

Obratovalni elektroenergetski model obločne peči (grafičen prikaz)

Bratina Janez¹

UDK: 669.187.25:621.365.2.001.5:620.9
ASM/SLA: W18s, U7c, D5a, U4k

V članku so z vrsto grafičnih slik prikazani funkcijski odnosi elektroenergetskih parametrov obločne peči, kot nastopajo pri modelu obločne peči, ki poleg kratkostičnih induktivnih in ohmskih upornosti upošteva še induktivno in ohmsko upornost električnega loka. Relativne vrednosti delovne moči na pečnem transformatorju, relativne vrednosti delovne moči na loku, relativne vrednosti napetosti loka, erozijski indeks, energijski in časovni izkoristek obločne peči so podani v odvisnosti od faznega faktorja $\cos\varphi$, ki je vodilna obratovalna veličina obločne peči, ter od razmerja induktivne in ohmske upornosti loka (δ), ki se podobno kot $\cos\varphi$ neposredno meri v času obratovanja. Splošno veljavne relativne elektroenergetske vrednosti obločne peči so za idealiziran primer obratovanja odvisne le od razmerja kratkostične induktivne in ohmske upornosti peči (γ), ki se glede na velikost in tip peči spreminja le v znanih mejah; prav tako je za posamezne tehnološke faze znano razmerje induktivne in nadomestne ohmske upornosti na loku peči (δ). Prikazane slike za realno nastopajoče vrednosti (γ) in (δ) ter $\cos\varphi$ omogočajo nazoren pregled stanj obločne peči, ki jih definira način vodenja peči ($\cos\varphi$, moč) in tehnološka faza obratovanja (δ). Poleg poglobljenega orisa elektroenergetskih in toplotnotehniških realnih stanj obločne peči omogoča tak prikaz medsebojno vrednotenje različnih tehnologij, kakor tudi optimiranje vodenja peči glede na energijski oziroma časovni izkoristek in glede na druge obratovalne omejitve.

Obratovalni elektroenergetski model obločne peči je postavljen na (navidezni) induktivni upornosti loka, ki daje skupno s kratkostično induktivno upornostjo peči (napajalne mreže, pečnega transformatorja, visokotokovnega sistema peči) takoimenovano obratovalno induktivno upornost obločne peči. Induktivna upornost loka je za posamezne tehnološke faze obratovanja peči v stalnem sorazmerju z nadomestno ohmsko upornostjo loka, ki nastopa kot ekvivalent delovne moči loka. Z razmerjem teh upornosti (δ) ter z znanim razmerjem kratkostične induktivne in ohmske upornosti (γ) so določljiva vsa obratovalna mesta obločne peči, izražena z relativnimi vrednostmi tokov, moči, napetosti oziroma z dejanskimi vrednostmi faznih faktorjev $\cos\varphi$ ter energijskih in časovnih izkoristkov obločne peči.

S pomočjo meritev toka in faznih jalovih moči je razmerje δ določljivo za vsako od treh faz trifazne obločne peči in je poleg faznih moči loka tudi merilo za simetričnost obremenitev peči kot porabnika električne energije. Običajno merimo jalovo moč posredno preko meritev navidezne in delovne moči, od merilnega sistema je odvisno, ali zajemamo z meritvijo vse, pri obratovanju peči nastopajoče dejavnike, ki določajo velikost jalove moči obločne peči. Ločimo namreč tri momente, ki vplivajo na končno višino ekvivalentne jalove moči obločne peči:

- jalova moč, ki nastaja zaradi časovnega zamika toka loka proti njegovi trenutni vrednosti napetosti zaradi zakasnelega vžiga loka oziroma potrebne vžigne napetosti loka;

- jalova moč, ki nastane zaradi višjih harmonskih komponent toka loka zaradi njegove značilne pravokotne napetostne karakteristike;

- jalova moč, ki nastane zaradi dodatnih sprememb toka oziroma napetosti kot posledica utripajočega oziroma nestabilnega gorenja električnega loka, katerega frekvenčni spekter utripanja leži izven osnovne frekvence napetosti in toka.

Poleg analognih merilnih pretvornikov, ki omogočajo zajemanje navedenih vrednosti in izračunavanje induktivne upornosti loka in razmerja δ , se vedno bolj uveljavljajo digitalni merilniki, ki s pomočjo posameznih vrednosti znotraj sinusne periode toka in napetosti vrednotijo njih efektivne vrednosti, s pomočjo katerih se nato izračunavajo delovna, navidezna in jalova moč. Računalniška merilna garnitura daje vse, za obratovanje obločne peči pomembne veličine: fazne toke, napetosti, fazne delovne, navidezne in jalove moči, fazni faktor $\cos\varphi$, razmerje δ , tokovno integracijo elektrodnih tokov, fazne energijske porabe itd., bodisi v trenutnih bodisi v povprečnih vrednostih.

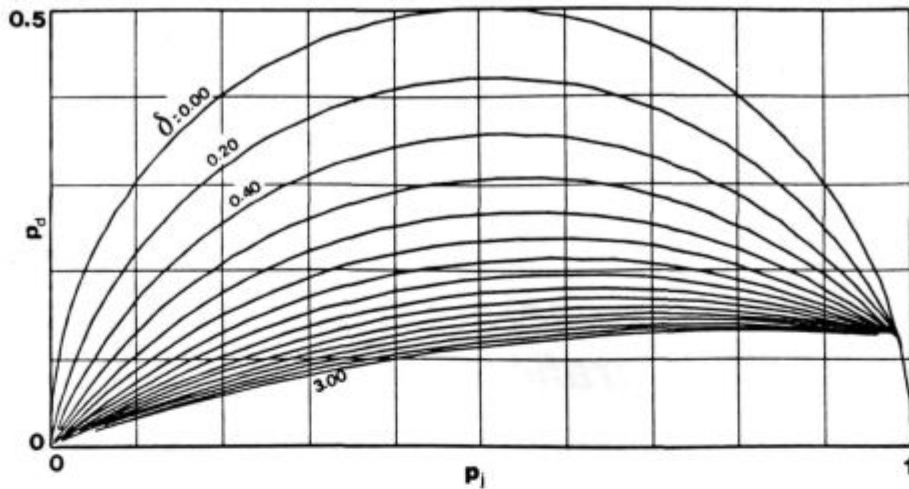
Obratovalni diagrami imajo vedno prednost pred kompliciranimi analitskimi enačbami: preglednost jim daje prednost pred eksaktnostjo. Prav zaradi tega je podan ta dodatek enačbam iz Obratovalnega elektroenergetskega modela obločne peči (ŽZB 1989/2) kot grafični prikaz značilnih elektrotehniških in energijskih odnosov pri obratovanju elektroobločne peči, kot jih je mogoče dobiti s pomočjo izpeljanih analitičnih izrazov in računalniške grafike.

