

# Gospodarjenje z električno energijo v Železarni Ravne

UDK: 621.316.003

ASM/SLA: U7C, W11

Janez Bratina

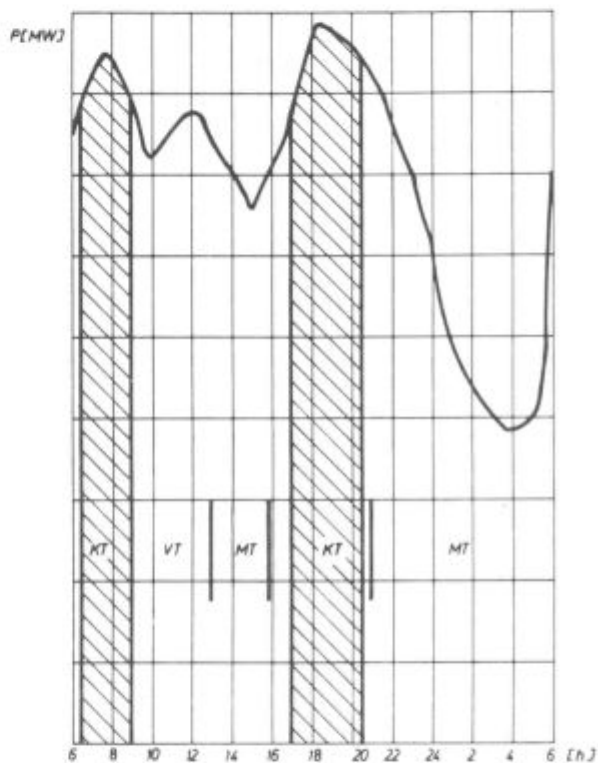
## UVOD

Kot posledica eksplozivnega večanja cen energije prihaja v metalurški proizvodnji vse bolj do pomembne veljave energetskega menagementa, ki kot oblika vodenja in upravljanja procesov v industriji izpolnjuje naloge in cilje, ki so v neposrednih ekonomskih učinkih proizvodnje, pa tudi v posrednih učinkih ohranjanja narodnega bogastva in okolja, v katerem živimo. Obravnavana sta dva vidika elektroenergetskega menagementa, ki ga zajemata pojma racionalna raba električne energije kot način porabe električne energije z doseganjem njene najnižje cene in racionalna izraba električne energije kot način vodenja proizvodnje z doseganjem najnižje specifične porabe električne energije na enoto proizvoda. Na področju gospodarjenja z električno energijo smo v železarni Ravne realizirali nekaj načel energetskega menagementa, ki so v članku prikazana kot poizkus optimiranja tehniških parametrov s pomočjo ekonomskih vrednosti in kot poizkus izpeljave optimalnih elektroenergetskih odnosov v elektroobločnih pečeh za proizvodnjo jekla.

## I. VODENJE ELEKTRIČNE MOČI ŽELEZARNE

O racionalni rabi električne energije tako velikega porabnika energije, kot je železarna Ravne, lahko govorimo le v okviru elektroenergetskega sistema Slovenije, o racionalni izrabi električne energije pa je znotraj delovne organizacije mogoče govoriti predvsem na področju metalurške elektrotermije. Racionalno rabo električne energije zahteva elektroenergetski proizvodno-prenosni sistem Slovenije, in sicer s težnjo, da bi vsakokratna poraba električne energije v sistemu omogočala njeno najcenejšo proizvodnjo. Neposredni odjemalci električne energije (TGA Kidričevo, TD Ruše, Slovenske železarne) prevzamejo letno več kot 25 % proizvedene električne energije in s svojim gospodarjenjem z njo bistveno pripomorejo k znižanju njenih proizvodnih stroškov. Intenzivnost porabe električne energije v elektroenergetskem sistemu Slovenije se v teku dneva spreminja: najnižja je v nočnem času, mnogo večja pa je v dopoldanskem času, ko obratuje večina industrije. Kot je s slike 1 razvidno, nastopajo znotraj dneva pasovi izrazito velikih obremenitev (konic obremenitve), ki so predvsem posledica navad in razvad gospodinjskih odjemalcev, katerih poraba nastopa v času kuhanja obrokov, v času nizkih temperatur, z nastopom mraka, itd.

Janez Bratina, dipl. inž. elektrotehnike, je ravnatelj TOZD ETS Železarne Ravne



Slika 1

Obremenilni diagram električne moči za SRS

Fig. 1

Load diagram of electric power in SR Slovenia

ter tiste industrije, ki proizvaja v eno ali dvoizmenskem ciklusu. Praviloma nastopata v zimskem času dve konici (jutranja in večerna), v letnem času pa le večerna. Celodnevna zimska poraba električne energije je v sistemu višja kot celodnevna letna, tudi dnevne konične obremenitve so v zimskem času višje kot v dnevnem. Zaradi znanega vsakokratnega ravnotežja med porabo električne energije in njeno proizvodnjo so zaradi takega načina odjema električne energije proizvodne in prenosne zmogljivosti v elektroenergetskem sistemu neenakomerno izrabljene, saj morajo biti grajene (upoštevajoč še nujne rezervne kapacitete) za maksimalno moč, ki nastopi le enkrat v teku 24 ur oz. le enkrat v teku 365 dni celega leta. Vsak posamezni porabnik električne energije ima svoj lasten obremenilni diagram, ki kaže, kako intenzivno porablja energijo v teku dneva, meseca, leta. Če delimo porabljeno količino električne energije (kWh) v nekem obdobju z največjo močjo (kW), s kate-

ro smo porabljali električno energijo v tem obdobju, dobimo tako imenovane obratovalne ure (h), ki so neposredno merilo enakomernosti (intenzivnosti) porabe. Če bi imeli na pr. mesečne obratovalne ure 720 h (24 ur  $\times$  30 dni), bi to pomenilo, da smo porabljali električno energijo skozi ves mesec absolutno enakomerno. Industrijski porabniki električne energije z enozmenskimi ali z dvozmenskimi delom dosegajo na pr. 100–300 obratovalnih ur, posamezno gospodinjstvo okrog 20 obratovalnih ur na mesec.

Proizvodnja električne energije v elektroenergetskem sistemu Slovenije je tako popolnoma v rokah porabe, uporaba proizvodnih in prenosnih zmogljivosti je odvisna od vsote obratovalnih karakteristik vseh porabnikov v sistemu. V vsaki proizvodnji pa so stroški proizvodnje bistveno odvisni od obratovalne izkoriščenosti naprave: čim več ur naprava obratuje, tem nižji so njeni specifični fiksni stroški. Kapitalno intenzivne gospodarske panoge (elektrogospodarstvo, metalurgija) nastopajo z velikimi deleži fiksnih stroškov v skupnih stroških poslovanja: če upoštevamo za gibljive stroške le stroške energetskega goriva (ter stroške neposredno vezane na gorivo), dobimo kljub podcenjenim osnovnim sredstvom elektrogospodarstva in skoraj tržnim cenam goriva razmerje med celoletnimi fiksnimi in gibljivimi stroški, ki je večje od ena. Podobna visoka razmerja (tudi preko 2) dosegajo tudi druga zapadno-evropska elektrogospodarska podjetja.

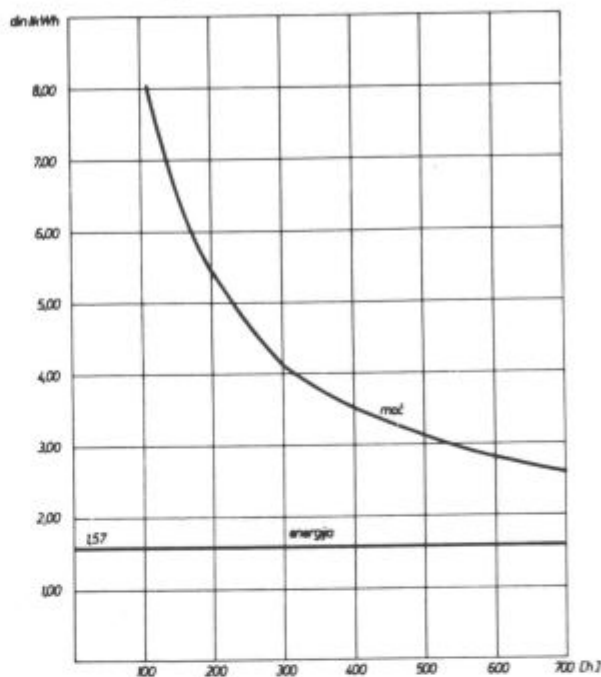
Upoštevajoč ekonomske zakonitosti, po katerih naj kupec krije stroške za prevzeto in porabljeno električno energijo, se iz navedenega dajo izluščiti elementi tarifnega sistema za prodajo električne energije:

- postavka za električno energijo (din/kWh) naj pokriva gibljive stroške (gorivo),
- postavka za angažirano moč (din/kW) naj pokriva fiksne stroške.

Postavke pa se ločijo po sezonah: v času zimske sezone, ko nastopa v sistemu višja poraba, je potrebno angažirati termoelektrarne z dražjim gorivom, imamo višje sezonske postavke; v času poletne sezone, ko je poraba manjša in obratujejo elektrarne z najnižjimi proizvodnimi stroški, kot napr. hidroelektrarne, pa imamo nižje sezonske postavke tako za moč kot energijo. Postavke se ločujejo tudi v odvisnosti od ur dneva: manjša tarifa traja v času noči ter v času popoldanske energetske doline (13 h do 16 h), višja tarifa traja v času dneva, za določene kategorije odjemalcev pa je določena tudi tako imenovana konična tarifa, ki traja v času, ko nastopajo v elektroenergetskem sistemu najvišje obremenitve (glej sl. 1). Ker se vse omenjene postavke (kakor tudi postavke za jalovo energijo) ločujejo tudi po napetostnih nivojih, kjer so porabniki priključeni na omrežje, se iz množice postavk na kraju obračunskega obdobja (mesec, leto) dobi sestavljena povprečna cena za kWh električne energije, ki je (poleg splošnega nivoja) odvisna predvsem od obratovalnih karakteristik posameznega industrijskega odjemalca. Gospodinjstva po veljavnem tarifnem sistemu še nimajo sezonskih postavk, značilnost sedanjega tarifnega sistema pa je tudi tako imenovani poseben odjem na 110 kV napetostnem nivoju, ki izloča porabo električne energije v elektroenergetskih in elektrometalurških pečeh kot posebno kategorijo odjema.

