

Obratovalni elektroenergetski model obločne peči za proizvodnjo jekla

Janez Bratina*

UDK: 669.187.25:621.365.2.001.5:620.9

ASM/SLA: W18s, U7c, D5a, U4k

Standardni prikaz elektroenergetskih obratovalnih karakteristik obločne peči temelji na obračunu električnega tokokroga, v katerem je lok nadomeščen z ohmsko upornostjo. Z uvedbo razmerja kratkostične induktivne in ohmske upornosti pečnega tokokroga (γ) in z uvedbo razmerja toplotnih izgub peči proti moči idealnega kratkega stika (ψ) so se univerzalno posplošile v relativnih vrednostih podane enačbe vseh električnih vrednosti in njih značilnih obratovalnih mest. Z upoštevanjem induktivne upornosti loka in njegovega konstantnega razmerja do njegove nadomestne ohmske upornosti (δ) so bile izvedene izpopolnjene enačbe za realnejše opisovanje elektroenergetskih lastnosti obločne peči. Uvedeno razmerje je tudi teoretsko utemeljilo odnos med obratovalno induktivno upornostjo in faznim faktorjem. Z meritvami delovne in jalove moči obločne peči je faktor neposredno določljiv in služi poleg faznega faktorja, ki je pri obratovanju obločne peči vodilna veličina, kot nastavitveni spremljivi parameter elektrodne regulacije v različnih tehnoloških fazah obratovanja obločne peči. S pomočjo predloženega modela elektroenergetskih in toplotnotehničnih parametrov obločne peči je mogoča optimizacija obratovanja peči v vseh tehnoloških fazah izdelave jekla.

Uvod

Elektroobločna peč se je razvila iz agregata za izdelavo specialnih legur in žlinder, s čemer se je na prelomu stoletja ukvarjal Francoz Paul Heroult; prva enofazna obločna peč, zmogljivosti 500 kg, je bila postavljena v Remscheidu l. 1906; patentne prijave Siemens o uporabi električnega loka za taljenje težko taljivih materialov pa segajo že v leto 1879. V sto letih se je elektroobločna peč razvila v agregat, s katerim danes v svetu proizvedejo 25 % jekla, posamezne dežele (Španija, Italija) pa na ta način proizvedejo več kot 50 % svojega jekla. Največji razmah rasti elektrojekla je bil dosežen po drugi svetovni vojni, ko so se ob cenemem starem železu, ceneni električni energiji in ob nizkih specifičnih kapitalnih stroških, v primerjavi z integralnimi železarnami izpopolnjevali tako tehnologija jekla kakor sami proizvodni agregati. Velikost peči se je ustalila med 20 t in 200 t, čeprav se za posebne namene grade tudi manjše enote. Specifične transformatorske moči peči so se od prvotnih običajnih vrednosti 200 kVA/t vložka povzpele pri Ultra High Power pečeh na 600 kVA/t do 1000 kVA/t; obločna

peč je v tem obdobju povečala svojo proizvodnjo od prvotnih nekaj ton na uro na preko 100 t/h. Razvoj agregatov izjemnih moči pečnih transformatorjev je bil mogoč le na podlagi dovolj stabilnega elektroenergetskega omrežja; dosedanja cenovna razmerja, ki jih je spremljala konstantno večanje energijskih stroškov, so povzročila gradnjo vedno bolj dognanih sistemov optimalnega vodenja peči, ki so imeli nalogo dosežati čim boljše uporabo elektirčne energije, glede na angažirano moč, ter s tem dosežene nižje cene prevzete električne energije in čim boljše izrabo električne energije, t. j. izdelati jeklo s čim manjšo energijsko porabo. Optimiranje energijsko intenzivnih proizvodnih procesov, kot so obločne peči, je mogoče le na osnovi poznavanja posebnih zakonitosti, na katerih sloni pretvorba električne energije v toplotno: v nadaljevanju je prikazan obratovalni elektroenergetski model obločne peči za proizvodnjo jekla, ki poskuša na osnovi do sedaj znanega z vpeljavo novih elementov omogočiti poglobljen vpogled v nastopajoče zakonitosti.

1. STANDARDNI PRIKAZ ELEKTROENERGETSKIH RAZMER Z RELATIVNIMI VREDNOSTMI

Obratovalne karakteristike elektroobločne peči izhajajo iz obračuna elementov nadomestne sheme peči. Na **Sl. 1** so prikazane kratkostične ohmske (R_k) in induktivne upornosti (X_k), reducirane na pečno, t. j. sekundarno stran pečnega transformatorja, ter nadomestna upornost električnega loka. Če ob znani fazni napetosti (U_l) definiramo:

tok idealnega kratkega stika:

$$J_{k0} = \frac{U_l}{X_k} \quad (1)$$

moč idealnega kratkega stika:

$$P_{k0} = 3 J_{k0} U_l \quad (2)$$

razmerje kratkostičnih upornosti:

$$\gamma = \frac{X_k}{R_k} \quad (3)$$

slede kot glavni obratovalni parametri relativne vrednosti:

toka:

$$j = \frac{J}{J_{k0}} \quad (4)$$

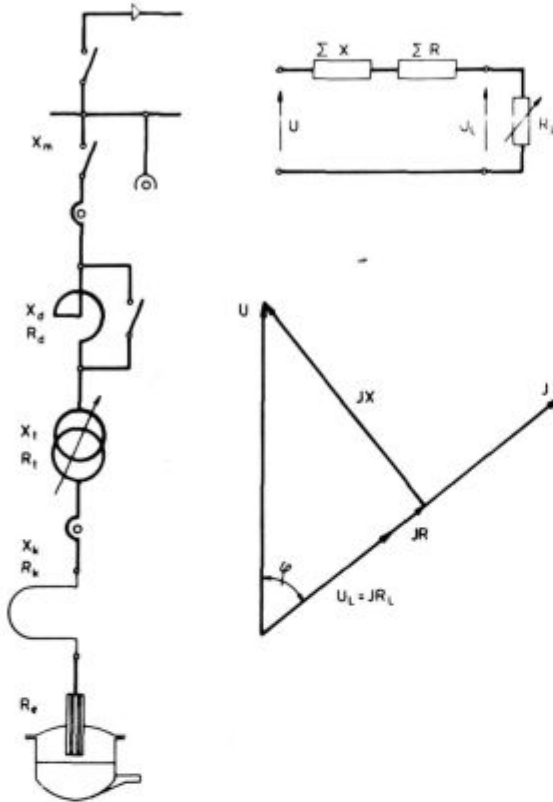
* dr. Janez Bratina, dipl. ing. el. — Železarna Ravne

Originalno publicirano: ŽEZB 23 (1989) 2

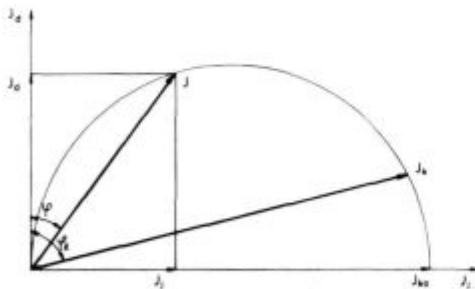
Rokopis prejet: januar 1989

moči:

$$p = \frac{P}{P_{ko}} \quad (5)$$



Slika 1. Nadomestna shema obločne peči
Fig. 1 Substitution scheme of the arc furnace



Slika 2. Krožni diagram obločne peči s kratkostičnimi nadomestnimi upornostmi
Fig. 2 Circle diagram of the arc furnace with the short-circuit substitution resistances

Iz krožnega diagrama po sl. 2 neposredno sledijo:

obratovalni tok:

$$j = \sin \varphi \quad (6)$$

obratovalni fazni faktor:

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - j^2} \quad (7)$$

delovna moč na transformatorju:

$$p_d = j \sqrt{1 - j^2} \quad (8)$$

$$p_d = \frac{1}{2} \sin 2\varphi \quad (9)$$

jalova moč na transformatorju:

$$p_j = j^2 \quad (10)$$

$$p_j = \sin^2 \varphi \quad (11)$$

navidezna moč na transformatorju:

$$p_n = j \quad (12)$$

električne izgube:

$$p_{el} = \frac{1}{\gamma} j^2 \quad (13)$$

$$p_{el} = \frac{1}{\gamma} \sin^2 \varphi \quad (14)$$

napetost na loku:

$$e = \sqrt{1 - j^2} - \frac{1}{\gamma} j \quad (15)$$

$$e = \cos \varphi - \frac{1}{\gamma} \sin \varphi \quad (16)$$

delovna moč na loku:

$$p_l = j \sqrt{1 - j^2} - \frac{1}{\gamma} j^2 \quad (17)$$

$$p_l = \frac{1}{2} \sin 2\varphi \left(1 - \frac{1}{\gamma} \operatorname{tg} \varphi\right) \quad (18)$$

električni izkoristek kot razmerje med delovno močjo na loku in delovno močjo na transformatorju:

$$\eta_{el} = \frac{\sqrt{1 - j^2} - \frac{1}{\gamma} j}{\sqrt{1 - j^2}} \quad (19)$$

$$\eta_{el} = 1 - \frac{1}{\gamma} \operatorname{tg} \varphi \quad (20)$$

Če postavimo kot relativne toplotne izgube obločne peči še razmerje med njihovo absolutno vrednostjo in močjo idealnega kratkega stika:

$$\psi = \frac{P_{izg}}{P_{ko}} \quad (21)$$

sledi enačba za

energijski izkoristek:

$$\eta_{en} = \frac{j \sqrt{1 - j^2} - \frac{1}{\gamma} j^2 - \psi}{j \sqrt{1 - j^2}} \quad (22)$$

$$\eta_{en} = 1 - \frac{1}{\gamma} \operatorname{tg} \varphi - \frac{2\psi}{\sin 2\varphi} \quad (23)$$

pri čemer je tudi:

$$\frac{\psi}{p_d} = \eta_{el} - \eta_{en} \quad (24)$$

Vidimo, da se da vsako obratovalno mesto obločne peči ob znanem razmerju γ definirati s faznim faktorjem $\cos \varphi$ oziroma s pripadajočim kotom φ .