Slika 1 kaže splošno veljavni krožni diagram obločne peči, ki ga z nanovo vpeljanim razmerjem induktivne in ohmske upornosti loka (δ) dopolnjujejo sploščene krož-

¹ dr. Janez Bratina, dipl. ing. el. — Železarna Ravne

² Originalno objavljeno: ŽZB 24 (1990/2)

³ Rokopis prejet: jan. 1990

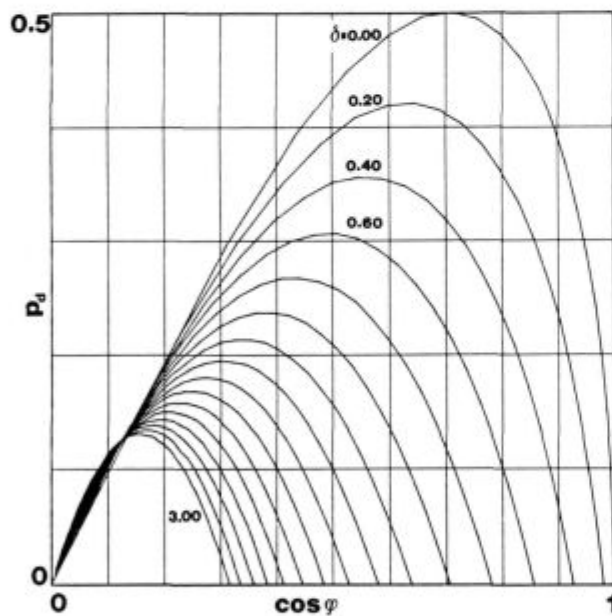


Slika 1

Krožni diagram elektroobločne peči, $\gamma=8$, $\delta=0.00-3.00$, $\Delta\delta=0.20$
 p_d — relativna delovna moč
 p_i — relativna jalova moč

Fig: 1

Circle diagram of electric arc furnace, $\gamma=8$, $\delta=0.00-3.00$, $\Delta\delta=0.20$
 p_d — relative active power
 p_i — relative reactive power



Slika 2

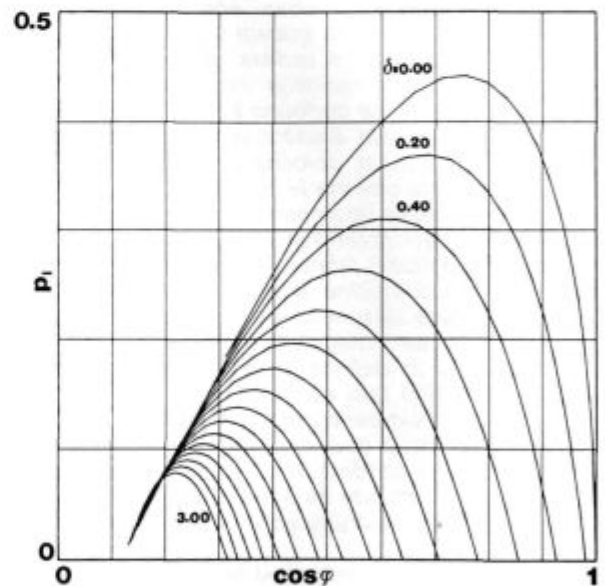
Obratovalni diagram elektroobločne peči, $\gamma=8$, $\delta=0.00-3.00$, $\Delta\delta=0.20$
 p_d — relativna delovna moč
 $\cos\varphi$ — fazni faktor

Fig: 2

Operational diagram of electric arc furnace, $\gamma=8$, $\delta=0.00-3.00$, $\Delta\delta=0.20$
 p_d — relative active power
 $\cos\varphi$ — phase factor

nice, ki določajo relativne vrednosti delovne in jalove moči, toka in pripadajočega faznega faktorja $\cos\varphi$ od idealne polkrožnice pri $\delta=0.00$ do mejne krivulje maksimalnega možnega razmerja δ . Vse krivulje so podane za razmerje kratkostičnih vrednosti $\gamma=8$, zato veljajo:

— kratkostični fazni faktor: $\cos\delta_k=0.124$



Slika 3

Obratovalni diagram elektroobločne peči, $\gamma=8$, $\delta=0.00-3.00$, $\Delta\delta=0.20$
 p_i — relativna delovna moč na loku
 $\cos\varphi$ — fazni faktor

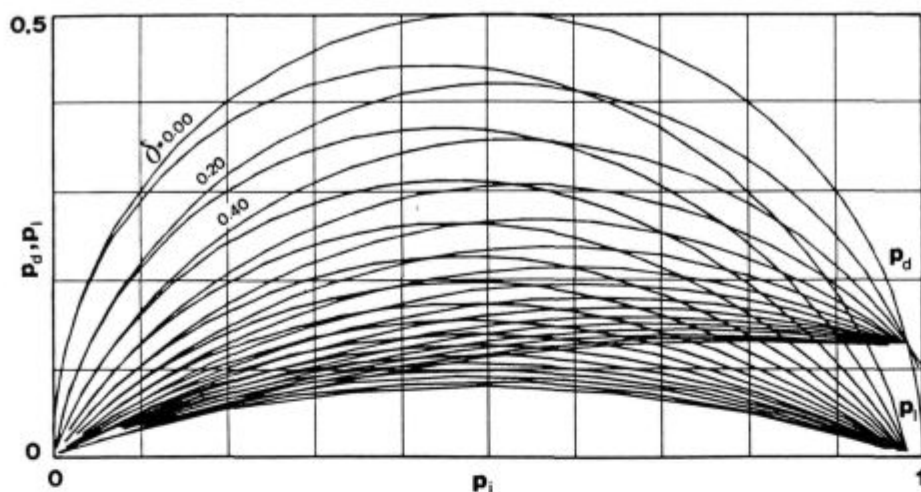
Fig: 3

Operational diagram of electric arc furnace, $\gamma=8$, $\delta=0.00-3.00$, $\Delta\delta=0.20$
 p_i — relative active power in arc
 $\cos\varphi$ — phase factor

— začetni (največji možni) fazni faktor ob $\delta=3.938$: $\cos\varphi_0=0.246$.

Slika 2 prikazuje obratovalni diagram obločne peči in kaže odvisnost delovne moči na transformatorju od faznega faktorja $\cos\varphi$ za različna razmerja δ pri $\gamma=8$.

Slika 3 kaže odvisnost delovne moči na loku od faznega faktorja $\cos\varphi$. Na obeh slikah se vidi, kako se obra-



Slika 4

Krožni diagram elektroobločne peči, $\gamma = 8$, $\delta = 0.00 - 3.00$, $\Delta\delta = 0.20$

p_d — relativna delovna moč
 p_i — relativna delovna moč na loku
 p_j — relativna jalova moč

Fig: 4

Circle diagram of electric arc furnace, $\gamma = 8$, $\delta = 0.00 - 3.00$, $\Delta\delta = 0.20$

p_d — relative active power
 p_i — relative active power in arc
 p_j — relative reactive power

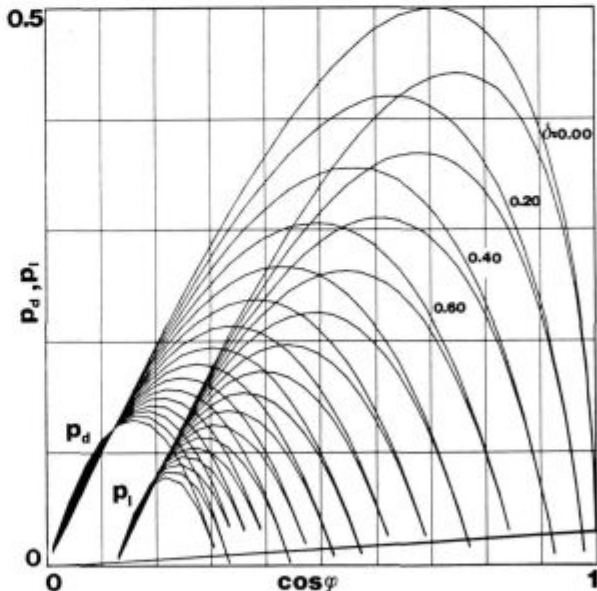
tovalna mesta maksimalnih moči na loku z padajočim razmerjem δ premikajo k večjim vrednostim $\cos\varphi$; začetek taljenja pomeni visoka razmerja $\delta = 0.30 - 0.50$ in torej obratovanje z nizkim $\cos\varphi = 0.68 - 0.62$; polno taljenje (na pr. na preostanek taline) pa mora ob nižjih $\delta = 0.05 - 0.15$ potekati pri ustrezno višjih $\cos\varphi = 0.80 - 0.82$, če želimo pri taljenju vložka dosežati obratovalna območja maksimalnih moči na loku.