Racionalna raba električne energije mora torej zagotavljati najnižje stroške za njeno proizvodnjo, istočasno pa bi ob dosledno izpeljanem stroškovnem načelu tarifiranja morali s tako rabo električne energije dosegati porabniki zase najnižjo ceno.

Če gledamo odnos cene za kWh iz postavke za moč in iz postavke za energijo v odvisnosti od obratovalnih ur, so razmere enostavne in jasne. Kot je razvidno s sl. 2, se z večanjem obratovalnih ur delež moči v skupni



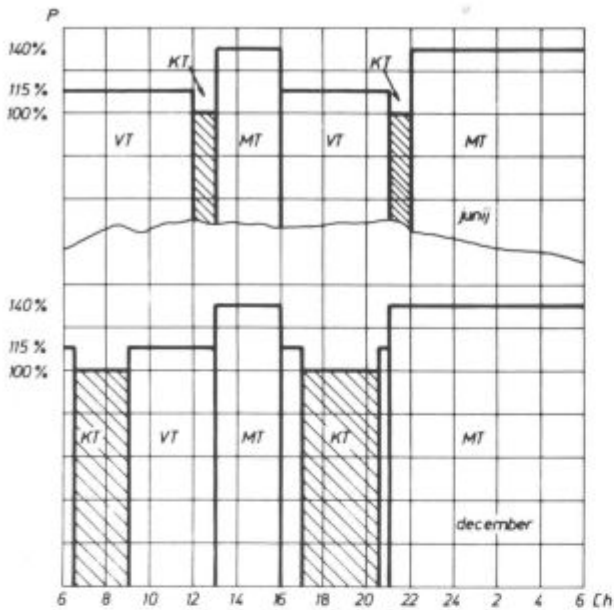
Slika 2

Cena električne energije v odvisnosti od obratovalnih ur

Fig. 2

Price of electric energy depending on operational hours

ceni za električno energijo zmanjšuje, čeprav ne postane nepomemben. Porabnik, ki kontinuirano obratuje vse leto s konstantno močjo (kot napr. elektroliza aluminija), doseže izredno visoke obratovalne ure in s tem nizko povprečno ceno. Visoke obratovalne ure pa se ne dosežejo le z enakomernim, temveč tudi s takoimenovanim inverznim obratovanjem, ki ga na podlagi tarifnega sistema omogočajo v posebnih pogojih neposredni dogovori med Elektrogospodarstvom in velikimi porabniki električne energije. Osnovni pogoj za tako obratovanje je poleg tehniških možnosti porabnika ustreznost registracija porabe oz. moči. Obračunska moč se namreč meri kot povprečna četrturna poraba in jo je potrebno s posebnimi napravami registrirati vsakih 15 minut. Tako inverzno obratovanje je prikazano na sl. 3. V času trajanja višje tarife (podnevi) obratujemo na pr. s 100 % močjo. Ker smo se obvezali, da bomo v kritičnem času konične obremenitve sistema obratovali z zmanjšano močjo (na pr. za 15 %), smemo v času trajanja manjše tarife (ponoči) obratovati s 40 % višjo močjo. Tako inverzno obratovanje razbremenjuje elektroenergetski sistem v času sistemskih konic in ga obremenjuje v času, ko je v sistemu na razpolago dovolj moči. Obratovalne ure takega porabnika pa se zvišujejo zaradi tega, ker je pri tem obračunska moč, iz katere sledijo obratovalne ure, tista moč, ki je bila dosežena v času konične tarife, in ne moč, dosežena v času višje tarife (podnevi), ali celo moč, dosežena v času manjše tarife (ponoči). Čas trajanja konične tarife je različen glede na mesec: v zimskih mesecih traja do 6 h na dan, v poletnih mesecih pa do najmanj 2 h na dan. Začetek oz. konec konične tari-



Slika 3  
Inverzno obratovanje  
Fig. 3  
Inverse operation

fe se spreminja v glavnem od dolžine dneva oz. od nastopa svetlobe in je vnaprej določen za posamezne mesece leta.

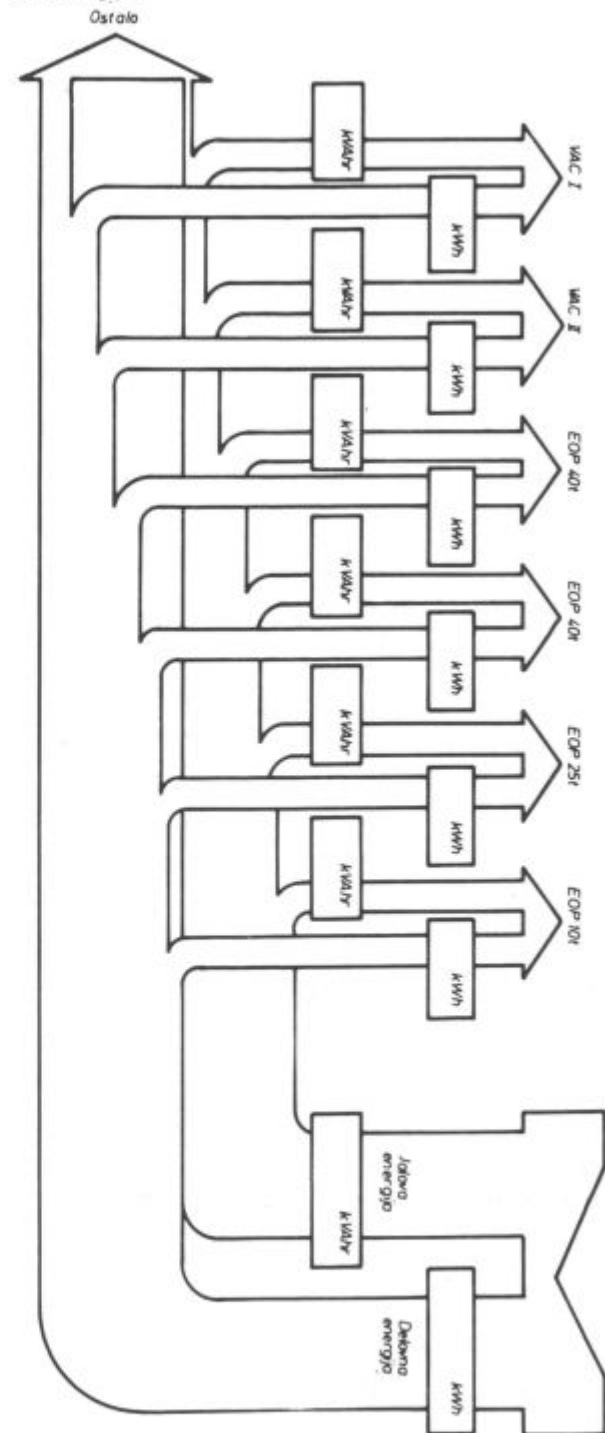
Prednosti porabnikov, ki lahko prilagajajo svojo porabo razmeram v elektroenergetskem sistemu, se ne kažejo zgolj v višjih lastnih obratovalnih urah (in s tem v višjih obratovalnih urah proizvodnih in prenosnih naprav elektroindustrije), temveč služijo tudi kot rezervna proizvodna kapaciteta v elektroenergetskem sistemu. Prilagajanju imamo več vrst in je s posebnimi kriteriji tudi različno ovrednoteno:

— takojšnje nenapovedano prilagajanje poteka s pomočjo samodejnega izklopa velikih porabnikov (elektroobločnih peči, elektroplavžev, elektroliz) s podfrekvenčnimi releji. Ob motnjah v elektroenergetskem sistemu, ko grozi njegov razpad, pade frekvenca napetosti pod 50 Hz; sistem se s samodejno razbremenitvijo, ki jo omogoča tako prilagajanje, lahko ujame in ponovno uravnovesi;

— napovedano prilagajanje nastopa ob večjih okvarah proizvodnih ali prenosnih enot ali pa ob pomanjkanju moči ali energije v sistemu, ko so angažirane že vse proizvodne kapacitete in druge možnosti oskrbe. Tako prilagajanje, ki ga zahteva republiški dispečer na podlagi dogovora oz. sporazuma, ima več stopenj različne intenzivnosti redukcije porabe. Pogoj za tako prilagajanje porabe je seveda možnost, da se dispečerjeva zahteva v določenem času pri porabniku izvede, za kar je potrebna neprekinjena stikalničarska služba.

Kako voditi porabo električne energije železarne, da bo izpolnjevala opisane zahteve (po sl. 3), je elektrotehniški, pa tudi ekonomski problem. Največji porabnik električne energije v železarni Ravne so elektroobločne peči in srednjefrekvenčne talilne peči na katerih temelji celotna proizvodnja surovega jekla. Naloga je toliko zapletenejša, ker ima železarna pet elektroobločnih peči različnih velikosti in različnih moči transformatorjev ter dve vakuumski napravi, ki sta nameščeni v dveh elektrojeklarnah, in nastopa poleg naštetih porabnikov

električne energije še obremenitev ostalih metalurških in mehanskih obratov. Shemo pretoka električne energije kaže sl. 4, ki ponazarja tudi sistem merjenja porabe el. energije.

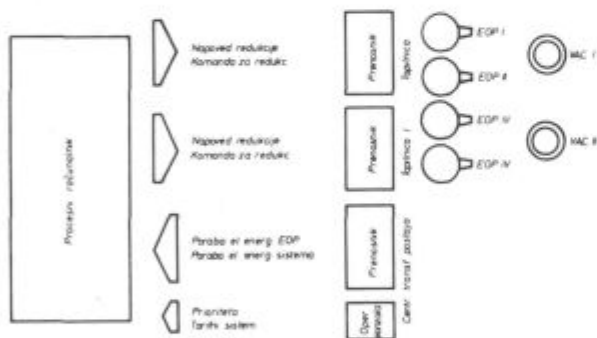


Slika 4  
Merjenje električne energije v železarni Ravne  
Fig. 4  
Measuring electrical energy in the Ravne Ironworks

Kot je znano, ima elektroobločna peč karakteristični obremenilni diagram, po katerem je obremenitev v času taljenja zelo visoka (20 % do 30 % višja od moči trans-

formatorja) in je prekinjena v času ponovnega zalaganja peči z vložkom, obremenitev v času raztaljenega vložka (čas rafinacije oz. oksidacije) pa je 1/3 nazivne obremenitve ali še manj in je prav tako pogosto prekinjena zaradi različnih posegov v peč. Proces izdelave jekla v peči je tipičen diskontinuirni proces, ki se razlikuje od šarže do šarže, odvisno od vložka in od kvalitete izdelanega jekla. S postavitvijo vakuumskih naprav, ki s pomočjo električne energije prav tako dogrevata tekoče jeklo kot v obločni peči in kamor se prenese končna faza izdelave jekla, se elektroenergetske razmere še zaostrijo: čas izdelave jekla v elektroobločni peči se skrajša, povprečna obtežba peči se povečuje, istočasno pa se v izrazitih elektroenergetskih blokkih nepredvideno pojavi obremenitev vakuumske naprave.