Med najmarkantnejšimi parametri oziroma obratovalnimi mesti so:

1.1 Kratek stik

tok kratkega stika:

$$j_k = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + 1}} \tag{25}$$

$$j_k = \sin \varphi_k \tag{26}$$

fazni faktor pri kratkem stiku:

$$\cos \varphi_k = \frac{1}{\sqrt{\gamma^2 + 1}} \tag{27}$$

delovna moč pri kratkem stiku:

$$\rho_{dk} = \frac{\gamma}{\gamma^2 + 1} \tag{28}$$

$$\rho_{dk} = \frac{1}{2} \sin 2 \varphi_k \tag{29}$$

jalova moč pri kratkem stiku:

$$\rho_{jk} = \frac{\gamma^2}{\gamma^2 + 1} \tag{30}$$

$$\rho_{jk} = \sin^2 \varphi_k \tag{31}$$

navidezna moč pri kratkem stiku:

$$\rho_{hk} = \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + 1}} \tag{32}$$

$$\rho_{hk} = \sin \varphi_k \tag{33}$$

1.2 Maksimalna delovna moč na transformatorju

tok pri maksimalni delovni moči:

$$j_{dm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \tag{34}$$

fazni faktor pri maksimalni delovni moči:

$$\cos \varphi_{dm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \tag{35}$$

maksimalna delovna moč na transformatorju:

$$\rho_{dm} = \frac{1}{2} \tag{36}$$

delovna moč na loku pri maksimalni delovni moči na transformatorju:

$$\rho_{adm} = \frac{\gamma - 1}{2\gamma} \tag{37}$$

električne izgube pri maksimalni delovni moči na transformatorju:

$$\rho_{eldm} = \frac{1}{2\gamma} \tag{38}$$

električni izkoristek pri maksimalni delovni moči na transformatorju:

$$\eta_{eldm} = 1 - \frac{1}{\gamma} \tag{39}$$

energijski izkoristek pri maksimalni delovni moči na transformatorju:

$$\eta_{endm} = 1 - \frac{1}{\gamma} - 2\psi \tag{40}$$

1.3 Maksimalna delovna moč na loku

tok pri maksimalni delovni moči na loku:

$$j_{lm} = \sqrt{\frac{\sqrt{\gamma^2 + 1} - 1}{2\sqrt{\gamma^2 + 1}}} \tag{41}$$

$$j_{lm} = \sin \frac{\varphi_k}{2} \tag{42}$$

fazni faktor pri maksimalni delovni moči na loku:

$$\cos \varphi_{lm} = \sqrt{\frac{\sqrt{\gamma^2 + 1} + 1}{2\sqrt{\gamma^2 + 1}}} \tag{43}$$

$$\cos \varphi_{lm} = \cos \frac{\varphi_k}{2} \tag{44}$$

maksimalna delovna moč na loku:

$$\rho_{lm} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 + 1} + 1} \tag{45}$$

$$\rho_{lm} = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \frac{\varphi_k}{2} \tag{46}$$

delovna moč na transformatorju pri maksimalni delovni moči na loku:

$$\rho_{dlm} = \frac{\gamma}{2\sqrt{\gamma^2 + 1}} \tag{47}$$

$$\rho_{dlm} = \frac{1}{2} \sin \varphi_k \tag{48}$$

električne izgube pri maksimalni delovni moči na loku:

$$\rho_{elilm} = \frac{\sqrt{\gamma^2 + 1} - 1}{2\gamma\sqrt{\gamma^2 + 1}} \tag{49}$$

električni izkoristek pri maksimalni delovni moči na loku:

$$\eta_{elilm} = 1 - \frac{1}{\sqrt{\gamma^2 + 1} + 1} \tag{50}$$

$$\eta_{elilm} = 1 - \frac{1}{\gamma} \operatorname{tg} \frac{\varphi_k}{2} \tag{51}$$

energijski izkoristek pri maksimalni delovni moči na loku:

$$\eta_{enilm} = 1 - \frac{1}{\sqrt{\gamma^2 + 1} + 1} - \frac{2\psi}{\gamma} \cdot \sqrt{\gamma^2 + 1} \tag{52}$$

1.3 Maksimalni energijski izkoristek

tok pri maksimalnem energijskem izkoristku:

$$j_l = \sqrt{\frac{\gamma\psi}{1 + 2\gamma\psi}} \tag{53}$$

fazni faktor pri maksimalnem energijskem izkoristku:

$$\cos \varphi_v = \sqrt{\frac{1 + \gamma\psi}{1 + 2\gamma\psi}} \tag{54}$$

delovna moč na loku pri maksimalnem energijskem izkoristku:

$$\rho_{l\eta} = \frac{\sqrt{\gamma\psi(1 + \gamma\psi)} - \psi}{1 + 2\gamma\psi} \tag{55}$$

delovna moč na transformatorju pri maksimalnem energijskem izkoristku:

$$\rho_{d\eta} = \frac{\sqrt{\gamma\psi(1+\gamma\psi)}}{1+2\gamma\psi} \quad (56)$$

električne izgube pri maksimalnem energijskem izkoristku:

$$\rho_{el\eta} = \frac{\psi}{1+2\gamma\psi} \quad (57)$$

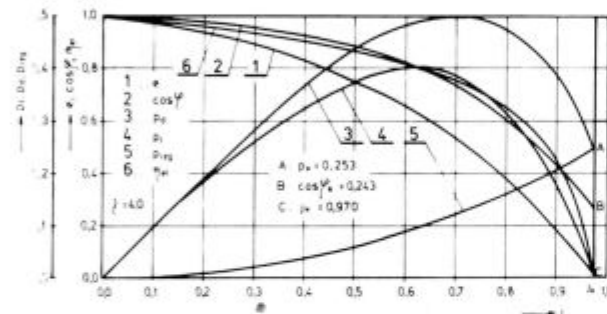
električni izkoristek pri maksimalnem energijskem izkoristku:

$$\eta_{el\eta} = 1 - \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{\gamma\psi}{1+\gamma\psi}} \quad (58)$$

maksimalni energijski izkoristek:

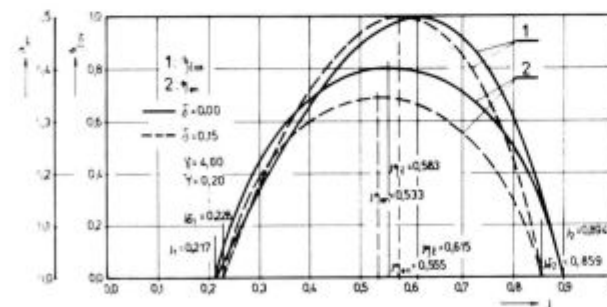
$$\eta_{en\eta} = 1 - 2 \sqrt{\frac{\psi}{\gamma(1+\gamma\psi)}} \quad (59)$$

Funkcijski poteki napetosti na loku, faznega faktorja, delovne moči na transformatorju, delovne moči na loku, električne izgube in energijski izkoristek so prikazani na obratovalnem diagramu obločne peči na sl. 3.



Slika 3. Obratovalni diagram obločne peči
Fig. 3. Diagram of the arc furnace operation

Glede na potek krivulje energijskega izkoristka na sl. 4 je razvidno, da imamo dve obratovalni točki, kjer je energijski izkoristek peči nič: ob tem je moč na loku enaka moči toplotnih izgub.



Slika 4. Energijski in časovni izkoristek obločne peči
Fig. 4. Energy and time yield of the arc furnace

Vrednosti toka, pri katerih je izpolnjen prejšnji pogoj, sta:

$$j_{1,2} = \sqrt{\frac{\gamma(\gamma-2\psi) \pm \gamma\sqrt{\gamma^2-4\gamma\psi(1+\gamma\psi)}}{2(\gamma^2+1)}} \quad (60)$$

Maksimalne možne toplotne izgube pokrivamo v primeru, da je $j_1 = j_2$. Tok mejnih izgub je:

$$j_0 = \sqrt{\frac{\sqrt{\gamma^2+1}-1}{2\sqrt{\gamma^2+1}}} \quad (61)$$

$$j_0 = \sin \frac{\varphi_0}{2} \quad (62)$$

Maksimalne toplotne izgube, ki jih je mogoče pokrivati z v peč dovedeno močjo:

$$\psi_0 = \frac{(\sqrt{\gamma^2+1})-1}{2\gamma} \quad (63)$$

Pri tem je tok $j_0 = j_m = j_{m0}$. Za presojo obratovalnih stanj elektroobločne peči sta pomembni še dve funkcijski odvisnosti:

— časovni izkoristek govori o izkoriščenosti moči glede na maksimalno moč na loku:

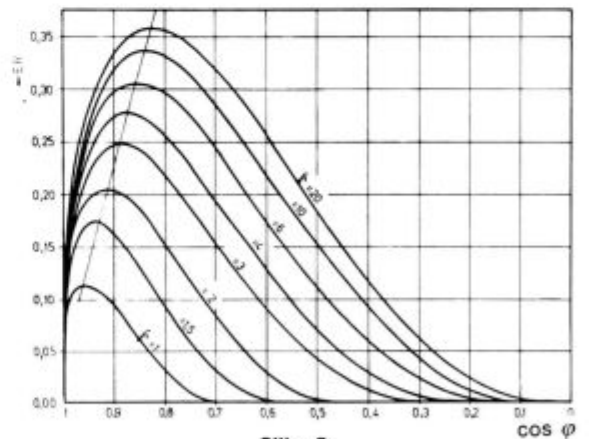
$$\eta_{cas} = \frac{j\sqrt{1-j^2} - \frac{1}{\gamma}j^2 - \psi}{\frac{1}{2} \operatorname{tg} \frac{\varphi_0}{2} - \psi} \quad (64)$$

(Izkoristek časa ima vrednost nič pri istih tokovih j_1 in j_2 kot energijski izkoristek, maksimalno vrednost pa ima vedno pri j_m)

— erozijski indeks kot merilo toplotne obremenitve obzidave; definiran je kot produkt moči loka in njegove napetosti:

$$er = j[j\sqrt{1-j^2} - \frac{1}{\gamma}j^2]^2 \quad (65)$$

$$er = [1 - \frac{1}{\gamma} \operatorname{tg} \varphi]^2 \cos^2 \varphi \sin \varphi \quad (66)$$



Slika 5. Erozijski indeks obločne peči
Fig. 5. Erosion index of the arc furnace

Potek erozijskega indeksa kaže sl. 5. Največjo vrednost doseže ob pogoju, da je razmerje upornosti:

$$\gamma_0 = \frac{3j_0\sqrt{1-j_0^2}}{1-3j_0} \quad (67)$$

$$\gamma_0 = \frac{3 \sin \varphi_0 \cos \varphi_0}{1 - 3 \sin^2 \varphi_0} \quad (68)$$

Pri tem je njegova največja vrednost:

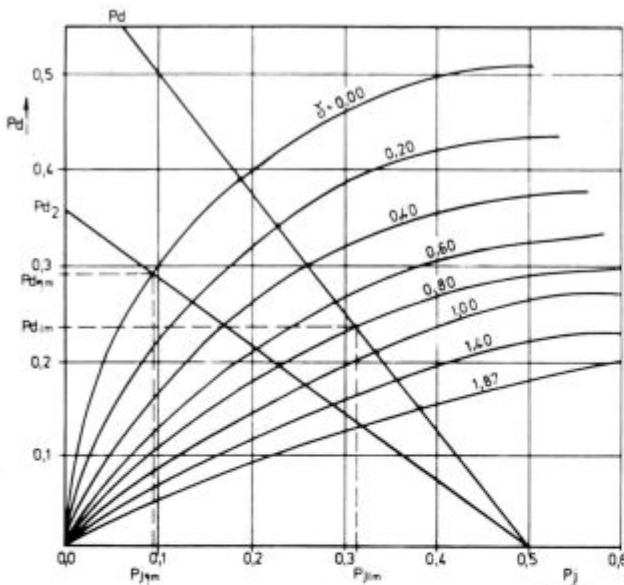
$$er_m = \frac{4}{9} \cdot \frac{j_0}{1 - j_0^2} \quad (69)$$

$$er_m = \frac{4}{9} \cdot \frac{\sin \varphi_0}{\cos^2 \varphi_0} \quad (70)$$

Tabela 1: Karakteristične vrednosti obratovanja obločne peči pri maksimalnem erozijskem indeksu za idealne razmere

Table 1: Characteristic values for the arc furnace operation at the maximal erosion index for ideal conditions

γ	δ	j	$\cos \varphi$	er_{max}	p_d	p_j
1.00	0.00	0.2699	0.9628	0.1296	0.2599	0.0728
2.00	0.00	0.3909	0.9203	0.2054	0.3598	0.1528
3.00	0.00	0.4469	0.8945	0.2484	0.3998	0.1998
4.00	0.00	0.4779	0.8783	0.2752	0.4198	0.2284
5.00	0.00	0.4969	0.8677	0.2934	0.4312	0.2470
6.00	0.00	0.5099	0.8601	0.3064	0.4386	0.2600
7.00	0.00	0.5199	0.8541	0.3162	0.4441	0.2703
8.00	0.00	0.5269	0.8498	0.3239	0.4478	0.2777
9.00	0.00	0.5319	0.8467	0.3300	0.4504	0.2830
10.00	0.00	0.5369	0.8435	0.3350	0.4530	0.2883
11.00	0.00	0.5399	0.8416	0.3392	0.4544	0.2915
12.00	0.00	0.5429	0.8397	0.3427	0.4559	0.2948
13.00	0.00	0.5429	0.8377	0.3457	0.4574	0.2981
14.00	0.00	0.5479	0.8364	0.3483	0.4583	0.3002
15.00	0.00	0.5499	0.8351	0.3506	0.4593	0.3024
16.00	0.00	0.5519	0.8338	0.3527	0.4602	0.3046
17.00	0.00	0.5529	0.8331	0.3544	0.4607	0.3058
18.00	0.00	0.5549	0.8318	0.3561	0.4616	0.3080
19.00	0.00	0.5559	0.8311	0.3575	0.4621	0.3091



Slika 6.

Izpopolnjen krožni diagram obločne peči

Fig. 6

Completed circle diagram of the arc furnace

V Tabeli 1 so izračunane vrednosti maksimalnega erozijskega indeksa v odvisnosti od razmerja upornosti γ . Poleg obratovalnih diagramov (po sliki 3) je za ponazoritev obratovalnih mest obločne peči še vedno najprimernejši krožni diagram. Na sliki 6 je na njem prikazanih

nekaj značilnih obratovalnih mest. Za konstrukcijo obratovalne točke maksimalne moči na loku je potrebno poznati vrednost moči:

$$p_{d1} = \frac{\gamma}{2} \quad (71)$$

Za konstrukcijo obratovalne točke največjega energijskega izkoristka pa moč

$$p_{d2} = \sqrt{\gamma \psi (1 + \gamma \psi)} \quad (72)$$

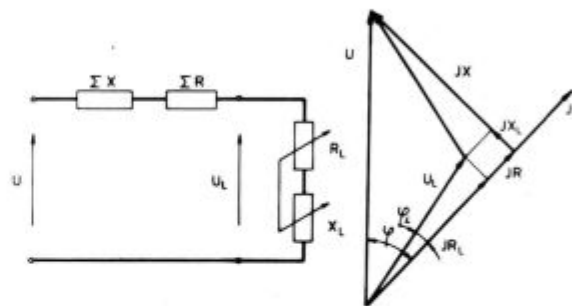
Pri največjih toplotnih izgubah, ki jih je še mogoče pokrivati, se obe konstrukcijski točki p_{d1} in p_{d2} izenačita.

2. PRIKAZ Z DODATNO INDUKTIVNOSTJO LOKA

Rezultati iz enačb prejšnjega poglavja se ne skladajo dobro z obratovalnimi razmerami; izmerjene vrednosti delovne moči so manjše od pričakovanih, fazni faktorji pa slabši, kot bi smeli biti. Neskladje ima svoj vzrok v predpostavki, s katero smo električni lok nadomestili s spremenljivim ohmskim uporom, ki se spreminja od vrednosti nič pri kratkem stiku do vrednosti neskončno pri praznem teku peči. Električni lok seveda ni linearna ohmska upornost, še posebno komplicirane so njegove karakteristike v pogojih gorenja pri izmenični napetosti, ko začne lok prevajati tok šele pri vžigni napetosti oziroma ko ga preneha voditi že pri ugasnilni napetosti. Posledice se kažejo v velikih popačitvah sinusne oblike toka loka. Meritve osnovnih harmonskih komponent toka in napetosti na obločnih pečeh kažejo, da je zakasnitev prehoda toka skozi vrednost nič pri določenih razmerah v peči neodvisna od velikosti toka. Zaključimo lahko: izmenični električni lok nima le ohmske komponente upornosti, temveč tudi induktivno; za določene pogoje gorenja loka v peči sta si ti upornosti v stalnem razmerju:

$$\delta = \frac{X_L}{R_L} \quad (73)$$

Nadomestna shema elektroenergetskih parametrov obločne peči se z uvedbo razmerja δ spremeni, kot je to prikazano na sliki 7. Obračun razmer po zgornjih nadomestnih shemah nam da naslednje rezultate:



Slika 7.