Slika 4 je skupna slika delovne moči na transformatorju in delovne moči na loku v odvisnosti od jalove moči. Vidna sta izrazito različna maksimuma obeh moči, razviden je tudi pričakovani pojav, ki dokazuje, kako se delovna moč na transformatorju ob kratkem stiku zniža na svojo najmanjšo vrednost, t.j. na vrednost moči kratkostičnih izgub, ter kako pri tem delovna moč na loku pade na vrednost nič.

Slika 5 je skupna slika delovne moči na transformatorju in delovne moči na loku v odvisnosti od faznega faktorja $\cos\varphi$; pri vsakokratnem razmerju δ je obratovanje z maksimalno močjo loka vedno pri višjem $\cos\varphi$, kot pri obratovanju pri maksimalni moči na transformatorju. S slike se lepo razbere, kolikšno relativno moč izgubljamo, če ne vodimo obratovanja peči ustrezno vsakokratnemu stanju v peči, t.j. v odvisnosti od izmerjene vrednosti δ . Absolutne vrednosti moči dobimo — skladno z definicijo — tako, da relativne vrednosti moči pomnožimo s pripadajočo močjo idealnega kratkega stika.

Slika 6 kaže relativno vrednost napetosti na loku v odvisnosti od $\cos\varphi$. Ker je dolžina loka neposredno sorazmerna z napetostjo na loku, lahko s pomočjo diagrama ugotovimo, kako vplivati na dolžino loka; tu je $\cos\varphi$ odlično merilo, ki pove, kako s spreminjanjem $\cos\varphi$ večamo ali skrajšujemo dolžino loka. Tudi tu velja, da dobimo dejansko napetost na loku, če njeno relativno vrednost pomnožimo z nazivno (fazno) vrednostjo napetosti. Približno dolžino električnega loka dobimo tako, da napetost električnega loka, dobljeno iz njegove relativne

vrednosti in fazne napetosti med elektrodo in kopeljo (vložkom), izraženo v V izrazimo, enostavno v dolžini (v mm), ker velja v širokem razponu elektrodnih tokov od



Slika 5

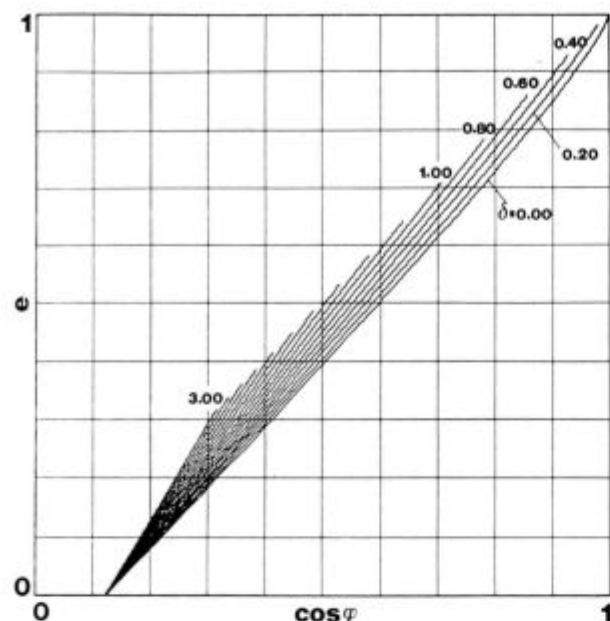
Obratovalni diagram elektroobločne peči, $\gamma = 8$, $\delta = 0.00 - 3.00$, $\Delta\delta = 0.20$

p_d — relativna delovna moč
 p_i — relativna delovna moč na loku
 $\cos\varphi$ — fazni faktor

Fig: 5

Operational diagram of electric arc furnace, $\gamma = 8$, $\varphi = 0.00 - 3.00$, $\Delta\delta = 0.20$

p_d — relative active power
 p_i — relative active power in arc
 $\cos\varphi$ — phase factor



Slika 6

Napetost na loku elektroobločne peči, $\gamma = 8$, $\delta = 0.00-3.00$, $\Delta\delta = 0.20$

e — relativna napetost na loku
 $\cos\varphi$ — fazni faktor

Fig. 6

Voltage on arc of electric arc furnace, $\gamma = 8$, $\delta = 0.00-3.00$, $\Delta\delta = 0.20$

e — relative voltage on arc
 $\cos\varphi$ — phase factor

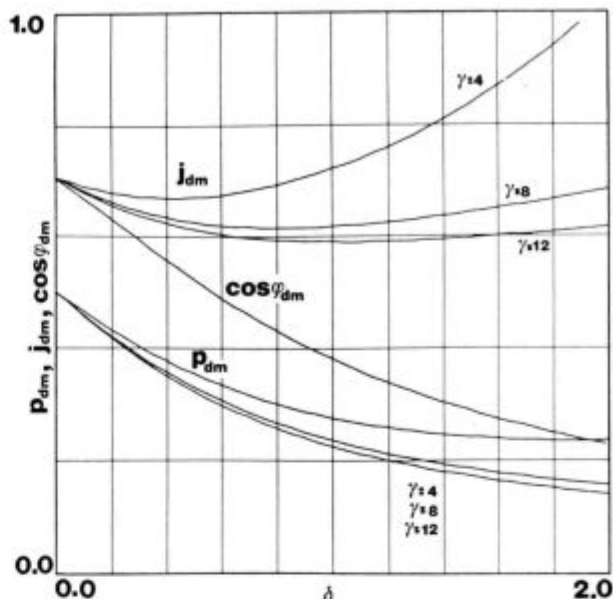
1 kA do 100 kA električna poljska jakost loka približno 1 V/mm. Ustrezno konstantnemu padcu napetosti na loku (ca. 30 V) je treba tako dobljeno vrednost zmanjšati še za 30 mm.

Slika 7 kaže potek vrednosti maksimalne delovne moči na transformatorju, pripadajočega toka in $\cos\varphi$ v odvisnosti od velikosti razmerja γ in δ . Vidimo, da nam ob normalnem razmerju kratkostičnih upornosti (γ ca. 10) obratovanje s skoraj konstantnim tokom v celotnem razponu od $\delta = 0.00$ do $\delta = 2.00$ omogoča doseganje vsakokratne maksimalne delovne moči na transformatorju. Pri visokem razmerju δ je maksimalna delovna moč nizka in nastopa neodvisno od vrednosti γ vedno pri nizkih vrednostih $\cos\varphi$; z zmanjševanjem vrednosti razmerja δ maksimalne relativne vrednosti delovne moči na transformatorju hitro naraščajo.