Dokler smo neposredni porabniki električne energije ugotavljali maksimalno konično obremenitev v razdobju enourne porabe, je stikalec v centralni transformatorski postaji še mogel spremljati gibanja obeh kazalcev »čuvaja konic«, od katerih je eden kazal dejansko vrednost obremenitve, drugi pa dopustno, in ukrepati z zahtevo za zmanjšanje moči pri peči ali pa z odklopom peči. Z uvedbo četrtturnega ugotavljanja konice pa je postal čas za odločanje in ukrepanje zelo kratek. Ker je za vodenje obremenitve celotne železarne potrebna še vrsta drugih informacij o stanju peči, je bilo jasno, da te naloge človek ne zmore zanesljivo opravljati 24 h na dan, temveč le računalnik. Procesni računalnik opravlja to delo v železarni že 6 let. Za program vodenja za obremenitve potreben pretok informacij je razviden s sl. 5. Pripomniti je treba, da smo zmogljivosti

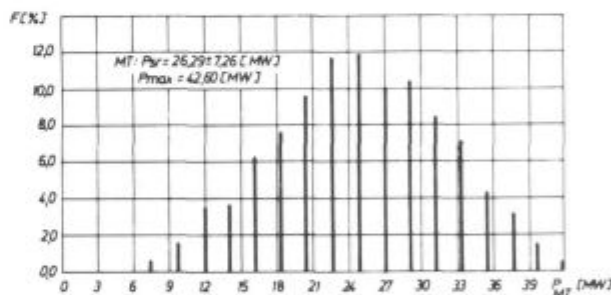
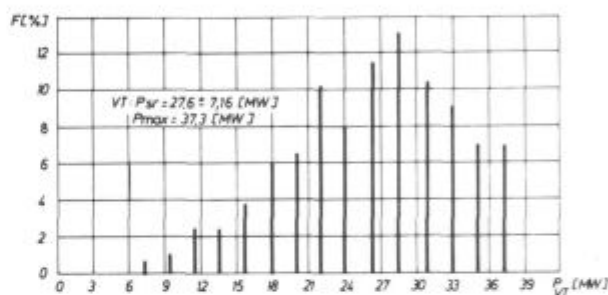
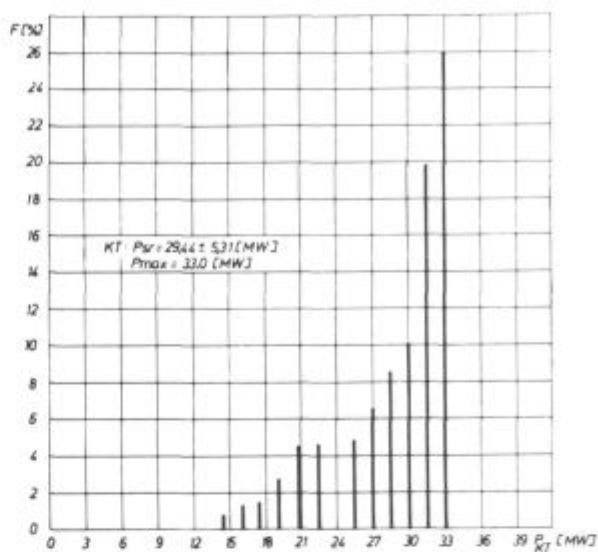


Slika 5  
Pretok informacij EOP — procesni računalnik

Fig. 5

Flow of informations between arc furnaces and process computer

računalnika izkoristili tudi za evidenco vseh dogodkov na elektroobločni peči, kakor tudi za zapis alarmnih signalov, ki omogočajo nadzor nad obratovanjem peči. Elektroobločnih peči ni mogoče voditi po voznem redu tako, da bi se faze taljenja enih peči prekrivale s fazami raztaljenega stanja drugih peči in da bi nam tako dobljene vsote obremenitev zagotavljale konstantno obremenitev v vsakem 15-minutnem razdobju. Pri zelo malo reduciranem obratovanju, kakor ga imamo na pr. v času manjše tarife (ponoči, nedelje), se četrtturne obremenitve porazdele po tipični normalni distribuciji (sl. 6), kar dokazuje naključnost nastanka razredov moči. Celotno moč, s katero železarna prevzema iz električnega omrežja energijo, je možno po programu posameznih tarifnih nivojev (po sl. 3) voditi le tako, da se znotraj vsakega 15-minutnega merilnega obdobja ustrezno zmanjšuje električna moč posamezne obločne peči ali



Slika 6

Porazdelitev 15-minutne moči v posameznih tarifnih obdobjih

Fig. 6

Distribution of 15 minute-power in single tariff periods

več peči istočasno. Zmanjševanje moči peči je možno izvesti z neposrednim posegom v elektrodno regulacijo obločne peči ali pa z odklopom (dvigom elektrod). Ker je proizvodnemu procesu najmanj škodljiva prekinitve v času taljenja in ker so efekti zaustavitve obratovanja peči v tej fazi zaradi velikih moči taljenja največji, se peči načeloma izklaplajo le v času taljenja, v odvisnosti od prioritete po principu last in — first out: najnižjo prioriteto ima peč, ki je zadnja pričela taliti, najvišjo pa ima tista, ki je v zaključni fazi izdelave jekla. Efekti takega načina vodenja so razvidni s sl. 6, kjer so moči nad določenimi vrednostmi enostavno odrezane. Ker se vrednosti na sl. 6 nanašajo na isto mesečno obdobje, je razvidna razlika v največji moči, ki jo je železarna prevzela v času konične tarife in v času manjše tarife in ki



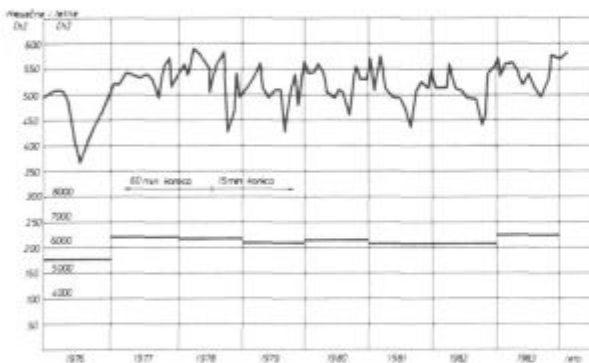
znaša za ta mesec 9,2 MW oz. 27,5 % od v konični tarifi doseženih vrednosti.

O stopnji izkoriščenosti proizvodnih naprav železarne v posameznem času trajanja tarif govore dosežene obratovalne ure v teh obdobjih. Ker je čas trajanja posameznih tarifnih obdobj različnih, nam absolutne obratovalne ure povedo manj kot njihove relativne vrednosti, ki jih dobimo tudi iz razmerja med srednjimi in maksimalnimi vrednostmi moči posameznega tarifnega obdobja.

V naslednji preglednici so za enomesečno obdobje prikazane srednje dosežene in maksimalne dosežene 15-minutne moči ter izkoriščenosti te moči za posamezno tarifno obdobje.

Tarifno obdobje	Psr (MW)	Mmax (MW)	Izkoriščenost
MT («ponoči«)	26,29	42,6	61,8
VT («podnevi«)	27,66	37,3	74,1
KT («v konici«)	29,44	33,4	88,1

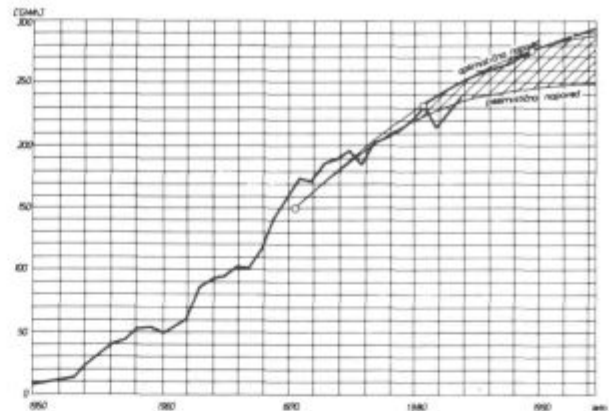
Mesečne obratovalne ure železarne Ravne, izračunane iz moči v KT, prikazuje za nekaj let sl. 7. Na sl. 8 pa je prikazana poraba električne energije v preteklosti in poizkus prognoze do leta 2000.



Slika 7  
Mesečne obratovalne ure  
Fig. 7  
Operational hours per month

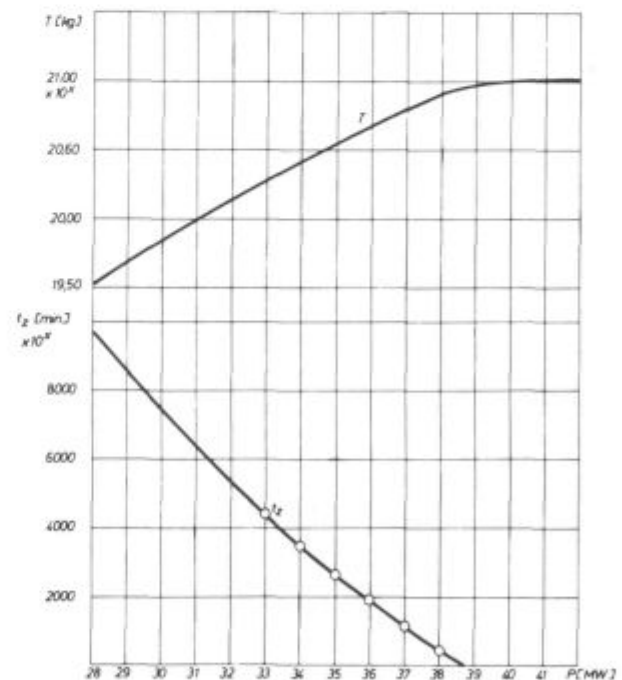
Ko se postavlja vprašanje, kako nizko naj vodimo obremenitve v posameznih tarifnih obdobjih, se reducira paleta problemov na iskanje optimalnih vrednosti. Če odmislimo organizacijske prijeme, s katerimi lahko vplivamo na vrstni red obratovanja elektroobločnih peči, in s tem na nivo električne moči, s katero prevzema delovna organizacija električno energijo, je edina preostala možnost zniževati električno moč, izklapljati obločne peči znotraj 15-minutnega obdobja, tako da 15-minutna vrednost porabe ne preseže vnaprej določene vrednosti. To opravlja računalnik, upošteva prioriteto, in tudi vsakokratni trend celotne porabe. Računalnik nekaj prvih minut 15-minutnega obdobja le opazuje rast porabe, s tem da obračunava vsako minuto vse vrednosti: ukrepa pa zadnjih 12 minut.

