

Elektroenergetski ter obratovalni odnosi obločne peči za proizvodnjo jekla

Poznavanje elektrotehničnih, energetskih in produktivnostnih razmer elektro obločne peči za pridobivanje jekla je važno za eksploatacijo kakor tudi za dobavitelja električne energije. Elektro obločna peč je enostavna, cenena in visoko produktivna naprava za proizvodnjo jekla, ki je kljub svoji popolnosti še vedno predmet izpopolnitev tako v konstrukcijskem kot v tehnološkem pogledu. Za nami je že razpotje, kjer so se ločile visoko produktivne obločne peči za proizvodnjo masovnih jekel od klasičnih obločnih peči za visoko kvaliteten program konstrukcijskih, orodnih in ognjeodpornih jekel. V domačih razmerah klasičnega obratovanja obločnih peči je še vedno aktualno vprašanje optimalnih režimov obratovanja tako v času taljenja kot pri raztaljenem vložku. Z analizo stanja elektrotehničnih parametrov se da obločna peč ob dobrem poznavanju teoretičnega ozadja uglasiti ugodnim ali celo najugodnejšim proizvodnim pokazateljem. Kaj nam ob tem lahko prispevata vpeljan tehnološki red in dobra organiziranost, se vse premalo zavedamo.

Kvalitativne in kvantitativne relacije, navedene v tem članku v poglavjih: Elektrotehnični parametri peči, Peč kot elektroenergetski potrošnik, Produktivnostni odnosi peči, so samo en del osnove, s katero je mogoče zasledovati in dosežati ugodno proizvodnjo. Drugi del je metalurški, ki pa tu ni obravnavan.

UVOD

Prvi zametki uporabe električne energije za taljenje rud in metalov segajo v leto 1853, ko je Francoz Pichon patentiral svojo električno peč za taljenje. Prvo praktično uporabno električno peč je zgradil Williemi Siemens 1879. leta. To je bila enofazna obločna peč s korizontalnima elektrodama, med katerima je gorel obločni plamen, pod njim pa se je nahajal talilni lonec. Tako izvedbo obločnih peči štejemo med peči z indirektnim lokom. Razen nekaj izjemnih primerov takih peči ni več v obratovanju, ker so imele preveč konstrukcijskih težav. Sodobne elektroobločne peči so peči z direktnim lokom, t. j. z lokom med elektrodo in vložkom oziroma talino. Take vrste peči je razvil Francoz Heroult v letih 1888 do 1892. Bistvena izboljšava te peči je bila v tem, da je bil električni lok v času taljenja zakrit z vložkom, da toplotna energija ni mogla direktno sevati na obzidavo peči. Današnje elektroobločne peči, ki so trifazne, imajo namesto lonca gibljivo kad, ki ima v premeru tudi

preko 5 m: kad se lahko giblje naprej ali nazaj za izliv taline in žlindre, lahko pa tudi — pri posebnih izvedbah — rotira. Kad je prekrita z obokom, skozi katerega segajo elektrode. Pri šaržiranju peči se obok dvigne in nagne toliko od kadi, da lahko košaro z vložkom izsujemo direktno v kad. Starejše izvedbe elektroobločnih peči nimajo gibljivega oboka.

Za letnico začetka industrijske proizvodnje surovega jekla iz elektro obločnih peči lahko smatramo leto 1900, ko je proizvodnja elektro jekla dosegla okrog 5000 t. Vzporedno z naraščanjem proizvodnje elektroenergije in izpopolnitvijo elektro topilniškega agregata se je razmahnila proizvodnja elektro jekla do neslutnih možnosti. V letu 1965 je bila svetovna proizvodnja elektro jekla 57.800.000 t ali 12,6 % celotne proizvodnje surovega jekla (459.000.000 ton). Če računamo, da je potrebno okroglo 1000 kWh/t električne energije za finalno proizvodnjo tega elementarnega artikla naše civilizacije, pomeni poraba 57,8 milijard kWh v letu 1965 izredno bogatega potrošnika, ki s svojimi specifičnostmi vsiljuje elektrogospodarstvu svojevrsten značaj.

Predvsem je to potrošnik, ki s svojo močjo angažira proizvajalce električne energije podnevi in ponoči, ob delavnikih in praznikih, poleti in pozimi popolnoma enako. S takim odvzemom povcenjuje električno energijo. Proizvajalci in dobavitelji električne energije dajejo zato po vsem svetu, kjer vladajo ekonomske zakonitosti, posebne ugodnosti železarnam (jalova energija se sploh ne obračunava, ugodne obojestranske posebne obveznosti itd.) Zaradi tega tudi metalurgija najde vedno znova v svoji računici primernost novih investicij za proizvodnjo jekla na osnovi elektroenergije.

Procentualni delež elektro jekla, jekla iz elektro obločnih peči (tu ni izvzeta proizvodnja jekla iz visoko frekvenčnih peči) v skupni proizvodnji surovega jekla se po posameznih deželah razlikuje, kot to kažejo podatki iz spodnje tabele.

PROIZVODNJA SUROVEGA JEKLA
leta 1965 (v 1000 t)

	Elektro jeklo	Surovo jeklo	%
Sovjetska zveza	8.650	91.000	9,5
Združene države	12.523	122.100	10,3
Švedska	1.802	4.725	38,2
Italija	4.745	12.680	37,8
Jugoslavija	229	1.769	12,9

Podatki o naraščanju proizvodnje elektro jekla govore o vedno večjem porastu. Med leti 1952 do 1966 je celotna proizvodnja jekla v ZDA narasla za 44 %, proizvodnja elektro jekla pa je v istem obdobju porasla za 114 %. Že l. 1957 je bilo 65 % vseh ogljikovih jekel v ZDA proizvedenih v elektro obločnih pečeh. Trend naraščanja proizvodnje elektro jekla je za zadnja tri desetletja skoraj konstanten — podvojitvena doba je 10 let, kar se zelo ujema s trendom naraščanja potrošnje elektroenergije.

Paralelna rast metalurgije in električne energije torej ni slučajna. Proces skupnega stimulativnega razvoja pa je šele na začetku. Poleg ugodne cene vložka — starega železa je druga najvažnejša surovina za proizvodnjo elektro jekla električna energija. Perspektive za ceno proizvodnje te surovine pa so dane — predvsem na zahodu — s proizvodnjo v jedrskih elektrarnah. Že današnje jedrske elektrarne konkurirajo po svoji ceni za proizvedeno kWh termoelektarnam in celo hidroelektarnam, kljub temu da izkoristijo le 2 % energije urana. Dokaz temu so velike jedrske elektrarne v ZDA in Angliji. Danes se ceni skupna moč jedrskih elektrarn na 10.000 MW, samo v ZDA pa jih je v gradnji skupno 12.000 MW, v razdelavi pa nadaljnjih 28.000 MW. Za leto 1980 se predvideva svetovna moč jedrskih elektrarn na 300.000 MW. Pri tem pa je poudariti, da bodo bodoče elektrarne z reaktorji na hitri brider izkoriščale 75 % energije urana in bodo tako rekoč same zase ustvarjale gorivo.

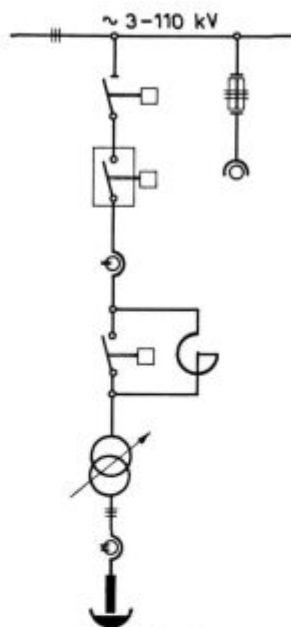
Nadaljnji pokazatelj, ki govori v prid elektro jeklu, so ugodne investicijske naložbe v tovrstno tehnologijo. Te so trikrat manjše kot investicije za proizvodnjo konvertorskega — kisikovega jekla. Ob takih razmerah ni naključje, da je danes elektro jeklo v ZDA in na Švedskem že cenejše od konvertorskega. Temu je po svoje pripomogla velika proizvodnost sodobnih topilniških agregatov, ki s pomočjo pripravljenega vložka, izredno kratke rafinacijske dobe ter velikega angažiranja električne moči v celotnem obdobju predelave že dosegajo 30 % večjo produktivnost pri porabi specifične energije pod 500 kWh/t. Tudi gradnja elektroobločnih peči je že preseгла agregate zmogljivosti 150 t ali 200 t, saj so projektirane peči 400 t.

Lahko računamo, da bo izhod iz naše jeklarske nerazvitosti, saj se nahajamo prav na dnu lestvice porabe jekla na prebivalca, terjal bistveni delež v proizvodnji jekla iz elektroobločnih peči. Vrsta jeklarn v Jugoslaviji je v izgradnji; tudi v Sloveniji se postavljajo nove elektroobločne peči. Obstaja pa že vrsta takih naprav, zato vsakodnevna praksa obratovanja in planiranja terja boljše poznavanje elektroobločnih peči kot velepotrošnika električne energije in razmer, ki jih tak potrošnik ustvarja v elektroenergetskem sistemu.

1. ELEKTROTEHNIČNI PARAMETRI PEČI

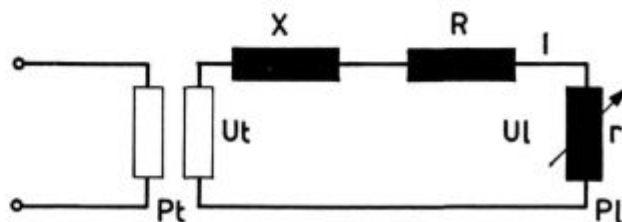
1.1.

Poenostavljena slika elektro obločne peči in nje ne električne opreme je razvidna iz enopolne sheme po sliki 1. V tokokrogu napajalna mreža — peč imamo poleg stikalnih, mernih, regulacijskih ele-



Slika 1
Enopolna shema obločne peči

mentov dva elementa, ki igrata posebno vlogo pri obratovanju same peči: visokonapetostno dušilko ter transformator. Prva služi za stabilizacijo loka (električni lok ima negativno upornostno karakteristiko), transformator pa omogoča napajanje loka s tako obliko električne energije, kot jo določata velikost in konstrukcija peči oziroma obratovne razmere v peči. Medtem ko je na primarni strani transformator priključen na visokonapetostno mrežo najvišjih napetosti (3—110 kV), so njegove sekundarne napetosti v splošnem od 400 V do 60 V, tokovi pa od nekaj 1000 A do 80.000 A. Moč transformatorja se je še pred nekaj leti gibala okrog 300 kVA/t vložka, danes pa se že grade peči s specifično močjo 450—520 kVA/t vložka. Razvojna tendenca elektroobločne peči gre k vedno bolj grobemu izkoriščanju električnih naprav. Sodobni pečni transformator je regulacijski z regulacijo pod obremenitvijo.



Nadomestna shema obločne peči
Slika 2

Gledano električno, imamo torej v tokokrogu po sl. 1 le induktivne in ohmske upornosti. Preden pristopimo k obračunu tako poenostavljenega tokokroga po sl. 2 je potrebno omeniti vrsto poenostavitve in predpostavk, katere je potrebno pri rezultatih obračuna upoštevati:

1. Predpostavljen je stacionaren proces v peči.
2. Predpostavljene so sinusne vrednosti napetosti in toka.
3. Predpostavljene so skoncentrirane in v obratovanju nespremenjene vrednosti upornosti.
4. Električni lok ima samo ohmsko upornost.
5. Upornost vložka oziroma taline je zanemarljiva.
6. Vse relacije se nanašajo na enofazne razmere. Pri računanju jih je smiselno modificirati.

V tekstu so uporabljene naslednje označbe:

- U — napetost transformatorja
- U_l — napetost loka
- U_0 — kritična napetost
- J — tok loka
- J_k — tok kratkega stika
- J_0 — tok pri kritični napetosti
- J_{k0} — tok idealnega kratkega stika ($R=0$)
- J_{Plmax} — tok pri maksimalni moči loka
- $J_{\eta_{max}}$ — tok pri maksimalnem izkoristku naprave
- $J_{\xi_{max}}$ — tok pri maksimalnem erozijskem indeksu
- P_n — navidezna moč na transformatorju
- P_l — delovna moč na loku
- P_{max} — maksimalna delovna moč na transformatorju
- P_{kon} — konična moč (urna ali četrturna)
- P_{lmax} — maksimalna moč loka
- P_{ko} — moč električnih izgub pri idealnem kratkem stiku
- P_p — izgube peči zaradi sevanja in konvekcije
- P_{pt} — izgube peči pri taljenju
- P_{pv} — izgube pri raztaljenem vložku
- P —
- izg. el. — električne izgube (Joulova moč)
- P_{sr} — povprečna moč ciklusa šarže
- R — ohmska upornost vseh v tokokrogu nastopajočih elementov razen upornosti loka
- r — ohmska upornost loka
- x — induktivna upornost vseh v tokokrogu nastopajočih elementov
- Z_s — skupna impedanca tokokroga z upoštevanjem upornosti loka
- Z_k — kratkostična impedanca
- $\cos \varphi$ — fazni faktor
- $\cos \varphi_k$ — fazni faktor pri kratkem stiku
- $\cos \varphi_0$ — fazni faktor pri kritični napetosti
- $\cos \varphi_{sr}$ — fazni faktor ciklusa šarže
- $(\cos \varphi)_{\eta_{max}}$ — fazni faktor pri maksimalnem izkoristku
- $(\cos \varphi)$ — fazni faktor pri maksimalni moči loka
- $(\cos \varphi)_{\xi_{max}}$ — fazni faktor pri maksimalnem erozijskem indeksu
- η — termični izkoristek
- η_{el} — električni izkoristek
- η_e — električni izkoristek pri moči P_e
- η — maksimalni izkoristek
- η_p — izkoristek pri maksimalni moči loka
- t — čas oksidacije + čas rafinacije + mrtvi časi
- t_r — čas raztaljenega vložka
- t_p — čas taljenja pri obratovanju z maksimalno močjo loka
- t_{η} — čas taljenja pri obratovanju z maksimalnim izkoristkom
- t_s — čas preobremenljivosti transformatorja
- G — teža vložka v peči
- g — proizvodnost peči
- g_t — proizvodnost peči v času taljenja

- g_r — proizvodnost peči v času raztaljenega vložka
- f — faktor obremenitve
- p — faktor preobremenjenosti
- o — faktor obremenjenosti
- l — dolžina loka med elektrodo in talino
- α — fiksni stroški na uro obratovanja peči
- β — cena električne energije
- γ — razmerje talilnih časov
- ξ — erozijski indeks
- s_0 — teoretična specifična poraba energije za taljenje (340 kWh/t)
- w — specifična poraba energije
- w_t — specifična poraba energije za taljenje
- w_r — specifična poraba energije pri raztaljenem vložku
- w_0 — specifična poraba energije pri oksidaciji
- S — razmerje stroškov obratovanja pri maksimalni moči loka proti stroškom obratovanja pri maksimalnem izkoristku

Impedanca tokokroga je

$$Z_s = \sqrt{(R + r)^2 + X^2}$$

Tok električnega loka je

$$J = \frac{U}{Z_s}$$

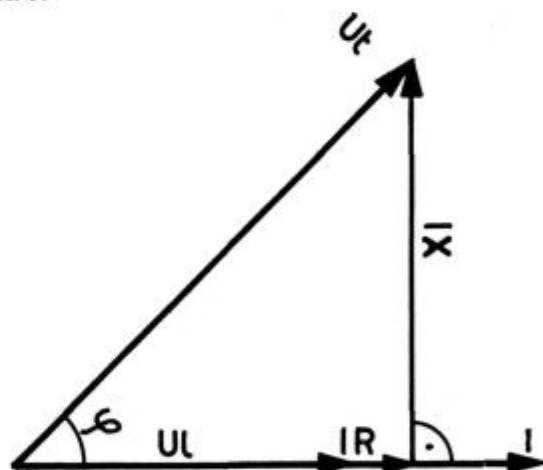
Delovna moč električnega loka je

$$P_l = \frac{r}{Z_s^2} U^2$$

Napetost loka je

$$U_l = \sqrt{U^2 - J^2 X^2} - JR$$

Iz slednje enačbe dobimo kazalčni diagram po sl. 3.



Slika 3
Kazalčni diagram obločne peči

Kot med napetostjo in tokom dobimo po enačbi

$$\cos \varphi = \frac{R + r}{Z_s}$$

Tok kratkega stika — kratek stik elektrode z vložkom — dobimo po relaciji

$$J_k = \frac{U}{Z_k}$$

Ustrezni kot med napetostjo in tokom je

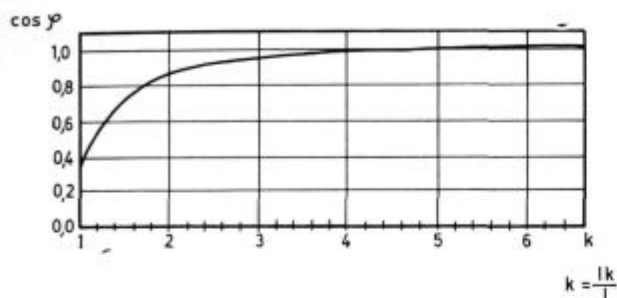
$$\cos \varphi_k = \frac{R}{Z_k}$$

Idealen tok kratkega stika dobimo, če zanemarimo ohmske upornosti tokokroga

$$J_{ko} = \frac{U}{X}$$

Če zanemarimo R^2 v primerjavi z X^2 ($R \ll X$) lahko iz zgornjih enačb izpeljemo naslednjo relacijo

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{J}{J_k}\right)^2}$$



Slika 4
Fazni faktor obločne peči

Enačbo prikazuje sl. 4, iz katere lahko že sklepamo na osnovne značilnosti elektro obločne peči kot potrošnika električne energije. Z dobrim $\cos \varphi$ lahko obratujemo le takrat, če dopuščamo velike kratkostične tokove oz. če zmoremo zmanjšati induktivne upornosti na takšen nivo. Taka želja ima postavljene dvojne meje: prvič zahteva konstrukcija peči določeno dolžino in razporeditev visokotokovnih dovodov na peč. S tem je pa že podana njih induktivnost, ki tudi predstavlja pretežni del induktivnosti celotne naprave. Po drugi strani pomenijo večji kratkostični tokovi večje spremembe napetosti v napajalni mreži. Iz dolgoletnih izkušenj graditeljev elektroobločnih peči je bilo dobljeno

grobo pravilo, po katerem mora biti skupna impedanca naprave vsaj tolikšna, da so kratkostični tokovi enaki dvakratnim nazivnim tokovom.