Slika 8 kaže potek vrednosti maksimalne delovne moči na loku, pripadajočega toka in $\cos\varphi$ v odvisnosti od razmerij γ in δ . Podobno zgornji sliki tudi tu vse vrednosti z naraščanjem δ značilno padajo in so slabo odvisne od velikosti razmerja γ . Obratovanje s konstantnim relativnim tokom zagotavlja v dobrem približku za celotno območje realno nastopajočih vrednosti δ doseganje maksimalne delovne moči na loku.

Slika 9 navaja pogoje za energijsko optimalno obratovanje v odvisnosti od razmerja δ in od relativnih toplotnih izgub za razmerja kratkostičnih upornosti $\gamma = 4$ in 12; nizke toplotne izgube obločne peči zahtevajo obratovanje z visokimi $\cos\varphi$ in obratno; pri tem velja, da naraščajoče razmerje δ zahteva v vsakem primeru slabši $\cos\varphi$.

Slika 10 prikazuje potek relativnega erozijskega indeksa, ki nastopa kot merilo za toplotno obremenjenost obzidave obločne peči zaradi sevanja električnega loka nanjo. Vidimo, da maksimalne vrednosti erozijskega



Slika 7

Razmere pri maksimalni delovni moči na transformatorju, $\gamma = 4, 8, 12$

p_{dm} — relativna maksimalna delovna moč na transformatorju
 i_{dm} — relativni tok pri maksimalni delovni moči na transformatorju
 $\cos\varphi_{dm}$ — fazni faktor pri maksimalni delovni moči na transformatorju
 γ — razmerje kratkostična induktivna upornost peči/kratostična ohmska upornost peči
 δ — razmerje induktivna upornost loka/kratostična upornost peči

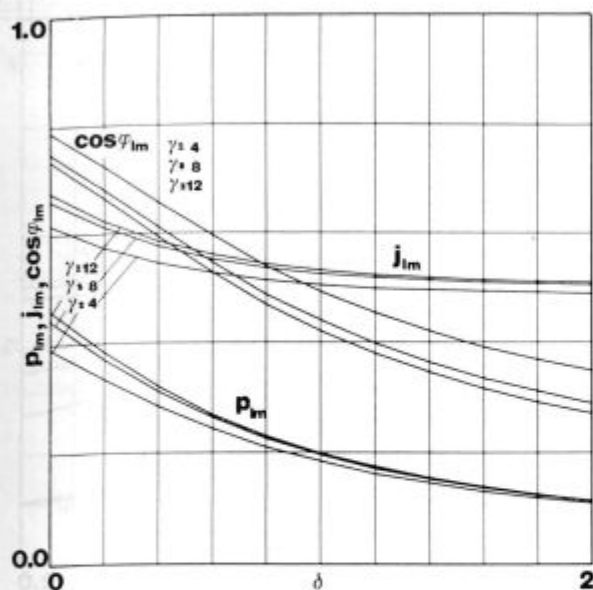
Fig. 7

Conditions at the maximum active power on transformer, $\gamma = 4, 8, 12$

p_{dm} — relative maximum reactive power on transformer
 i_{dm} — relative current at maximum reactive power on transformer
 $\cos\varphi_{dm}$ — phase factor at maximum reactive power on transformer
 γ — short-circuit inductive reactance/short-circuit ohmic resistance of furnace ratio
 δ — inductive reactance of arc/short-circuit furnace resistance ratio

indeksa nastopajo vedno ob določenem $\cos\varphi$ in da se z naraščanjem razmerja δ višina njegovih maksimumov znižuje in istočasno premika k nižjim $\cos\varphi$. Pri raztaljenem vložku, ko je obzidava peči najbolj izpostavljena toplotnim obremenitvam električnega loka, leži $\delta = 0.00-0.10$, zato je pri tem najbolj kritično obratovno območje, t.j. območje maksimalnih erozijskih indeksov za realno nastopajoče vrednosti razmerja $\gamma = 4$ do 12 med $\cos\varphi = 0.82$ in $\cos\varphi = 0.86$.

Na sliki 11 so navedeni energijski izkoristki elektroobločne peči za različne toplotne izgube ψ in (zaradi preglednosti) za štiri značilna razmerja δ (začetek taljenja $\delta = 0.45-0.30$, polno taljenje $\delta = 0.15$ ter raztaljeno stanje $\delta = 0.00$) v odvisnosti od obratovnega faznega faktorja $\cos\varphi$. Potek energijskih izkoristkov dokazuje, da se z večanjem razmerja δ energijski optimum premika k obratovanju z nižjimi $\cos\varphi$; prav tako tendenco povzročajo višje toplotne izgube peči ψ . Toplotno ravnotežje elektroobločne peči dajejo obratovna stanja z energijskim izkoristkom nič. Na slikah je viden značilen široko sploščen potek energijskih izkoristkov ob nizkih toplotnih izgubah peči, medtem ko velike toplotne izgube



Slika 8

Razmere pri maksimalni delovni moči na loku, $\gamma = 4, 8, 12$

- p_m — relativna maksimalna delovna moč na loku
- j_m — relativni tok pri maksimalni delovni moči na loku
- $\cos \varphi_m$ — fazni faktor pri maksimalni delovni moči na loku
- γ — razmerje kratkostična induktivna upornost/kratkostična ohmska upornost peči
- δ — razmerje induktivna upornost loka/kratkostična upornost peči

Fig: 8

Conditions at the maximum active power in arc, $\gamma = 4, 8, 12$

- p_m — relative maximum active power in arc
- j_m — relative current at maximum active power in arc
- $\cos \varphi_m$ — phase factor at maximum active power in arc
- γ — short-circuit inductive reactance/short-circuit ohmic resistance ratio for furnace
- δ — inductive reactance of arc/short-circuit resistance of furnace ratio

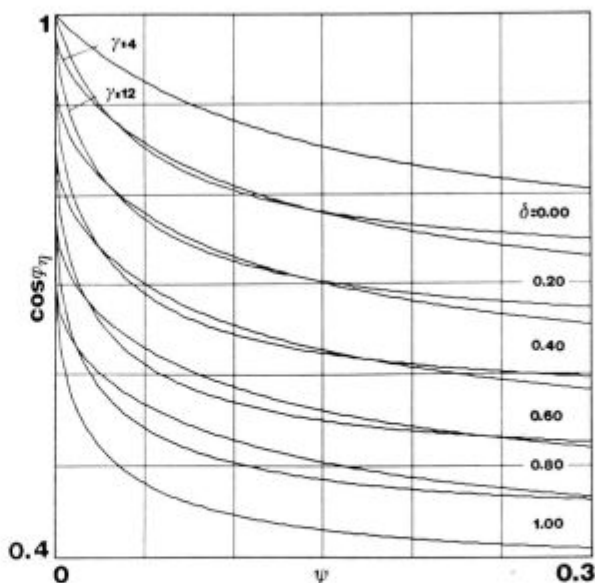
peči, na pr. ob raztaljenem vložku, zahtevajo ozko energijsko optimalno obratovno območje.

Slika 12 govori o tem, kako na obratovanje z maksimalnim energijskim izkoristkom vplivata sprememba razmer v peči, ki jih določajo pogoji gorenja električnega loka v peči (δ) in velikost toplotnih izgub v peči (ψ).

Slika 13 kaže, kakšne največje toplotne izgube obločne peči (ψ_0) je možno ob določenih razmerah v peči (δ) pokriti in kakšni so obratovni pogoji ($j_0, \cos \varphi$), v katerih je to možno dosegati. Vidimo, da so vrednosti odvisne predvsem od razmer v peči, t. j. od razmerja δ , in le delno od karakteristične vrednosti razmerja γ .