Nadomestna shema obločne peči z upoštevanjem induktivne upornosti loka

Fig. 7

Substitution scheme of the arc furnace, taking in account inductive reactances of the arc

napetost na loku:

$$e = \sqrt{\frac{1}{\delta^2 + 1} - f^2 \left[\frac{\gamma - \delta}{\gamma(\delta^2 + 1)} \right]^2} - j \frac{\gamma \delta + 1}{\gamma(\delta^2 + 1)} \quad (74)$$

delovna moč na transformatorju:

$$P_d = j \sqrt{\frac{1}{\delta^2 + 1} - j^2 \left[\frac{\gamma - \delta}{\gamma(\delta^2 + 1)} \right]^2} - j^2 \frac{\delta(\gamma - \delta)}{\gamma(\delta^2 + 1)} \quad (75)$$

delovna moč na loku:

$$P_l = j \sqrt{\frac{1}{\delta^2 + 1} - j^2 \left[\frac{\gamma - \delta}{\gamma(\delta^2 + 1)} \right]^2} - j^2 \frac{\gamma \delta + 1}{\gamma(\delta^2 + 1)} \quad (76)$$

fazni faktor:

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{1}{\delta^2 + 1} - j^2 \left[\frac{\gamma - \delta}{\gamma(\delta^2 + 1)} \right]^2} - j \frac{\delta(\gamma - \delta)}{\gamma(\delta^2 + 1)} \quad (77)$$

Prikladnejše enačbe za določanje relativnih vrednosti moči dobimo, če izhajamo iz faznega faktorja:

navidezna moč:

$$P_n = \frac{\gamma}{\gamma - \delta} (\sin \varphi - \delta \cos \varphi) \quad (78)$$

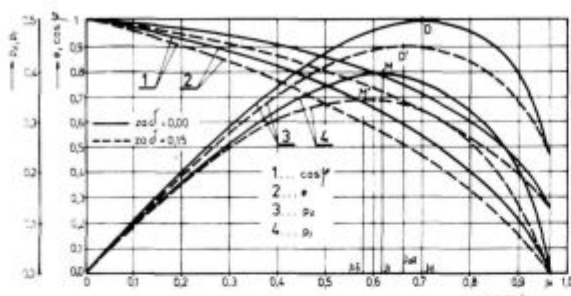
delovna moč:

$$P_d = \frac{\gamma}{\gamma - \delta} \cos \varphi (\sin \varphi - \delta \cos \varphi) \quad (79)$$

jalova moč:

$$P_l = \frac{\gamma}{\gamma - \delta} \sin \varphi (\sin \varphi - \delta \cos \varphi) \quad (80)$$

Enačbe dajejo vrednosti relativnih moči na pečnem transformatorju, t. j. na njegovi primarni strani, če vstavimo vanje primarju pripadajoči fazni faktor in razmerje upornosti, oziroma vrednosti moči na pečni, t. j. sekundarni strani transformatorja, če vstavljamo na sekundarju izmerjene vrednosti faznega faktorja in razmerja upornosti.



Slika 8

Obratovni diagram obločne peči v realnih razmerah

Fig. 8

Diagram of the arc furnace operation in real conditions

Na sliki 8 je razvidna sprememba, ki jo povzroči faktor δ na potek moči in faznega faktorja. Vidi se, da se s tem spremeni tudi lega karakterističnih obratovnih točk. Nespremenjene ostanejo samo vrednosti ob kratkem stiku.

2.1 Maksimalna delovna moč na transformatorju:

tok pri maksimalni delovni moči na transformatorju:

$$j_{dm\delta} = \frac{\gamma}{\sqrt{2}(\gamma - \delta)} \sqrt{\frac{\delta^2 + 1}{\delta \sqrt{\delta^2 + 1} + \delta^2 + 1}} \quad (81)$$

fazni faktor pri maksimalni delovni moči na transformatorju:

$$\cos \varphi_{dm\delta} = \frac{1}{\sqrt{2} \sqrt{\delta \sqrt{\delta^2 + 1} + \delta^2 + 1}} \quad (82)$$

maksimalna delovna moč na transformatorju:

$$P_{dm\delta} = \frac{\gamma}{2(\gamma - \delta) [\delta + \sqrt{\delta^2 + 1}]} \quad (83)$$

Iz pogoja za maksimalno delovno moč na transformatorju sledi, da nastopi pri nekem mejnem razmerju δ izenačitev te maksimalne moči z močjo kratkega stika; ob tem se izenačita tok maksimalne delovne moči na transformatorju in tok kratkega stika, kakor tudi pripadajoča fazna faktorja. Največje možno razmerje med induktivno upornostjo loka in njegovo nadomestno upornostjo je torej:

$$\delta_0 = \frac{\gamma^2 - 1}{2\gamma} \quad (84)$$

Tabela II: Karakteristične vrednosti obratovanja obločne peči pri maksimalni delovni moči na transformatorju ($\gamma = 4$)

Table II: Characteristic values for the arc furnace operation at the maximal effective power on the transformer ($\gamma = 4$)

γ	δ	$\cos \varphi$	j	P_d	P_l	P_n	η_{el}
4.00	0.00	.7071	.7071	.5000	.5000	.3750	.7500
4.00	0.10	.6710	.6916	.4641	.5128	.3445	.7423
4.00	0.20	.6340	.6806	.4315	.5263	.3157	.7316
4.00	0.30	.5969	.6737	.4022	.5405	.2887	.7178
4.00	0.40	.5606	.6709	.3761	.5556	.2636	.7008
4.00	0.50	.5257	.6718	.3532	.5714	.2403	.6806
4.00	0.60	.4927	.6760	.3331	.5882	.2188	.6570
4.00	0.70	.4618	.6833	.3155	.6061	.1988	.6301
4.00	0.80	.4332	.6934	.3004	.6250	.1802	.5998
4.00	0.90	.4068	.7063	.2873	.6452	.1626	.5660
4.00	1.00	.3827	.7216	.2761	.6667	.1460	.5286
4.00	1.10	.3606	.7394	.2666	.6897	.1299	.4874
4.00	1.20	.3404	.7597	.2586	.7143	.1143	.4421
4.00	1.30	.3220	.7824	.2519	.7407	.0989	.3925
4.00	1.40	.3052	.8078	.2465	.7692	.0834	.3383
4.00	1.50	.2898	.8359	.2422	.8000	.0676	.2789
4.00	1.60	.2757	.8669	.2390	.8333	.0511	.2138
4.00	1.70	.2627	.9012	.2368	.8696	.0337	.1425
4.00	1.80	.2508	.9391	.2356	.9091	.0151	.0640

V Tabeli II so izračunane obratovne vrednosti, ki so potrebne za doseganje največje delovne moči na transformatorju, v odvisnosti od razmerja δ za karakterističen parameter obločne peči $\gamma = 4$.

2.2 Maksimalna delovna moč na loku

tok pri maksimalni delovni moči loka:

$$j_{\delta} = \sqrt{\frac{\gamma^2 \sqrt{(\gamma^2 + 1)(\delta^2 + 1)}}{2(\gamma^2 + 1) [\sqrt{(\gamma^2 + 1)(\delta^2 + 1)} + (\gamma\delta + 1)]}} \quad (85)$$

fazni faktor pri maksimalni delovni moči loka:

$$\cos \varphi_{m\delta} = \frac{(\delta^2 + 1) + \sqrt{(\gamma^2 + 1)(\delta^2 + 1)}}{\sqrt{2(\delta^2 + 1)[(\gamma\delta + 1)\sqrt{(\gamma^2 + 1)(\delta^2 + 1)} + (\gamma^2 + 1)(\delta^2 + 1)}} \quad (86)$$

maksimalna delovna moč loka:

$$P_{m\delta} = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{(\gamma\delta + 1) + \sqrt{(\gamma^2 + 1)(\delta^2 + 1)}} \quad (87)$$

V **Tabeli III** so izračunane obratovalne vrednosti, pri katerih dosegamo največje delovne moči na loku, v odvisnosti od razmerja δ za karakterističen parameter obločne peči $\gamma = 4$.

γ	δ	$\cos \varphi$	j	P_d	P_l	P_i	η_{ei}
4.00	0.00	.7882	.6154	.4850	.3787	.3903	.8084
4.00	0.10	.7565	.5930	.4487	.3878	.3607	.6080
4.00	0.20	.7237	.5740	.4154	.3961	.3330	.6034
4.00	0.30	.6904	.5580	.3853	.4037	.3074	.5958
4.00	0.40	.6576	.5448	.3582	.4104	.2840	.5857
4.00	0.50	.6257	.5339	.3340	.4165	.2628	.5733
4.00	0.60	.5953	.5250	.3125	.4218	.2436	.5590
4.00	0.70	.5667	.5178	.2934	.4266	.2264	.5431
4.00	0.80	.5400	.5119	.2764	.4308	.2109	.5260
4.00	0.90	.5154	.5072	.2614	.4346	.1971	.5079
4.00	1.00	.4926	.5033	.2479	.4380	.1846	.4892
4.00	1.10	.4718	.5001	.2360	.4409	.1734	.4699
4.00	1.20	.4527	.4976	.2252	.4437	.1633	.4504
4.00	1.30	.4352	.4954	.2156	.4460	.1542	.4308
4.00	1.40	.4192	.4937	.2069	.4482	.1460	.4111
4.00	1.50	.4045	.4922	.1991	.4501	.1385	.3915
4.00	1.60	.3910	.4910	.1920	.4519	.1317	.3721
4.00	1.70	.3786	.4900	.1855	.4535	.1255	.3528
4.00	1.80	.3672	.4892	.1796	.4550	.1198	.3338

Tabela III: Karakteristične vrednosti obratovanja obločne peči pri maksimalni delovni moči na loku ($\gamma = 4$)

Table III: Characteristic values for the arc furnace operation at the maximal effective power on arc ($\gamma = 4$)

2.3 Maksimalni energijski izkoristek

Iz pogoja za ekstremno vrednost energijskega izkoristka dobimo vrednost toka, pri katerem je ta dosegljiv:

$$j_{\eta\delta} = \gamma \sqrt{\frac{\psi(\delta^2 + 1)[\gamma + 2\psi(\gamma - \delta)^2] - \psi\delta\sqrt{(\delta^2 + 1)[\gamma + 2\psi(\gamma - \delta)^2] - \gamma^2(\delta^2 + 1)}}{\gamma^2\delta^2 + [\gamma + 2\psi(\gamma - \delta)^2]^2}} \quad (88)$$

V **Tabeli IV** so izračunane obratovalne vrednosti, pri katerih dosegamo največje energijske izkoristke, v odvisnosti od velikosti razmerij δ in za karakterističen parameter obločne peči $\gamma = 4$.