Izredne važnosti za metalurški proces v peči kakor tudi za elektrogospodarstvo je moč, ki je angažirana pod električnim lokom. Maksimalno moč lahko dobimo iz pogoja

$$\frac{\sigma P_1}{\sigma r} = \emptyset$$

Pri tem pogoju mora upornost loka ustrezati zahtevi

$$r = Z_k$$

Maksimalna moč loka je

$$P_{lmax} = \frac{U^2}{2(R + Z_k)}$$

Maksimalna moč loka nastopa pri toku:

$$J_{Plmax} = \frac{U}{\sqrt{2Z_k(R + Z_k)}}$$

Fazni faktor, pri katerem ta moč nastopa:

$$(\cos \varphi)_{Plmax} = \sqrt{1 - \frac{X^2}{2Z_k(R + Z_k)}}$$

Maksimalna delovna moč na transformatorju:

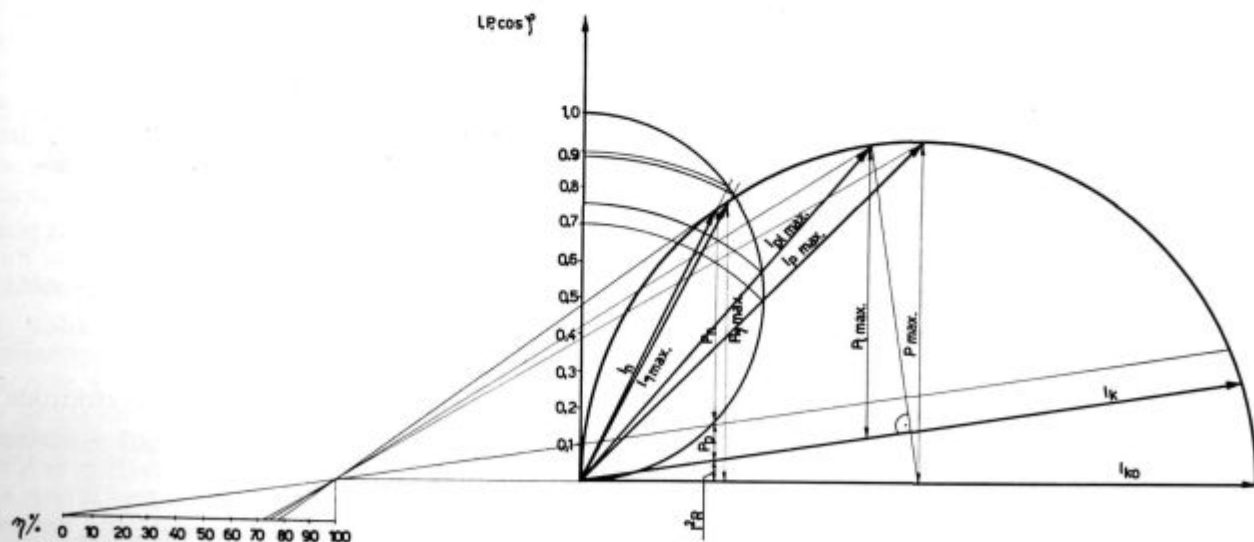
$$P_{max} = \frac{U^2}{2X}$$

Tok, pri katerem nastopa ta moč

$$J_{Pmax} = \frac{J_{ko}}{\sqrt{2}}$$

Fazni faktor pri maksimalni delovni moči na transformatorju:

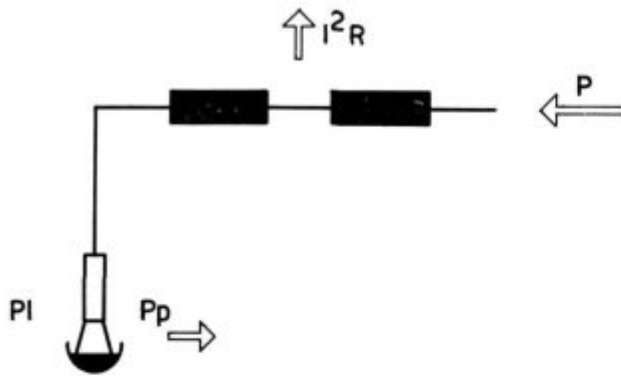
$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$



Slika 5
Krožni diagram obločne peči

Na podlagi dosedanjih enačb se da narediti krožni diagram po sl. 5.

Dosedaj smo pri obračunavanju tokokroga po sl. 2. obravnavali le splošne električne veličine. Manjka še obračun energetske plati elektroobločne peči, ki naj upošteva bilanco koristnih in izgubljenih energij. Po poenostavljeni energetske situaciji



Slika 6
Energetske razmere obločne peči

sl. 6 bomo ločili od dovedene energije koristno in izgubljeno, kot je to običajno pri strojih. Imamo dovedeno moč, ki je enaka moči loka + izgube na dovodu k peči, ter koristno moč, ki je enaka razliki med močjo loka in izgubami peči (P_p) zaradi konvekcije in sevanja.

Izraz za izkoristek naprave sledi

$$\eta = \frac{P_1 - P_p}{P_1 + J^2 R}$$

Odrpto vprašanje maksimalnega termičnega izkoristka naprave je rešljivo pri pogoju, da je

$$\frac{\sigma \eta}{\sigma J} = \emptyset$$

Preko prej navedenih relacij se dobi enačba, po kateri dobimo tok, pri katerem je izkoristek naprave maksimalen:

$$J\eta_{\max} = \frac{U}{\sqrt{2X^2 + U^2 \frac{R}{P_p}}}$$

Pripadajoči fazni faktor:

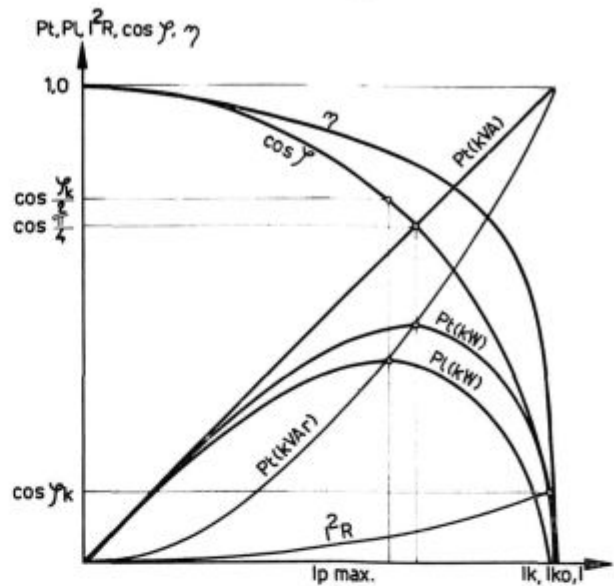
$$(\cos \varphi)_{\max} = \sqrt{1 - \frac{1}{2 + P_{ko}/P_p}}$$

pri čemer je

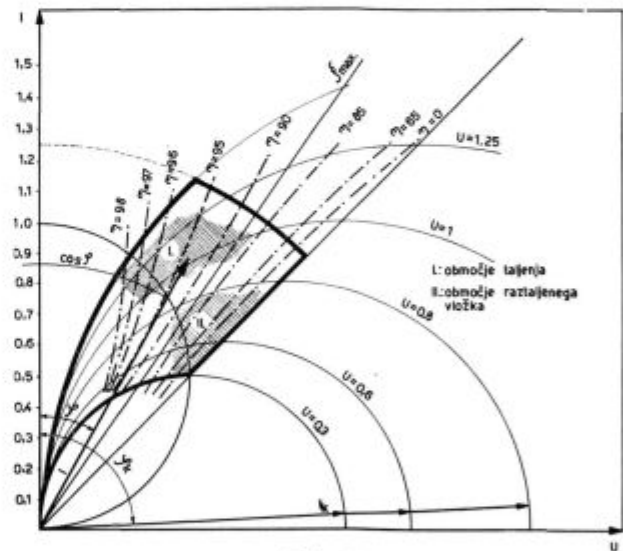
$$P_{ko} = J_{ko}^2 R$$

Ce si ogledamo na sl. 7. oz. na sl. 8. prikazane obratovalne diagrame za obločno peč, vidimo, da lahko obratujemo na katerem koli mestu, upoštevajoč pri tem napetostni razpon, ki ga določa regu-

lacija transformatorja ter tokovne obremenitve, ki so odvisne poleg transformatorja še od elektrodne regulacije. Kljub temu se obratovalne možnosti elektro obločne peči kot velepotrošnika električne



Slika 7
Obratovalni diagram obločne peči



Slika 8
Razširjeni krožni diagram obločne peči

energije gibljejo v mnogo ožjih mejah, kot to izhaja iz dosedanjih ugotovitev. Predvsem ne smemo pozabiti na tehnološki proces v peči, ki zahteva v začetnem obdobju, t. j. za časa taljenja vložka ekstremno angažiranje električne moči na loku, v kasnejšem obdobju raztaljenega vložka pa zahteva tehnologija »vožnjo« po določenem temperaturnem režimu. Angažiranje moči je tu mnogo manjše.

Ce se zaenkrat omejimo zgolj na obratovalni režim v času taljenja, smo takoj pri vprašanju najgospodarnejšega obratovanja: ali je ta pri obrato-

vanju z maksimalnim izkoristkom ali pa pri obratovanju z maksimalno močjo loka ali pa je obratovalna točka najgospodarnejšega obratovanja druge.

Če si pogledamo razmerje obratovalnih stroškov, ki enkrat nastopajo pri obratovanju z maksimalno močjo loka, drugič pa pri obratovanju z maksimalnim izkoristkom, dobimo, da je odnos stroškov odvisen:

$$S = \gamma \cdot \frac{1 + \frac{\beta}{\alpha (1 - \eta_p) \cdot P_{lmax}}}{1 + \frac{\beta}{\alpha (1 - \eta_\eta) P_{\eta max}}}$$

Pri čemer je γ razmerje časov taljenja

$$\gamma = \frac{t_p}{t_\eta} = \frac{P_{\eta max} \cdot \eta_\eta}{P_{lmax} \cdot \eta_p}$$

Raziskave po zgornjih relacijah kažejo, da je obratovanje z maksimalnim izkoristkom (t. j. z minimalno specifično porabo energije) gospodarnejše le pri obločnih pečeh z velikimi toplotnimi izgubami (relativne izgube preko 0,25). Posebno pri večjih agregatih profit na specifični porabi energije v primeru obratovanja v točki maksimalnih izkoristkov ne odtehta dobiti na skrajšanju časa taljenja v primeru obratovanja z maksimalno močjo na loku. Slednje obratovanje zahteva le 70 % do 80 % talilnega časa, ki je potreben za obratovanje z maksimalnim izkoristkom. Upoštevati moramo tudi razmerje cen: dokler je električna energija relativno poceni, kapitalni stroški elektroobločne peči inkluzive kapitalni stroški pripadajočih metalurških naprav pa visoki, je izkoriščanje agregata pri maksimalni moči loka gospodarnejše.

Literatura navaja, da obratujejo sodobni veleagregati s faznim faktorjem za časa taljenja nekje med 0,72—0,78. Če to primerjamo s prej navedeno relacijo za fazni faktor, dobimo takoj potrditev za zgornja izvajanja (Primer 25 t obločne peči: $Z_k = 45\%$ $R = 6,5\%$ ($\cos \varphi$) $P_{lmax} = 0,76$.

Postavlja se vprašanje, ali je obratovanje z maksimalno močjo loka sploh dosegljivo. Kot je razvidno iz enačbe za velikost te moči, je ta sorazmerna kvadratu napetosti transformatorja in obratno sorazmerna z impedanco naprave. Čim manjša je torej induktivna upornost, ker le ta je odločujoča, tem večja je maksimalna moč loka. Pri dovolj nizkih upornostih dobimo moči, ki so mnogo nad nazivno močjo transformatorja. To velja predvsem za manjše obločne peči, kjer so napetosti relativno visoke (do 400 V). Pri velikih agregatih — nad 60 t, katerih lastna induktivna upornost je že precejšnja, je problem obrnjen: obstaja nevarnost, da bi transformatorjeva nazivna moč bila večja od maksimalne moči pod lokom. Vedeti namreč moramo, da smo z napetostmi na (sekundarju) transformatorja omejeni: 500 V je že

izredna napetost; kljub temu so Japonci l. 1962 postavili 200 t elektroobločno peč z napetostjo 700 V.

Ker induktivne upornosti z velikostjo rastejo več kot linearno, je jasno, da postane dušilka pri določeni velikosti naprave naenkrat odveč. Ta meja je nekje pri pečeh kapacitet 30—50 t oziroma pri pečnem transformatorju moč okrog 10.000 kVA. Seveda je meja odvisna od izvedbe peči in končno od napajalne mreže.

Postavlja se problem, kako pri velikih agregatih znižati odvečne induktivne upornosti. Konstrukterji peči dosegajo to s posebnimi transformatorji z majhno kratkostično napetostjo, s čim krajšo povezavo med transformatorjem in pečjo, s posebno razporeditvijo nizkonapetostnih vodnikov, s tem da priključujejo pečne transformatorje na najvišje napetosti (110 kV, 150 kV). Zanimiva je tako imenovana Knappsackova vezava nizkonapetostnih vodnikov, po kateri je sekundarna stran pečnega transformatorja odprt trikotnik, ki je sklenjen šele pri elektrodah na peči.

Izračuni kažejo, da so potrebne naslednje tokovne preobremenitve transformatorja v času taljenja, da bi se dosegla točka maksimalne moči na električnem loku:

- pri 50 % kratkostični impedanci ca 30 %
- pri 45 % kratkostični impedanci ca 45 %
- pri 40 % kratkostični impedanci ca 60 %.

Ali pečni transformator take preobremenitve lahko prenese? Ti transformatorji so običajno zelo dobro grajeni in dimenzionirani. Enotnih predpisov tu ni. Kot primer navajamo zahteve sovjetskih graditeljev peči za preobremenljivosti pečnih transformatorjev.

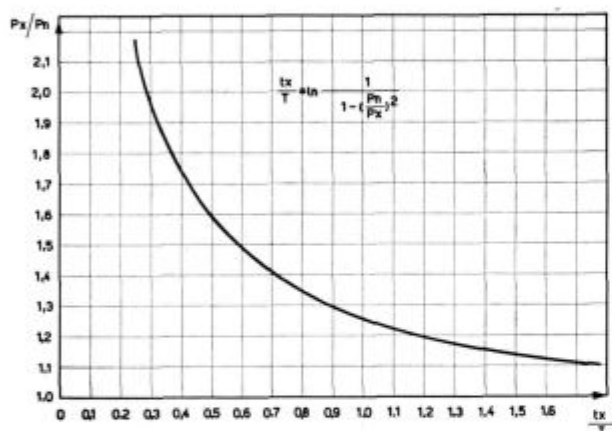
	Predhodni trajni prazni tek	Predhodna trajna 100 % obremenitev
preobremenitev 250 %	10 sek.	./.
preobremenitev 100 %	30 min.	5 min.
preobremenitev 50 %	60 min.	30 min.
preobremenitev 25 %	240 min.	120 min.

Sodobni transformatorji prenesejo izredne preobremenitve. Za racionalno izkoriščanje naprave je poznavanje preobremenljivosti zelo važno. Pravilno izkoriščanje te možnosti pa je možno samo ob pravilni transformatorjevi zaščiti. O tem je govor na drugem mestu, pripomniti je samo, da je najmerodajnejše merilo preobremenljivosti celotne naprave temperatura delov, ki vodijo tok (navitja transformatorja in dušilke, zbiralnice, dovodi na peč, elektrodna držala in elektrode).

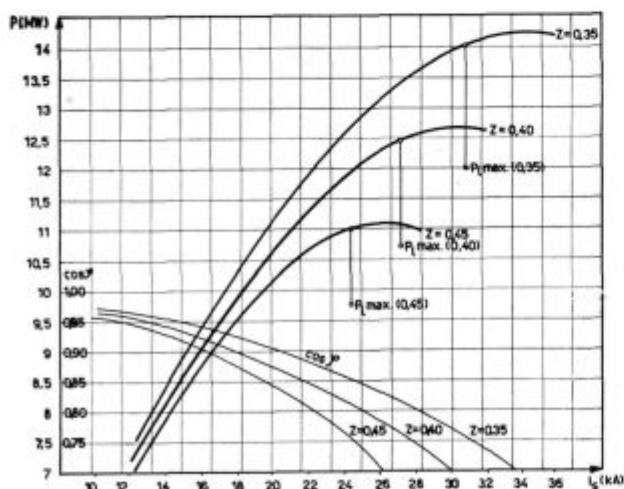
O preobremenljivosti transformatorja nam lahko mnogo pove njegova časovna konstanta segrevanja: obe vrednosti sta si sorazmerni. Idealizirane razmere preobremenljivosti, če je pred njo in za njo trajni prazni tek — nam kaže relacija

$$\frac{t_x}{T} = \ln \frac{1}{1 - \left(\frac{P_n}{P_x}\right)^2}$$

pri čemer je T časovna konstanta transformatorja, t_x pa čas dopustne preobremenitve moči P_x . Iz enačbe sledi, da je 25 % preobremenitev dopustna za čas, ki je enak časovni konstanti segrevanja. Ker imamo ob obločnih pečeh transformatorje velikih moči, ki imajo visoke časovne konstante, obremenitve transformatorja pa lahko smatramo kot obremenitve z določeno intermitenco, so ti transformatorji že po naravi obratovanja preobremenljivi. Možnosti preobremenljivosti transformatorjev pri idealnih razmerah kaže slika 9.