Slika 14 kaže časovni izkoristek obratovanja obločne peči kot merila za izkoriščenost maksimalne možne moči na loku glede na razmerje δ v primeru konstantnih izgub $\psi = 0.05$ pri $\gamma = 4$ in $\gamma = 12$; z naraščajočimi vrednostmi δ se maksimalni izkoristki časa karakteristično zmanjšujejo in selijo k nižjim $\cos \varphi$. Obratovanje v stanju peči, ki daje visoke vrednosti za δ , kar je značilno predvsem za začetek taljenja, daje vedno slab časovni izkoristek razpoložljive moči in nizek $\cos \varphi$. Razvidno je tudi, kako je za točno vodenje obločne peči po maksimalnih vrednostih časovnega izkoristka važno poznavanje razmerja γ .

Slika 15 daje vrednosti časovnega izkoristka za različne toplotne izgube peči; večanje teh izgub znižuje časovni izkoristek glede na maksimalnega, ki nastopa pri $\delta = 0.00$, ter oži možni obratovni razpon, večanje vrednosti δ pa premika maksimume vzdolž abscise k slabšim



Slika 9

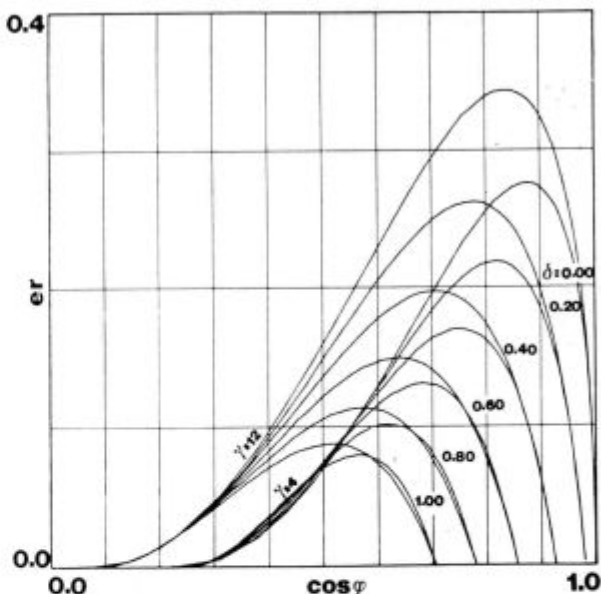
Razmere pri maksimalnem energijskem izkoristku, $\gamma = 4, 12$, $\delta = 0.00 - 1.00$, $\Delta \delta = 0.20$

- $\cos \varphi_{\eta}$ — fazni faktor pri maksimalnem energijskem izkoristku
- ψ — relativne toplotne izgube obločne peči

Fig: 9

Conditions at the maximum energy yield, $\gamma = 4, 12$, $\delta = 0.00 - 1.00$, $\Delta \delta = 0.20$

- $\cos \varphi_{\eta}$ — phase factor at the maximum energy yield
- ψ — relative heat losses of the arc furnace



Slika 10

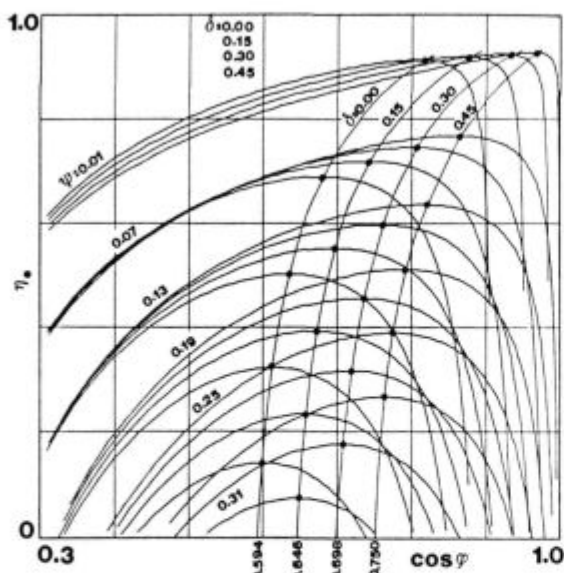
Erozijski indeks elektroobločne peči, $\gamma = 4, 12$, $\delta = 0.00 - 3.00$, $\Delta \delta = 0.20$

- E_r — relativni erozijski indeks
- $\cos \varphi$ — fazni faktor

Fig: 10

Erosion index of electric arc furnace, $\gamma = 4, 12$, $\delta = 0.00 - 3.00$, $\Delta \delta = 0.20$

- E_r — relative erosion index
- $\cos \varphi$ — phase factor



Slika 11

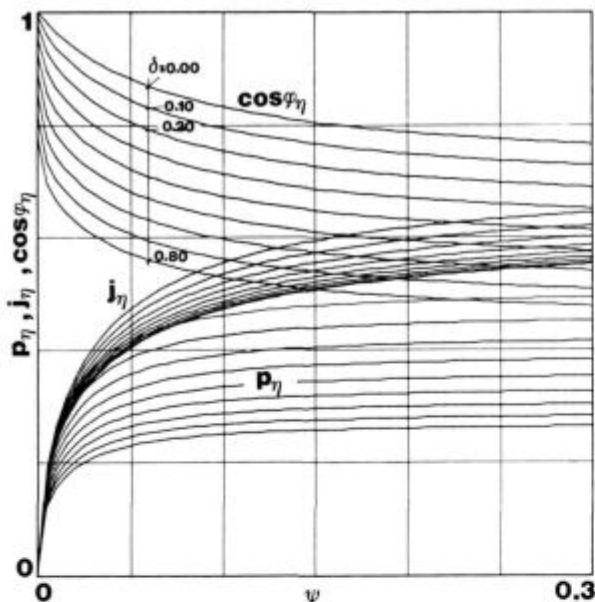
Energijski izkoristek elektroobločne peči, $\gamma=8$, $\delta=0.00, 0.15, 0.30, 0.45$, $\psi=0.01-0.31$, $\Delta\psi=0.06$

η — energijski izkoristek obločne peči
 $\cos\varphi$ — fazni faktor

Fig: 11

Energy yield of the electric arc furnace, $\gamma=8$, $\delta=0.00, 0.15, 0.30, 0.45$, $\psi=0.01-0.31$, $\Delta\psi=0.06$

η — energy yield of arc furnace
 $\cos\varphi$ — phase factor



Slika 12

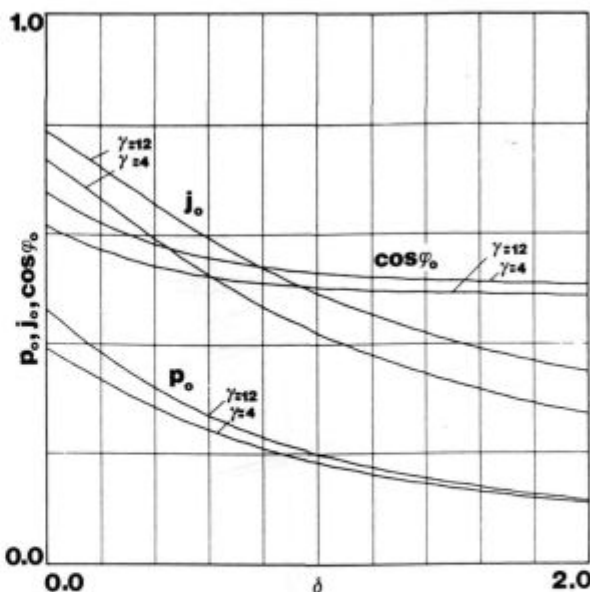
Maksimalen energijski izkoristek elektroobločne peči, $\gamma=8$, $\psi=0.00-0.30$, $\delta=0.00-0.80$, $\Delta\delta=0.10$