Na **sliki 4** sta prikazana poteka energijskega izkoristka in izkoristka časa: vidimo, da so se z uvedbo razmerja δ spremenile vrednosti tokov, s katerima se lahko doseže ravnotežno pokrivanje toplotnih izgub.

tok za pokrivanje toplotnih izgub:

$$h_{1,2} = \sqrt{\frac{\gamma^2 - 2\gamma\psi(\gamma\delta + 1) \pm \gamma\sqrt{\gamma^2 - 4\gamma\psi(\gamma\delta + 1) - 4\psi^2(\gamma - \delta)^2}}{2(\gamma^2 + 1)}} \quad (89)$$

tok za pokrivanje maksimalnih toplotnih izgub:

$$h_0 = \frac{\gamma}{\gamma - \delta} \sqrt{\frac{(\gamma^2 + 1)(\delta^2 + 1) - (\gamma\delta + 1)\sqrt{(\gamma^2 + 1)(\delta^2 + 1)}}{2(\gamma^2 + 1)}} \quad (90)$$

maksimalne toplotne izgube:

$$\psi_0 = \frac{\gamma\sqrt{(\gamma^2 + 1)(\delta^2 + 1) - \gamma(\gamma\delta + 1)}}{2(\gamma - \delta)^2} \quad (91)$$

V **Tabeli V** so izračunane obratovalne vrednosti za mejno pokrivanje toplotnih izgub v odvisnosti od razmerij γ in za karakteristični parameter obločne peči $\gamma = 4$.

Erozijski indeks er ima pri δ podoben potek kot za idealne razmere, le da so njegove maksimalne vrednosti nižje in nastopajo pri slabših faznih faktorjih. V **tabeli VI** so izračunane obratovalne vrednosti pri maksimalnih erozijskih indeksih v odvisnosti od razmerja δ za karakterističen parameter obločne peči $\gamma = 4$.

Z vpeljavo faktorja δ se klasičen krožni diagram splošči: kot $\varphi_2 = \arctg \delta$ je tangenti kot sploščene krožnice v koordinatnem izhodišču, iz katerega vodijo krivulje konstantnih δ v skupno točko kratkega stika, in je torej

tudi najmanjši obratovalno dosegljivi fazni kot. Nasprotno pa je največji dosegljivi fazni kot pri kratkem stiku: $\varphi_1 = \arctg \gamma$, oziroma pri najvišje dosegljivem razmerju $\delta = \delta_0$. Kot je razvidno iz **slike 9**, so točke maksimalne moči na loku še vedno na isti premici kot na **sliki 2**, med tem ko se točke maksimalne moči na transformatorju z rastočim razmerjem δ zmanjšujejo tako, da se pri $\delta = \delta_0$ maksimalna delovna moč na transformatorju izenači z delovno močjo kratkega stika. Omeniti je treba tudi posebnost, da ostaja maksimalna delovna moč na transformatorju ob določenem razmerju δ pri tistem faznem faktorju, ne glede na različno vrednost γ . Obratovalna mesta maksimalnega energijskega izkoristka so prikazana na **sliki 10**: nizke toplotne izgube zahtevajo nižje vrednosti relativne moči obratovanja, najvišje izgube pa je mogoče pokrivati z obratovanjem, ki zagotavlja maksimalno moč na loku, t. j. pri $\psi = P_{m\delta}$.

Tabela IV: Karakteristične vrednosti obratovanja obločne peči pri maksimalnem energijskem izkoristku ($\gamma = 4$)

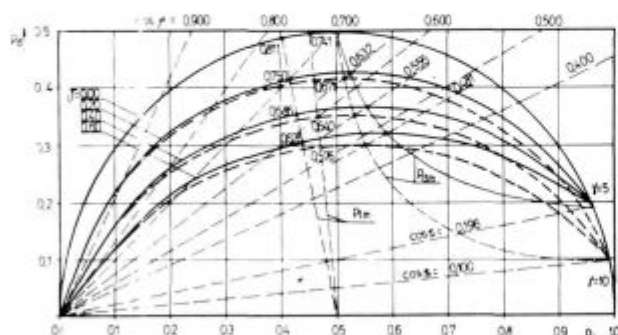
Table IV: Characteristic values for the arc furnace operation at the maximal energy yield ($\gamma = 4$)

ψ	δ	$\cos\varphi$	j	p_d	p_l	η_{el}	η_{en}
0.05	0.00	.9258	.3779	.3499	.1429	.8979	.7550
0.05	0.10	.8938	.3682	.3291	.1651	.8970	.7450
0.05	0.20	.8579	.3601	.3089	.1850	.8950	.7332
0.05	0.30	.8195	.3536	.2898	.2026	.8921	.7196
0.05	0.40	.7800	.3485	.2718	.2181	.8882	.7043
0.05	0.50	.7405	.3448	.2553	.2317	.8835	.6877
0.05	0.60	.7020	.3422	.2402	.2437	.8781	.6700
0.05	0.70	.6651	.3406	.2266	.2543	.8719	.6513
0.05	0.80	.6304	.3399	.2142	.2639	.8651	.6318
0.05	0.90	.5979	.3399	.2032	.2725	.8578	.6118
0.05	1.00	.5678	.3404	.1933	.2802	.8500	.5914
0.05	1.10	.5400	.3415	.1844	.2874	.8418	.5707
0.05	1.20	.5144	.3429	.1764	.2941	.8333	.5500
0.05	1.30	.4910	.3448	.1693	.3004	.8244	.5291
0.05	1.40	.4659	.3469	.1629	.3063	.8152	.5083
0.05	1.50	.4498	.3492	.1571	.3119	.8058	.4876
0.05	1.60	.4317	.3518	.1519	.3173	.7962	.4671
0.05	1.70	.4151	.3546	.1472	.3226	.7864	.4468
0.05	1.80	.3999	.3576	.1430	.3278	.7764	.4268
0.15	0.00	.8528	.5222	.4453	.2727	.8469	.5101
0.15	0.10	.8170	.5075	.4146	.2926	.8446	.4829
0.15	0.20	.7791	.4957	.3862	.3108	.8409	.4526
0.15	0.30	.7403	.4866	.3602	.3271	.8356	.4193
0.15	0.40	.7014	.4800	.3367	.3421	.8289	.3835
0.15	0.50	.6636	.4757	.3157	.3559	.8207	.3456
0.15	0.60	.6273	.4733	.2969	.3686	.8113	.3062
0.15	0.70	.5931	.4725	.2803	.3804	.8008	.2657
0.15	0.80	.5612	.4732	.2656	.3917	.7892	.2245
0.15	0.90	.5318	.4751	.2526	.4023	.7766	.1830
0.15	1.00	.5047	.4780	.2412	.4127	.7631	.1415
0.15	1.10	.4799	.4818	.2312	.4227	.7489	.1004
0.15	1.20	.4573	.4864	.2224	.4326	.7340	.0598
0.15	1.30	.4367	.4916	.2147	.4422	.7185	.0199
0.25	0.00	.8164	.5773	.4714	.3334	.8232	.2928
0.25	0.10	.7802	.5614	.4380	.3512	.8201	.2494
0.25	0.20	.7424	.5489	.4075	.3677	.8151	.2016
0.25	0.30	.7039	.5395	.3789	.3832	.8083	.1501
0.25	0.40	.6658	.5330	.3549	.3977	.7998	.0955
0.25	0.50	.6289	.5291	.3327	.4114	.7896	.0381
0.35	0.00	.7947	.6069	.4823	.3684	.8090	.0834
0.35	0.10	.7584	.5907	.4479	.3850	.8052	.0240

Tabela V: Karakteristične vrednosti obratovanja obločne peči pri mejnem pokrivanju toplotnih izgub ($\gamma = 4$)

Table V: Characteristic values for the arc furnace operation at the boundary compensation of thermal losses ($\gamma = 4$)