Slika 9
Preobremenljivost pečnega transformatorja

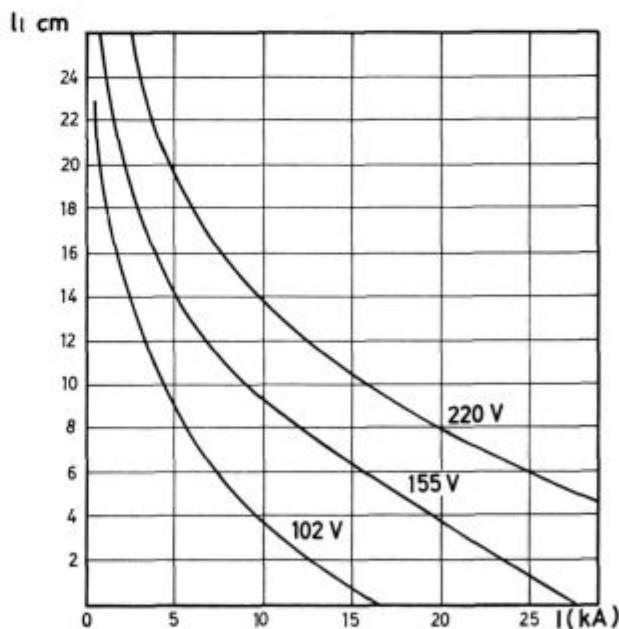


Slika 10
Tokovi maksimalnih moči in maksimalnih izkoristkov

Dobro izbrana elektro oprema peči omogoča takšne preobremenitve, da je območje maksimalne moči na loku dosegljivo. Pri tem je potrebno dušilko, ki je v času taljenja vklopljena, primerno uglasiti impedancam peči, transformatorja in kratkostičnim močem napajalne mreže. Iz prakse, pa tudi iz literature dobljeni podatki govore o 120 % poprečni obtežbi v času taljenja. Upoštevajoč prekinitev taljenja se dejanske preobremenitve približujejo resnično optimalnim. Razmere ob tokovih maksimalne moči na loku oziroma ob tokovih maksimalnega izkoristka nam kaže slika 10.

1.2.

Obratovanje elektro obločne peči v času oksidacije in rafinacije se elektroenergetsko bistveno razlikuje od obratovanja peči v času taljenja. Medtem ko je bila angažirana moč v času taljenja praktično omejena edinole z zmožnostjo električnih naprav, je za obdobje raztaljenega vložka značilen manjši in enakomernejši odvzem energije, odvisen v glavnem le od pretežnosti endotermnih oz. eksotermnih reakcij v kopeli, od višine zahtevane temperature taline ter od toplotnih izgub peči. Energija se mora v tem času dovajati pri manjši napetosti loka. Pri manjši napetosti imamo krajši lok, pri tem pa je toplotno sevanje na obok manjše, kar je odločilne važnosti za vzdržnost obzidave.



Slika 11
Dolžina električnega loka

Kot prikazuje sl. 11 za konkreten primer, je napetost, tok ter dolžina loka v skladu s poenostavljeno Ayrtonovo enačbo:

$$U_l = A + B \cdot \frac{1}{J}$$

Pri čemer so A in B konstante.

Moč dovedene energije v peč je torej v glavnem velikost moči toplotnih izgub (posebno v času rafinacije). Zaradi dobrih jonizacijskih pogojev je lok stabilen, zato je ta čas dušilka izklopljena.

Če obračunamo idealno energetska situacijo v tem obdobju, pri kateri predpostavimo enakost dovedene ter odvedene energije, dobimo tako imenovano kritično napetost transformatorja, to je najmanjšo napetost, pri kateri lahko dovedemo v peč enako moč, kot jo predstavljajo skupne izgube:

$$U_o = \sqrt{2P_p (R + Z_k)}$$

Ustrezni tok je

$$J_o = \sqrt{\frac{P_p}{Z_k}}$$

Ustrezni fazni faktor

$$\cos \varphi_o = \sqrt{1 - \frac{X^2}{2Z_k (R + Z_k)}}$$

Kot je razvidno iz teorije, sovpadata v primeru, da je moč loka enaka moči toplotnih izgub ($P_t = P_p$), obratovalni točki maksimalne moči na loku in maksimalnega izkoristka. To potrjuje tudi relacija za fazni faktor, ki je identična prej navedeni relaciji za fazni faktor pri maksimalni moči loka. To je območje nizkih izkoristkov, teoretično izkoristkov nič.

Obratovalna mesta v času oksidacije in rafinacije se torej nahajajo v območju okrog kritične napetosti oziroma okrog pripadajočega toka, pri katerem je fazni faktor 0,74—0,72. Za doseganje takega obratovanja ni nobenih zaprek. Daleč pa tako obratovanje ne bi bilo najugodnejše, če ne bi istočasno izpolnjevalo drugih pogojev. Pri določanju najugodnejših obratovalnih mest v času taljenja — okrog maksimalne moči na loku — ni drugih tehnoloških zadržkov, razen da naj se taljenje vrši pri zakritem loku (Verdeckte Lichtbogen). Tako obratovanje pa ni več možno, kakor hitro imamo raztaljen vložek. Zdaj energija loka prosto seva v prostor peči. 85 % do 90 % celotne oddane energije seva sam električni lok, ki ima temperaturo do 8000° K, preostalih 10 % do 15 % pa oddaja izstopna površina loka na elektrodi. Dimenzije električnega toka so odvisne od mnogih faktorjev. Red velikosti za premer električnega loka v obločnih pečeh dosega vrednosti par centimetrov, dolžina pa se giblje okrog 10 cm. Pri takih relativno majhnih dimenzijah loka pa so njegove površinske obremenitve izredne: več 100 kW/cm², kar je n. pr. več kot desetkrat več kot pri plamenskem varjenju.

Iz treh krožno razmeščenih lokov trifazne elektroobločne peči sledi razporeditev toplotne obremenitve na površino taline oz. na ostalo okolico. Iz toplotno geometrijskih odnosov sledi, da pride

ca 90 % energije, ki seva na talino v krog premera dvojne razdalje talina — elektroda. To so tako imenovane vroče cone pod elektrodami. Delilni krog elektrod mora biti tak, da se te cone delno prekrivajo in da se v centru peči ustvarja enotno območje velikih toplotnih obremenitev.

Glede na sevalni koeficient žilindre, ki prekriva jekleno talino in ki se giblje v času oksidacije okrog 0,60 in v času rafinacije okrog 0,50 vidimo, da kopel absorbira le 50 % do 60 % energije, ki jo na kopel seva lok. Preostali del se reflektira na notranjo obzidavo peči, predvsem na njen obok. Idealiziran izračun kaže, da sprejme obzidava peči 67 % do 72 % energije, talina pa 30 do 28 % energije. Prve številke veljajo za oksidacijo, druge pa za rafinacijo.

Pri izračunu so bili seveda zanemarjeni efekti zasenčenja in temperaturna razlika med kopeljo in obzidavo, ki zgornjo sliko lahko bistveno spremenijo. Pri sprejemu energije na kopel igra važno vlogo žilindra. Bistven vpliv ima njen absorpcijski koeficient in njena specifična toplotna prevodnost, ki lahko v času kuhanja niha v razmerju 1 : 14. Debelina žilindre neugodno vpliva na temperaturno razdelitev v peči, zato so zahteve pri velikih pečeh, kjer debelina žilindre raste s tretjim korenom iz zmogljivosti peči, po najugodnejšem obratovanju ostrejšje.

Pri realnejšem obravnavanju sevalne energije loka po prostoru peči seveda ne moremo mimo efekta zasenčenja: čim krajši je lok, tem bolj elektroda zasenči obok. Pri kratkem loku se ta tudi premakne pod samo elektrodo, medtem ko je pri veliki razdalji elektroda — kopel izvor lok zunanja stena ali rob elektrode in je ta celo nagnjena na svojem spodnjem koncu navzven, kar je zelo neugodno. S skrajšanjem loka dobimo dejansko dvojen efekt: večje zasenčenje loka in ugodnejše razmerje sevanja na talino in obzidavo. Skrajšanje loka pa pomeni manjšo napetost na loku oz. večji tok loka.

Iz podobnih razglabljanj je ameriški raziskovalec elektro obločnih peči Mr. Schwabe vpeljal tako imenovani erozijski indeks kot nekakšno merilo za obremenitev obzidave peči pri obratovanju peči z raztaljenim vložkom. Izhajal je iz dejstva, da je obremenitev obzidave peči sorazmerna z močjo loka in sorazmerna tudi z napetostjo loka. Erozijski indeks je zato enak:

$$\xi = k \cdot U_l \cdot P_l$$

Mr. Schwabe ga je računal številčno in ugotovil, da ima indeks svoj maksimum pri ca 2/3 maksimalne moči na transformatorju. Za vsakdanjo prakso pa se da erozijski indeks (t. j. najneugodnejše obratovanje) prikazati bolj ugodno. Avtorjeva originalna pot je naslednja:

$$\xi = k \cdot U_l \cdot P_l = k (JU^2 - J^3 X^2)$$

Maksimalni erozijski indeks nastopa torej vedno ob istem faznem faktorju 0,82!

Ce ob zaključku obravnave obratovalnih območij elektroobločne peči pri raztaljenem vložku pogledamo najprimernejša območja, vidimo, da bo v času oksidacije in segrevanja kopeli na višje temperature ugodno obratovati z močjo, ki bo nižja od maksimalne moči loka, t. j. v okolici moči pri maksimalnem izkoristku (ob primarno znižani napetosti brez vklopljene dušilke). Pripadajoči fazni faktor lahko pričakujemo okrog 0,85. Pri rafinaciji, ko praktično krijemo le toplotne izgube peči, je najugodnejše obratovati v območju maksimalnih moči loka ob najnižjih napetostih. Pripadajoči fazni faktor se ne bo dvignil nad 0,75. V obeh primerih se je nujno izogibati obratovanja s faznim faktorjem 0,82. (Glej sliko 8.)

Maksimum nastopa pri pogoju

$$\frac{\sigma \xi}{\tau J} = \emptyset$$

Iz česar se dobi tok, pri katerem je indeks maksimalen

$$J_{\xi_{\max}} = \frac{U}{\sqrt{3X}}$$

Pripadajoči fazni faktor se dobi preko:

$$\sin \varphi_{\xi} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$\cos \varphi_{\xi} = 0,82$$

PEČ KOT ELEKTROENERGETSKI POTROŠNIK

2.1

Podrobnejša analiza karakteristik elektroobločne peči kot potrošnika električne energije ne more iti preko fizikalnih dogajanj na loku v posameznih obdobjih obratovanja peči. Posebni pogoji gorenja loka v teh obdobjih zahtevajo izpolnitev različnih zahtev elektrodne regulacije. Tako imenovana elektrodna regulacija predstavlja dejansko regulacijo moči na loku. V splošnem se da moč loka pri znani napetosti definirati z njegovo impedanco. Določena impedanca loka pa je podana z geometrijo razmer na loku, predvsem z njegovo dolžino. Merni člen elektrodne regulacije je torej kvocientni impedančni merilec, izvršni člen regulacije pa skrbi za ustrezne premike elektrod v nove položaje v odvisnosti od spremenjene impedance loka (glej sl. 12).

Praden si bomo podrobneje ogledali detajle same regulacije, si poglejmo najprej njene naloge:

a) **Začetek taljenja:** ob priključitvi peči na mrežo oziroma ob prikloplitvi avtomatike, se morajo elektrode avtomatično spustiti na vložek, ob njihovem direktnem kontaktu z njimi se vžge lok, elektroda pa se mora odmakniti na razdaljo, ki jo

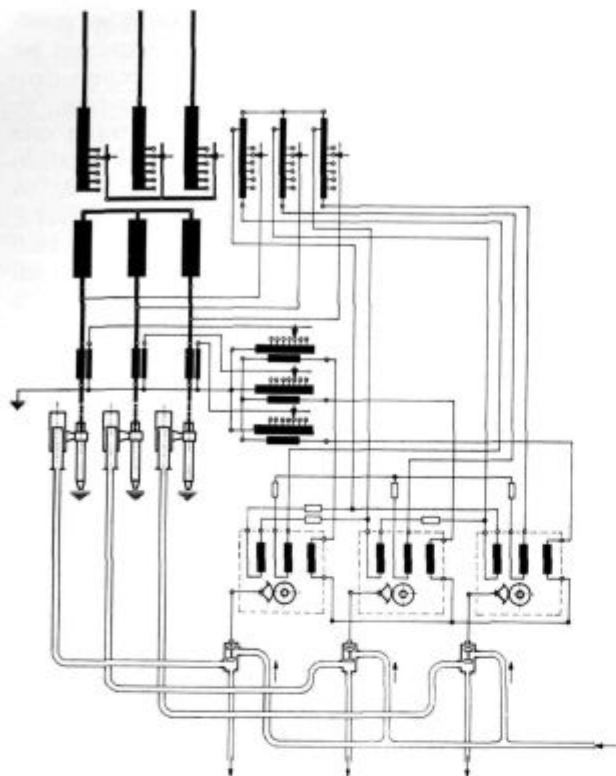
zahteva nastavitev regulacije. Trenutek vžiga predstavlja za transformator kratek stik: napetost na elektrodi pade na vrednost nič; ali povedano drugače: ničlišče, ki pri obločni peči ni fiksirano, se premakne v ogljišče napetostnega trikotnika one faze, ki je v kratkem stiku. Pogost pojav kratkih stikov v začetku taljenja je bil tudi vzrok, da so prvotno regulacijo, ki je bazirala na merjenju toka, zamenjali z impedančno regulacijo. Pri kratkem stiku ene faze se namreč spremenijo tokovi tudi v drugih dveh fazah. Taka tokovna regulacija je bila mnogo bolj nemirna kot impedančna. Impedanca faze, ki je v kratkem stiku, se spremeni, impedanca zdravih faz pa ostane pri tem praktično ista. Praktično zaradi tega, ker se impedanca loka s spremembo toka tudi delno spremeni. Ob kratkem stiku ene faze dobimo tako vseeno spremembo moči na drugih fazah, vendar so ti vplivi močno oslabljeni.

Ob začetku taljenja je regulacija pred težko nalogo, ker mora čase trajanja kratkih stikov zmanjšati na najmanjšo mero. Skrbeti mora, da se lok ne pretrga, ker so pogoji za obstoj loka v hladni peči zelo neugodni. Kratki stiki in trganje loka ima za posledico izredno nihanje angažirane moči, ki lahko doseže več 10 MVA/sek. Tem nihanjem težko sledijo turbinski in generatorski regulatorji napajalne mreže, kar ima za posledico veliko nihanje napetosti v bližnji okolici napajalne točke. Vzdrževanje električnega loka v začetku taljenja je zelo težavno zaradi slabih jonizacijskih pogojev; težave še poveča trifazni sistem elektrod, ki skupno z magnetnim poljem vložka teži za tem, da se loki pod elektrodami potrgajo.

Bistven za regulacijo v tem obdobju je njen nastavitveni čas. Čim krajši je, tem prej so vsa odstopanja izravnana. Previdnost pa terja izbira regulacijske hitrosti: ta v tem obdobju ne bi smela biti prevelika, ker smo sicer zaradi kratkega loka v nevarnosti, da regulacija sama povzroča kratke stike.

b) **Proces taljenja:** s časom se elektrode prebijejo skozi vložek in si v območju najtoplejših con naredo prave kraterje. Vedno obstaja možnost, da se tak krater zruši in zasuje elektrodo, kar ima za posledico kratek stik. Elektroda mora prepotovati velike razdalje (tudi nad 1 m), da se izvleče iz vložka, zato je važno, da so regulacijske hitrosti zelo velike. Vendar so zahteve po velikih regulacijskih hitrostih povezane z nizom problemov: vprašanje moči in odzivnih časov izvršnih organov regulacije, vprašanje togosti oz. resonance elektrodnih držal, vprašanje lomljenja grafitnih elektrod itd. Snodaj navedeni podatki za regulacijske hitrosti, ki so v Evropi običajne, kažejo, da zahteve po kvalitetni regulaciji rastejo z velikostjo peči:

kapaciteta peči	hitrost: mm/sek
1—4 t	25— 30
5—30 t	35— 60
nad 30 t	60—100
max.	150



Slika 12
Regulacija moči obločne peči

Na neenakomernost odvzema energije v času taljenja pa ne vpliva samo regulacija. Obratovanje peči je v veliki meri odvisno od kvalitete vložka. Najboljši vložek imamo takrat, ko je med večje kose pomešan drobiž. Najslabša je nepaketirana pločevina, skozi katero elektroda sunkovito pregreva: naenkrat je med elektrodo in vložkom kratek stik, v naslednjem trenutku pa se lok že pretrga. Takšen neenakomeren odvzem električne energije pri slabem vložku ima za posledico tudi povečanje specifične porabe energije za preko 10 %.

Obdobje taljenja predstavlja izredno obremenitev za transformator. Ne samo zaradi velike obtežbe, temveč tudi zaradi pogostih kratkih stikov. Za dobro obratovanje v času taljenja je potreben preobremenljiv transformator, ki mora brez težav prenesti vrsto kratkih stikov. Pogoste prekinitve taljenja lahko povzročajo slaba zaščita transformatorja, ki po nepotrebnem izklaplja transformator. Taki izklopi so zelo neželeni, ker ne predstavljajo samo podaljšanje taljenja, temveč obremenjujejo tudi visokonapetostna močnostna stikala, ki so sicer pojačane izvedbe zaradi pogostih vklopov in izklopov (4–10 manevrov na šaržo). Najvažnejša zaščita transformatorja je vsekakor zaščita pred previsoko temperaturo navitja. Zaradi forsiranega hlajenja in hitrih sprememb obremenitev nam temperatura transformatorjevega olja da slabo sliko o temperaturi navitja. Če želimo preobremenljivost transformatorja popolnoma izkoristiti,

je potrebno meriti temperaturo navitja. Najobičajnejše dosežemo to s temperaturno preslikavo.

