

Gospodarnost vodnohlajenih kablov pri elektroobločnih pečeh

UDK: 621.745.32:330.2

ASM/SLA: U7c, W18s, A5f, 17—51

Janez Bratina

V času nenormalno hitre rasti cen je optimiranje stroškov v proizvodnji na prvi pogled nehvaležen posel, saj se odnosi in razmere zelo hitro spreminjajo.

V članku poizkušamo prikazati ekonomsko-tehniško gospodarnost vodnohlajenih kablov elektroobločne peči. Pri tem upoštevamo poleg kapitalnih stroškov za material tudi stroške za energijo izgub ter razmerje tokovnih gostot v vodno, oz. zračnohlajenih kabljih. Rezultati so prikazani za razmere leta 1971 in 1981.

Na elektrode elektroobločne peči je potrebno dovajati električno energijo velikih moči (več deset MVA) pri relativno nizki napetosti (nekaj sto voltov). Zaradi tega so neizogibni visoki tokovi 20 do 30 kA pri srednjeobločnih pečeh (20 do 40 t) ali tudi preko 60 kA pri obločnih pečeh nad 100 t. Take tokovnonapetostne razmere so neizogibne zaradi uporabnih karakteristik električnega loka, s pomočjo katerega se pod elektrodami v peči električna energija pretvarja v toplotno. Zaradi operativne manipulativnosti posameznih elementov peči morajo biti dovodi na peč gibljivi, kar zahteva namesto togih bakrenih zbiralnic, ki smo jih vajeni pri elektrotehnikih velikih tokov, fleksibilne kable. Kabelska izvedba dovodov na električno obločno peč pa skriva v sebi vrsto težav. Fleksibilni kabel je spleten v vrvenico iz nekaj tisoč bakrenih žic, premera nekaj desetink milimetra. Na vsaki strani kabla moramo imeti ustrezen kabelski čevelj za pritrditev in za prevajanje električnega toka. Ker lahko za kabel, ki visi v zraku, računamo s tokovno gostoto le nekaj nad 1 A/mm² prereza kabla, pomeni tok 1 kA takoj presek 1000 mm², kar predstavlja že zgornjo mejo za kabel. Nujno je torej uporabiti vrsto paralelno potekajočih kablov, katerih število se povzpne pri eni sami fazi tudi do 40.

Ker so obločne peči seveda trifazne, je prva vidna značilnost takih peči šop kablov, ki se raztezajo od stene transformatorske postaje na elektrodne nosilce peči.

Prva nevšečnost fleksibilnih kablov je ta, da so stalno v medsebojnem premikanju. Premikajo jih popolnoma neregularni premiki posameznih elektrod navzgor ali navzdol kot posledica delovanja elektrodne regulacije ter zaradi sil, ki nastajajo med kablji zaradi v njih tekočih električnih tokov; te sile nastopajo prečno med kablji in radialno v kabljih. Poleg mehanskih obremenitev so kablji izpostavljeni visoki temperaturi, saj se sami segrevajo zaradi joulskih izgub ter zaradi bližine vroče peči. Nič manj kvarno ne vpliva na kable atmosfera okrog peči, ki povzroča krhkost bakrenih pramenov in nepredvidene mehanske poškodbe (kratki stiki med golimi kablji, obrizganje z žlindro ali talino itd.). Vse to povzroča staranje kablov in njihovo skorajšnje uničenje.

Skupna teža bakrenih, v zraku hlajenih kablov po že omenjenih izhodiščih se giblje okrog 200 kg na dolžinski meter in 10 kA v vsaki fazi. Pri srednji dolžini 10 m in elektrodnem toku 30 kA dobimo skupno težo bakrenih fleksibilov okrog 6000 kg. Če računamo kg montiranega kabla 300 din, kar je nizko ocenjeno, predstavljajo dovodi na peč vrednost 1.800.000 din. Zamenjava kompletnih dovodov na peč zato predstavlja strošek, kateremu je vredno posvečati pozornost, predvsem če ob tem še upoštevamo zastoje obratovanja obločne peči.