ψ	δ	j_1	$\cos\varphi_1$	j_2	$\cos\varphi_2$	j_0	$\cos\varphi_0$
0.05	0.00	.0507	.9987	.9565	.2914	.6154	.7882
0.05	0.10	.0512	.9888	.9516	.2904	.5930	.7565
0.05	0.20	.0522	.9698	.9466	.2894	.5740	.7237
0.05	0.30	.0537	.9430	.9415	.2884	.5580	.6904
0.05	0.40	.0557	.9101	.9364	.2875	.5448	.6576
0.05	0.50	.0582	.8731	.9312	.2865	.5339	.6257
0.05	0.60	.0610	.8337	.9259	.2854	.5250	.5953
0.05	0.70	.0643	.7935	.9206	.2844	.5178	.5667
0.05	0.80	.0678	.7536	.9152	.2834	.5119	.5400
0.05	0.90	.0717	.7150	.9098	.2824	.5072	.5154
0.05	1.00	.0758	.6780	.9043	.2813	.5033	.4926
0.05	1.10	.0802	.6432	.8987	.2803	.5001	.4718
0.05	1.20	.0848	.6105	.8930	.2792	.4976	.4527
0.05	1.30	.0896	.5800	.8872	.2781	.4954	.4352
0.05	1.40	.0946	.5517	.8814	.2770	.4937	.4192
0.05	1.50	.0998	.5255	.8754	.2759	.4922	.4045
0.05	1.60	.1052	.5013	.8694	.2748	.4910	.3910
0.05	1.70	.1108	.4789	.8633	.2737	.4901	.3786
0.05	1.80	.1165	.4581	.8571	.2726	.4892	.3672
.15	0.00	.1582	.9873	.9195	.3930	.6154	.7882
.15	0.10	.1618	.9670	.9034	.3918	.5930	.7565
.15	0.20	.1673	.9380	.8866	.3908	.5740	.7237
.15	0.30	.1748	.9017	.8690	.3898	.5580	.6904
.15	0.40	.1842	.8602	.8507	.3890	.5448	.6576
.15	0.50	.1957	.8153	.8313	.3882	.5339	.6257
.15	0.60	.2093	.7689	.8107	.3877	.5250	.5953
.15	0.70	.2251	.7224	.7888	.3873	.5178	.5667
.15	0.80	.2435	.6767	.7650	.3873	.5119	.5400
.15	0.90	.2648	.6325	.7391	.3877	.5072	.5154
.15	1.00	.2898	.5900	.7100	.3887	.5033	.4926
.15	1.10	.3197	.5490	.6765	.3908	.5001	.4718
.15	1.20	.3577	.5087	.6354	.3949	.4976	.4527
.15	1.30	.4142	.4656	.5761	.4043	.4954	.4352
.25	0.00	.2810	.9596	.8628	.5054	.6154	.7882
.25	0.10	.2933	.9255	.8309	.5086	.5930	.7565
.25	0.20	.3109	.8817	.7954	.5131	.5740	.7237
.25	0.30	.3354	.8291	.7548	.5198	.5580	.6904
.25	0.40	.3700	.7681	.7059	.5306	.5448	.6576
.25	0.50	.4245	.6950	.6387	.5510	.5339	.6275
.35	0.00	.4472	.8944	.7592	.6507	.6154	.7882
.35	0.10	.5063	.8178	.6739	.6878	.5930	.7565



Slika 9.

Krožni diagram obločne peči v realnih razmerah

Fig. 9

Circle diagram of the arc furnace in real conditions

V do sedaj prikazanih tabelah izračunane vrednosti osvetljujejo nekatera značilna obratovalna stanja obločne peči:

— maksimalna delovna moč na transformatorju se da doseči pri $\cos \varphi = 0.707$ le v idealiziranem primeru, ko je $\delta = 0$, sicer pa vedno pri slabšem faznem faktorju ($\cos \varphi < 0.707$) oziroma pri tokovih, ki so večji od 0,707;

— maksimalna delovna moč na loku, ki naj bi zagotavljala najintenzivnejši dovod energije v vložek, zahteva v idealiziranih razmerah obratovanje s faznim faktorjem $\cos \varphi_m = \cos \frac{\varphi_0}{2}$, kar je v vsakem primeru večja vrednost

od 0,707, sicer pa se z naraščajočim razmerjem δ znižuje. Za fazo taljenja, ki se vedno začneja z visokimi vrednostmi δ , pomeni zahteva po vsakokratni maksimalni moči loka začetno obratovanje z zelo nizkimi $\cos \varphi = 0,55 - 0,60$ in z tokovi $j = 0,50 - 0,52$, zaključek

Tabela VI: Karakteristične vrednosti obratovanja obločne peči pri maksimalnem erozijskem indeksu ($\gamma = 4$)

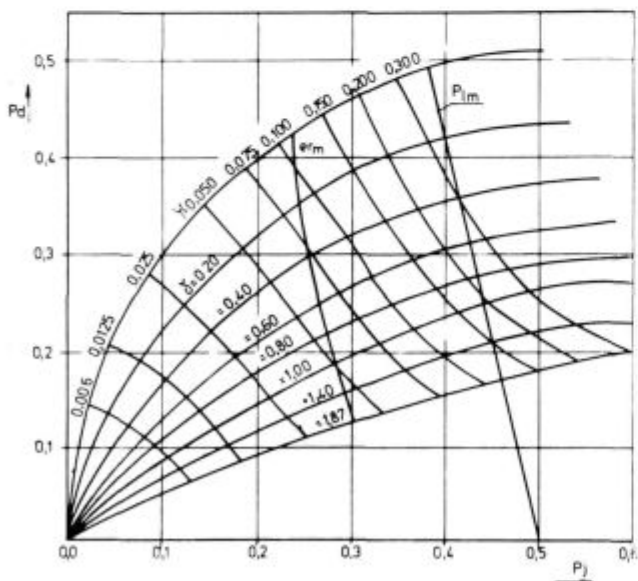
Table VI: Characteristic values for the arc furnace operation at the maximal erosion index ($\gamma = 4$)

γ	δ	j	$\cos \varphi$	$e\Gamma_{max}$	ρ_d	ρ_j
4.00	0.00	0.4779	0.8783	0.2752	0.4198	0.2284
4.00	0.10	0.4519	0.8506	0.2459	0.3844	0.2376
4.00	0.20	0.4289	0.8204	0.2182	0.3519	0.2452
4.00	0.30	0.4099	0.7880	0.1926	0.3230	0.2524
4.00	0.40	0.3939	0.7544	0.1695	0.2972	0.2586
4.00	0.50	0.3809	0.7203	0.1488	0.2744	0.2642
4.00	0.60	0.3709	0.6864	0.1307	0.2546	0.2697
4.00	0.70	0.3619	0.6540	0.1149	0.2367	0.2738
4.00	0.80	0.3549	0.6228	0.1012	0.2211	0.2777
4.00	0.90	0.3499	0.5931	0.0894	0.2076	0.2817
4.00	1.00	0.3449	0.5657	0.0793	0.1951	0.2844
4.00	1.10	0.3409	0.5402	0.0705	0.1842	0.2869
4.00	1.20	0.3379	0.5164	0.0630	0.1745	0.2894
4.00	1.30	0.3359	0.4942	0.0565	0.1660	0.2920
4.00	1.40	0.3339	0.4739	0.0509	0.1582	0.2941
4.00	1.50	0.3319	0.4552	0.0460	0.1511	0.2956
4.00	1.60	0.3309	0.4377	0.0417	0.1449	0.2975
4.00	1.70	0.3289	0.4220	0.0379	0.1388	0.2982
4.00	1.80	0.3279	0.4071	0.0346	0.1335	0.2995

taljenja pa z relativno ugodnim $\cos \varphi = 0,75-0,80$, ker se ob koncu taljenja δ zmanjša na $\delta = 0,05-0,15$;

— maksimalni energijski izkoristek je odvisen tako od relativnih toplotnih izgub ψ kakor tudi od razmerja δ . Za začetek taljenja, ko imamo nizke toplotne izgube in visoko razmerje δ , zahteva obratovanje $\cos \varphi = 0,60-0,70$ oziroma tok $j = 0,32-0,34$, spremljene razmere na zaključku taljenja pa zahtevajo obratovanje s $\cos \varphi = 0,82-0,84$ in tok $j = 0,52-0,60$;

— maksimalni erozijski indeks nastopa pri idealnih razmerah za v praksi nastopajoče vrednosti $\gamma = 3-10$ pri $\cos \varphi = 0,89-0,84$ oziroma pri toku $j = 0,45-0,54$, z upoštevanjem razmerja δ pa pri nekaj nižjih vrednosti faznega faktorja oziroma pri nižjih tokovih.



Slika 10.

Krožni diagram obločne peči v realnih razmerah z mesti maksimalnih energijskih izkoristkov

Fig. 10

Circle diagram of the arc furnace in real conditions with the points of maximal energy yields

Na podlagi izvedenih zakonitosti je možna optimizacija obratovanja obločne peči glede na različne tehnološke zahteve in omejitve kakor tudi glede na specifično energijsko porabo, proizvodnost peči in minimum proizvodnih stroškov.

3. OBRATOVALNA INDUKTIVNA UPORNOST

Z uvedbo induktivne upornosti loka v nadomestno shemo obločne peči se skupna induktivna upornost ustrežno razmeram v peči povečuje: namesto z meritvami definirane kratkostične induktivne upornosti nastopa v električnem tokokrogu obločne peči takoimenovana obratovalna induktivna upornost. Učinek tega povečanja je bil večkrat ugotavljen in publiciran, vendar bolj kot napotilo za pravilno dimenzioniranje električnih parametrov peči oziroma transformatorja. Ker nas zanima predvsem razmerje obratovalne induktivne upornosti nasproti njeni kratkostični vrednosti, sledi:

$$\frac{X_0}{X_k} = 1 + \delta \frac{e}{j} \tag{92}$$

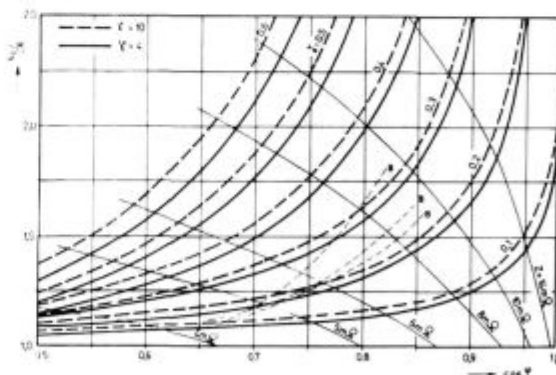
in z upoštevanjem izraza za napetost loka:

$$\frac{X_0}{X_k} = \frac{\gamma - \delta}{\delta(\delta^2 + 1)} + \sqrt{\frac{\delta^2}{j^2(\delta^2 + 1)} - \left[\frac{\delta(\gamma - \delta)}{\gamma(\delta^2 + 1)} \right]^2} \tag{93}$$

Preko zamenjave relativnega toka s faznim faktorjem dobimo poenostavljeni izraz za razmerje upornost:

$$\frac{X_0}{X_k} = \frac{\gamma - \delta}{\gamma} \cdot \frac{1}{1 - \delta \operatorname{ctg} \varphi} \tag{94}$$

Razmerje δ torej neposredno vpliva na povečanje obratovalne induktivne upornosti, prav tako kakor tudi že dosedaj empirično znano dejstvo, po katerem vodi večanje obratovalnega faznega faktorja neposredno k večanju obratovalne induktivne upornosti: z navedeno izpeljavo je empiričen odnos dobil teoretsko potrditev.