Tako imamo v oblasti ne samo preobremenitve zaradi forsiranega taljenja, temveč tudi preobremenitve zaradi kratkih stikov. Kot smo že ugotovili, se gibljejo kratki stiki elektrod z vložkom v območju $2 J_n$ (pri vklopljeni dušilki), zato ni nujno, da bi pretokovna zaščita reagirala takoj na vsak tak kratek stik. Kot so pokazale izkušnje, se najbolj obnese dvojna pretokovna zaščita: pretokovna zaščita s časovno zakasnitvijo ter trenutna pretokovna — kratkostična zaščita. Naloga prve je, da štiti predvsem pečni del: med vložek zatak-njena elektroda, okvara elektrodnih držal ali regulacije itd. Naloga druge pa je zaščita transformatorja in dušilke ter druge visokonapetostne opreme pred notranjimi okvarami. Pretokovna zaščita s časovno zakasnitvijo običajno torej ne odklaplja pri prehodnih kratkih stikih, zato jo nastavimo nekako med $1,4$ – $1,8 J_n$ z veliko zakasnitvijo 10–20 sek. Ti neobičajno dolgi izklopilni časi, ki so lahko tokovno odvisni ali tudi neodvisni, omogočajo z dobro temperaturno zaščito popolnoma varno obratovanje, pri tem pa dopuščamo regulaciji, da sama odpravi pretežni del nenormalnih situacij v peči.

c) **Proces ob tekočem vložku:** nad raztaljenim vložkom gori električni lok zelo mirno. Napetosti loka so majhne, tokovi veliki, zaradi visokih temperatur je jonizacija lahka. Tudi lok sam je zelo kratek: 10–40 mm, zato pomeni vsaka sprememba te razdalje bistveno spremembo angažirane moči. Iz tega lahko torej zaključimo, da je v tem obdobju za regulacijo važna predvsem njena točnost in preciznost.

Danes poznamo dve vrsti elektrodnih regulacij pri obločnih pečeh: čiste električne regulacije in elektrohidravlične regulacije. Kot lahko sklepamo že iz samih nazivov, se obe regulaciji ločita predvsem v ojačitvenih in nastavitvenih organih.

Električna regulacija ima električna pojačala (amplidin, rototrol, transduktor) in elektromotor kot nastavitveni člen. Pri elektrohidravlični regulaciji pa so ojačala in nastavitveni členi hidravlični elementi. Pri čisti električni regulaciji je šel razvoj od prvotne regulacije s stikali (Tirrillov regulator) preko regulacije z rotacijskimi stroji na prečno polje do transduktorske regulacije oziroma do regulacije s krmiljenimi Hg ali Si usmerniki. Vendar električna regulacija ni dosegla niti s pomočjo zadnjih dosežkov elektrotehnike vseh kvalitet hidravlike. Električna regulacija ima predvsem slabosti v svoji preveliki vztrajnosti, zaradi katere so pospeški v primeru s hidravliko majhni. Kljub uporabi posebnih pogonskih motorjev z vitkimi rotorji so pospeški hidravlike tudi do 40-krat večji, tako da smo včasih že prisiljeni v hidravlični tokokrog vgrajevati dušilne elemente, da zaradi prevelikih pospeškov ne bi prišlo do loma elektrod. Odzivi celotne regulacije so seveda temu primerni: pri elektromotorni regulaciji dosežemo največ

100 ms, pri hidravlični pa je odzivni čas do 40 ms. Tudi regulacijske hitrosti elektromotorne regulacije so omejene. Danes so najvišje praktično dosežene hitrosti 50—60 mm/sek., s hidravliko pa lahko dosežemo tudi do 150 mm/sek. Če še pogledamo lastne čase ojačevalnih elementov obeh regulacij, vidimo, da so lastni časi hidravlike nekaj ms, medtem ko ima amplidin ali transduktor vsaj 10-kratne lastne čase.

Kvalitetna elektrodna regulacija bistveno vpliva na enakomernost odvzema energije, pripomore pa tudi k zmanjšanju specifične porabe energije, elektrod in ognjevzdržne opeke.

Pri običajnih izvedbah električnih peči je še ena značilnost peči kot potrošnika električne energije, ki je izven dosega regulacije t.j. asimetričnost faznih obremenitev. Asimetrija obremenitev, ki je lahko tudi do 10 %, se javlja v tako imenovani ostri fazi, t.j. v fazi one elektrode, ki je najbližja transformatorju. Ta faza ima najmanjšo dolžino dovodov na peč oz. najmanjšo impedanco, zato je napetost loka te faze vedno nekoliko višja. Na tem mestu je ognjevzdržna obloga najbolj obremenjena in njena slaba vzdržnost na tem mestu je znak, da so faze nesimetrično obremenjene.

Simetriranje elektroobločne peči se dosega na različne načine: z nesimetrično dimenzioniranimi dovodi na peč, z vgraditvijo posebne dušilke v dovod ostre faze, s trikotno vezavo na peči (odprti trikotnik na transformatorju), s tem da namesto trifaznega transformatorja vzamemo tri enofazne ali pa posebni petstebrni transformator itd.

Obnesla se je izvedba z običajnim trifaznim transformatorjem, ki ima tri regulacijska stikala.

S takimi pogoji je uspelo zmanjšati asimetrijo faznih obtežb do 2 %.

2.2

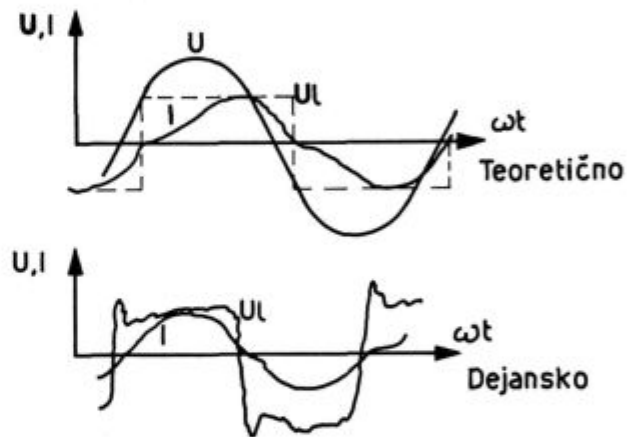
Nemirnost obratovanja elektro obločne peči, ki je izražena z neenakomernostjo odvzema električne energije, določa predvsem stabilnost električnega loka med elektrodo in vložkom. Ločimo makrostabilnost in mikrostabilnost loka. Makrostabilnost se pojavlja predvsem v času taljenja vložka. Sunkovita potrošnja energije, ki je prvih 10—15 min. še nekako periodična — regulacija vžiga lok — je kasneje popolnoma aperiodična. Vžiganje loka se vrši z nekaj zmanjšano napetostjo na elektrodah, ker imamo v tem času največ kratkih stikov. Taljenje poteka pri največji napetosti na elektrodah, s stopnjo raztaljenosti se proces umirja. Pri tem velikost vklopljene dušilke ugodno vpliva na makrostabilnost obratovanja, vendar se v proizvodnji teži k zmanjšanju induktivnosti dušilke, katere velikost zmanjšuje možnost angažiranja čim večje delovne moči na loku.

V času taljenja je velikost sunkov pri manjših napravah večja od nazivne moči transformatorja, pri večjih napravah (nad 10 MVA) pa sunki niso večji od moči transformatorja. Statistično obdelani podatki za velikost in pogostost obremenitvenih

sprememb kažejo, da je velikost sunkov obratno sorazmerna z njihovo pogostostjo. Pogostost sprememb ima pri njihovi določeni velikosti nekje svoj maksimum. Maksimum pogostosti ali frekvenca obremenitvenih sprememb se pojavlja v območju 3—7 Hz.

V območju raztaljenega vložka je makrostabilnost loka kljub izklopljeni dušilki ugodnejša. Spremembe toka so le do 30 % od nazivnega toka. Neugodnost tega obratovanja pa je v tem, da so zdajšnje spremembe obremenitve periodične in se gibljejo prav tako v izredno neugodnem območju 3—7 Hz. Zaradi periodično se ponavljajočih padcev napetosti v omrežju, ki je v bližnji okolici napajalnega mesta obločne peči, dobimo utripanje svetlobe s frekvenco, za katero je človeško oko najbolj občutljivejše. Utripanje svetlobe (fliker, flimmen) je najvidnejši pri žarnicah na žarilno nit, pa tudi televizijski aparati so zelo občutljivi za periodične spremembe.

Na mikrostabilnost lahko vpliva predvsem velikost induktivne upornosti, ki jo imamo v energetskem tokokrogu, in sicer raste stabilnost s kvadra-



Slika 13
Napetost in tok električnega loka

tom induktivne upornosti. To izhaja iz vse večje časovne premaknitve napetosti in toka, kar ima za posledico, da je ob času, ko gre tok skozi vrednost nič, na loku že relativno visoka napetost. Ob tem prehodu nastajajo oscilacije z lastno frekvenco sistema RLC, ki še povečajo vžigno napetost (glej sl. 13). V tej zvezi naj omenimo, da tudi različna obloga peči vpliva na mikrostabilnost loka. Pri kisli oblogi je jonizacija zelo slaba, zato je gorenje loka težavno, medtem ko bazična obloga in dodatki apna v talino ugodno vplivajo na stabilnost.

Po oscilogramu sl. 13 vidimo, da tok loka ni sinusne oblike. Oblika toka se da matematično dobiti iz idealiziranih pogojev, da je napetost na transformatorju sinusna in da je napetost loka pravokotne oblike. Iz teh predpostavk sledi, da si tok električnega loka lahko predstavljamo sestavljenega iz dveh tokov: čistega sinusnega dela osnov-

ne frekvence ter iz toka, ki je eksponencialne oblike. Zaradi take oblike imamo v napajalni mreži obločnih peči višje harmonske tokove.

Meritve kažejo, da lahko pričakujemo:

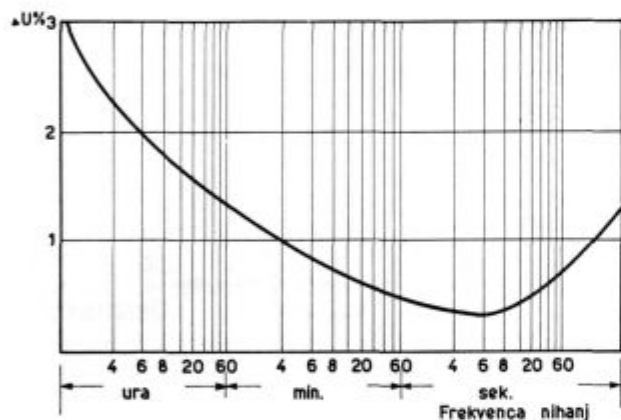
	$2 \times 50 \text{ Hz}$	$3 \times 50 \text{ Hz}$	$5 \times 50 \text{ Hz}$	$7 \times 50 \text{ Hz}$
za taljenje	7 %	10 %	5 %	5 %
za rafinacijo	5 %	15 %	5 %	3 %

Procent se nanaša na nazivni tok osnovne frekvence.

Taki višje harmonski tokovi pa so že neprijetni za elektro gospodarstvo: povzročajo nepotrebne padce napetosti v napajalni mreži, tvorijo inverzne komponente v generatorjih, so vzrok motenj telefonskih linij, vnašajo napake v meritve električne energije ter predstavljajo nekontrolirano nevarnost za preobremenitev kompenzacijskih kondenzatorjev.

2.3

Preden preidemo na izračun napetostnih sprememb, ki jih v napajalni mreži povzročajo elektro

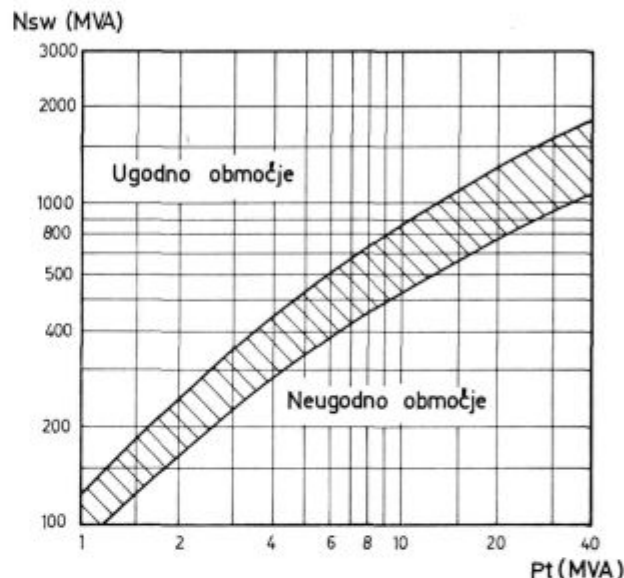


Slika 14
Dopustne spremembe napetosti

obločne peči, si pogledjmo, kakšne napetostne spremembe glede na njihovo pogostnost so dopustljive glede na najbolj neprijetno posledico, t.j. glede na utripanje svetlobe svetilk. Na podlagi dolgotrajnih merjenj in testov o meji med prijetnostjo in neprijetnostjo utripanja svetlobe, ki so jih izvedli predvsem Amerikanci, se je osvojila krivulja dopustnih napetostnih sprememb v odvisnosti od njihove frekvence, ki jo prinaša sl. 14. Razni avtorji prinašajo nekoliko drugačne krivulje, vendar se po smiselnosti vse ujemajo; posebno so si avtorji edini v tem, da je človeško oko najbolj občutljivejše za svetlobne spremembe frekvence 1 — 10 Hz. Zanimivo je, da je največja občutljivost za televizijske aparate še nižja: 0,5 — 3 Hz.

Ker lahko smatramo, da sta za neugodne posledice obratovanja obločne peči kriva tako peč kot

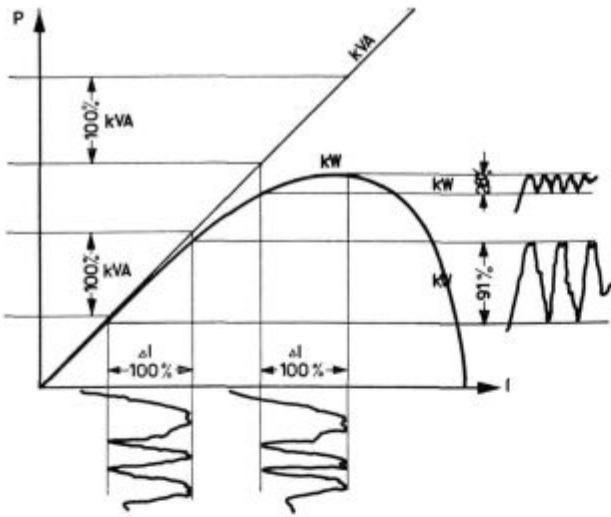
tudi napajalna mreža, ki te napetostne fluktuacije dopušča, so ameriški avtorji, ki so doslej največ naredili na tem področju, raziskali stanje obločnih peči v njihovi elektroenergetski mreži ter ugotovili ne samo kvalitativen, temveč tudi kvantitativen odnos, ki je potreben med napajalno mrežo in potrošnikom, v konkretnem primeru obločno pečjo. Kratkostična moč mreže oz. napajalne točke je ona kvaliteta sistema, ki je merodajna za njegovo togost nasproti napetostnim spremembam, ki jih povzročajo spremembe moči potrošnikov. Grob parameter za spremembe moči obločne peči, kot smo videli, pa je nazivna moč pečnega transformatorja. Odnos obeh parametrov kaže diagram po sl. 15. Diagram kaže ugodna in neugodna obrato-



Slika 15
Zaželene kratkostične moči napajalne mreže

valna območja. Ugodna leže pri višjih kratkostičnih močeh mreže in manjših močeh pečnega transformatorjev, neugodna pa pri manjših močeh mreže in večjih pečeh. Da imajo velike obločne peči relativno manjše spremembe moči, se da razbrati tudi iz diagrama, kjer meja med obema območjema ni linearna. Jasno pa je, da je potrebno pri tem upoštevati minimalne kratkostične moči, ker so napetostne fluktuacije v tem primeru največje.

Tu je omeniti tudi značilnost obločne peči, zaradi katere spremembe elektrodnih tokov ne pomenijo vedno procentualno istih sprememb angažirane delovne moči. Iz sl. 16 vidimo, da v območju tokov maksimalnih moči na loku zaradi zakrivljene karakteristike neka 100 % tokovna sprememba povzroči le 28 % spremembo delovne moči. Območje maksimalnih moči je območje obratovanja v času taljenja, torej takrat, ko pričakujemo največje fluktuacije napetosti v napajalni mreži. Za te je zato pretežno odgovorna nihajoča jalova moč, ker niha skoraj sorazmerno elektrodnim tokom. Diagram delovne moči ima običajno



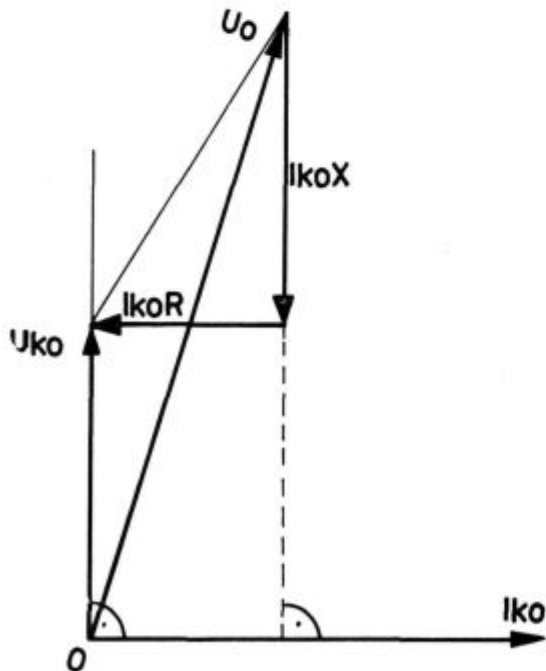
Slika 16
Spremembe tokov in moči obločne peči

časovno lep potek, ne pove pa nam ničesar o spremembah tokov v napajalni točki.