Vsakokratna zaustavitvev taljenja v elektroobločni peči pomeni nekajminutni zastoj proizvodnje, in s tem seveda njeno zmanjšanje. Število zaustavitvev taljenja in trajanja teh prekinitev je predvsem odvisno od različne-



Slika 8  
Poraba električne energije  
Fig. 8  
Consumption of electric energy

ga sovpadanja obratovanja elektroobločnih peči, saj predpostavljamo, da je preostala obremenitev železarne mnogo bolj konstantna; razne energetske doline preostale proizvodnje (napr. zaradi malic) samodejno zapolnijo obločne peči z zmanjšanjem časa čakanja. Skupen čas zastojev elektroobločnih peči zaradi takšnih internih redukcij je neposredno obratno sorazmeren nivoju električne moči v času konične tarife oz. v času višje tarife ter seveda od časa trajanja konične obremenitve, ki pa je v posameznih mesecih različna. Čas zastojev in proizvodnje elektroobločnih peči v odvisnosti od konične obremenitve železarne prikazuje za določen mesec sl. 9: razvidno je, da od neke moči naprej omejitev

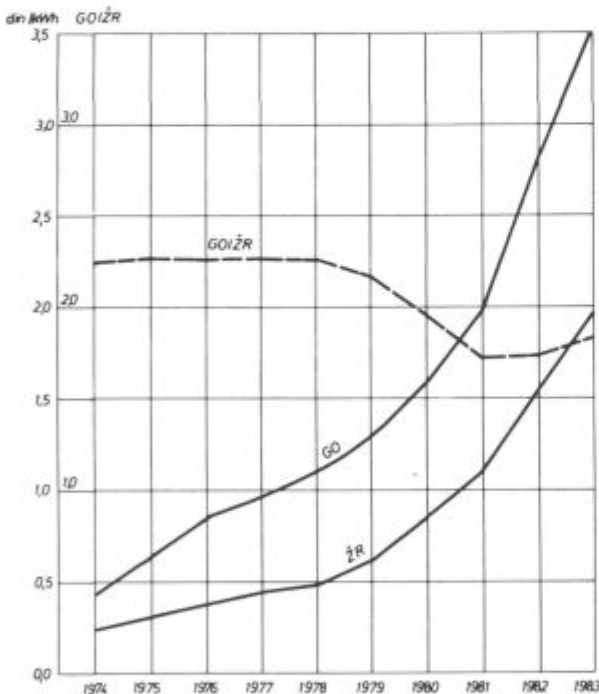


Slika 9  
Zastoji zaradi internih redukcij in proizvodnja surovega jekla  
Fig. 9  
Stillstands due to internal reductions and the production of raw steel

obratovanja peči ni več (dosežena je maksimalna proizvodnja), saj razpoložljiva električna moč zadošča vsem kombinacijam obratovanja elektroobločnih peči. Ob obravnavi časa trajanja redukcij je potrebno upoštevati, da je elektroobločna peč proizvodni agregat, ki obratuje sicer letno več kot 8600 h, proizvaja pa le 80 % tega časa. Ca. 20 % razpoložljivega časa odpade na razne tehnološko pogojene zastoje, kot so: obnova obzidave, menjava obokov in elektrod, popravila, čiščenje, čakanje itd. Iz letnih podatkov povzemamo, da je pripisana le ena desetina vseh zastojev omejevanju obratovanja zaradi redukcij el. energije. Pri tem seveda ni znano, koliko takega časa je bilo izkoriščenega za posege, ki bi sicer povzročili zastoj obratovanja, kakor tudi ni znano, kolikšen del tehnoloških zastojev je bilo izkoriščenih za čas redukcij.

Elektrotehniške možnosti, ki nam jih za vodenje obremenitve elektroobločnih peči daje procesni računalnik, so le potreben pogoj za doseganje optimalnih obratovalnih režimov. Očitno pa je, da so zadosten pogoj za doseg željenega obratovanja optimalna razmerja, ki jih določajo stroški, katerih del pada z zmanjšanjem električne moči in drugi del raste, ker jih manjša proizvodnja več ne pokriva v celoti.

Rast cene električne energije prikazuje sl. 10. V prikazano ceno so vključeni le prispevki, ki so vezani na kWh.



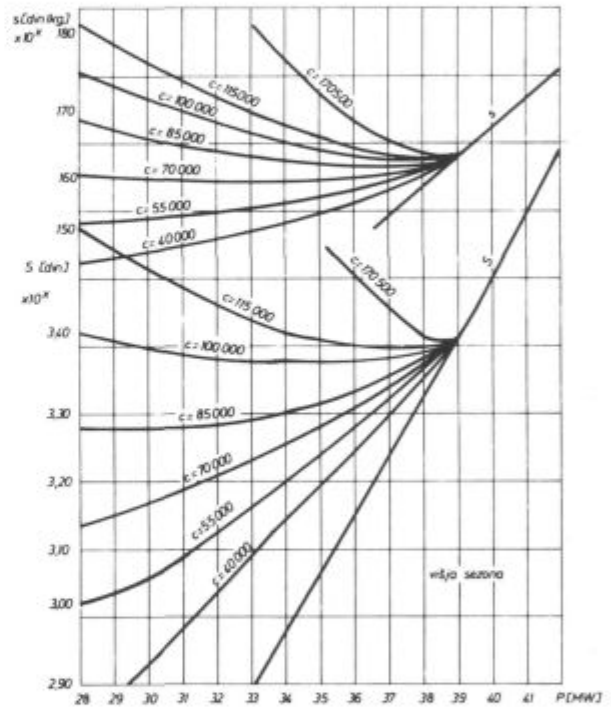
Slika 10  
Cena električne energije  
Fig. 10  
Price of electric energy

Upoštevajoč še preostale dogovorjene obveznosti, bi bila cena kWh še višja. Zanimivo je, da sledi časovni potek rasti cene zelo dobro eksponentni funkciji (korelacijski faktor  $R^2 = 0,99$ ) in da je čas podvojitve cene električne energije kot karakteristični podatek, za ŽR :  $t_2 = 2,94$  let (ZJ :  $t_2 = 2,72$  let, ŽŠ :  $t_2 = 2,77$  let). Podatki so za obdobje 1974—1983, medtem ko podvojitve cene električne energije v letu 1984 popolnoma izsto-

pa iz dosedanjih gibanj. Za primerjavo je na sl. 10 prikazana tudi cena električne energije za gospodinjstva, ki sicer ob višjem nivoju izkazuje mnogo počasnejšo rast (GO :  $t_2 = 3,40$  let). Cene gotovih proizvodov železarne Ravne so se gibale po enakih eksponentnih zakonitostih, vendar počasneje, saj je čas podvojitve za isto 10-letno obdobje :  $t_2 = 3,05$  let. Razmerje med povprečno letno kg ceno gotovih izdelkov in povprečno letno ceno kWh se je v istem obdobju gibalo med 47 kWh/kg in 37 kWh/kg.

Pravilneje bi bilo prikazati cene in ustrezna razmerja iz surovega jekla, vendar nas tu bolj zanima, kako se gibljejo stvarna razmerja. Cena surovega jekla pa je planska postavka, saj železarna s surovim jeklom ne nastopa na trgu. Znotraj desetletnega obdobja so se cene električne energije in cene proizvodov sicer različno hitro gibale, vendar ne tako različno, da ne bi mogli ugotavljati letnih optimalnih obratovalnih stanj.

Rezultati stroškovne analize so prikazani na slikah 11 in 12, in sicer so vsi podatki naneseni v odvisnosti od



Slika 11  
Optimalni obratovalni režimi železarne za čas visoke sezone

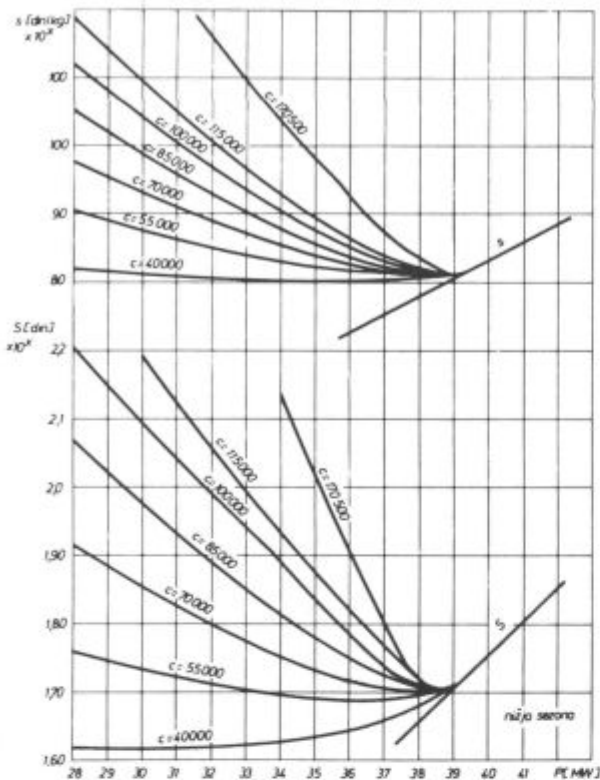
Fig. 11  
Optimal operational regimes in the ironworks for the period of high season

moči v konični tarifi, tj. od takoimenovane obračunske moči. Strošek za moč je premica (1) in je enak:

$$S_k = s_k \cdot P,$$

pri čemer je  $s_k$  (din/MW) tarifna postavka za moč. Stroški zaradi zastojev peči (internih redukcij) so sorazmerni času trajanja teh redukcij (po sl. 9), izračunani pa so na osnovi podatka, kolikšni so fiksni stroški ( $s_2$ ), (amortizacija, investicijsko vzdrževanje, obresti, režija) na minuto obratovanja. Celotni strošek zastoja peči je:

$$S_z = s_z \cdot t_z,$$



Slika 12

Optimalni obratovalni režimi železarne za čas nizke sezone

Fig. 12

Optimal operational regimes in the ironworks for the period of low season

pri čemer je  $t_z$  (min) čas zastoja peči v obračunskem obdobju.