Slika 11.

Obratovalna induktivna upornost obločne peči

Fig. 11

Operational inductive reactance of the arc furnace

Slika 11 prikazuje prejšnje ugotovitve, kjer je ob vnesenih mernih vrednostih po Bowmanu¹ podana še obratovalna impedančna upornost:

$$Z_0 = \frac{X}{\sin \varphi} [\Omega] \tag{95}$$

kot karakteristična regulacijska veličina obločne peči. V **Tabeli VII** so prikazane nekatere računске vrednosti razmerja obratovalne in kratkostične induktivne upornosti.

Tabela VII: Obratovalna induktivna upornost obločne peči ($\gamma = 4$)

Table VII: Operation inductive reactance of the arc furnace ($\gamma = 4$)

γ	$\cos \varphi$	X_o/X_k	δ	P_n	P_d	P_j
4.00	0.60	1.00	0.000	.8000	.4800	.6400
4.00	0.60	1.10	0.174	.7273	.4364	.5818
4.00	0.60	1.20	0.308	.6667	.4000	.5333
4.00	0.60	1.30	0.414	.6154	.3692	.4923
4.00	0.60	1.40	0.500	.5714	.3429	.4571
4.00	0.60	1.50	0.571	.5333	.3200	.4267
4.00	0.60	1.60	0.632	.5000	.3000	.4000
4.00	0.60	1.70	0.683	.4706	.2824	.3765
4.00	0.60	1.80	0.727	.4444	.2667	.3556
4.00	0.60	1.90	0.766	.4211	.2526	.3368
4.00	0.60	2.00	0.800	.4000	.2400	.3200
4.00	0.65	1.00	0.000	.7599	.4940	.5775
4.00	0.65	1.10	0.145	.6908	.4491	.5250
4.00	0.65	1.20	0.258	.6333	.4116	.4812
4.00	0.65	1.30	0.348	.5846	.3800	.4442
4.00	0.65	1.40	0.422	.5428	.3528	.4125
4.00	0.65	1.50	0.484	.5066	.3293	.3850
4.00	0.65	1.60	0.536	.4750	.3087	.3609
4.00	0.65	1.70	0.581	.4470	.2906	.3397
4.00	0.65	1.80	0.620	.4222	.2744	.3208
4.00	0.65	1.90	0.654	.4000	.2600	.3039
4.00	0.65	2.00	0.685	.3800	.2470	.2887
4.00	0.70	1.00	0.000	.7141	.4999	.5100
4.00	0.70	1.10	0.121	.6492	.4545	.4636
4.00	0.70	1.20	0.216	.5951	.4166	.4250
4.00	0.70	1.30	0.293	.5493	.3845	.3923
4.00	0.70	1.40	0.356	.5101	.3571	.3643
4.00	0.70	1.50	0.410	.4761	.3333	.3400
4.00	0.70	1.60	0.455	.4463	.3124	.3187
4.00	0.70	1.70	0.494	.4201	.2941	.3000
4.00	0.70	1.80	0.528	.3967	.2777	.2833
4.00	0.70	1.90	0.558	.3759	.2631	.2684
4.00	0.70	2.00	0.585	.3571	.2499	.2550
4.00	0.75	1.00	0.000	.6614	.4961	.4375
4.00	0.75	1.10	0.100	.6013	.4510	.3977
4.00	0.75	1.20	0.180	.5512	.4134	.3646
4.00	0.75	1.30	0.245	.5088	.3816	.3365
4.00	0.75	1.40	0.299	.4725	.3543	.3125
4.00	0.75	1.50	0.345	.4410	.3307	.2917
4.00	0.75	1.60	0.384	.4134	.3100	.2734
4.00	0.75	1.70	0.417	.3891	.2918	.2574
4.00	0.75	1.80	0.447	.3675	.2756	.2431
4.00	0.75	1.90	0.473	.3481	.2611	.2303
4.00	0.75	2.00	0.496	.3307	.2480	.2187
4.00	0.80	1.00	0.000	.6000	.4800	.3600
4.00	0.80	1.10	0.082	.5455	.4364	.3273
4.00	0.80	1.20	0.148	.5000	.4000	.3000
4.00	0.80	1.30	0.202	.4615	.3692	.2769
4.00	0.80	1.40	0.247	.4286	.3429	.2571
4.00	0.80	1.50	0.286	.4000	.3200	.2400
4.00	0.80	1.60	0.319	.3750	.3000	.2250
4.00	0.80	1.70	0.347	.3529	.2824	.2118
4.00	0.80	1.80	0.372	.3333	.2667	.2000
4.00	0.80	1.90	0.394	.3158	.2526	.1895
4.00	0.80	2.00	0.414	.3000	.2400	.1800

Ob poznanih kratkostičnih vrednostih ohmske in induktivne upornosti je za določitev razmerja z obratovalno induktivno upornostjo potrebno v obratovanju obločne peči ugotovljati njeno vrednost preko meritev toka (J) in jalove moči (P_j):

$$X_o = \frac{P_d}{J^2} [\Omega] \quad (96)$$

Razmerje δ se dobi z upoštevanjem pripadajočega faznega faktorja:

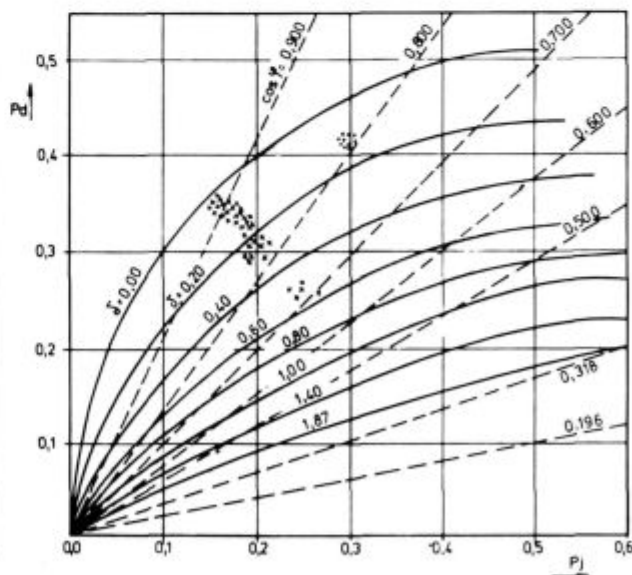
$$\delta = \frac{\gamma \left(\frac{X_o}{X_k} - 1 \right)}{\gamma \frac{X_o}{X_k} \operatorname{ctg} \varphi - 1} \quad (97)$$

Na podlagi tako dobljenih vrednosti faktorjev δ in $\cos \varphi$ je mogoče preko enačb za relativne vrednosti delovne (p_d) in jalove (p_j) moči določiti mesto obratovanja na prirejenem krožnem diagramu oziroma je mogoče obratovanje obločne peči prilagoditi optimalnim vrednostim glede na zahteve po maksimalni delovni moči na loku, po maksimalnem energijskem izkoristku ali drugih vidikih optimalnega vodenja obločne peči. Posamezne faze obratovanja obločne peči se med seboj bistveno razlikujejo:

— faza uvodnega taljenja: obratujemo z znižano napetostjo loka; lok zaradi slabih jonizacijskih pogojev težko gori in ugaša; prihaja do kratkih stikov pod posameznimi elektrodami in do občasnega dvofaznega obratovanja; obratujemo za $\cos \varphi = 0,60 - 0,75$; izmerjene so vrednosti $\delta = 0,40 - 0,70$;

— faza nazivnega taljenja: talimo z največjo močjo; električni lok gori relativno stabilno, saj se pod njim že ustvarja prva talina; vložek se tali med posameznimi elektrodami; ob rušitvi vložka v elektrodne kraterje prihaja do kratkih stikov, ki jih mora elektrodna regulacija izravnovati; obratujemo s $\cos \varphi = 0,72 - 0,82$. Posebno moderne UHP obločne peči omogočajo obratovanje z dolgim lokom, t. j. z visokim \cos . Razmerje δ se postopoma zmanjšuje od $\delta = 0,40$ na $\delta = 0,10$.

— faza raztaljenega vložka: električni lok gori zelo stabilno; v peč dovajamo bistveno zmanjšano moč, ki služi le za dvig temperature taline ali pa za vzdrževanje njene temperature. Običajno obratujemo s $\cos \varphi = 0,75$; le v primerih, ko je iz tehnoloških razlogov potrebno



Slika 12.