Po drugih virih iz literature (švicarska komisija za elektrotermijo) so podana dovoljena procentualna razmerja med močjo pečnega transformatorja in minimalno močjo trifaznega kratkega stika, ki ne smejo presegati naslednjih vrednosti:

za eno peč	1,2 % — 1,6 %
za dve peči	2,0 % — 2,7 %
za tri ali več	2,8 % — 3,7 %

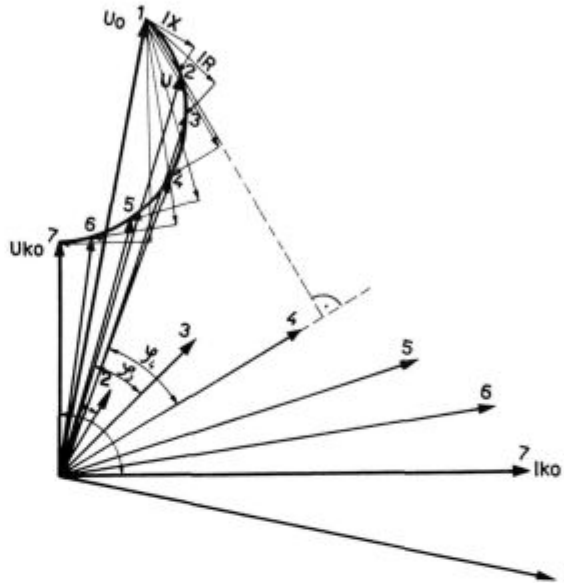
Le pri izpolnitvi gornjih pogojev lahko pričakujemo ugodne napetostne razmere v omrežju.



Slika 17
Napetostne spremembe ob kratkem stiku obločne peči

Po sl. 17 je razvidno, kako se da dobiti maksimalna sprememba napetosti v napajalni točki, katere izvor ima parametre X R.

U_0 je napetost praznega teka, U_{ko} pa je napetost pri idealnem kratkem stiku peči (J_{ko}). Razmerje da maksimalno napetostno spremembo v mreži. Po originalnem avtorjevem diagramu (sl. 18) se da dobiti položaj napetostnega kazalca za vsako obratovalno mesto obločne peči, če se poznajo karakteristike mreže, idealen kratkostični tok peči in fazni faktor obremenitve.



Slika 18
Napetostne spremembe pri obratovanju obločne peči

Na podlagi gornjih ugotovitev lahko dobimo grobo oceno napetostnih sprememb v omrežju po naslednjih relacijah:

$$\Delta U \% = \frac{P'_{sr}}{N_{sw}} \cdot 100 \%$$

pri čemer je

$$P'_{sr} = \frac{\sum P_i}{N} \sqrt{N}$$

P_i — moč posameznih pečnih transformatorjev
 N — število peči

Žal so vse gornje metode določitve ugodnosti oz. neugodnosti aproksimativne, točne rezultate dobimo le s pomočjo oscilografskih merjenj — torej šele takrat, ko je naprava v obratovanju.

Obstajajo možnosti, da se situacija okrog kritičnih napetostnih sprememb v omrežju izboljša. So pa te možnosti v večini primerov povezane z velikimi investicijskimi stroški. Če gledamo situacijo pri peči, je najenostavnejša metoda direkten priključek pečnega transformatorja na daljnovod

čim višje napetosti. Pri velikih napravah smo v to naravnost prisiljeni. Japonci so npr. svojo 200 t elektrooblačno peč moči 40 MVA priključili na napetost 154 kV.

V Ameriki so poizkušali stabilizirati napetost s pomočjo votle elektrode; stvar se ni preveč posrečila, kljub temu pa so opazili zanimiv pojav, da se je pri tem zmanjšala specifična poraba elektrod. Kot dajejo slutiti prvi poizkusi s predmagnetizirano dušilko, ki so bili opisani na V. mednarodnem kongresu za elektrotermijo v Wiesbadenu l. 1963, bi naj bila predmagnetizirana dušilka edina do sedaj poznana preprosta, relativno cenena in efektna metoda za zmanjšanje napetostnih nihanj, ki jih povzroča oblačna peč. Dušilka, ki ima železno jedro iz orientirane transformatorske pločevine, katere magnetna karakteristika ima ostro koleno, je predmagnetizirana tako, da nastane pri tokovih, ki leže nad nazivnim tokom peči, na dušilki velik padec napetosti. S tem se tokovni sunki sami zmanjšujejo. Meritve na 30 t oblačni peči so pokazale, da so se maksimalni toki, ki so bili sicer velikosti $1,75 J_n$, zmanjšali na $1,35 J_n$ in da se je maksimum pogostosti napetostnih sprememb premaknil od prvotnih $1,1 J_n$ na $0,75 J_n$. O ekonomičnosti take dušilke za proizvajalca jekla govore podatki, da se je pri uporabi predmagnetizirane dušilke skrajšal čas taljenja za 14,7 % in da se je specifična poraba energije zmanjšala za 4,1 %.

Zboljševati situacijo okrog napetostnih razmer v elektroenergetskem sistemu je težje. Osnovna zahteva za kakršno koli izboljšanje je jačanje kratkostičnih moči v napajalnih mestih: s postavitvijo novih generatorjev, z graditvijo paralelnih daljnovodov itd. Švedi so izvedli dva eksperimenta v tej zvezi, ki zaslužita pozornost. Namesto dušilke pri oblačni peči so uporabili visokonapetostne serijske kondenzatorje. Rezultati kažejo določene prednosti take izvedbe. Poizkusili pa so tudi priključiti paralelno k peči sinhronski kompenzator, ki je sposoben slediti hitrim spremembam jalove moči. Njegov napetostni regulator so celo delno krmilila z vrednostjo spremembe impedance električnega loka peči. Verjetno pa ugodni rezultati niso povsem ekonomsko upravičeni.

2.4

Iz dosedanje analize elektro oblačne peči kot potrošnika električne energije lahko povzamemo:

a) Poraba delovne energije se v odvisnosti od asortimenta proizvodnje ter od vrste peči giblje običajno od 600 — 800 kWh/t, pri čemer odpade na raztalitev — tekoče jeklo temperature 1550°C — ca 450 — 500 kWh/t (teoretično 340 kWh/t).

b) Pri današnjem klasičnem stanju opreme peči in tehnologije se gibljejo povprečni fazni faktorji celotnega ciklusa med 0,80 in 0,85. Pri velikih agregatih, kjer je dosegljiva točka maksimalne moči na loku, pade fazni faktor v času taljenja med 0,74 in 0,78. Za raztaljeni vložek velja pravilo, da

se izogiblujemo faktorja 0,82. Mnogokrat dosegamo v tem območju višje fazne faktorje, kar govori o tem, da metalurgi obratujejo raje z višjimi napetostmi in nižjimi tokovi.

c) V posameznih obdobjih proizvodnega procesa je specifična poraba delovne energije porazdeljena tako, da je odpade na taljenje 65 % — 75 %, na oksidacijsko obdobje 15 % — 25 % ter na rafinacijsko obdobje 10 % — 15 %. Če vpihavamo v oksidacijskem obdobju v peč kisik, se čas oksidacije in specifična poraba energije v tem času zelo zmanjšata.

d) Računajoč od srednje angažirane moči celotnega procesa v peči, odpade na taljenje ca 170 % te moči, na oksidacijo 75 %, na rafinacijo pa 40 %.

e) Energetska bilanca energij v elektro oblačni peči nam da termični izkoristek naprave. Če pri tem smatramo, da je energija žilindre nekoristna, se ta giblje od 38 % do 48 %. Upoštevajoč energijo žilindre kot koristno energijo — to je za tehnološki proces neobhodno — pa se izkoristek povzpne tudi preko 60 %. Električne izgube niso majhne, saj se gibljejo od 8 % do 14 %.

Pri prikazovanju značilnosti elektro oblačne peči kot potrošnika električne energije ne moremo mimo prikaza nove tehnologije pridobivanja jekla v teh pečeh, ki se uvaja v anglosaškem svetu. Gre za obratovanje oblačnih peči z ultra visokimi močmi (ultra-high power operation), ki v osnovi spreminja način obratovanja peči, predvsem pri proizvodnji nizkoogljivega jekla. Celotno obratovanje se vrši s konstantno močjo v času taljenja in v času že raztaljenega vložka, in to z izrednimi močmi, saj so specifične obremenitve na tono oz. na m^2 površine dvakrat tolikšne, kot pri dosedanjih napravah. Pri tem se obratuje z zelo kratkim lokom, kar pomeni, da vodimo na peč ekstremno velike tokove. Posledica tega so fazni faktorji v času taljenja 0,68—0,70, v času raztaljenega vložka pa komaj 0,60 — 0,62. Prav kratek lok — kot posledica visokih tokov — omogoča uporabo ekstremnih specifičnih moči, katerih sicer obzidava peči ne bi prenesla. Razdelitev sevanja med kopeljo in obzidavo je tu mnogo ugodnejša, kar dokazuje tudi velika oddaljenost tega obratovalnega področja ($\cos \varphi = 0,60$ — 0,70) od področja maksimalnega erozijskega indeksa ($\cos \varphi = 0,82$). Tako obratovanje je daleč od območij maksimalnih moči na loku oz. maksimalnih izkoristkov, saj se tu že močno približujemo obratovanju pod kratkim stikom. Posledica tega je majhno nihanje moči pri taljenju (majhna razlika med J_n in J_k), kakor tudi zelo čista sinusoida elektrodnih tokov. Višjih harmonskih komponent praktično ni, kar govori o znanem pojavu dobre jonizacije pri kratkem električnem loku. Ekonomske prednosti takega obratovanja so predvsem v visoki izrabi naprave: faktor obremenitve je skoraj ena, časi šarž pa so zelo kratki (150 t oblačna peč s transformatorjem 80 MVA:

trajanje šarže 2^h 16 min., proizvodnje 70 t/h, specifična poraba energije 450 — 490 kWh/t, specifična poraba elektrod 4 — 5,5 kg/t). Taki rezultati odtehtajo povečane stroške za jalovo energijo pa tudi za dražjo opremo peči.

2.5

Poznavanje maksimalne obtežbe, ki jo povzroča obločna peč v napajalnem sistemu ni važno samo pri izbiri elektroenergetske opreme, temveč tudi pri analizi obratovalnih stroškov. Vse današnje tarife za obračun porabljene električne energije vsebujejo elemente, po katerih je cena kWh odvisna poleg dnevnih in sezonskih postavk predvsem še od obtežbe. Po stroškovnem načelu obračunava elektro gospodarstvo najvišjo angažirano moč v določenem časovnem pasu (urna ali četrturna konica), ne glede na to ali je nastala samo enkrat v obračunskem obdobju ali pa je taka obtežba bila ves čas. Elektro gospodarstvo teži po čim boljšem izkoriščanju svojih naprav t. j. za njihove čim večje obratovalne ure.

Obratovanje obločne peči v enem ciklusu — od preboda do preboda — je tehnološko dokaj določeno. Ločili bi lahko samo klasičen način obratovanja (za program kvalitetnih in plemenitih jekel) ter obratovanja z ultra visokimi močmi (za proizvodnjo masovnih jekel). Detajlneje bomo obravnavali samo prvi način obratovanja, pri čemer bomo vpeljali naslednje odnose:

a) Faktor obremenitve

$$f = \frac{P_{sr}}{P'_{max}}$$

pri čemer je P'_{max} konica (urna ali četrturna)

b) Faktor preobremenjenosti

$$p = \frac{P'_{max}}{P_t \cdot \cos \varphi_{max}}$$

c) Faktor obremenjenosti

$$o = \frac{P_{sr}}{P_t \cdot \cos \varphi_{sr}}$$

Povezava med posameznimi faktorji je naslednja:

$$f = o \frac{\cos \varphi_{sr}}{\cos \varphi_{max}}$$

Glede na urno ali četrturno konico so po izkušnjah dobljeni faktorji preobremenljivosti

$$= 1,2 - 1,4 \quad (p)_{4h} \\ (p)_{1h} = 0,7 - 0,9$$

Faktorji obremenjenosti pa se gibljejo v območju

$$o = 0,4 - 0,6$$

Ker med faznim faktorjem konične obtežbe in srednjim faznim faktorjem ni bistvene razlike, lahko zaključimo, da je

$$\frac{1}{f} = \frac{p}{o} = 1,5 - 1,8$$

Faktor preobremenjenosti (p) je važen za dimenzioniranje opreme. Določa ga v prvi vrsti segrevanje transformatorja in dušilke.

Faktor obremenjenosti (o) nam pove stopnjo izkoriščenosti transformatorja; kot vidimo, je ta v enem proizvodnem ciklusu slabo izkoriščen. Letni faktor obremenjenosti je še nižji, okrog 30 %, kar govori o tem, da je med ciklusi mrtev čas. Ta je seveda potreben za obnovo obzidave peči ter druga remontna dela.

Faktor obremenitve (f) želimo imeti čim večji, ker pri tem ne bomo dobili samo večjega faktorja obremenjenosti, temveč predvsem skrajšanje proizvodnega ciklusa: faktor obremenjenosti pomeni tudi relativne obratovalne ure transformatorja.

Dokaj jasne razmere v primeru ene same peči postanejo takoj manj oprijemljive pri več pečeh, upoštevajoč še druge elektroenergetske potrošnike, ki obratujejo v istem sklopu. Če gledamo samo skupino več peči, vidimo, da je faktor obremenjenosti skupine enak faktorju obremenjenosti enote. Drugačne pa so razmere pri faktorju obremenitve: posamezne peči, obratujoče neodvisno druga od druge, enkrat sovpadajo z obdobji taljenja, drugič pa taljenje enih peči sovpada z obdobji raztaljenega vložka drugih. V prvem primeru je faktor obremenitve skupine peči enak kot pri eni peči, v drugem primeru pa je večji — jasno ugodnejši. Z rastočim številom peči slučajna sovpadanja dobivajo zakonitosti verjetnostnega računa, po katerem bi bil pri izredno velikem številu peči faktor obremenitve ena. Z vpeljavo strogega reda pri vrstnem redu obratovanja se da doseči ugoden faktor obremenitve že pri majhnem številu peči. Po podatkih iz literature, ki so dobljeni na osnovi računov, naj bi se dali doseči naslednji rezultati:

$$\text{ena peč: } \frac{1}{f} = 1,7$$

$$\text{dve ali tri peči: } \frac{1}{f} = 1,3$$

$$\text{štiri peči: } \frac{1}{f} = 1,0$$

Tako idealizirana teorija še ni bila v praksi potrjena. Razlogov je več: najvažnejši je gotovo ta, da obločna peč ni vlak, ki bi vozil točno po voznem redu in tako omogočal sinhronizacijo vožnje ostalih peči. Pri obratovanju peči se dogajajo nepredvidene stvari od različno dolgih korekcij analiz do nepredvidenih popravil. Predvsem to velja za malo-

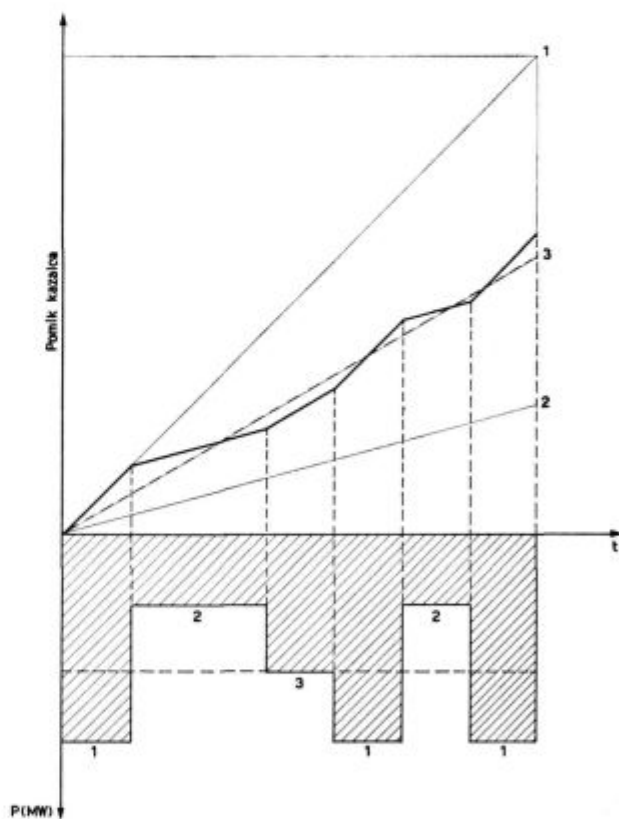
serijsko razdrobljeno proizvodnjo, kjer je kvečjemu nekaj desetini šarž enake kvalitete, kar zahteva različne tehnologije. Od te pa so odvisni časi pri raztaljenem vložku (ena žindra, dve žindri). Kljub temu pa nas bodo naraščajoči stroški za porabljeni kWh prisilili, da moramo obratovalno anarhijo preprečiti. Pri tem lahko distributer električne energije veliko pomaga s svojim razumevanjem. Različni dogovori težijo predvsem k takemu obračunu konične obtežbe, da se ta obračunava ali celo omejuje le v času, ko primanjkuje moči v elektroenergetskem sistemu (v času opoldanske in večerne konice ali v času višje dnevne tarife itd.). Važen je tudi dogovor o trajanju konice. Urna konica dovoljuje več manevrskega prostora kot četrturna, pri tem pa je četrturna konica zaradi različnih faktorjev preobremenjenosti lahko tudi več kot 50 % višja od urne.