Vrednost izpadlega dohodka izračunamo na osnovi podatka o izpadu proizvodnje peči  $i_p$  (kg/min) in o vrednosti dohodka v enoti proizvoda  $v_p$  (din/kg). Celo ten izpad dohodka je:

$$S_d = i_p \cdot v_p \cdot t_z$$

Vsota nepokritih stroškov in izpada dohodka je sorazmerna s časom zastoja peči:

$$S = S_z + S_d = s_z \cdot t_z + i_p \cdot v_p \cdot t_z = c \cdot t_z,$$

pri čemer je  $c$  (din/min) specifična vrednost nepokritih stroškov in izpadlega dohodka. Na sl. 11 in 12 je prikazan karakterističen potek stroškov za razne vrednosti stroškovne konstante  $c$ .

Matematična obravnava stroškovnih odnosov je bistveno odvisna od funkcijskega poteka zastojev  $t_z$  v odvisnosti od nivoja zahtevane konične moči  $P$ . Na sl. 9 je prikazan iz evidence zastojev potek teh vrednosti, ki pa ni linearen. S pomočjo statističnih regresijskih odnosov obdelanih podatkov smo ugotovili, da nastopa najvišji korelacijski faktor pri logaritmičnem odnosu med časom zastojev  $t_z$  in pripadajočim nivojem moči  $P$ :

$$t_z = a + b \ln P$$

Če vzamemo, da je  $P_0$  moč, pri kateri zastojev ni več ( $t_z = 0$ ) oz. da imamo pri neki moči  $P_1$  velikost zastojev  $t_{z1}$ , lahko iz pogojev:

$$0 = a + b \ln P_0$$

$$t_{z1} = a + b \ln P_1$$

dobimo vrednosti konstant tudi brez statistične obdelave.

$$b = - \frac{t_1}{\ln P_0 / P_1}$$

$$a = t_1 \frac{\ln P_0}{\ln P_0 / P_1},$$

pri čemer lahko dobi konstanta  $a$  fizikalni smisel kot vrednost zastojev pri moči 1 MW. Jasno je tudi, da ima relacija smisel samo pri vrednosti  $t_z \geq 0$  oz. pri močeh  $P < P_0$ .

Skupni fiksni stroški so torej:

$$S = S_k + S_z + S_d = (s_z + i_p \cdot v_p) t_z + s_k \cdot P = c \cdot t_z + s_k \cdot P$$

Upoštevaje časovni potek zastojev  $t_z$  pa:

$$S = s_k P + b c \ln P + a c$$

Šop ustreznih krivulj na spodnjem delu sl. 11 in 12 prikazuje potek teh stroškov. Vidimo, da visoke vrednosti za  $c$  (fiksni stroški + izpad dohodka) potiskajo minimum teh stroškov proti konični moči  $P_0$  torej k obratovanju z majhnimi zastoji oz. zahtevajo manjše vrednosti fiksnih stroškov večje redukcije oz. ustrezno manjšo konično obremenitev. Minimum skupnih fiksnih stroškov nastopa pri pogoju, da je

$$\frac{dS}{dP} = 0, \quad \text{kar dobimo pri moči:}$$

$$P_s = - \frac{b \cdot c}{s_k}$$

Enačba seveda velja le za moči, pri katerih je  $t_z \geq 0$ , ker so negativni zastoji nesmiselni oz. pri pogoju, da je  $P \leq P_0$ , saj pri večjih močeh stroškov zastojev ni več. Za proizvodnjo pa niso interesantni le skupni stroški, temveč predvsem specifični stroški proizvodnje na enoto proizvoda. Ti so

$$s = \frac{S}{T} = \frac{S}{T_1 - i_p \cdot t_z} \quad (\text{din/kg}),$$

pri čemer je  $T$  (kg) dejanska proizvodnja v obravnavanem obdobju,  $T_1$  (kg) pa skupna proizvodnja brez zastojev. Z upoštevanjem že prej izpeljanih odnosov lahko zapišemo končno obliko specifičnih stroškov:

$$s = \frac{s_k \cdot P + b \cdot c \cdot \ln P + a \cdot c}{T_1 - a \cdot i_p - b \cdot i_p \cdot \ln P}$$

Ustrezne krivulje so prikazane na zgornjem delu sl. 11 in 12. Prva značilnost je podobnost s spodnjimi krivuljami skupnih stroškov: čim višji so stroški (večja vrednost za  $c$ ), tem bolj se minimumi (najcenejša proizvodnja) približujejo vrednosti moči  $P_0$ , tj. k močem, ki zahtevajo malo zastojev. Z nižanjem stroškov zastojev ( $c$ ) pa se optimalno obratovanje premika k manjšim koničnim močem oz. k večjim redukcijam. Nasprotno stroškom zastojev deluje cena za prevzeto moč ( $s_k$ ). Višja cena moči zahteva optimum pri nižjem nivoju moči, če je strošek zastoja enak. To se lepo vidi iz primerjave med skupnimi stroški  $S$ , sl. 11, ki je izdelana za ceno moči visoke sezone, in sl. 12, ki je izdelana za ceno moči nižje sezone. Najnižje skupne stroške za visoko sezono pri  $c = 70.000$  dobimo pri konični moči 24,2 MW, za nizko sezono pri enaki vrednosti za  $c$  pri 38,5 MW. Po

tek specifičnih stroškov pa ni enak poteku skupnih stroškov, čeprav je podoben. Posebno se razlikujejo vrednosti moči, pri katerih nastopajo minimalne vrednosti. Najinteresantnejše so seveda minimalne specifične vrednosti stroškov oz. obratovalna področja koničnih moči, kjer ti stroški nastopajo. Dobimo jih pri pogoju, da je

$$\frac{dS}{dP} - B = 0$$

Rešitev zgornjega odvoda nam da enačbo za moč:

$$\ln P_s - \frac{A}{P_s} - B = 0,$$

pri čemer so konstante

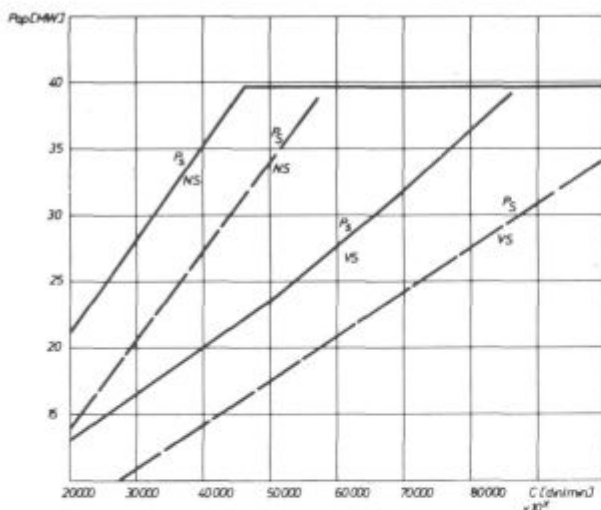
$$A = \frac{c \cdot T_i}{s_k \cdot i_p}$$

$$B = \frac{b-a}{P} + \frac{T_i}{b \cdot i_p}$$

$P_s$  pa je moč z najnižjimi specifičnimi stroški.

Enačba ima svoj smisel le pri pogoju, da je  $t_s \geq 0$ , oziroma da je  $P < P_0$ .

Potek minimalnih ekstremnih vrednosti je iz zgornjih delov obeh slik razviden: pri nižjih stroških za izpadlo proizvodnjo leže minimalne vrednosti pri nizkih koničnih obremenitvah in obratno, vendar se vrednosti moči, pri katerih nastopajo minimalni specifični stroški, razlikujejo od vrednosti moči, pri katerih nastopajo najnižji skupni stroški. Tudi ekstremi pri specifičnih stroških niso tako izraziti kot pri celotnih stroških. Pri vrednostih stroškov zastoja iz prejšnjega primera ( $c = 70.000$ ) dobimo najnižje specifične stroške pri konični moči 32,4 MW za visoko sezono, za nizko pa pri 38,5 MW.



Slika 13

Optimalne konične moči in njih odvisnosti od stroškov zastojev

Fig. 13

Optimal peak powers and their dependence on the standstill costs

Na sl. 13 so iz logaritmичne enačbe izračunane vrednosti za  $P_s$ , tj. moč, kjer nastopajo najmanjši specifični proizvodni stroški v odvisnosti od specifičnih stroškov

zastojev (c) ter od stroškov moči ( $s_p$ ) v posamezni sezoni ter vrednosti za  $P_0$ , tj. moč, kjer nastopajo najnižji skupni stroški. Slika daje jasen odgovor na vprašanje, kako spreminjati konično moč glede na sezonske cene energije.

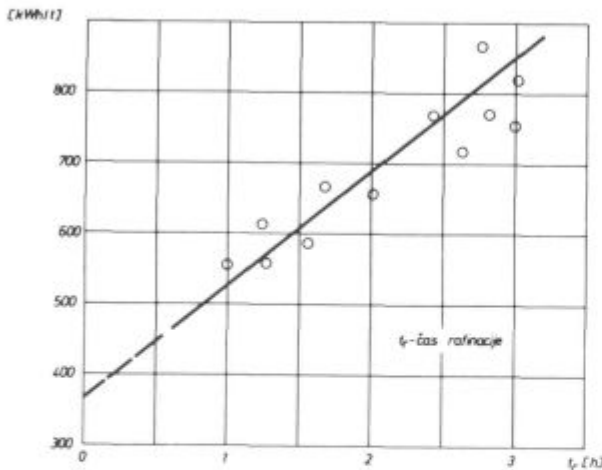
V teh izvajanjih niso bili upoštevani direktni stroški substance jekla (vložek, legure) niti ostali variabilni stroški proizvodnje. Visoke cene električne energije oz. visok delež moči v ceni električne energije zahteva posebno v visoki sezoni zaostreno prilagajanje moči obločnih peči razmeram v elektroenergetskem napajalnem sistemu, kar pomeni visoke interne redukcije. Zahteva proizvodnje, da naj se jeklo proizvaja z najnižjimi specifičnimi proizvodnimi stroški pa bo ob ceni energiji ter pri velikih fiksnih stroških zastojev in velikega izpada dohodka zaradi zgubljene proizvodnje pomenila obratovanje s čim manj zastoji in relativno velikimi močmi.

