a unui sistem caracterizat de  $k$  stări posibile avînd fiecare ponderea  $P_j$  ( $j = \overline{1, k}$ ), care se calculează cu relația [7]:

$$E_s = \sum_{j=1}^k P_j^2, \quad \left( \sum_{j=1}^k P_j = 1 \right) \quad (11)$$

Energia informațională este o măsură a sistemului dat, avînd valori mai apropiate de  $1/k$  cînd gradul de uniformitate crește și valori care tind spre 1 atunci cînd uniformitatea este tot mai mică.

Pentru compararea din punct de vedere al uniformității a mai multor sisteme cu un număr diferit de stări

Calculul indicatorilor de corelație  
Calculation of correlation indicators

Relația de calcul Calculation relationship	Număr de valori aparținând clasei: Number of values belonging to class:									$E_s$	$E_c$	$s_{conc}^2$	$I_c$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
(7)	1	0	0	6	21	30	17	4	1	0,263	0,254	512,1	130,0
(8)	0	0	2	5	14	27	17	2	1	0,270	0,259	490,4	127,0
(9)	0	2	2	10	27	19	15	4	1	0,225	0,215	742,6	159,8

se impune folosirea unui alt indicator,  $E_c$ , explicat pe baza lui  $E_s$  prin formula [7]:

$$E_c = \frac{k \sum_{j=1}^h P_j^2 - 1}{k - 1} \quad (12)$$

Valorile pentru  $E_c$  se plasează în intervalul [0,1], gradul de uniformitate al sistemului crescând când pentru  $E_c$  se înregistrează valori spre limita inferioară.

Modul concret de utilizare a indicatorului  $E_c$  la cazul concret analizat aici este următorul:

— pentru fiecare dintre relațiile deduse s-au determinat valorile  $N_{calculat}$  pentru valorile corespunzând lui  $t = 1, 2, \dots, 80$  în cazul relațiilor (7) și (9) și pentru valorile corespunzând lui  $t = 13, 14, \dots, 80$  în cazul relației (8),  $t$  fiind considerat în săptămîni;

— s-au determinat raporturile  $N_{calcul}/N_{real}$  pe intervalele de valori respective ale lui  $t$ .

Valorile astfel calculate s-au înscris în intervalul 0,89 — 1,07;

— s-au constituit nouă clase de valori cu intervalul de clasă de 0,02 calculindu-se ponderile corespunzătoare pentru valorile raportului  $N_{calcul}/N_{exp}$ .

Intervalul de clasă  $\Delta$  s-a stabilit în conformitate cu relația [5]:

$$\Delta = 8/100 (u_{max} - u_{min}) \quad (13)$$

în care:  $u = N_{calcul}/N_{exp}$ .

În tabelul 3 sînt prezentate numărul de valori pentru fiecare clasă,  $E_s$ ,  $E_c$ ,  $s_{conc}^2$  precum și produsul  $E_c \cdot s_{conc}^2$ , calculate pentru fiecare din relațiile (7) — (9).

Din datele cuprinse în tabelul 3 se relevă următoarele concluzii:

— repartiția punctelor experimentale în lungul curbei corespunzînd relației (9) este cea mai uniformă, în schimb, în acest caz dispersia de concordanță are valoarea cea mai mare;

— uniformitatea repartiției punctelor în cazul relațiilor (7) și (8) este apropiată și puțin mai mică decît în cazul relației (9). În același timp însă abaterile calculate sînt sensibil mai mici.

Pentru a surprinde simultan semnificația indicatorilor  $E_c$  și  $s_{conc}^2$  privind concordanța curbelor calculate cu rezultatele experimentale s-a propus un indicator de corelație definit cu formula:

$$I_c = N_c \cdot s_{conc}^2 \quad (14)$$

Indicatorul  $I_c$  este plasat în ultima coloană a tabelului 3. În contextul celor arătate la definirea mărimilor  $N_c$  și  $s_{conc}^2$ , cu cit valorile lui  $I_c$  sînt mai mici, gradul de concordanță reflectat de relația corespunzătoare este mai mare. Deci, se poate concluziona că relația (8) descrie cel mai bine evoluția în timp a puterii consumate de cuptorul electric. Trebuie precizat că acest rezultat rămîne valabil și dacă se efectuează extrapolarea acesteia între punctele  $t = 2 \div 12$ . Se poate totodată considera că și relația (7), obținută prin metoda polinoamelor Cebîșev prezintă un grad de concordanță apropiat.

#### 4. Concluzii

● Pe baza metodelor celor mai mici pătrate și a polinoamelor ortogonale Cebîșev s-au stabilit relații de dependență  $N = f(t)$ .

● Pentru aprecierea concordanței între curbele teoretice și datele experimentale s-au utilizat ca indicatori statistici dispersia de concordanță  $s_{conc}^2$  și  $E_c$ , stabilit pe baza relației pentru energia informațională.

● S-a definit  $I_c$ , un indicator de corelație mixt, prin relația  $I_c = E_c \cdot s_{conc}^2$ , pe baza căruia s-a putut indica relația de dependență optimă pentru dependența putere consumată — timp.

● Relația de principiu (8) a fost verificată și pentru o nouă perioadă de 33 săptămîni de funcționare, corespunzînd pentru a doua campanie, cînd s-a obținut aceeași evoluție în timp a puterii consumate la punerea în funcțiune a cuptorului, după efectuarea unor modificări constructive.

#### BIBLIOGRAFIE

1. Nestor, M. — Industria Ușoară, (3) 143, (1976).
2. Morrison, S. — Glass Technology, (3) 87 (1979).
3. Stverak, J. și colaboratori — 5 Konference o elektrickem taveni skla, Usti nad Labem, 1980, p. 66.
4. Taloi, D. și colaboratori — Optimizarea proceselor metalurgice, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983.
5. Gluck, A. — Metode matematice în industria chimică, Editura Tehnică, București, 1971.
6. Baron, T. — Metode statistice pentru analiza și controlul producției, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
7. Onicescu, O., Ștefănescu, V. — Elemente de statistică informațională cu aplicații, Editura Tehnică, București, 1979.