Za nekak osnovni red pri vrstnem redu obratovanja večjih peči skrbi že pogonsko osebje s težnjo po čim boljši izkoriščenosti pomožnih naprav. Kapacitete transportnih naprav (vozil, vagonov, žerjavov, tehtnic) bi bile malo izkoriščene, če bi lahko vsem pečem v isti fazi postopka istočasno stregli. Faze taljenja si zato sledijo že v grobem zaporedju, kar pa še ne garantira znosne konice. Neugodnosti nastopajo, če peči lahko bolj neodvisno obratujejo druga od druge kot npr. pri različnih lokacijah ali ob različnih namenih proizvodnje (za livarne ali valjarne). Upoštevati pa je še osnovno obtežbo drugih proizvodnih obratov, ki je sicer časovno bolj umirjena, pa tudi težje nadzorovana.

Ob velikih obločnih pečeh se je zato uvedla dispečerska elektroenergetska služba, katere naloga je, da usklajuje obtežbe na neki vnaprej dogovorjeni nivo ali pa celo sprejema ukaze od dispečerjev prenosno proizvodnih organizacij. Dispečer lahko že po poznavanju obratovalnega obdobja posameznih peči predvidi, kakšna bo obtežba v bodočem časovnem intervalu in ali bo potrebna njegova intervencija. Reduciranje obtežbe ali pa začasna ustavitve ene ali več peči mora biti izbrana tako, da ne prekinjamo tehnologije v taki stopnji, ki zahteva kontinuirano in nemoteno obratovanje. Brez večjih posledic je to možno le v času taljenja, tu pa je tudi efekt zaradi največjih angažiranih moči najboljši.

Predvidevanje obtežbe in odločanje o potrebi intervencije je stvar rutine. Sodobne merilne naprave ali pa računalniki posel zelo olajšujejo. Najbolj enostavni so tako imenovani čuvaji konice, ki signalizirajo nevarnost prekoračitve obtežbe ali pa celo odklapljajo za redukcijo predvidene potrošnike. Naprava je narejena tako, da sešteva oz. integrira produkte iz moči in časa. Vsakokratna poraba (moč) električne energije je sorazmerna hitrosti pomikanja kazalca, ki tako kaže stanje potrošnje. Drugi kazalec iste naprave se pomika enakomerno. Njegova hitrost je sorazmerno vnaprej določeni obtežbi, ki je ne želimo prekoračiti.

Iz primerjanja hitrosti vrtenja kazalcev bi lahko sklepali, ali je trenutna obtežba večja ali manjša od predvidene konične obtežbe. Vendar trenutne vrednosti moči niso tolikega pomena — odčitamo jih lahko z drugih instrumentov — važno je vedeti, s kakšno močjo smemo obratovati do konca opazovalne periode, da predvidenega povprečja periode, t. j. konice, ne bomo prekoračili. Če je kazalec dejanske porabe zaostal za kazalcem predvidene porabe, je bila v preteklem opazovanem obdobju povprečna obtežba nižja od predvidene. Če pa ga je prehitel, je bila povprečna obtežba v preteklem obdobju večja od predvidene. Če bomo torej hoteli v času konice obtežbo obdržati na predvidenem nivoju, jo je treba zmanjšati, da bo kazalec dejanske porabe zaostal toliko, da ga bo do konca opazovanega časa kazalec predvidene porabe vsaj dohitel. Razmere delovanja čuvaja konice so prikazane na sl. 19. Smeri posameznih premic ustrezajo na spodnjem delu prikazanim obtežbam. Nakloni premic so sorazmerni hitrostim kazalca stvarne obtežbe, pri čemer označuje debelo izvlečena premica gibanje kazalca predvidene obtežbe.



Slika 19
Delovanje čuvaja konice

Premice imajo večji odklon od debelo izvlečene pri večjih trenutnih obtežbah od povprečno predvidene in obratno. Gibanje kazalca stvarne obtežbe predstavlja lomljena črta. Kazalec stvarne obtežbe prehiteva kazalec predvidene obtežbe, kadar imamo

stanje potrošnje nad premico predvidene obtežbe in obratno. Z enostavnimi računi se da določiti, kakšno mora biti zmanjšanje obtežbe v odvisnosti od preostalega časa, da se predvidena konica ne bi prekoračila; običajno pa dispečerji s časom dobé občutek oz. izkušnje, kako postopati v takih primerih.

Rezultati take kontrole so vsekakor ugodni. Pri štirih neenakih pečeh se je npr. faktor obremenjenosti skupine peči povzpela na $1/f = 1,18$, kar je zelo blizu prej navedenih teoretičnih vrednosti in kar je 30 % ugodnejše od stanja, ko še ni bilo take dispečerske službe. Ob tem se je zmanjšala konica za 20 %. Število dispečerjevih posegov v obratovanje peči pa ni bilo vznemirjajoče.

3. ENERGETSKO OBRATOVALNI ODNOSI PEČI

3.1

Urna proizvodnja - produktivnost obločne peči, izražena v tonah proizvedenega jekla na uro, je odvisna v splošnem od velikosti peči. Velikost obločne peči je enosmiselno določena s kapaciteto tekočega jekla pred prebodom, torej z njenim volumnom, ki ga ustvarja posebna metalurško konstrukcijska geometrija. Dimenzije, kot so: premer peči, globina kopeli, oddaljenost oboka od dna, delilni krog elektrod itd., se z velikostjo peči spreminjajo po določenih zakonitostih, ki ne dovoljujejo večjih odstopanj. Vendar velikost (kapaciteta) obločne peči, izražena v tonah, ne pove še ničesar o času, v katerem se je tehnološki postopek pridobivanja jekla zaključil. Ta pa je, kot bomo videli, predvsem odvisen od moči transformatorja, ki dovaja energijo v peč. Čas trajanja šarže, t. j. čas od zalaganja od preboda, se da izraziti na naslednji način

$$t = \frac{G \cdot w}{P_{sr}}$$

pri čemer so G kapaciteta peči v tonah, w dejanska specifična poraba električne energije v kWh/t, P_{sr} pa srednja delovna moč v kW za časa trajanja šarže.

Urna proizvodnja je torej:

$$g = \frac{G}{t} = \frac{P_{sr}}{w} \text{ [t/h]}$$

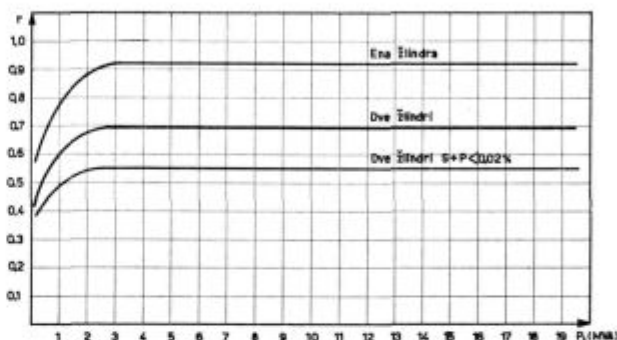
Ce vpeljemo v zgornji odnos že znani faktor obremenjenosti transformatorja (σ), dobimo direktno zvezo med proizvodnostjo in močjo transformatorja:

$$g = \frac{\sigma \cdot \cos \varphi_{sr}}{w} \cdot P_t$$

Faktor produktivnosti r nam pove, kakšno urno proizvodnjo lahko pričakujemo pri moči transformatorja 1 MVA:

$$r = \frac{1000 \cdot \sigma \cdot \cos \varphi_{sr}}{w}$$

Faktor produktivnosti kaže sl. 20 v odvisnosti od kapacitete peči ter od načina tehnologije. Kot se vidi iz gornje enačbe, so v tem faktorju združene vse specifičnosti obratovanja peči. Predvsem je jasna direktna zveza s faktorjem obremenjenosti. Odvisno od tega, ali zasledujemo urno proizvodnjo posamezne šarže ali drugega časovnega



Slika 20
Faktor produktivnosti

obdobja (mesečna, ali letna), je potrebno upoštevati ustrezne faktorje obremenjenosti transformatorja. Jasno je, da je faktor obremenjenosti ene šarže višji od mesečnega ali celo letnega. Iz slike 20 se dajo posamezni faktorji izračunati. V produktivnostnem faktorju je zajeta tudi specifična poraba energije kot obratno sorazmeren činitelj. Ker upoštevamo zaenkrat le globalne produktivnostne in energetske razmere peči, je ta odnos trivialen. Videli pa bomo, da obstaja tesna medsebojna zveza med vsemi dejavniki, ki vplivajo na faktor produktivnosti. Ta se giblje v razponu

$$r = 0,50 - 0,75$$

Končno lahko zapišemo, da je produktivnost obločne peči

$$g \text{ [t/h]} = r \cdot P_t \text{ [MVA]}$$

Recipročna vrednost produktivnosti pomeni specifični predelovalni čas, t. j. čas, ki je potreben za izdelavo 1 t jekla. V obratovanju obločne peči ločimo predvsem dve obdobji: taljenje in čas raztaljenega vložka. Kot je razvidno iz prejšnjih izvajanj, je proces taljenja čisto v rokah elektroenergetskih razmer, medtem ko je čas raztaljenega vložka metalurško tehnološka zadeva. Analogno temu lahko tudi specifični predelovalni čas razstavimo na specifični predelovalni čas za taljenje in

na specifični predelovalni čas pri raztaljenem vložku:

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_t} + \frac{1}{g_r}$$

Recipročna vrednost produktivnosti nekega ključnega tehnološkega ciklusa je torej enaka vsoti recipročnih vrednosti produktivnosti posameznih faz postopka.

Produktivnost taljenja se da izraziti s časom, ki je potreben za taljenje

$$t_i = \frac{G \cdot \delta_o}{P_{max} \cdot \eta_x - P_{pt}}$$

Električni izkoristek v času taljenja je odvisen od faktorja preobremenjenosti:

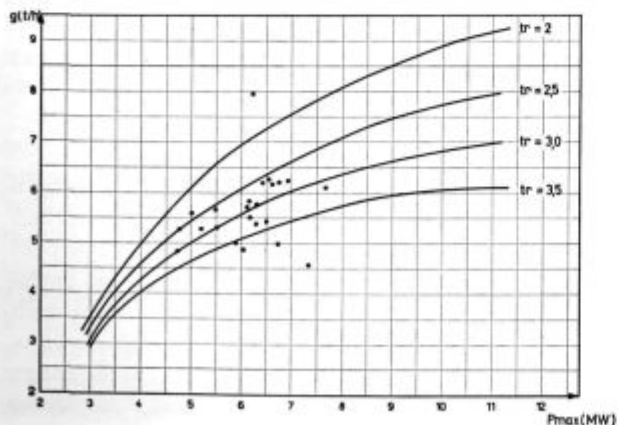
$$\eta_x = 1 - (1 - \eta_o) \cdot p^2$$

pri čemer je treba — po definiciji upoštevati odvisnost faktorja preobremenjenosti od faznega faktorja. Preobremenjenost računamo običajno za nazivno napetost transformatorja. Iz navedenega sledi:

$$g_t = \frac{1}{\delta_o} (P_{max} \cdot \eta_x - P_{pt})$$

$$g_r = \frac{G}{t_r}$$

Iz enačb je razvidno, da je produktivnost obločne peči neposredno odvisna od maksimalne električne moči, ki jo transformator zmore. Odvisna pa je tudi od tehnologije: skrajšanje časa t_r pomeni njeno neposredno zvišanje. Za konkreten primer obratovalnih zmogljivosti obločne peči kaže zgornje razmere sl. 21. Omeniti je, da pomeni P_{max} srednjo delovno moč, izmerjeno na transformatorju v času taljenja. Prekinitve obratovanja v času taljenja zaradi ponovnega zalaganja ali zaradi delovanja zaščite zmanjšuje povprečno vrednost moči.



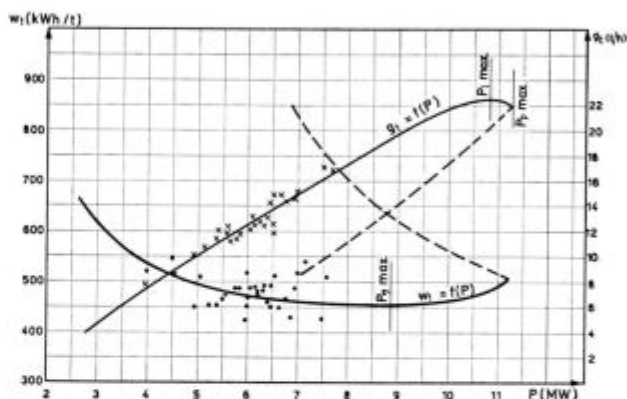
Slika 21
Produktivnost obločne peči

Specifična poraba električne energije za taljenje je odvisna:

$$w_t = \frac{\delta_o}{\eta_x - P_{pt}/P_{max}}$$

in se giblje okrog 45 kWh/t. Termični izkoristek taljenja je pri tem ca 80 %. Razni avtorji dokazujejo, da je potrebno pri izračunih upoštevati teoretično specifično porabo za taljenje 365 kWh/t in ne 340 kWh/t, in sicer zaradi različnih eksotermnih procesov v času taljenja.

Jasno je, da vrednost števila v zgornji enačbi predstavlja celotni izkoristek procesa. Kot smo videli že v prvem poglavju, ima izkoristek svoj maksimum in pri njem je specifična poraba električne energije najmanjša. Območje obratovanja pri maksimalnih izkoristkih se lepo vidi iz sl. 22.



Slika 22
Produktivnost in specifična poraba energije obločne peči pri taljenju

Krivulja specifične porabe električne energije ima blag in neizrazit minimum. Zaradi tega se toliko lažje odločimo za moči taljenja, ki leže nad močmi maksimalnih izkoristkov, saj s tem lahko bistveno zvečamo produktivnost. Večanje moči ima postavljene meje: največja delovna moč, ki jo lahko izmerimo na transformatorju ($P_{p,max}$), nastopa pri faznem faktorju 0,71. Največja delovna moč, ki jo dobimo na električnem loku ($P_{l,max}$) in pri kateri je produktivnost najvišja, nastopa pri nekaj nižji moči od $P_{p,max}$ (fazni faktor 0,76). Razmere so vidne na sliki 22. Vidimo, da ima produktivnost g_t izrazit maksimum, zato je nesmiselno preobremenjevati transformator preko $P_{l,max}$ oziroma prekoračevati tok, pri katerem bi bil fazni faktor slabši od ca 0,76.

Sl. 22 nam kaže tudi vrednosti, ki so bile dosežene v konkretnem primeru. Opazna je nizka povprečna moč v času taljenja, kar je posledica mnogih prekinitvev predvsem zaradi večkratnega dolgotrajnega zalaganja. Črtnane krivulje predstavljajo vrednosti parametrov za moči P_{max} , ki bi bile dosežene pri večjih elektrodnih tokovih, kot je

J_{pmax} . To je območje tokov v desni polovici krožnega diagrama ali območje faznih faktorjev, ki so manjši od 0,71.

Visoka produktivnost ter nizka poraba električne energije sta v veliki meri odvisna od organiziranosti tehnološkega postopka.

Pokazali bomo nekaj parametrov, kako kvantitativno vplivajo na rezultate obratovanja. Dvignjene razžarjene elektrode so pogost in nujen pojav pri obratovanju: 10-minutno prosto sevanje z njihove površine predstavlja izguba ca 25 kWh na dolžinski meter sevalne površine. Pri zalaganju s košaro je peč odprta, tako da obok in kad peči, katerih obzidava je segreti tudi nad 1500°C, neovirano sevata v prostor. Hitre manipulacije so tu izrednega pomena ne samo zaradi izgub energije, temveč tudi zaradi kvarnega vpliva hitrih temperaturnih sprememb na vzdržnost obzidave. Sl. 23 kaže potek temperature obzidave oboka in kadi v odvisnosti od časa kakor tudi izgubljanje akumulirane energije obzidave. Sl. 24 nazorno kaže odvisnost specifične porabe energije od tako imenovanih mrtvih časov: popravila dna, časi zalaganja, čakanje, vzdrževalna dela itd. Prikazane meritve dajejo zgovoren podatek: pri četrturnem skrajšanju mrtvih

časov lahko pričakujemo tudi za 50 kWh/t zmanjšano specifično porabo energije!