## II. VODENJE SPECIFIČNE PORABE ELEKTRIČNE ENERGIJE OBLOČNE PEČI

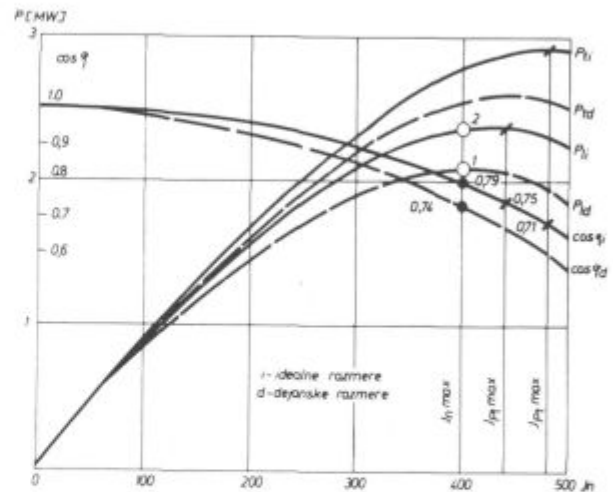
O racionalni izbiri električne energije govorimo kot o kazalcu, ki nam pove, kaj nam je uspelo ustvariti s kWh električne energije v proizvodnem procesu ali pogosteje: koliko električne energije smo porabili na enoto proizvoda. Specifična poraba električne energije (kWh/t) je torej nekakšna elektroenergetska produktivnost. Zakaj nam včasih uspe izdelati tono odlitega jekla s porabo 530 kWh, drugič pa za enako tono jekla potrebujemo 800 kWh ali skoraj 50 % več? Ker je za raztalitev tone starega železa teoretično potrebno 340 kWh energije, pomeni, da vodimo proizvodni proces s 65 % izkoristkom, drugič pa le s 43 %. Kje so skrajni dosegi največjih energetskih izkoristkov v elektroobločni peči, ki so že tehniško izvedljivi in ekonomsko opravičljivi, nam govore podatki o doseženih vrednostih v japonskih jeklarnah. V domačih razmerah, kjer ne poznamo zelo velikih peči z UHP transformatorji, ki bistveno pripomorejo k ugodnim rezultatom, lahko razpravljamo le o praktično izvedljivih ukrepih in vplivnih dejavnikih. V osnovi delimo te v dve skupini: organizacijske in tehniško-tehnološke.

Organizacijski vplivni dejavniki, ki vplivajo na velikost specifične porabe električne energije v obločni peči, so pravladujoči. Ker obratuje obločna peč z relativno velikimi toplotnimi izgubami, ca. 30 % v času raztaljenega vložka (temperature okrog 1600 °C), je prvi vplivni dejavnik čas trajanja šarže od preboda do preboda. Pogosto objavljene relacije (glej sl. 14) samo dokazujejo znano dejstvo, da z večjo produktivnostjo (t/h) pada specifična poraba energije: vsak zastoj v obratovanju elektroobločne peči pomeni le nepotrebno dodatno pokrivanje izgub; energija, ki jo dovajamo v peč z raztaljenim vložkom, služi le za ohranjanje temperature. Posebno izrazit in boleč je ta odnos pri obločnih pečeh, ki imajo namesto ognjevzdorne obzidave vgrajene vodohlajene panele. Ti so se sicer razvili iz UHP obločnih peči, ko klasične obzidave peči niso več vzdržale silnih toplotnih obremenitev v času taljenja, vendar so prodrli zaradi svoje velike trajnosti tudi v področje HP peči ali pa tudi običajnih elektroobločnih peči, predvsem onih, ki so namenjene bolj taljenju in katerih rafinacijski del se prenaša v vakuumsko napravo. Sl. 15 kaže povečanje specifične porabe električne energije za 40-t obločno peč za obdobje, ko se je v njej izdelovalo jeklo v celotnem tehnološkem postopku. Povečanje porabe za 8 % do 10 % je v skladu s podatki drugih jeklarn in potrjuje podatek, da pri vodohlajenih panelih pomeni podaljša-

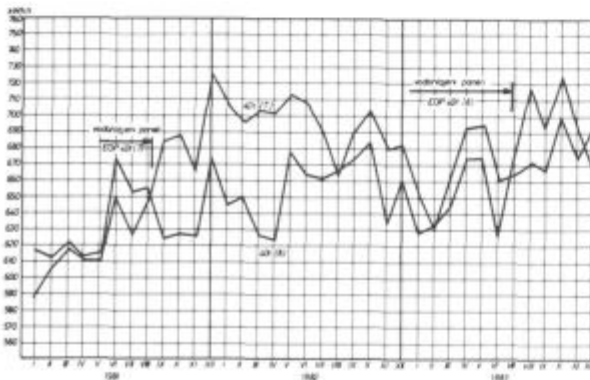




Slika 14  
Specifična poraba električne energije  
Fig. 14  
Specific consumption of electric energy



Slika 16  
Obratovalni diagram 5 t EOP  
Fig. 16  
Operational diagram of 5 t arc furnace



Slika 15  
Specifična poraba električne energije 40 t EOP  
Fig. 15  
Specific consumption of electric energy for 40 t arc furnace

nje rafinacijskega časa za 30 minut povečano specifično porabo za 25 kWh/t. Pričakuje se, da bi specifična poraba teh peči s prenosom rafinacije v vakuumsko napravo morala biti nižja od one pred uvedbo vodohladnih panelov.

Malo premalo upoštevanimi organizacijskimi dejavniki je tudi premajhna skrb za hitro zalaganje peči, menjavo oboka, elektrod ter seveda skrbna priprava vložka, ki je v domačih razmerah eden glavnih vzrokov za doseganje slabših rezultatov. Tipa vložka, ki bi omogočal enkratno ali dvakratno zalaganje peči, skoraj ne poznamo. Kratek čas od preboda do preboda, posebno pa še kratek čas raztaljenega vložka je zagotovilo za dobre rezultate. Med organizacijske vplivne dejavnike, ki lahko bistveno vplivajo na znižanje specifične porabe električne energije v obločni peči, je tudi potrebno znanje in izkušnje poslužujočega osebja.

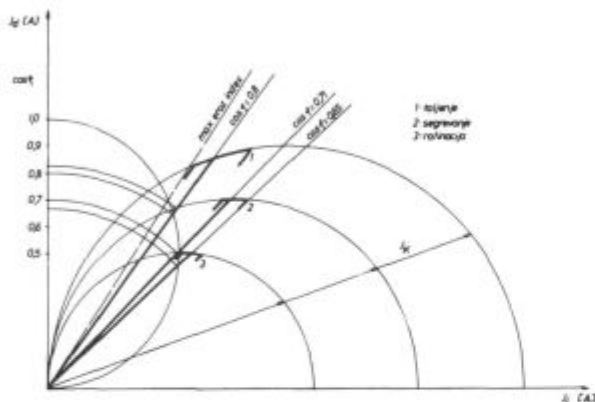
Elektrotehniške in tehnološke vplivne dejavnike moramo iskati v pogojih, s katerimi dosegamo optimalne elektroenergetske razmere v obločni peči. To je predvsem obratovanje z maksimalnimi energetskimi izkoristki, ki je poleg območij z maksimalno produktivnostjo med najzanimivejšimi obratovalnimi stanji. Na sl. 16

so ta območja prikazana. Iz njih lahko zaključimo, da je za območje taljenja enostavno določljivo:

- območje največje delovne moči na transformatorju (fazni faktor 0,71):  $J_{P_{II} \max}$
- območje največje delovne moči na loku (fazni faktor 0,77–0,74):  $J_{P_{II} \max}$
- območje največjih energetskih izkoristkov (fazni faktor 0,78–0,75):  $J_{\eta \max}$

Karakteristike obratovalnega diagrama na sl. 16 so po znanih relacijah določene z napetostjo, tokom ter induktivno upornostjo transformatorja, dušilke in visokotokovnih dovodov k peči. Kako z najrazličnejšimi možnimi kombinacijami teh vrednosti izvesti fazo taljenja, upoštevajoč pri tem še razmere v peči, da bo opravljeno najhitreje in s čim manj izgub, je problem, pred katerega sta z enako težo postavljena konstrukter in projektant obločne peči kot njen upravljalec. Običajno se projektant izogne obratovalnim pastem tako, da predvidi nemogoče širok razpon napetostnih in tokovnih stopenj ter dušilko z več odcepi, češ, imate vse možnosti izbire! Zanesljivo pa te mnoge možnosti bolj pripomorejo k slabemu obratovanju kot k optimalnemu: slabih kombinacij je mnogo, dobrih pa je, razmeram v peči ustrezno, le nekaj. V tej zvezi je zanimiv podatek, da je običajno število stopenj pečnih transformatorjev v ZDA 6 do 8, v Evropi pa imamo običajnih 16 ali celo preko 20 napetostnih stopenj.