Pri sodobnejših izvedbah obločnih peči so namesto golih bakrenih vrvenic začeli uvajati vodnohlajene izolirane fleksibile, s katerimi so poizkušali naenkrat rešiti več problemov. Izredno pomemben konstrukcijski parameter obločne peči, ki direktno vpliva na obratovalne lastnosti, je impedanca nizkonapetostnega dovodnega sistema. Z impedanco je določena in omejena maksimalna delovna moč električnega loka, kakor tudi celotno obratovalno področje, saj impedanca določa premer krožnega diagrama obločne peči. Pri velikih pečeh dobimo zaradi velikih dimenzij paralelno tekočih fleksibilov tolikšne impedance, da obratovanje z maksimalnimi močmi ni več mogoče, oz. dobimo pri tem zelo slab fazni faktor moči. Verjetno je prav to dejstvo dalo vzpodbudo za uvedbo vodno hlajenih kablov, s katerimi je mogoče impedance dovodov na peč bistveno zmanjšati, saj se poleg zmanjšanja paralelno tekočih vodov zmanjšajo tudi njih medsebojne razdalje, ker so ti kablji izolirani.

Janez Bratina je diplomirani inženir elektrotehnike in ravnatelj TOZD elektrotehniških služb v železarni Ravne

Vodno hlajeni kabel je v bistvu bakrena fleksibilna vrvenica, ki je obdana s toplotno obstojnim izolacijskim plaščem. Znotraj vrvenice je več cevastih odprtih, skozi katere se pretaka voda. Izolacijski plašč mora biti zato dovolj močan, da prenese pritisk vode, saj se ta zaradi vmesnih prostorov med posameznimi prameni razliva po celotnem preseku kabla. Kabelski čevlji, ki jih normalno uporabljamo za priklop na zbiralnice električnega toka, morajo zdaj imeti tudi priključke za dovod in odvod hladilne vode.

Seveda prinaša hladilna voda v električni vodni sistem določeno problematiko. Vodna instalacija mora biti skrbno izvedena, da ne zamakajo izolirani deli peči itd. Pretok hladilne vode mora biti nadzorovan avtomatično, ker bi polno obratovanje peči brez hlajenja kablov te v najkrajšem času uničilo. Hladilna voda pa mora biti čista, brez mehanskih delcev, ki bi sicer lahko zamašili prehode skozi kable.

Vodno hlajeni kabli prinašajo tudi druge ekonomsko-tehnične posebnosti, zaradi katerih jih vse pogosteje uvajamo na elektroobločne peči. Zaradi intenzivnega hlajenja se že sami vsiljujejo na mesta s povišano temperaturo, kot je to pri obločnih pečeh; zaradi hlajenja jih lahko tudi bistveno bolj obremenimo kot kable, ki visijo prosto v zraku in jih hladi zrak. Zaradi tega je kablov na peči manj. Izolacijski plašč teh kablov je obilen, cefranje in trganje pramenov je onemogočeno, vpliv atmosfere na bakrene žile je izločen, do stikov med fazami ne more priti. Za ekstremne temperature pa so tudi ti kabli občutljivi. Uniči jih lahko:

daljše direktno sevanje taline, brizg taline ali zlin-dre, agresivna ali nečista voda.

Zaradi dobrega odvajanja toplote so tokovne gostote vodno hlajenih kablov nekako štirikrat tolikšne kot pri zračno hlajenih kablilih. Če označujemo razmere pri zračno hlajenih kablilih z indeksom 1, pri vodno hlajenih kablilih pa z indeksom 2, velja

$$\frac{g_2}{g_1} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{m_1}{m_2} = \frac{P_2}{P_1} = \alpha \doteq 4$$

pri čemer so:

- g — (A/mm²) — gostota toka
- S — (mm²) — presek kabla
- m — (kg) — masa vodljivega bakra
- P — (kW) — joulske izgube
- α — — razmerje tokovnih gostot