$p_{\eta m}$ — relativna delovna moč na transformatorju pri maksimalnem energijskem izkoristku
 $i_{\eta m}$ — relatičen tok pri maksimalnem energijskem izkoristku
 $\cos\varphi_{\eta m}$ — fazni faktor pri maksimalnem energijskem izkoristku

Fig: 12

Maximum energy yield of electric arc furnace, $\gamma=8$, $\psi=0.00-0.30$, $\delta=0.00-0.80$, $\Delta\delta=0.10$

$p_{\eta m}$ — relative active power on transformer at the maximum energy yield
 $i_{\eta m}$ — relative current at the maximum energy yield
 $\cos\varphi_{\eta m}$ — phase factor at the maximum energy yield



Slika 13

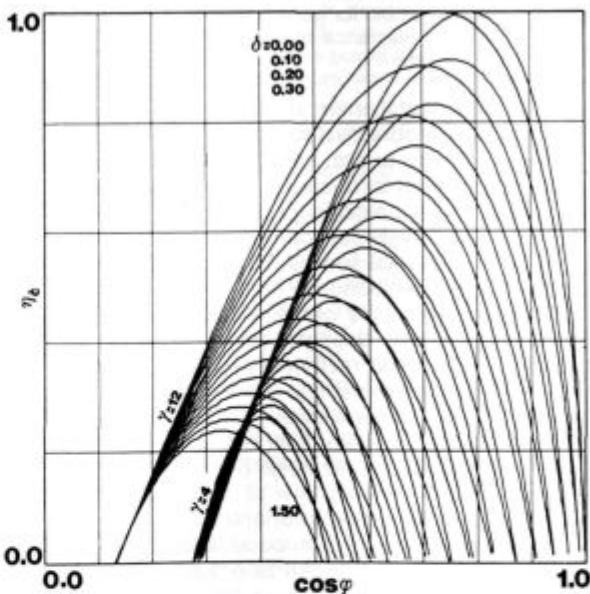
Maksimalne toplotne izgube peči, $\gamma=4, 12$, $\delta=0.00-2.00$

p_0 — maksimalna moč toplotnih izgub
 i_0 — tok za porivanje maksimalnih toplotnih izgub
 $\cos\varphi_0$ — fazni faktor pri pokrivanju maksimalnih toplotnih izgub

Fig: 13

Maximum heat losses of the furnace, $\gamma=4, 12$, $\delta=0.00-2.00$

p_0 — maximum power of heat losses
 i_0 — current for covering maximum heat losses
 $\cos\varphi_0$ — phase factor for covering maximum heat losses



Slika 14

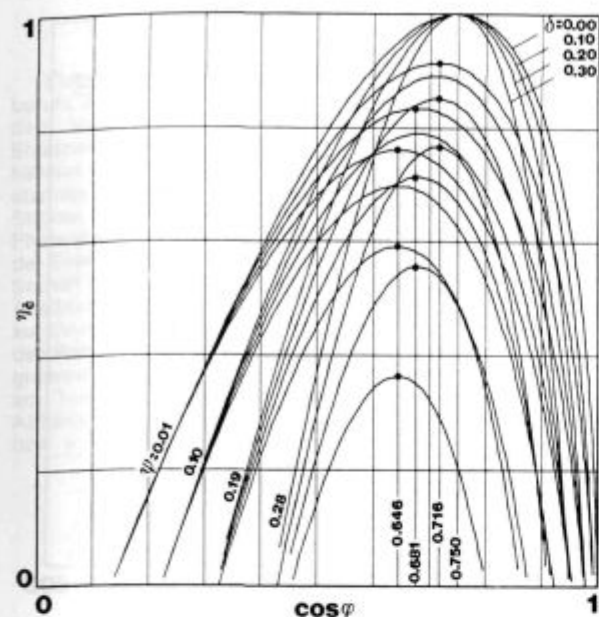
Časovni izkoristek elektroobločne peči, $\gamma=4, 12$, $\psi=0.05$, $\delta=0.001-1.50$, $\Delta\delta=0.05$

η_δ — časovni izkoristek elektroobločne peči
 $\cos\varphi$ — fazni faktor

Fig: 14

Time yield of electric arc furnace, $\gamma=4, 12$, $\psi=0.05$, $\delta=0.001-1.50$, $\Delta\delta=0.05$

η_δ — time yield of arc furnace
 $\cos\varphi$ — phase factor



Slika 15

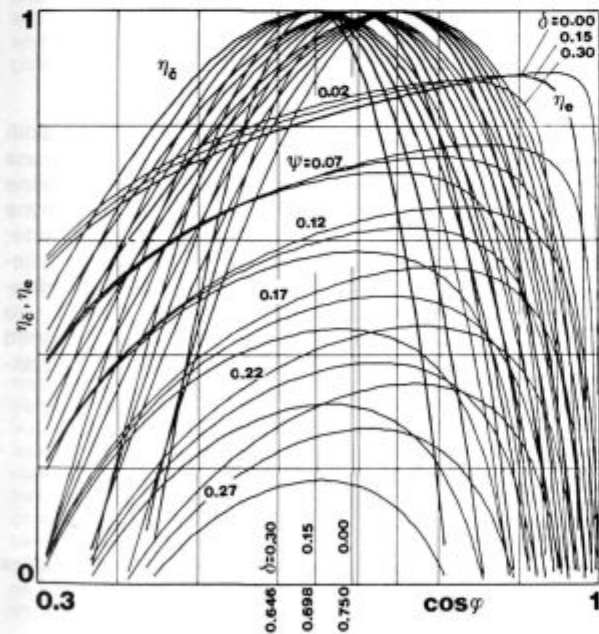
Časovni in energijski izkoristek elektroobločne peči, $\gamma=8$, $\psi=0.01-0.28$, $\Delta\psi=0.09$, $\delta=0.00-0.30$, $\Delta\delta=0.10$

η_e — časovni izkoristek
 $\cos\varphi$ — fazni faktor

Fig: 15

Time yield of electric arc furnace, $\gamma=8$, $\psi=0.01-0.28$, $\Delta\psi=0.09$, $\delta=0.00-0.30$, $\Delta\delta=0.10$

η_e — time yield
 $\cos\varphi$ — phase factor



Slika 16

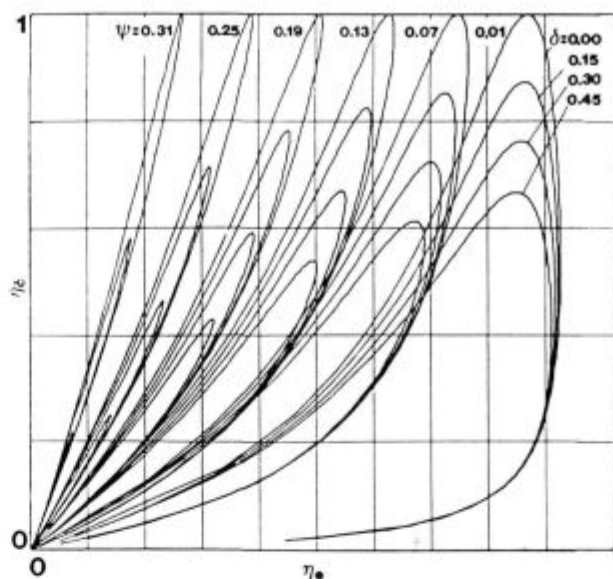
Časovni in energijski izkoristek elektroobločne peči, $\gamma=8$, $\psi=0.02-0.27$, $\Delta\psi=0.05$, $\delta=0.00, 0.15, 0.30$