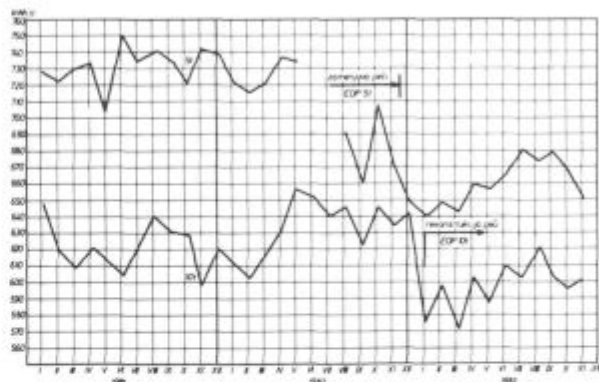
Taljenje vložka naj poteka s konstantno močjo in z največjo možno preobremenitvijo transformatorja. To splošno načelo zahteva takšno induktivno upornost v pečnem krogu, da lahko električni lok gori enakomerno kljub slabim jonizacijskim pogojem, ki vladajo v peči zaradi nizkih temperatur. Pri UHP obločnih pečeh dosegamo te zahteve z izredno velikimi elektrodnimi tokovi. Kazalec toka na krožnem diagramu obločne peči na sl. 17 leži skoraj točno pod faznim kotom  $45^\circ$  oz. s faznim faktorjem 0,71. Pri večjih pečeh dosežemo take razmere že brez posebne dušilke, saj predstavljajo visokotokovni vodi na peč že dovolj veliko oz. preveliko induktivno upornost. UHP peči zagotavlja tudi v času taljenja zelo čist sinusni potek toka, čeprav ima sicer električni lok tipično nelinearno uporabno karakteristiko in je povzročitelj popačenj toka in napajalne napetosti. Taljenje vložka v UHP peči je zaradi svoje visoke specifi-



Slika 17  
Krožni diagram karakterističnih obratovalnih območij  
Fig. 17  
Circle diagram of characteristic operational regions

čne moči (600–800 kVA/t) transformatorja in zaradi vodohlajenih panelov okarakterizirano kot surovo oz. divje, saj talimo od prvega trenutka do skoraj dokončne raztalitve z maksimalno napetostjo in maksimalnim tokom. Bojazni zaradi obzidave ni, saj je pri modernih pečeh tudi že obok vodohlajen. Pri srednjih in manjših pečeh pa so omejitve za doseg optimalnega taljenja številnejše. Ker velikost toka ne zadošča za doseg faznega faktorja 0,71, moramo v tokokrog vključiti ustrezno induktivno upornost (dušilko), ki nam zagotavlja stabilno gorenje loka in s tem enakomeren dovod moči v peč. Ker s tem pri največji možni napetosti in največjem možnem elektrodnem toku z večanjem dušilke večamo fazni kot (slabšamo fazni faktor), se nam zmanjšuje v peč dovedena delovna moč. Kompromis pri taljenju z nekaj večjim faznim faktorjem, kot je 0,71, je očiten in utemeljen tudi s tem, ker dobimo maksimalno moč, ki nam jo pokažejo instrumenti, pri faznem faktorju okrog 0,76 (glej sl. 16). Pri običajnem preveč voluminoznem vložku se elektrode takoj prebijajo v notranjost peči in ni nevarnosti, da bi zaradi direktnega sevanja električnega loka poškodovali ali obok ali obzidavo. Zaradi tega tudi niso neobičajni višji fazni faktorji v času taljenja (0,80 ali več), bistveno je, da imamo stabilen električni lok. Tega zagotavljata poleg naštetih električnih parametrov vložek in elektrodna regulacija, ki ima nalahko nalogo, da zagotavlja loku v času obratovanja konstantno impedanco. Elektrodna regulacija mora s hitrim pozicioniranjem položaja elektrod nasproti vložku skrbeti, da se lok ali ne trga ali pa da ne prihaja do kratkih stikov. Odziv elektrodne regulacije na izmerjene spremembe v peči ter mehanska togost pozicijskega izvršnega organa regulacije imata odločilno vlogo pri kvaliteti elektrodne regulacije. Kaj pripomore sodobna elektrodna regulacija k zmanjšanju specifične porabe električne energije, prikazuje sl. 18, kjer so prikazane mesečne specifične porabe za 10-t in 5-t elektroobložno peč v železarni Ravne pred rekonstrukcijo in po njej. Pri 10-t peči je bila zamenjana stara amplidinska elektromotorna regulacija s sodobno elektronsko-hidravlično, sistem Demag – Rade Končar, elektroenergetski del vključno s transformatorjem pa je ostal isti.

Rekonstrukcija, ki je zajemala tudi mehaniko elektrodnih ročic (in ki je bila opravljena v 20. dneh), je prinesla poleg 5 % povečane produktivnosti tudi 6 % znižanje specifične porabe. 5-t elektroobložna peč je bila zaradi dotrajanosti zamenjana. Stara peč je imela trans-

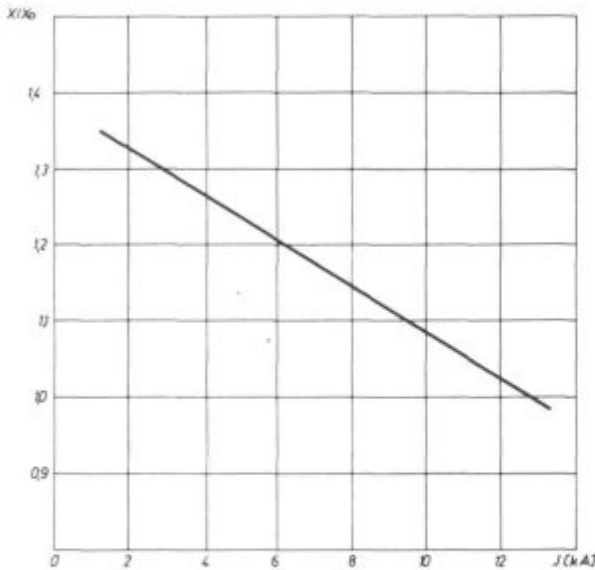


Slika 18  
Specifična poraba električne energije 10 t EOP in 5 t EOP  
Fig. 18  
Specific consumption of electric energy for 10 t and 5 t arc furnaces

formator moči 4,5 MVA in Tirilov regulator za elektromotorsko pozicioniranje elektrod, nova pa transformator moči 3/3,6 MVA in elektronsko-hidravlično regulacijski sistem Demag – Rade Končar. Efekti so vidni na sl. 16, kjer se vidi, da se je znižala specifična poraba za 11 %, povečala pa se je tudi produktivnost. Povečanje produktivnosti je tu izrazitejše kot pri 10-t peči, ker je bil spremenjen tudi način zalaganja peči.

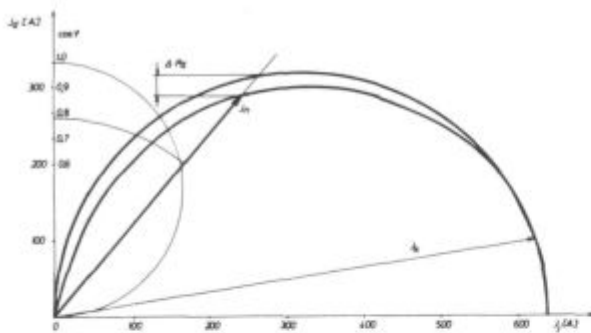
Ali pričeti taljenje z znižano napetostjo oz. z manjšim tokom, ni samo vprašanje vložka v peči, ampak predvsem razmerij v peči, ki določajo takoimenovano obratovalno impedanco peči. Vse meritve namreč dokazujejo, da je dejanska obratovalna impedanca mnogo višja kot kratkostična, tj. ona, ki smo jo izmerili pri preizkusu kratkega stika. Razlaga pojava je v tem, da nam popačitve toka, ki so posledice nelinearne upornosti loka, dajo višje harmonske tokove, ki z delom višjih frekvenc dodatno povečujejo induktivno upornost v pečnem tokokrogu. Meritve dokazujejo, da se obratovalna impedanca približuje dejanski sorazmerno porabljeni energiji: ob raztaljenem vložku so jonizacijski pogoji za gorenje loka idealni, tok je mnogo manj popačen, dodatnih induktivnih upornosti zaradi višje harmonskih tokov ni. Za fazo taljenja odločujoča pa je z meritvami dokazana povezava med obratovalno induktivno upornostjo in razmerjem napetost/elektrodni tok. Z rastočim razmerjem raste obratovalna induktivna upornost (sl. 19), kar pomeni, da pri majhnih tokovih z večanjem napetosti ne bomo dosegli efektnega zvečanja moči taljenja: praktiki vedo, da je začetna moč taljenja skoraj neodvisna od višine napetosti. Zniževanje toka v začetni fazi taljenja ima torej dvakrat negativne posledice. Primernejše bi bilo pričeti taljenje z nižjo napetostjo, kar ima dvojni pozitiven efekt: zaradi poslabšanja faznega faktorja se poveča stabilnost gorenja loka, zmanjša pa se tudi obratovalna impedanca, kar omogoča večji dovod moči v peč. Vendar se tak način začetnega taljenja redko izvaja, predvsem zaradi nezaželenih pogostih preklopov napetostnih stopenj transformatorja in zaradi slabega efekta: slab vložek ima namreč to prednost, da so elektrode hitro »na dnu« peči, kar pomeni ob predpostavki, da smo dno dobro založili, da dobimo kmalu stacionarnejše razmere v peči. To pa seveda povzroči zmanjšanje obratovalne impedance in enak efekt povečanja moči taljenja kot z znižanjem napetosti.

Ker je pri konstantni napetosti obratovalna induktivna upornost odvisna neposredno od toka, se nam kro-



Slika 19  
**Obratovalna induktivna upornost EOP**  
 Fig. 19  
**Operational inductance of arc furnace**

žni diagram obločne peči spremeni v ovalni diagram obločne peči. Konstrukcija je razvidna s sl. 20, kjer je tudi prikazano, da obratovalna induktivna upornost postane enaka kratkostični šele pri kratkem stiku. S slike je tudi razvidno, kolikšen tok oz. moč smemo pričakovati pri določenem razmerju omenjenih upornosti oz. kakšno zmanjšanje moči pri tem dobimo.



Slika 20  
**Realni krožni diagram EOP**  
 Fig. 20  
**Real circle diagram of arc furnace**

Če zaključimo razpravo o fazi taljenja v obločni peči, lahko za večino primerov rečemo, da talimo pri določeni napetosti (ne vedno najvišji) z regulatorjem toka, nastavljenim na največjo vrednost. Tok in moč bosta postopoma naraščala, dokler ne bosta v prvi tretjini faze taljenja dosegla maksimalne vrednosti. Tako postane vprašanje izteka taljenja mnogo kritičnejše in problematičnejše kot njegov začetek. Zamujeno zmanjšanje moči taljenja ob raztalitvi vložka pomeni lahko nevarno posledico za ognjevzdržno obzidavo pečne kadi in oboka, saj lok ni več zakrit z vložkom, ampak neposredno seva na obzidavo. Ni pa potrebno samo zmanj-

šanje moči, lok pri raztaljenem vložku ne potrebuje več dodatne dušilke. Izklopljena dušilka pomeni večji krog krožnega diagrama (pri isti napetosti), zato višji fazni faktor, skratka nesprejemljivo stanje za obzidavo peči. Tu se pokažejo prednosti vodohlajenih panelov proti občutljivi klasični obzidavi, zato je vodenje izteka tu temvažnejše.