O vplivu časa t_r (čas raztaljenega vložka) na produktivnost smo že govorili, isti parameter pa direktno vpliva tudi na porabo energije. Skupno porabo električne energije lahko določimo iz naslednje relacije:

$$w = w_t + w_o + w_r$$

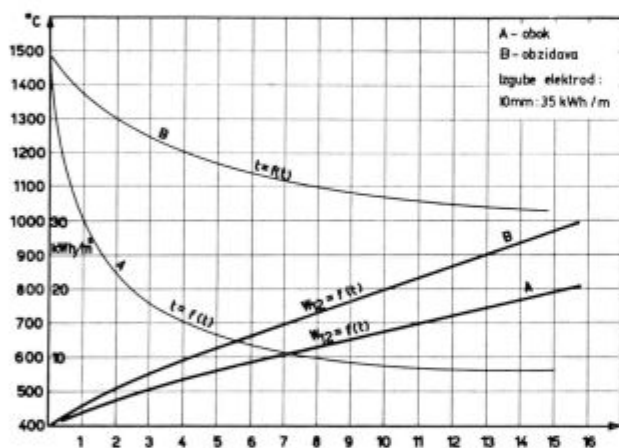
pri čemer je: w_t specifična poraba električne energije za taljenje — w_o je konstanta in predstavlja porabo energije za formiranje žlindre, za segrevanje taline nad talilne temperature, upoštevajoč pri tem bilanco reakcijskih energij procesa; w_r je energija toplotnih izgub, ki je odvisna:

$$w_r = \frac{P_{pr}}{G} \cdot t_r$$

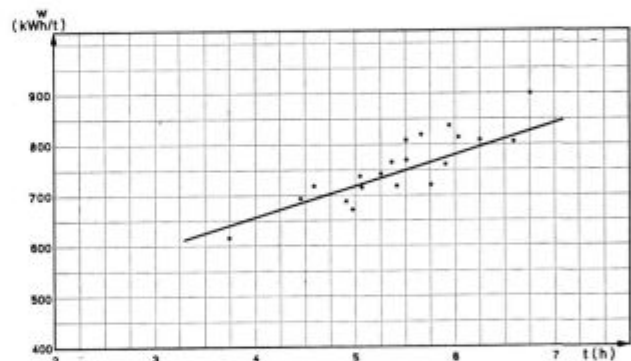
Skupna specifična poraba električne energije obločne peči je torej

$$w = \frac{\delta_o}{\eta_x - P_{pt}/P_{max}} + w_o + \frac{P_{pr}}{G} t_r$$

Sl. 25 kaže zgornji odnos. Meritve, ki so prikazane ob izračunanih specifičnih porabah, dokazujejo pravilnost gornjih izvajanj. Vrednosti w_o se gibljejo med 10 % in 20 % celotne specifične porabe, močno pa so odvisne od tehnologije (ena ali



Slika 23
Hlajenje oboka in kadi obločne peči

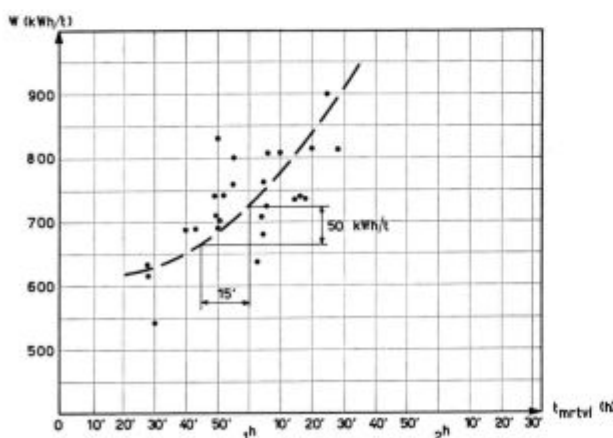


Slika 25
Poraba energije v odvisnosti od trajanja šarže

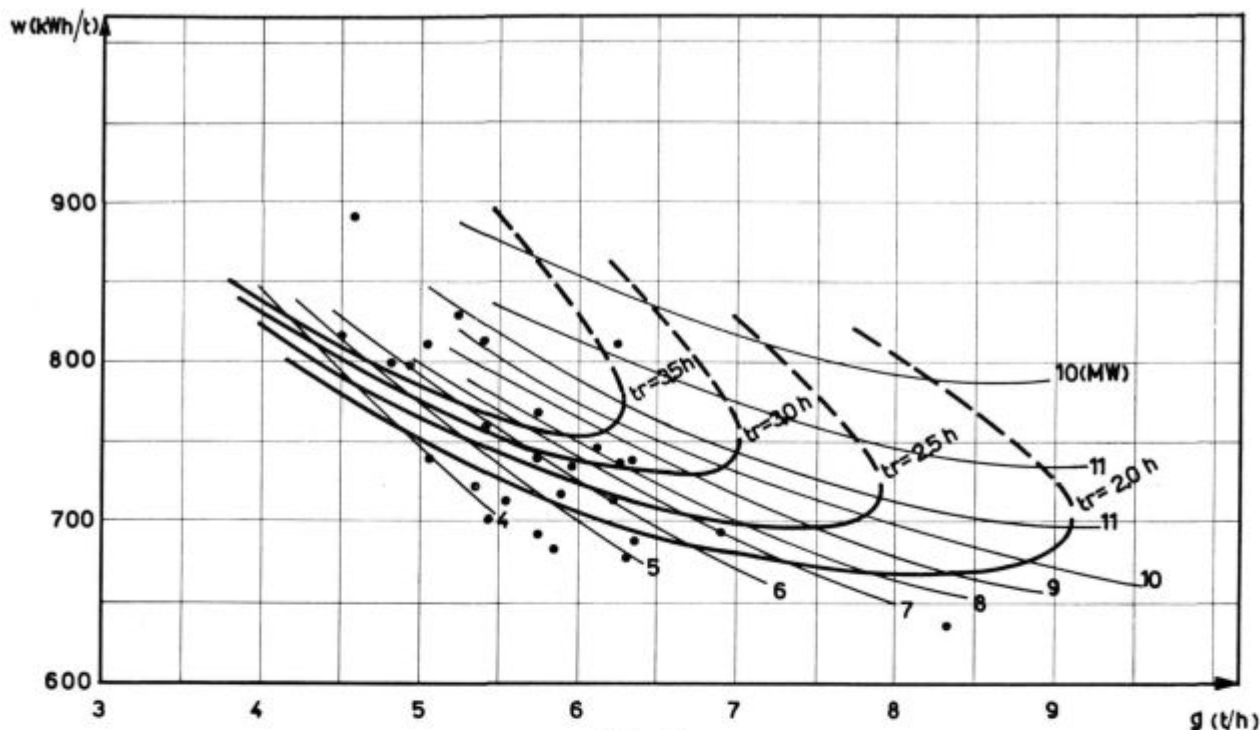
več žlinder, vpihanje kisika itd). Porabe na sl. 25 so prikazane za določeno moč ($P_{max} = konst$), čas t je čas celotne šarže ($t = t_t + t_r$).

Če končno povežemo definicijski odnos za produktivnost obločne peči z njeno specifično porabo električne energije, dobimo funkcijo $w = w(g)$, katera najvažnejši parametri so P_{max} (moč za časa taljenja) in t_r (čas raztaljenega vložka). Te zanimive krivulje so prikazane na sl. 26. Kažejo ponovno značilnosti obločne peči, t. j. območje blagih minimumov porabe energije ter območja izrazitih maksimalnih produktivnosti. Prehod na drugo stran maksimalnih produktivnosti pomeni obratovanje z elektrodnimi tokovi nad P_{pmax} .

Funkcije $w = w(g)$ so interesantne predvsem zaradi tega, ker kažejo odnos med vrednostmi, ki so najlažje merljive in ki se v proizvodnji vedno



Slika 24
Vpliv mrtvih časov na specifično porabo energije



Slika 26

Vpliv produktivnosti na specifično porabo energije

beležijo. Če si izračunamo krivulji za mejne vrednosti t_r (za minimalni in maksimalni čas raztaljenega vložka), dobimo območje, v katerem mora potekati normalna proizvodnja.

3.2

Pri dosedanjem obravnavanju energetske produktivnosti odnosov obločne peči nismo obravnavali činitelja, ki vpliva prav tako na oba parametra peči. To so toplotne izgube (P_p), določitev katerih pa sega že v razdelitev energij ali v energetske bilanco. Kot pri večini toplotnih strojev tudi pri obločni peči ni mogoče določiti vseh energij neposredno. Meriti se daje enostavno le določene veličine. Grobe predpostavke vnašajo v detajle energetske bilance napake, kar pa ni poseben problem, saj nas pri energetske produktivnosti odnosih zanimajo le globalne razmere. Najvažnejša predpostavka pri razdelitvi energij, ki je pa tudi najbolj dvomljiva, je trditev o konstantnosti skupnih izgub v času obratovanja. Po tej tezi obločna peč oddaja toplotno moč ves čas enakomerno v prostor. To dokazuje več avtorjev, pa tudi določene meritve kažejo, da je to v prvem približku res tako. Če ločimo moč izgub predvsem na dva dela: na električne izgube moči ter na ostale toplotne izgube, potem lahko rečemo, da je za čas taljenja

$$P_{izg} = P_{izgel} + P_{pt}$$

Električne izgube so v času taljenja največje, ker takrat tečejo preko nadomestnih upornosti elektroenergetskega tokokroga R največje moči. V

času raztaljenega vložka so te moči ca 5-krat manjše.

Zaradi (približno) kvadratnega odnosa so pri tem električne izgube zanemarljive, zato lahko trdimo, da imamo za čas raztaljenega vložka le toplotne izgube, ki pa so po prvotni predpostavki

$$P_{pr} = P_{izg}$$

Če pregledamo stvarno obratovanje obločne peči, vidimo, da so v času:

1. Taljenja
 - a) Izgube sevanja in konvekcije zaradi hladnejšega vložka in obzidave manjše
 - b) Izgube s plini so manjše. Plini zaradi odgora so pri nižjih temperaturah manjši
 - c) Izgube s hladilno vodo peči so zaradi nižjih temperatur manjše
2. Raztaljenega vložka
 - a) Izgube sevanja in konvekcije so nekaj večje
 - b) Izgube s plini so večje, posebno v času oksidacije
 - c) Izgube s hladilno vodo so večje zaradi večjih temperatur oboka, vrat, elektrod
 - d) Električne izgube so bistveno manjše.

Pri energetske bilanci obločne peči je poleg toplotne vsebnosti jekla — entalpije jekla upoštevati še kot koristno energijo entalpijo žilindre. Točnejša bilanca mora upoštevati poleg električne energije kot dovedeno energijo tudi reakcijsko toploto. Njen izračun zahteva točno poznavanje endotermnih in eksotermnih metalurških procesov. Reakcijska tolota dosega ca 15 % skupne dovedene

energije, nastaja pa predvsem v času oksidacije in rafinacije.

Skupne toplotne izgube v času taljenja so

$$P_{izg} = G \frac{w_t - \delta_o}{t_t}$$

Če zmanjšamo njihovo vrednost za električne izgube, dobimo toplotne izgube obločne peči pri taljenju

$$P_{pt} = P_{izg} - P_{izgel}$$

Električne izgube se dajo enostavno izračunati iz posameznih ohmskih upornosti ter iz tokov, pri katerih se je vršilo taljenje. Vendar povprečni talilni toki zaradi zelo spreminjajočih se vrednosti dajo zelo grobe ocene električnih izgub. Mnogo boljši rezultati se dobijo z J^2t — števcem, iz katerega odčitkov se dobe izgube:

$$P_{izgel} = 3 \cdot k \frac{J_t^2}{t} R$$

Določitev toplotnih izgub v času raztaljenega vložka (P_{pr}) je bila že omenjena. Za kontrolo teh izgub nam je lahko dovedena moč v času raztaljenega vložka, točneje v času rafinacije. V prvem približju je tokrat dovedena moč enaka toplotnim izgubam:

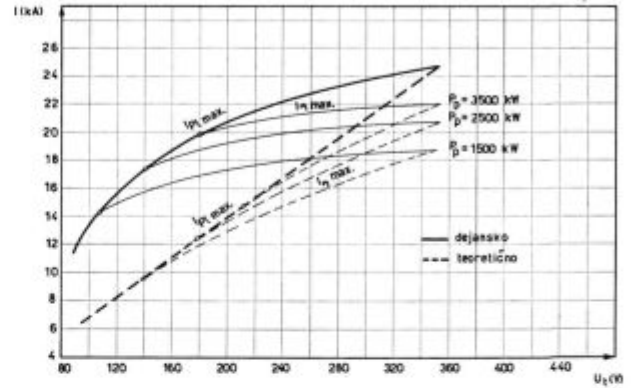
$$P_{rat} = P_{pr}$$

3.3

Graditelji peči dajejo običajno konstrukcijske podatke, eventualno še podatke o produktivnosti in specifični porabi električne energije za taljenje. Za podrobnejše poznavanje obločne peči pa je potreben niz podatkov. Večina teh je odraz specifičnih pogojev obratovanja in jih je zato mogoče dobiti le z meritvami. V prvi vrsti so važne meritve električnih parametrov obločne peči ter meritve energetske proizvodnih parametrov. Če te meritve zajemajo beleženje preko 40 spremenljivk. Če pa bi hoteli obseči še metalurške kvantitativne in kvalitativne odnose, vzdržnosti obzidave, porabe elektrod in pomožnih materialov, temperaturne razmere itd., bi število spremenljivk naraslo do takih meja, da bi jih bilo mogoče obdelati le z računskim strojem.

Električne meritve imajo predvsem namen določiti impedanco peči. Najenostavneje se dajo dobiti vrednosti z meritvami kratkega stika. Pri nižjih napetostih regulacijskega pečnega transformatorja se elektrode potopijo v raztaljeni vložek. Instrumenti se dajo zelo hitro odčitati, ker takoj po potopitvi elektrod nastopi stacionarno stanje. Tako vršimo meritve z vedno večjimi napetostmi do znosnih preobremenitev transformatorja. Pri tem je potrebno pretokovno zaščito transformatorja blokirati. Meritve z nazivno primarno napetostjo lahko izvršimo le do ca 75 % sekundarne napetosti, kratkostično impedanco za nazivno napetost je zato ekstrapolirati. Z W -metrično in $U - J$

metodo se dajo dobiti reaktance in induktance. Njihov potek glede na sekundarno napetost transformatorja običajno ni linearen. Temu so predvsem vzrok različne vezave regulacijskega transformatorja, od katerih so v posameznih napetostnih stopnjah odvisne kratkostične napetosti. Vpliv na nelinearnost poteka impedanca pri različnih stopnjah je iskati tudi v negativni uporovni karakteristiki elektrod kakor tudi pri neraziskanih prehodnih upornostih elektroda — talina ter pri upornosti same taline.



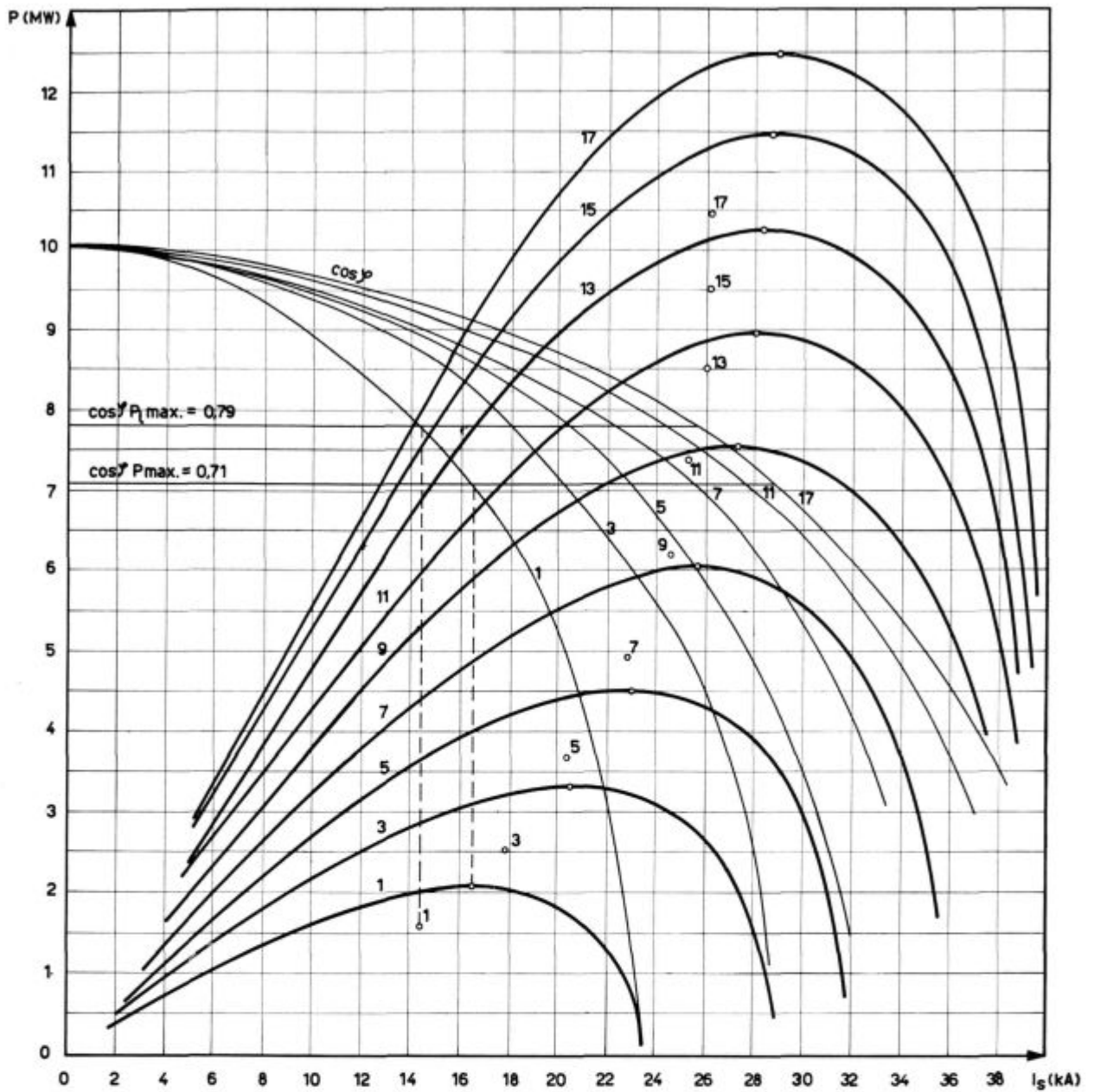
Slika 27

Režim maksimalne moči, toka in maksimalnih izkoristkov

S pomočjo znanih impedanc se dajo določiti za vsakdanjo prakso izredno važni obratovalni diagrami, kjer nas najbolj zanimajo vrednosti tokov, pri katerih je električna moč na loku maksimalna. Pri konstantni impedanci potekajo te vrednosti linearno z napetostjo, sl. 27 pa nam kaže, kako bistvene so razlike med dejanskimi in teoretičnimi vrednostmi. Realni obratovalni diagram je prikazan na sl. 28. Le tako prikazane razmere so lahko vodilo za gospodarno vodenje obratovanja obločne peči.