η_e — časovni izkoristek
 η_e — energijski izkoristek
 $\cos\varphi$ — fazni faktor

Fig: 16

Time and energy yield of electric arc furnace, $\gamma=8$, $\psi=0.02-0.27$, $\Delta\psi=0.05$, $\delta=0.00, 0.15, 0.30$

η_e — time yield
 η_e — energy yield
 $\cos\varphi$ — phase factor



Slika 17

Časovni in energijski izkoristek obločne peči, $\gamma=8$, $\psi=0.01-0.31$, $\Delta\psi=0.06$, $\delta=0.00, 0.15, 0.30, 0.45$

η_e — časovni izkoristek
 η_e — energijski izkoristek
 $\cos\varphi$ — fazni faktor

Fig: 17

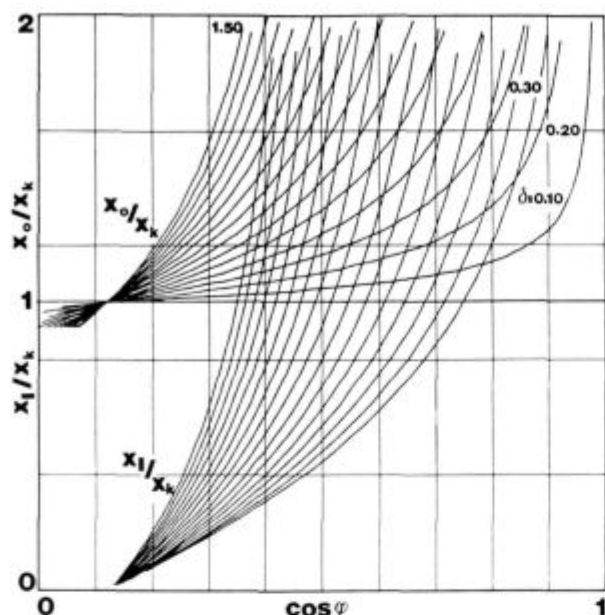
Time and energy yield of arc furnace, $\gamma=8$, $\psi=0.01-0.31$, $\Delta\psi=0.06$, $\delta=0.00, 0.15, 0.30, 0.45$

η_e — time yield
 η_e — energy yield
 $\cos\varphi$ — phase factor

$\cos\varphi$. Skladno s prikazanim modelom nastopajo maksimalni časovni in energijski izkoristki pri $\cos\varphi$, ki so, ne glede na toplotne izgube, odvisni samo od δ .

Na sliki 16 so podani časovni in energijski izkoristki za začetek taljenja ($\delta=0.30$), pa tudi za konec taljenja ($\delta=0.00$) za različne toplotne izgube; obratovalna maksimuma obeh izkoristkov sta pri nizkih toplotnih izgubah peči, t. j. na začetku taljenja zelo oddaljena drug od drugega; vsakokratni maksimalni časovni izkoristki so podani z velikostjo 100 %, ne glede na to, pri katerem δ nastopajo. Vztrajanje pri obratovanju z maksimalnim časovnim izkoristkom zaradi položnega poteka energijskega izkoristka tega le malo poslabšuje. Ker se z naraščajočimi toplotnimi izgubami peči energijski optimum seli vedno bliže k časovnemu optimumu, se s tem modelom potrjuje običajna obratovalna praksa elektrojeklarjev, ki pričenjajo taljenje z nekaj slabšim $\cos\varphi=0.68$, t. j. pri nekaj slabšem časovnem izkoristku $\eta_e=0.74$ ($\delta=0.20$), in končajo taljenje še vedno pri maksimalnem časovnem izkoristku z običajnim $\cos\varphi=0.75$ ($\delta=0.00$). Omejitve obratovanja obločne peči v času taljenja so v začetni fazi v stabilnosti gorenja električnega loka, v končni raztaljeni fazi pa v nevarnostih obratovalnih stanj z visokimi erozijskimi indeksi. Podrobna obratovalna navodila za vodenje obločne peči pa so še odvisna od uporabljenih tehnoloških postopkov izdelave jekla.

Na Sliki 17 imamo prikazano medsebojno odvisnost obeh izkoristkov, iz katere sta razvidni maksimalni vrednosti energijskega in časovnega izkoristka; pri nizkih toplotnih izgubah obločne peči sta maksimalni vrednosti dokaj oddaljeni druga od druge, medtem ko velike toplotne izgube obločne peči (napr. ob koncu šarže) približujeta ekstrema vedno bolj istemu obratovalnemu mestu. Prikazano je tudi vplivno delovanje razmerja δ in



Slika 18

Razmerje obratovalna induktivna upornost / kratkostična induktivna upornost peči ter razmerje induktivna upornost loka / kratkostična induktivna upornost peči v odvisnosti od $\cos \varphi$, $\gamma = 8$, $\delta = 0 - 1.5$, $\Delta \delta = 0.10$

X_o/X_k — obratovalna induktivna upornost / kratkostična induktivna upornost peči
 X_l/X_k — induktivna upornost loka / kratkostična induktivna upornost peči
 $\cos \varphi$ — fazni faktor

Fig: 18

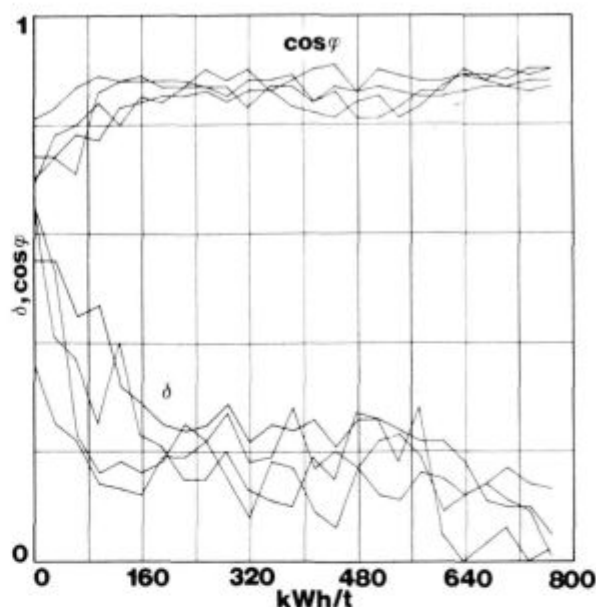
Operational inductive reactance/short-circuit inductive reactance of furnace ratio, and inductive reactance of arc/short-circuit inductive reactance of furnace ratio as functions of $\cos \varphi$, $\gamma = 8$, $\delta = 0 - 1.5$, $\Delta \delta = 0.10$

X_o/X_k — operational inductive reactance/short-circuit inductive reactance of furnace
 X_l/X_k — inductive reactance of arc/short-circuit inductive reactance of furnace
 $\cos \varphi$ — phase factor

toplotnih izgub ψ na obe vrednosti; večanje faktorja δ bistveno znižuje časovni izkoristek in le v manjši meri tudi energijskega; večje toplotne izgube pa spreminjajo značilni potek izkoristkov tako, da le-ta ob največjih možnih izgubah sovpadeta v eni obratovalni točki.