Toplotnotehniške razmere v peči v stanju raztaljenega vložka opisujejo z erozijskim indeksom kot številom za toplotno obremenitev obzidave. Indeks je enak produktu med napetostjo in močjo. Avtor članka je dokazal, da maksimalni erozijski indeks nastopa vedno pri faznem faktorju 0,82, zato se je treba temu stanju v peči pri raztaljenem vložku izogibati. Elektrotehniško so razmere v obločni peči v fazi raztaljenega vložka ugodne. V peč dovedena moč je potrebna le za kritje toplotnih izgub peči oz. za dogrevanje taline na določeno temperaturo. Električni lok gori mirno, popačenje toka je minimalno. Edina omejitev je sevanje na obzidavo, definirano z erozijskim indeksom, ter tehnološka zahteva, da elektroda ne sme biti potopljena v talino (zaradi nevarnosti neogljčenja). Zaradi relativno majhnih moči obratujemo z nizkimi napetostmi in s tokovi, ki zagotavljajo fazni faktor, ki je nižji od onega, pri katerem nastopa maksimalni erozijski indeks. Že pri pogledu v peč vidimo, da pomeni majhen tok oz. dober fazni faktor relativno dolg električni lok, ki ga žilindra nad talino ne more zaslanjati, da pa pomeni povečevanje toka istočasno skrajševanje električnega loka. Povečevanje toka daleč preko faznega faktorja 0,71 je seveda tehniški nesmisel, ker prične padati delovna moč na loku. Zato je pravilno izbrana za določeno moč tista kombinacija napetosti in toka, ki da fazni faktor od 0,66 do 0,74 in predvsem zagotavlja takšno dolžino loka, da lok lepo odriva žilindro od elektrode in da žilindra zaslanja sevanje loka na obzidavo. Ustreznih napetostnih stopenj ni potrebno dosti: ena do dve višji napetostni stopnji za hitro segrevanje kopeli ter ena ali dve nižji napetostni stopnji z različnimi tokovnimi kombinacijami za obdržanje tekočega jekla na potrebni temperaturi. Optimalno vodenje obločne peči v raztaljeni fazi ima torej dva cilja: energetski, da spravimo čimveč toplotne energije v kopel in ne v obzidavo, tehnološki pa, da obzidavo s prevelikim direktnim sevanjem električnega loka ne preobremenjujemo. Za vsako fazo izdelave jekla so karakteristični elektrotehniški parametri obločne peči, prikazani na sl. 17, in sicer za vsako proizvodno fazo po eno stanje. Iz že povedanih razlogov potrebujemo za vsako fazo obratovanja vsaj dve kombinaciji, skupaj torej nekako 6 do 8 napetostnih stopenj s točno ustreznimi velikostmi elektrodnih tokov. Klasična elektrodna regulacija je zahtevala vsakokratno ročno prilaganje elektrotehniških parametrov razmeram v peči, kar je pomenilo, da je optimalno vodenje obločne peči stvar znanja in vestnosti posluževalcev. Tu smo dosegli precejšen napredek s takoimenovanim optimeltom, tj. z zmožnostjo elektrodne regulacije, da se vsaki napetostni stopnji prej nastavi ustrezni elektrodni tok: posluževalec izbira le napetostne stopnje, tokovne se mu prilagode same oz. jih ne more po svoje spreminjati. Poizkušali so tudi z neposrednim računalniškim vodenjem elektroobločnih peči, posebej še fazo taljenja, vendar je prevelika diskontinuiranost procesa, različnost vhodnih parametrov in njih premalo zanesljivo obvladovanje bil vzrok, da računalnik še ne more prevzeti vseh nalog vodenja elektroobločne peči.

Za določitev elektrotehniških parametrov obločne peči in za nastavitve nakazanih optimalnih vrednosti je potrebno te meriti in nastaviti. Najenostavnejša je meri-



tev s pomočjo regulatorja delovne in jalove moči ali pa s pomočjo števec delovne in jalove energije. Ker je zaradi posebno nestacionarnega stanja v fazi taljenja uporaba klasičnih merilnih instrumentov nemogoča, se da fazni faktor iz zgornjih povprečkov najzanesljiveje ugotavljati. Registrirni kW in kVAR-meter je postal obvezen instrument obločne peči in če je ustrezno dušen, je nepogrešljiv pripomoček. Z meritvijo kratkega stika določimo induktivne in omske upornosti. Spreminjanje obratovalne induktivne upornosti je možno meriti le s posebnimi registrirnimi napravami. V železarni Ravne smo zgradili mikroprocesorsko merilno napravo, ki omogoča merjenje vseh faznih napetosti, tokov, delovnih in jalovih moči v enominutni povprečni vrednosti, izračunavanje vseh elektrotehniških parametrov ter njih kontinuirni izpis. Tako lahko zasledujemo celotno obratovanje obločne peči v vseh fazah obratovanja, spreminjanje obratovalnih upornosti, tokovno in ener-

gijsko simetričnost obremenitev posameznih elektrod itd.

Določanje elektroenergetskih parametrov, kontrola nastavljenih zaščitnih vrednosti, vrednosti parametrov, regulacijskega kroga, vzdrževanje pravilne funkcionalnosti posameznih sklopov obločne peči, nadzor nad do-gajanjem v topilnici, analiza rezultatov in ukrepanje za izboljšanje stanja je vrsta spremljajoče proizvodne dejavnosti, ki poleg ustrezne organiziranosti in opremljenosti zahteva tudi posebna tehnološka znanja. Le tako je mogoče krčiti poti racionalne rabe in izrabe električne energije: doseči za enako količino porabljene energije nižjo ceno za kWh in izdelati enako količino jekla z manj porabljene energije.

**Opomba:** Pri razreševanju problematike poglavja I Gospodarjenje z električno energijo v železarni Ravne je sodeloval Bertalanč Anton, inženir elektrotehnike — Vodja odd. za elektroenergetske naprave železarne Ravne.

### ZUSAMMENFASSUNG

Im Beitrag wird die Bewirtschaftung der Elektrischen Energie so wie die im Hüttenwerk Ravne ausgeführt wird aus zwei Standpunkten dargelegt und zwar: als Führung der Belastung des Hüttenwerkes bzw. deren elektrischen Kraft mit dem Ziel möglichst niedrigen Preis für die verbrauchte kWh zu erreichen, was als rationelle Verwendung der elektrischen Energie genannt wird, und als Führung der Lichtbogenöfen mit dem Ziel den Stahl mit möglichst niedrigem Aufwand der Elektrischen Energie zu erzeugen, was als rationelle Ausnützung dieser Energie genannt wird.

Die Methoden der optimalen Führung der Belastung des Hüttenwerkes, wo der Stahl in Lichtbogenöfen erzeugt wird werden beschrieben, und die höchstökonomischen Betriebsregime auf Grund der technischen und Kostenaufwandparametern werden bestimmt. Die wachsenden festen Kosten für die Störungen wegen der internen Einschränkung und die wach-

senden Kosten des ausgefallenen Einkommens verschieben den optimalen Betrieb zu höheren Spitzenkräften; umgekehrt aber verlangen die immer höheren Preise für die Elektrische Energie bzw. deren Kraft das verschieben dieser Betriebsführung zu kleineren Spitzenbelastungen. Der analytische Zutritt zu der Lösung des Optimierens und die Ergebnisse dieser Methode werden angegeben.

Die Optimierung der elektroenergetischen Betriebsregime des Lichtbogenofens für die Stahlerzeugung ist der Inhalt des zweiten Teiles dieses Betrages wo der Betrieb des Lichtbogenofens in der Einschmelz und in der Raffinationsphase behandelt wird. Die Einflüsse der elektrotechnischen Parameter auf das energetisch günstigste Betreiben des Ofens werden beschrieben und die Ergebnisse solcher Betriebsführung am Beispiel der Lichtbogenöfen im Hüttenwerk Ravne werden gezeigt.

### SUMMARY

The paper presents two viewpoints of power management being used in the Ravne Ironworks, i. e: control of the load of ironworks or its electric power with the aim to achieve the lowest possible price for the consumed kWh, which can be described as rational use of electric energy; control of electric arc furnaces with the aim to manufacture steel with the lowest possible consumption of electric energy which can be described as rational yield of this energy.

The methods for optimal control of load of such ironworks are described where steel is manufactured in arc furnaces, and the most economic operational regimes based on technical and cost parameters are determined. Increasing fixed costs of

standstills due to internal reductions and the increasing costs of lost income shift the optimal operation towards higher peak powers, on the other hand the increasing prices of electric energy or its power demand the shift of operation to lower peak loads. Analytical approach to the solution of optimizing and the results obtained by this method are presented.

Optimizing the operating power regimes of arc furnaces for steelmaking is the content of the second part of the paper in which the operation of arc furnace is treated by stages of smelting and refining. Influences of electrotechnical parameters on the energetically most suitable operation of the furnace are described and the results of such operation are illustrated by the examples of the arc furnaces in the Ravne Ironworks.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены два вида экономии в области электроэнергетики, которые выполняют в металлургическом заводе Железарна Равне а именно: управление нагрузкой завода отн. её электрической силой с целью, чтобы стоимость расходуемой квт. этой энергии была чем ниже- это значит рациональное использование электрической энергии и управление электродуговыми печами с целью, чтобы для изготовленной стали утратили чем меньше электрической энергии — это значит рациональный расход этой энергии.

Описаны методы оптимального управления нагрузки завода, который занимается с производством стали в дуговых электродуговых печах, также определение наиболее экономических режимов взяв во внимание технические и экономические параметры. Повышение постоянных расходов на застой вследствие внутренних редуций и повыше-

ные расходы вследствие выпадения дохода сдвинули оптимальную работу в направлении к более высоким пикам мощностям, наоборот же постоянное повышение стоимости электрической энергии отн. её мощности в направлении меньших пик нагрузки.

Предложен аналитический подход к решению оптимизации, а также результаты, которые получены применением этого метода. Оптимизация отн. установление оптимальных электроэнергетических работы дуговой печи для производства стали приведена во второй части этой статьи где действие дуговой печи рассматривается по фазам плавления и рафинирования.

Описано влияние электротехнических параметров на энергетически наиболее благоприятную работу печи, а также приведены результаты такой работы, полученные при дуговых печах металлургического завода Железарна Равне.