Vidimo, da potrebujemo pri vodno hlajenih kablilih približno 4 × manjšo maso vodljivega bakra kot pri zračno hlajenih kablilih, obenem pa dobimo zaradi povečane gostote 4 × tolikšne skupne izgube električnih moči. Kolikšne izgube nastopajo na srednje veliki obločni peči (30 kA, 6000 kg bakra) lahko dobimo iz enačbe:

$$P = v \cdot m \cdot g^2 = 2,5 \cdot 6000 \cdot 1,1^2 = 18,2 \text{ kW}$$

Za vodno hlajene kable pa bi bile razmere naslednje:

$$m_2 = \frac{m_1}{4} = \frac{6000}{4} = 1500 \text{ kg}$$

$$P_2 = 4 \cdot P_1 = 4 \cdot 18,2 = 73 \text{ kW}$$

Vidimo, da imamo dva parametra, ki sta bistveno različna pri obeh kabelskih sistemih, zato bo ekonomski izračun temeljil predvsem na stroških za zamenjave kabelskih dovodov in na stroških za izgubljeno električno energijo.

Zaradi jasnejšega pregleda ne bomo upoštevali stroškov za hladilno vodo, oziroma bomo stroške za hladilno vodo zajeli v stroških za izgubljeno električno energijo.

Če označimo z:

- S_1 — (din) — letni skupni stroški za kabelsko izvedbo z zračno hlajenimi kabli,
- S_2 — (din) — letni skupni stroški za kabelsko izvedbo z vodno hlajenimi kabli,
- c — (din/kWh) — cena električne energije pri obločni peči,
- t — (h) — obratovalne ure peči,
- m — (kg) — masa aktivnega dela kablov,
- a — (din/kg) — letna amortizacija kablov,
- α — — razmerje tokovnih gostot,

lahko pišemo, da so ustrezni skupni letni stroški:

$$S_1 = P_1 \cdot c \cdot t + m_1 \cdot a_1$$

$$S_2 = P_2 \cdot c \cdot t + m_2 \cdot a_2$$

Če stroške za obe različni kabelski izvedbi izenačimo, upoštevaje pri tem posledice razmerja tokovnih gostot α , in izrazimo a_2 kot najvišje dopustno letno amortizacijo za vodno hlajene kable, dobimo, da je:

$$a_2 = \alpha \cdot a_1 - \frac{P_1}{m_1} \cdot c \cdot t \cdot \alpha (\alpha - 1)$$

Če je pri tem nova konstanta

$$b = \frac{P_1}{m_1} \cdot c \cdot t = v \cdot g_1^2 \cdot c \cdot t \text{ (din/kg \cdot leto)}$$

in predstavlja letne stroške za električno energijo, zgubljeno v 1 kg bakra, dobimo končno

$$a_2 = \alpha a_1 - b \alpha (\alpha - 1)$$

Najvišja dopustna letna amortizacija za vodno hlajene kable je odvisna od višine letne amortizacije zračno hlajenih kablov ter od razmerja α , če je konstanta b , ki vsebuje obratovalne ure peči in ceno kWh stalnica.

Ekstrem za letno amortizacijo za vodno hlajene kable dobimo pri pogoju

$$\frac{\partial a_2}{\partial \alpha} = 0$$

Pogoj za ekstrem je izpolnjen pri

$$\alpha_m = \frac{a_1 + b}{2b}$$

Ekstremna letna amortizacija pri tem je

$$a_2 = \frac{(a_1 + b)^2}{4b}$$

Predn si bomo ogledali mejne, še gospodarne višine letne mortizacije za vodno hlajene fleksibilne kable, je potrebno podrobneje komentirati stalnico b:

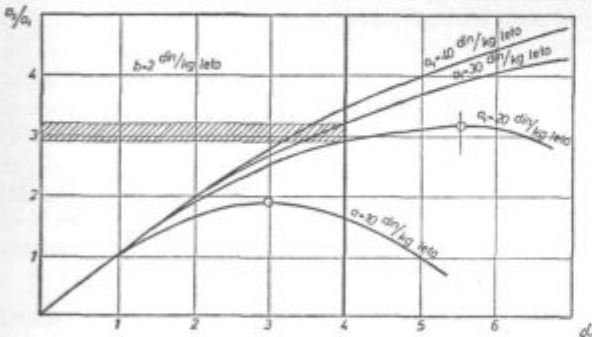
$$b = v \cdot g_1^2 \cdot c \cdot t$$

kjer predstavlja prvi del

$$v \cdot g_1^2 = 2,5 \cdot 1,1^2 = 3 \text{ (W/kg)}$$

specifične izgube v bakru zračno hlajenega fleksibila. V drugem delu pa predstavlja t obratovalne ure elektroobločne peči. To so seveda elektrotehnične obratovalne ure, oz. ure obratovanja z gostoto toka g v dovodnih kabljih in se zato bistveno razlikujejo od ur obratovanja peči.