Prikaz obratovanja obločne peči v realnem krožnem diagramu

fig. 12

Presentation of the arc furnace operation in the real circle diagram

obratovanje z dolgim lokom, tudi s $\cos \varphi > 0,80$. Razmerje δ se ustali med vrednostjo $\delta = 0,00 - 0,15$.

Na sliki 12 prikazane izmerjene vrednosti so dobljene s pomočjo on-line računalniškega merilnega sistema, ki z digitalizacijo sinusne periode faznih napetosti in tokov, vzeti kot vzorec vsako sekundo, izračunava njihove efektivne vrednosti ter vrednosti delovne, jalove in navidezne moči in jih povpreči za poljubno izbrano število vzorcev. Merilni sistem daje tako vse tri fazne vrednosti, kar je važno za presojo delovanja elektrodne regulacije posameznih faz, kakor tudi skupne trofazne vrednosti. S pomočjo v računalnik vstavljenega modela dobimo poleg absolutnih vrednosti napetosti, toka in moči prikazane vsakokratne relativne vrednosti moči, faznega faktorja in razmerja δ . Slika 12 tudi kaže, kako so za posamezne napetostne stopnje prednastavljena obratovalna mesta elektrodne regulacije. Pri vsaki napetostni stopnji imamo določeno število obratovalnih točk, od katerih so vrednosti v času taljenja značilno razsute vzdolž obratovalnih mest konstantne impedance loka, medtem ko so posamezne točke pri dogrevanju ali vzdrževanju temperature taline skoncentrirane v točkovne grupe z majhnim trosejnjem.

4. SKLEP

Standardni prikaz elektroenergetskih obratovalnih karakteristik obločne peči temelji na obračunu električnega tokokroga, v katerem je lok nadomeščen z ohmsko upornostjo. Z uvedbo razmerja kratkostične induktivne in ohmske upornosti pečnega tokokroga (γ) in z uvedbo razmerja toplotnih izgub peči proti moči idealnega kratkega stika (ψ) so se univerzalno posplošile v relativnih vrednostih podane enačbe vseh električnih vrednosti in njih značilnih obratovalnih mest. Z upoštevanjem induktivne upornosti loka in njegovega konstantnega razmerja do njegove nadomestne ohmske upornosti (δ) so bile izvedene izpopolnjene enačbe za realnejše opisovanje elektroenergetskih lastnosti obločne peči. Uvedeno razmerje δ je tudi teoretsko utemeljilo odnos med obratovalno induktivno upornostjo in faznim faktorjem. Z meritvami delovne in jalove moči obločne peči je faktor δ neposredno določljiv in služi poleg faznega faktorja, ki je

pri obratovanju obločne peči vodilna veličina, kot nastavitveni spremenljivi parameter elektrodne regulacije v različnih tehnoloških fazah obratovanja obločne peči.

LITERATURA

1. B. Bowman: Trends in electrical Parameters of Arc Steel-making Furnaces, *Elektrowaerme International* 37 (1979)
2. K. Bretthauer: Optimierung der Anordnung der Hochstromleiter von Drehstromlichtbogenofen, *Elektrowaerme International* 41 (1983)
3. E. Markworth: Möglichkeiten einer Leistungssteigerung beim Betrieb von Lichtbogen — Schmelzofen, *Elektrowaerme International* 39 (1980)
4. W. E. Schwabe: Electric Furnace Problems: Design and Operating requirements for UHP Arc Furnaces melting Preduced Charge materials, U. I. E. 1976
5. W. E. Schwabe: Development of large Steel Furnaces from 100 t to 400 t Capacity, U. I. E. 1972
6. K. Schermer: Verminderung des Einschmelzstromverbrauches des Lichtbogenofens durch Ausnutzung der im Abgass enthaltene Waerme zum Schrotverwaermen, *Elektrowaerme International* 39 (1981)
7. H. Berger: Die elektrische und mechanische Auslegung des Elektrolichtbogenofens, *Radex Rundschau* 1 (1982)
8. G. Pfeiffer: Elektrische Auslegung und Ausruestung von Lichtbogenofenanlagen, *Radex Rundschau* 2 (1984)
9. S. Koele: Lineares elektrisches Ersatzschaltbild von Drehstromlichtbogenofen, UIE Kongres, Stockholm 1984
10. S. Koele: Lineares Ersatzschaltbild des Hochstromsystems von Drehstrom Lichtbogenofen, *Elektrowaerme International* 43 (1985)
11. M. Sakulin: Betriebsverhalten von Drehstromlichtbogenofen, 4th Arc Furnace Meeting, Budapest 1985
12. M. Karbowiczek: Optimization of the Work Parameters of Steemaking Process, 4th Arc Furnace Meeting, Budapest 1985
13. L. Perme, I. J. Schifarth: Einige Probleme bei der Untersuchung der Lichtbogenspannung, *Elektrowaerme* 15 (1957)
14. J. Bratina: Elektroenergetski ter obratovalni odnosi obločne peči za proizvodnjo jekla, *Železarski Zbornik* 3, (1969)
15. J. Bratina: Računalniško upravljanje električne moči obločnih peči, *Železarski Zbornik* 4 (1978)
16. J. Bratina: Optimalno obratovanje obločne peči za proizvodnjo jekla, *Energetika i zaštita okolja u crnoj metalurgiji* 1984
17. J. Bratina: Elektroobločna peč danes, *Železarski Zbornik* 22 (1988)

ZUSAMMENFASSUNG

Es wird eine übliche Darstellung der elektroenergetischen und Betriebsverhältnisse eines Lichtbogenofens zur Erzeugung von Stahl, mit relativen elektrotechnischen Werten gegeben. Dieses macht den Vergleich der Betriebszustände verschiedener Öfen möglich. Der Grund für die Ausführung der Gleichungen und für die Darstellung der charakteristischen Zustände ist der Strom eines idealen Kurzschlusses des Lichtbogenofens bzw. deren Stärke, und das Verhältniss des induktiven — Kurzschluss, und des ohmschen Widerstandes des Ofens. Die ausgeführten Gleichungen für die Kurzschlussverhältnisse bei der maximalen Arbeitskraft am Ofentransformator bzw. am elektrischen Lichtbogen bei maximaler Energieausnutzung, bei maximaler Zeitausnutzung, bei der Grenzbedeckung der Wärmeverluste und beim maximalen Erosionsindex geben eine

Übersicht über die mögliche Betriebsweise eines Lichtbogenofens. Mit der Einführung der zusätzlichen Induktivität des Lichtbogens, das ist des Verhältnisses des induktiven Widerstandes des Lichtbogens gegenüber dessen ohmschen Ersatzwiderstandes (δ) ist es möglich für alle angeführten Betriebszustände der Realität eine entsprechende Abrechnung zu machen, welche die bisher bekannte Anwendung des sogenannten induktiven Betriebswiderstandes des Ofens ersetzt. Aus den Gleichungen, ausgeführt in relativen Werten geht hervor, dass beim bekannten Verhältniss (γ), und beim ausgemessenen Faktor (δ), der Phasenfaktor ($\cos \varphi$) des Lichtbogenofens in deren allen betrieblichen und technologischen Phasen, die führende Grösse ist.

SUMMARY

Standard presentation of electric-energy and operating conditions of the steelmaking arc furnace with the relative electrical values is given, and thus a comparison of operating conditions can be made for various furnaces. Basis for the deduction of equations and for the presentation of characteristic conditions is the current of ideal short circuit of the arc furnace or its power, and the ratio of short-circuit inductive and ohmic resistance of the furnace. The deduced equations for the short-circuit conditions, for the conditions at the maximal effective power on the furnace transformer or on the electric arc, at the maximal energy yield, at the boundary covering of thermal losses, and at the

maximal erosion index give the possible operating conditions of the arc furnace. Introduction of the added inductivity of electric arc, i.e. the ratio of inductive reactance of the arc and its substituting ohmic resistance (δ), enables for all the previously given real operating conditions a corresponding evaluation which substitutes the so far known application of the so called operating inductive reactance of the furnace. The equations were deduced for relative values and they show that controlling quantity of the arc furnace in all the operational and technological steps is the power factor ($\cos \varphi$) if ratio γ and measured factor φ are known.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Додана стандартизована модель електроенергетического отношения хода электродуговой печи для производства стали с приведением относительных электротехнических значений, что даёт возможность сравнению состояния хода различных типов печей. Основание для осуществления уравнений и для пояснения характеристических состояний представляет собой ток идеального короткого замыкания дуговой печи, относительно её мощность, а также и отношение замыкания на коротко индуктивного и омического сопротивления печи. Выведенные уравнения для замыкания на коротко для отношений при максимальном рабочем ходе относительно при максимальной мощности на трансформатору печи относительно на электрической дуге, при максимальном использовании энергии и времени, а также при ма-

ксимальном покрытию тепловых потерь и при максимальном эрозионном индексе дают обозрение над возможностью работы дуговой печи. С внесением добавочной индуктивности электрического лука, что значит отношения индуктивного сопротивления дуги против его заменимого омического сопротивления (δ), окажется возможность для всех рабочих состояний реальный соответственный подсчёт, который заменят до сих пор известное применение так называемого индуктивного сопротивления печи. Из уравнений, выведенных в относительных значениях следует, что при известном отношении (γ) и при измеренным факторе фазовой фактор ($\cos \varphi$) представляет собой ведущую величину дуговой печи при её фазах производства и технологии производственных и технологических фаз.