Na podlagi izmerjenih impedanc peči, transformatorja in dušilke in ob poznavanju kratkostične moči napajalne mreže in njenega stanja je mogoče končno preverjati pravilnost velikosti dušilke. V večini primerov so dušilke prebogato dimenzionirane. Po eni strani so se s tem hoteli zavarovati dobavitelji peči, po drugi strani pa so se razmere v napajalnem elektroenergetskem sistemu sčasoma le izboljšale. Kratkostične razmere so danes marsikje bistveno večje kot pred leti. Sl. 10 kaže, kaj pomeni za obločno peč zmanjšanje njene impedanace od 45 % na 40 %, kar se je doseglo z zmanjšanjem impedanace dušilke od prvotnih 10 % na 5 %. Pri enakih elektrodnih tokovih smo s tem povečali delovno moč za ca 10 %, kar je bistveno spremenilo energetske produktivnostne pokazatelje.

Meritve energetske proizvodnih parametrov obločne peči temeljijo predvsem na meritvah tež, časov in energije. Najvažnejše so teže metalnega in nemetalnega vložka, teže odlitih ingotov in žlindre. Zasedovati je čase taljenja, oksidacije, rafinacije, čase šaržiranja in mrtve čase. Ustrezno časom je



Slika 28
Realni obratovalni diagram

beležiti porabo delovne in jalove energije, čas vklopa oz. izklopa dušilke. Interesantne so vrednosti napetosti, elektrodnih tokov in faznega faktorja, s katerimi so določena obratovalna mesta v obra-

tovalnem diagramu. Vse parametre je neprekinjeno zasledovati vsaj 50 šarž. Take meritve predstavljajo veliko delo, vendar jih je le ob takem številu možno obdelati s primerno statistično verjetnostjo.

Literatura

1. Richtlinien für den Anschluss von Lichtbogenöfen, ÖZE JHg 16/9
2. Lichtbogenschmelzöfen grosser Leistung, H. I. Forst, Berg — und Hüttenmännische Monatshefte 1961/9
3. Lichtbogenstahlschmelzöfen als elektrische Verbraucher und Möglichkeiten zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit, H. Lürig (Detto)
4. Arbeitsbedingungen und Wirkungsgrad grosser Lichtbogenstahlschmelzöfen, H. Forst Elektrowärme 1960/6
5. Die elektrische Ausrüstung moderner Lichtbogenstahlschmelzöfen, H. Forst BBC — Nachrichten 4/1957, 2/1958
6. Einführung in die Probleme des elektrischen Lichtbogen und Widerstandsofens, Dr. ing. Erich Klass (Springer — Verlag, Berlin 1951)

7. The Use of Series Capacitors in Conjunction with Electric Smelting Furnaces, H. Flaath (ASEA 7791 E/497/66)
8. Stand und Entwicklung der Elektrodenregelung der Lichtbogenstahlöfen, (Stahl und Eisen 1954)
9. Electric Furnace Steelmaking I, II (Interscience Publisher New York 1962)
10. Beitrag zur Kenntnis des Lichtbogenofens unter besonderer Berücksichtigung des Grossraumofens für die Stahlerzeugung, Harms F. (Stahl und Eisen 83, Heft 5)
11. Grundlagen für die Symmetrierung von Drehstrom — Lichtbogenofen, Duechting W. (Elektrowärme Nr 19, 1961)
12. Elektrische Schmelzöfen für Eisenmetallurgie, Okorokow (VEB Verlag Berlin 1953)
13. Erfahrung bei der Messung von Spannungsschwankungen an Lichtbogenöfen, Krabiell (Elektrowärme Nr 11, 1962)
14. Savremena elektrolučna peč za topljenje čelika i njen uticaj na energetski sistem, ing. R. Bulajić. (Savetovanje Lučna i indukciona peč u elektrometalurgiji i livarstvu — Maribor 1963)
15. Problemi automatizacije elektrolučnih peči, ing. I. Černelč, ing. K. Rožič (Savetovanje o automatizaciji u crnoj metalurgiji Beograd 1962)
16. Elektromagnetne sile na električni oblok, prof. dr. ing. Venče Koželj (Posvetovanje o stikalni tehniki, Ljubljana 1964)
17. Vergleichende Betrachtungen über die hydraulischen und elektromotorischen Elektrodenregelungen von Lichtbogenschmelzöfen sowie über die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit, A. Driller und H. Ernst (IV. kongres UIE 1959)
18. Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der elektrohydraulischen Elektrodenregelung von Lichtbogenschmelzöfen, R. Lambert (IV. kongres UIE 1959)
19. Electricity supply and control for large arc furnaces, H. Sheppard and E. Freeman (V. kongres UIE 1963)
20. Reduction of Current Fluctuation and Efficiency. Improvements by Power Saturable Reactor in Steel Melting Arc Furnace Operation, S. Hazumi and M. Yoskino (V. kongres UIE 1963)
21. Problems of Lamp Flicker caused by Large Electric Arc Furnace for Steel Production in Japan, T. Tinguzi (V. kongres UIE 1963)
22. Das Betriebsverhalten von Lichtbogenstahlschmelzöfen und ihr Einfluss auf Drehstromhochspannungsnetze, V. Lanner und P. Torseke (V. kongres UIE 1963)
23. Beitrag zum Problem der Rückwirkungen von Lichtbogenöfen auf die Betriebsverhältnisse der Verteilnetze, P. Senn (V. kongres UIE 1963)
24. Principles of Highproduction Electric Steel Furnace Production, Schwabe (V. kongres 1963)
25. Electricity Supply and Control for Large Arc Furnaces Sheppard, Freeman (V. kongres 1963)
26. Reduction of Current Fluctuations and Efficiency. Improvements by Power Saturable Reactor in Steel Melting Arc Furnace Operation, Hazumi, Yoshino (V. kongres UIE 1963)
27. Problems of Lamp Flicker caused by Large Electric Arc Furnaces for Steel Production in Japan, Zinguzi (V. kongres UIE 1963)
28. Untersuchungen über resultierende Spannungsschwankungen durch gleichzeitigen Betrieb mehrerer Lichtbogenöfen, welche am gleichen Netzknoten angeschlossen sind, Werner L. (V. kongres UIE 1963)
29. Beitrag zum Problem der Rückwirkungen von Lichtbogenöfen auf die Betriebsverhältnisse der Verteilnetze, Sen, Lememmer (VI. kongres UIE 1968)
30. Experience with Ultra-high Power Electric Furnace Operation, Schwabe — Robinson (VI. kongres UIE 1968)
31. Modern Methods of Automatically Controlling Electric Furnaces, Owen (VI. kongres UIE 1968)
32. Economical Flicker Reduction for Arc Furnaces, Friedlander, Young (VI. kongres UIE 1968)
33. The Measurement of Voltage Fluctuations caused by arc Furnaces, Kendal (VI. kongres UIE 1968)
34. Untersuchung der optimalen Einstellung des Überstromschutzes an einem Transformator eines Lichtbogenofens, Jahn, Ehrig (VI. kongres UIE 1968)
35. Progress in Electric Power Supply to Arc Furnace Loads in Japan, Zinguzi (VI. kongres UIE 1968)
36. Improvements in Performance by New Design of Six Electrode Arc Furnace, Bazeley, Harrison (VI. kongres UIE 1968)
37. Der Lichtbogen im Elektrostahlhofen unter dem Einfluss ionisierender Mittel, Dunski, Kegel (VI. kongres UIE 1968)
38. Electrical Heating and Stirring of Melts in Ladles, Hammerlund, Sundberg (VI. kongres UIE 1968)
39. Methode zur Bestimmung der Betriebszustände von unsymmetrischen Lichtbogen — Drehstromofenanlagen Kurbel (VI. kongres UIE 1968)

ZUSAMMENFASSUNG

In den drei Kapiteln dieses Artikel sind die wichtigsten Merkmale eines Elektrolichtbogenofens gezeigt. Im ersten Kapitel werden die elektrischen Verhältnisse der ganzen Anlage besprochen. Vor allem die Einschmelzzeit und die

Möglichkeit im Betrieb mit einem minimalen spezifischen Energieverbrauch zu arbeiten. Es wird gezeigt, dass das Schmelzen mit einer maximalen Kraft am Lichtbogen ökonomischer ist denn die Einschmelzzeit beträgt nur 80 % der

Zeit welche bei einem minimalem Energieverbrauch nötig wäre. Es ist auch ein Überblick über die Möglichkeiten für eine höchstökonomische Betriebsweise gegeben. Die wichtigsten Faktoren dabei sind die Grösse der Ofenimpedanz und die Möglichkeit der Überbelastung des Ofentransformators. Nach dem Einschmelzen sind die elektrischen Verhältnisse am Ofen völlig anders. Der Lichtbogen brennt ruhig, die Drossel ist nicht mehr nötig die Energiezufuhr ist wesentlich kleiner. Wegen der völlig freien Energiestrahlung des Lichtbogens in den Ofen ist dem Lichtbogen eine solche Geometrie zu geben, dass die Strahlung des Lichtbogens auf die Ofenausmauerung so klein wie möglich sein wird. Da die Lichtbogeneometrie von den rein elektrischen Grössen bestimmt wird ist über diese Grössen von dem amerikanischen Forscher der Lichtbogenöfen Mr. Schwabe der sogenannte Erosionsindex eingeführt worden. Die Verfolgung solches Erosionsindex welcher ein Massstab für die Wärmebeanspruchung des Ofens sein sollte ist nicht geeignet, weil der Index eine bloss Zahl darstellt. Der Autor hat es bewiesen, dass der grösste Erosionsindex immer bei dem gleichem Anlagenleistungsfaktor ($\cos \phi = 0.82$) auftritt. Die Kontrolle des Anlagenleistungsfaktor ist für den Schmelzer einfach und leicht, deshalb ist es auf eine ganz einfache Weise möglich den Ofen auch nach der Einschmelzzeit wirtschaftlich zu führen.

Im nächsten Kapitel ist der Lichtbogenofen als Energieverbraucher dargestellt. Der Einfluss der betriebsmässigen Stromschwankungen auf die Netzbelastung ist durch die Makro und Mikrostabilität des Lichtbogens gegeben. Die Möglichkeiten und Ansprüche der Elektrodenregelung (Kraftregelung) von welcher der Betrieb des Ofens grösstenteils abhängt, sind erörtert. Die Leistungsschwankungen des Lichtbogens übertragen sich auf das Hoch-

spannungsnetz und rufen dort entsprechende Spannungsänderungen hervor die sich besonders auf die Glühlampen sehr störend auswirken können. Diese Störungen können voraus bestimmt werden, sie hängen aber vor allem von der Kurzschlussleistung des Netzes und von der Transformatorstärke ab.

Eine weitere Charakteristik des Lichtbogenofens als Energieverbraucher ist neben der nichtsymmetrischen Beanspruchungen und der höheren harmonischen Strömen vor allem in der ungleichmässigen Ausnützung der Kraft während der ganzen Schmelzzeit. Davon spricht der Belastungsfaktor, der Überbelastungsfaktor und der Belastungsfaktor der elektrischen Ofenanlagen. Diese Faktoren sind für einen Ofen so wie auch für eine Ofengruppe dargestellt. Es ist auch die Möglichkeit angedeutet wie den Belastungsfaktor einer Ofengruppe auszubessern beziehungsweise wie die Spitzenbelastung zu niedrigen.

Im letzten Kapitel werden die Leistungsparameter des Ofens besprochen. Es ist das Verhältniss zwischen der Transformatorleistung und der Stundenleistung des Ofens so wie zwischen der Wirkleistung während des Einschmelzens und der Einschmelzzeit gezeigt. Am interessantesten sind die Funktionen welche das Verhältniss zwischen der Ofenstundenleistung und dem spezifischen Energieverbrauch darstellen. Die gegebenen Kurven haben zwei Extremwerte: einen minimalen Energieverbrauch beim Betrieb mit einem maximalen Leistungsfaktor und eine maximale Stundenleistung beim Betrieb mit einer maximalen Kraft des Lichtbogens. Im einzelnen sind die Wärme und Elektrischen Verluste und die Energiebilanz des Lichtbogenofens beschrieben.

Für die Bestimmung der charakteristischen Ofendaten nötigen elektrischen Messungen sind am Ende dieses Kapitels beschrieben.

SUMMARY

The paper consisting of three chapters shows the most important characteristics of an electric arc furnace for steel-making. The chapter Electrotechnical parameters of an electric arc furnace deals with electrical behavior of the device. Period of charge melting is discussed and possibilities for operation with the minimal specific energy consumption are analyzed. The paper gives evidence that melting with maximal power of the arc is more economical, as the operation takes only about 80 per cent of the time necessary for melting with the minimal energy consumption. Possibilities for the most economical operation are examined. The most important factor is the magnitude of furnace impedances and danger for overloading of the furnace transformer. The period of the molten charge demands completely different electrical conditions in the furnace: the arc works steadily, damper is not needed any more, energy input is essentially smaller. As arc radiates energy into the furnace, its geometry must be such that the radiation towards the furnace refractor will be the smallest. As geometry of the arc is determined by purely electrical dimensions, so called erosion index is defined, which was introduced by Mr. Schwabe, American researcher of electric arc furnaces. On the other hand, determination of such erosion index which should be a parameter for thermal load of the furnace refractory is unsuitable, as the index is only a number. The author proved that the maximal erosion index appears always at the same phase factor ($\cos \phi = 0.82$). The control of the phase factor is for the smelter a very simple and easy task, and therefore the furnace can be economically controlled in a very simple way also during the time when charge is molten.

In the next chapter the furnace is shown as an electro-energetical consumer. Influence of every time consumption

of electrical energy on the feeder network is given by macro- and microstability of the electric arc. Possibilities and demands for electrode regulation (power regulation) are examined, because the furnace operation depends a great deal on this regulation. Advantage or disadvantage of the operation due to the magnitude of the network voltage drop (oscillating light of bulbs) can be determined beforehand. Circumstances depend mainly on short-circuit power of the electroenergetic system, and on the transformer power. A further characteristic of an electric arc furnace as an electroenergetic consumer is an unequal power consumption during the operating cycle, besides unsymmetrical loads and higher harmonic currents. This is confirmed by a load factor, by an overload factor, and by a load factor of the electric furnace devices. Factors for one furnace as well as for a group of furnaces are presented, and in this case, possibility is shown how to improve the load factor for a furnace group or how to decrease their peak load.

In the last chapter energy-producing parameters of the furnace are discussed. Correlations between the furnace transformer power and the furnace throughput rates, between the power during the melting period and the melting time and specific energy consumption, etc. are presented. The most interested and for exploitation the most suitable are those functions which show relationship between the furnace throughput and its specific heat consumption. The given curves has two extremes: a minimum energy consumption at operating with maximal efficiency, and a maximum of throughput at operating with the maximal arc power. Detailedly heat and electrical losses are dealt with, as well as the structure of energy balance for an electric arc furnace. To determine characteristic data of a furnace, which are basis for evaluation of operating conditions, some measurements are necessary, and they are shortly described at the end of the chapter.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В трех частях статьи приведены наиболее важные характеристики электродуговой печи для производства стали. В первой части о электрических параметрах рассмотрены электрические соотношения установки. Указано на длительность плавления и на возможности плавления с минимальной утратой специфичной теплоты. Доказывается, что плавление с максимальной мощностью на электрической дуге более экономно т. к. в сравнении с плавкой с минимальной утратой специфичной теплоты, оно длится всего прибл. 80 % времени. Рассмотрены возможности наиболее экономного производства. Самая важная особенность представляет величина полного сопротивления (импеданса) и допустимость перегрузки трансформатора печи. Время расплавления загрузки требует совсем иные электрические соотношения в печи: дуга горит спокойно, дроссель не нужен, подача электрической энергии существенно меньше. Вследствии свободной радиации дуги геометрическая конструкция дуги должна быть такова чтобы радиация на футеровку была чем меньше. Так как геометрию дуги определяют только электрические размеры то посредством их формулирован так именованный эрозийный индекс, его ввел американский исследователь электродуговых печей Mr. Schwobe. Несмотря на это, следить за этим индексом, который бы должен представлять размерный показатель, не рекомендуется, потому что представляет собой лишь годовое число.

М.Хпава

Афтор статьи доказывает, что максимальный эрозийный индекс наступает всегда при одинаковом факторе фаз (косинус $\phi = 0.82$). Проверка фактора фаз для плавильника весьма проста. Поэтому есть возможность на весьма легкий способ руководить с электродуговой печью наиболее экономно также во время расплавления загрузки.

Во второй части статьи печь рассмотрена как электроэнергетический потребитель. Блияние каждого расхода электроэнергии на питающую сеть показано при помощи макро и микростабильности электрической дуги. Рассмотрены возможности и требо-

вания регуляции электрод (регуляция мощности) от чего главным образом зависит режим работы печи. Положительная и отрицательная стороны режима работы печи в зависимости от величины изменения напряжения сети (пульсирование электрических лампочек) можно определить вперед, условия режима зависят главным образом от короткозамкнутости мощности электроэнергетической системы и от мощности трансформатора. Следующая характеристика электродуговой печи как электроэнергетического потребителя кроме несимметрических напряжений и высших гармонических электр. токов состоит в неравномерности потребления ёмкости во время рабочего цикла. На это указывают: фактор нагрузки, фактор перегрузки и фактор нагрузки электрического снаряжения печи. Рассмотрены факторы одной и одной группы печей при чём указано на возможность как улучшить фактор загрузки целой группы печей т. е. как уменьшать ихнюю пиковую загрузку.

В последней части статьи рассмотрены энергетические параметры производительности печи. Указано на соотношение между мощностью трансформатора и производства электродуговой печи в час; между мощностью во время плавки и длительности плавки т. е. расхода удельной энергии итд. Самое интересное и наиболее применимо в эксплуатации суть функции которые указывают на связь между производительностью печи и расхода удельной энергии.

Приведены кривые линии которые имеют два экстремума: минимальный расход электрической энергии при режиме работы печи с максимальным использованием и кривая максимальной производительности во время хода с максимальной мощностью дуги.

Обширно рассмотрены тепловые и электрические потери и конструкция энергетического баланса эл-дуговой печи. В конце статьи описаны измерения необходимые для определения характеристических данных которая служат како основание для расчёта режима работы электродуговой печи.