Na Sliki 18 je podano, kako vplivajo različne vrednosti δ na odnos med obratovalnim faznim faktorjem $\cos \varphi$ in razmerjem med obratovalno induktivno upornostjo in njeno kratkostično vrednostjo; prikazan je tudi potek induktivnih vrednosti loka v razmerju do kratkostične induktivne upornosti.

Slika 19 prikazuje potek razmerja δ in faznega faktorja $\cos \varphi$, dobljenega s pomočjo on-line računalniško



Slika 19

Razmerje δ v odvisnosti od porabljene specifične energije v elektroobločni peči

δ — razmerje induktivne upornosti loka nasproti njeni nadomestni ohmski upornosti
 (kWh/t) — porabljena električna energija na tono vložka
 $\cos \varphi$ — fazni faktor

Fig: 19

δ ratio as a function of consumed specific energy in electric arc furnace

δ — inductive reactance of arc/substituting ohmic resistance ratio
 (kWh/t) — consumed electric energy per ton feed
 $\cos \varphi$ — phase factor

vodenega digitalnega merilnika elektriških obratovalnih parametrov obločne peči v odvisnosti od absorbirane električne energije v peči za primer 10-tonske obločne peči; s stopnjo raztaljenosti vložka razmerje induktivne in ohmske upornosti δ pada, fazni faktor $\cos \varphi$ pa raste; največje vrednosti razmerja δ nastopajo v začetku taljenja ($\delta = 0.70 - 0.30$), na koncu taljenja pa težijo k vrednosti nič; začetne vrednosti faznega faktorja so $\cos \varphi = 0.65 - 0.75$, končne pa se gibljejo med $\cos \varphi = 0.85 - 0.90$. Na sl. 19 je tudi razvidno, kako naknadno došaržiranje poveča razmerje δ .

LITERATURA

J. Bratina: Obratovalni elektroenergetski model obločne peči za proizvodnjo jekla, Železarski zbornik, 23 (1989) 2

ZUSAMMENFASSUNG

Elektroenergetisches Betriebsmodell des Lichtbogenofens beruht auf dem induktiven Widerstand des Lichtbogens bzw. dem Verhältniss dieses Widerstandes zu dem ohmschen Ersatzwiderstand des Lichtbogens (δ). Mit dem bekannten Verhältniss des Kurzschluss, des induktiven und ohmschen Widerstandes des Lichtbogenofens (γ) sind alle relativen Werte der Ströme, der Spannung der Listung bzw. des reellen Wertes des Phasenfaktors $\cos\varphi$ und des Ausnutzungsgrades der Zeit und der Energie bestimmbar. Anstatt der umfangreichen mathematischen Gleichungen sind im Artikel die Funktionskurven dieser Ausdrücke gegeben, erhalten mit der Hilfe der Rechnergraphik auf Grund des im realen Ofenbetrieb am häufigsten auftretenden Parameter. Charakteristisch sind die Kreis und Betriebsdiagramme des Lichtbogenofens mit dem Verlauf der Wirkleistung am Transformator und der Wirkleistung am Lichtbogen in Abhängigkeit von der Blindleistungskomponente der Leistung bzw. von dem Phasenfaktor $\cos\varphi$ und dem Verhältniss δ .

Gegeben ist der Verlauf der Ströme der Leistung, des $\cos\varphi$ für den Fall der grössten Wirkleistung am Transformator und der grössten Wirkleistung am Lichtbogen in Abhängigkeit von dem Verhältniss δ . Bedingungen für den Betrieb des Lichtbogenofens mit dem grössten Ausnutzungsgrad der Zeit und Energie und der Verlauf dieser Ausnutzungsgrade in Abhängigkeit von dem Verhältniss δ und der relativen Wärmeverluste des Ofens ψ sind gegeben. Die Abschlussbilder zeigen die Verbindung zwischen dem Verhältniss des induktiven Betriebswiderstandes des Ofens bzw. des induktiven Lichtbogenwiderstandes mit dem induktiven Kurzschlusswiderstand des Ofens und dem Phasenfaktor $\cos\varphi$ bei verschiedenen Verhältnissen δ . Gezeigt wird auch der Verlauf des Verhältnisses δ , gemessen „on line“ im Verlauf einer Schmelze im Lichtbogenofen mit einem rechnergesteuerten digitalen Sonderinstrument in Abhängigkeit von dem Verbrauch elektrischer Energie im Lichtbogenofen.

SUMMARY

Operational electroenergetic model of arc furnace is based on the inductive reactance of arc or on the ratio between this value and the substituting ohmic resistance of arc (δ). By knowing the ratio of short-circuit inductive reactance and ohmic resistance of arc furnace (γ) all the relative values of currents, voltages, powers or real values of $\cos\varphi$, time and energy yields can be determined. Instead of extensive mathematical equations the paper presents functional curves of these expressions obtained by computer graphics and based on parameters which most often appear in real operation of the furnace. Characteristic are the circle and the operational diagrams of electric arc furnace with the variation of active power on transformer and active power in arc depending on reactive component of power or on $\cos\varphi$, and on ratio δ . Variation of currents, of

power, $\cos\varphi$ is given for the cases of the highest active power on the transformer, and the highest active power in arc depending on δ ratio. Further, the conditions for arc furnace operation with the highest time and energy yields are presented together with the variation of these yields as a function of δ ratio and of relative heat losses of the furnace ψ . Final pictures show the connection between the ratio of operational inductive reactance of the furnace or inductive reactance of the arc and short-circuit inductive reactance of the furnace, and $\cos\varphi$ at various δ ratios. Also the variation of the δ ratio is presented being measured on line during making melt in the arc furnace with a special computer controlled digital measuring instrument, as a function of consumed electric energy in the furnace.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рабочий электроэнергетический модель электродуговой печи основывается на индуктивном сопротивлении дуги т.е. на отношении этого сопротивления против запасного омического сопротивления дуги (δ). С известным отношением короткозамыкательного индуктивного и омического сопротивления электродуговой печи (γ) можна определить все релятивные значения токов, напряженности, силы т.е. реальные значения фазового фактора $\cos\varphi$, а также временной и энергетической эффективностях. В статье вместо обширных математических уравнений даны кривые функций этих понятий, полученные с помощью вычислительной графики на основе наиболее частых параметров в реальной работе печи. Характеристичными являются круговые и рабочие диаграммы электродуговой печи с ходами рабочего усилия на трансформаторе и рабочего усилия на дуге в зависимости от холостого компонента усилия т.е. от фазового фактора

$\cos\varphi$ и отношения δ . Дан ход токов, усилия, $\cos\varphi$ в момент наибольших рабочего усилия на трансформаторе и рабочего усилия на дуге в зависимости от отношения δ . Даны условия работы электродуговой печи с наибольшими временной и энергетической эффективностями, а также ход этих эффективностях в зависимости от отношения δ и релятивных тепловых потерь ψ . Окончательные рисби показывают связанность между отношением рабочего индуктивного сопротивления печи т.е. индуктивного сопротивления дуги с короткозамыкательным индуктивным сопротивлением печи и фазовым фактором $\cos\varphi$ при различных отношениях δ .

Показан также ход отношения δ , измеренный „он лайн“ во время изготовления шихты в электродуговой печи с особенным цифровым измерителем с компьютерным управлением в зависимости от расходуемой электроэнергии в печи.