Tudi faktor obremenjenosti elektroobločne peči, ki govori o srednji obremenitvi moči peči v času trajanja šarže in se giblje okrog 0,5, nam ne da pravih obratovalnih ur. Pri tem je treba upoštevati še dejstvo, da obratuje obločna peč pri nižjih močeh z relativno višjimi elektroodnimi tokovi. Predpostavimo torej ustrezni korelacijski

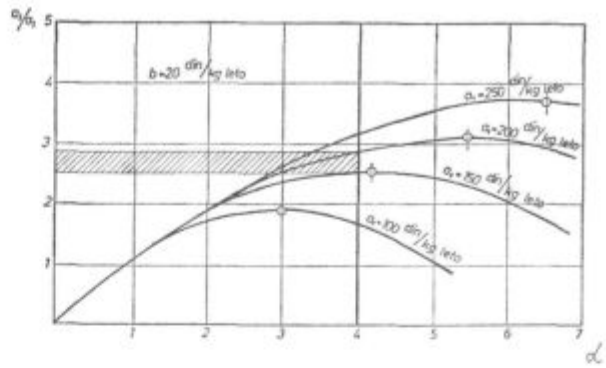
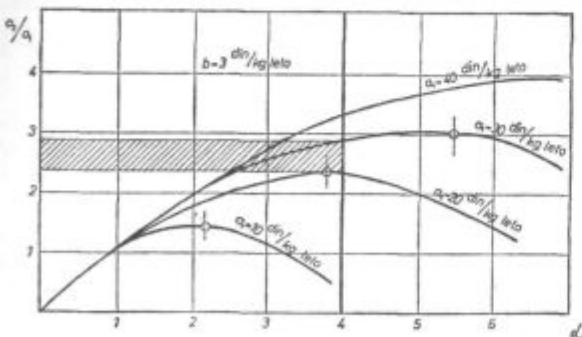


Slika 1

Odvisnost razmerij amortizacije a_2/a_1 od razmerja tokovnih gostot α (stanje 1971)

Fig. 1

Relationship between the a_2/a_1 amortization ratio and the ratio of current densities α (ln 1971)



Slika 2

Odvisnost razmerij amortizacije a_2/a_1 od razmerja tokovnih gostot α (stanje 1981)

Fig. 2

Relationship between the a_2/a_1 amortization ratio and the ratio of current densities α (ln 1981)

faktor za določitev pravih elektrotehničnih obratovalnih ur na 0,55. Pri tem dobimo višino teh ur iz letnih ur obratovanja obločne peči

$$t_e = 0,55 \cdot t_p = 0,55 \cdot 7500 = 4000 \text{ h}$$

Ceno kWh električne energije moramo upoštevati obremenjeno z vsemi transformatorskimi in transportnimi stroški do sekundarne strani pečnega transformatorja. Za izbrana leta dobimo za konstanto b vrednosti:

$$\text{Leto 1971 : } b = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,16 \cdot 4000 = 2 \text{ din/kg leto}$$

$$\text{Leto 1981 : } b = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,6 \cdot 4000 = 20 \text{ din/kg leto}$$

Ker različne obločne peči obratujejo v različnih obratovalnih režimih in z različno ceno električne energije, so v nadaljnih prikazih upoštevane tudi razmere za $b = 3$, oz. $b = 30$.

Na sl. 1 in sl. 2 je grafično prikazan odnos

$$a_2/a_1 = f(\alpha)$$

za različne parametre a_1 in b. Iz slik se da ugotoviti, kako je dopustna največja, še gospodarna letna amortizacija za vodno hlajene kable odvisna od njihove tokovne gostote pri različnih letnih amortizacijah za zračno hlajene kable pri razmerah cen v letih 1971 in 1981. Iz diagramov izhaja, da sme pri običajnem razmerju tokovnih gostot $\alpha = 4$ znašati razmerje letnih amortizacij med vodno hlajenimi kablji za $b = 2$, tj. v letu 1971 $a_2/a_1 = 3$. V

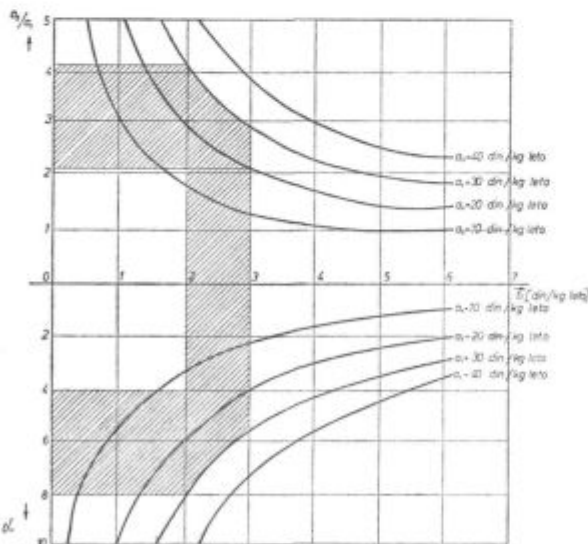
istem letu pade za $b = 3$ to razmerje na $a_2/a_1 = 2,5$, upoštevaje pri tem letno amortizacijo za zračno hlajene kable $a_1 = 20-30$ din/kg.

V letih do 1981 so se brutto cene električne energije proti letu 1971 povečale cca 10 krat. Konstanta b se giblje torej med $b = 20-30$. Cena bakrenih fleksibilov, upoštevajoč ostale stroške (vzdrževanje), pa se je v istem obdobju povečala okrog 6-krat in lahko računamo v letu 1981 z letno amortizacijo zračno hlajenih kablov med $a_1 = 150-200$ din/kg. Iz diagramov spoznamo, da opisani premik cen le delno spreminja razmerje om. dopustnih amortizacij

npr.: $b = 2$ na $b = 20$ pomeni $a_2/a_1 = 3,0$ na $a_2/a_1 = 2,5$

oziroma za : $b = 3$ na $b = 30$ pomeni $a_2/a_1 = 2,5$ na $a_2/a_1 = 2,0$.

Sprememba cen energije in bakra, ki smo ji bili priča v zadnjih desetih letih, zožuje gospodarno razmerje med letnimi amortizacijami od takratnih 2,5-3,0 na sedanje 2,0-2,5 ali za dobrih 20 %. Vodno hlajeni kabli bodo danes torej ekonomičnejši od zračno hlajenih kablov le takrat, ko bodo letni stroški zanje manjši od dvakratnih, oz. dvainpolkrat letnih stroškov za zračno hlajene kable. Račun upošteva seveda le stvarne letne tehnične amortizacije; za pravi ekonomski izračun je potrebno upoštevati še tehnično amortizacijsko dobo ali življenjsko dobo. Če ima torej vodno hlajeni kabel za 50 % daljšo življenjsko dobo od zračno hlajenega, sme biti $1,5 \times (2,0-2,5)$, tj. 3,0-3,75 dražji od zračno hlajenih kablov, pa bo vodno hlajena izvedba še vedno gospodarnejša.

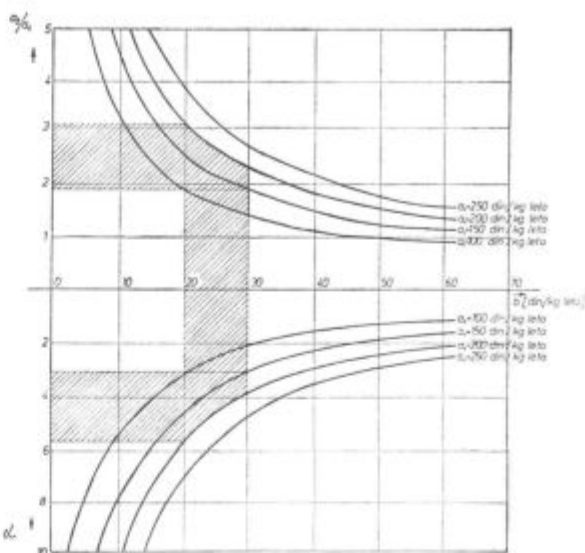


Slika 3

Odvisnost maksimalnih razmerij amortizacij a_2/a_1 in maksimalnih tokovnih gostot α od stroškov izgub energije b (stanje 1971)

Fig. 3

Relationship between the maximal a_2/a_1 amortization ratios and the maximal current densities α , and the costs of energy losses b (in 1971)



Slika 4

Odvisnost maksimalnih razmerij amortizacij a_2/a_1 in maksimalnih tokovnih gostot α od stroškov izgub energije b (stanje 1981)

Fig. 4

Relationship between the maximal a_2/a_1 amortization ratios and the maximal current densities α , and the costs of energy losses b (in 1981)

Na sl. 3 in 4 je prikazano razmerje med letnimi amortizacijami a_2/a_1 in konstanto b za ekstremno najvišjo amortizacijo a_2 , ki nastopa pri razmerju α max. Kot že povedano, predstavlja b specifične stroške energetskih izgub v kablju, zato je razumljiv potek krivulj, po katerih mora biti letna amortizacija za vodno hlajene kable nižja, če narastejo stroški za izgubljen energijo (večji b), kajti le tako bodo skupni stroški za vodno hlajene kable nižji od stroškov za zračno hlajene kable. S slik 3 in 4 tudi vidimo, da so pri vrednostih $b < 2$ (1971), oz. $b < 20$ (1981) amortizacijska razmerja visoka in se vrednosti hitro spreminjajo.

Dosedanje razpravljanje je imelo cilj ugotoviti še dopustno letno razmerje amortizacij med vodno hlajenimi in zračno hlajenimi fleksibilni obločne peči pri danih razmerjih tokovnih gostot (α) pri danih cenah za električno energijo in za baker v kablju. Rezultati so prikazani v spodnjem delu sl. 3 in 4. Pri razmerah cen iz leta 1971 bi smela biti najvišja razmerja tokovnih gostot med vodno hlajenimi in zračno hlajenimi kabli $\alpha = 4-8$, pri cenah iz leta 1981 pa med $\alpha = 3-6$. Spet vidimo odločujoči vpliv večje rasti cen energije na zahtevo po zmanjšanju tokovnih gostot vodno hlajenih kablov.

POVZETEK:

Prispevek obravnava gospodarnost vodno hlajenih fleksibilnih kablov na elektroobločni peči. Izračun ugotavlja, kako so najvišji še dopustni

letni stroški za tehnično amortizacijo teh kablov odvisni od amortizacije zračno hlajenih kablov in cen električne energije. Pri razmerju pripadajočih tokovnih gostot $\alpha = 4$ in cen iz leta 1971 sme letna amortizacija vodno hlajenih kablov doseči 2,5 do 3-kratno vrednost amortizacije zračno hlajenih kablov. Za leto 1981 se ta odnos zniža na 2,0 do

2,5-kratno vrednost, predvsem kot posledica hitrejše rasti cene električne energije. Prispevek obravnava tudi določitev optimalnega razmerja tokovnih gostot α na osnovi razmerja cen. V letu 1971 se je optimalno razmerje gibalo v razponu $\alpha = 4-8$, v letu 1981 pa se zožuje v razponu $\alpha = 3-6$.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Artikel wird die Wirtschaftlichkeit der flexiblen wassergekühlten Kabeln an Lichtbogenöfen behandelt. Die Rechnung gibt fest wie die höchsten noch zulässigen Jahresausgaben für die technische Abschreibung dieser Kabeln von der Abschreibung der luftgekühlten Kabeln und der Kosten für die elektrische Energie abhängig sind. Beim Verhältniss der zugehörigen Stromdichte $\alpha = 4$ und der Preise aus dem Jahre 1971 darf die Jahresabschreibung der wassergekühlten Kabeln 2.5 bis 3-maligen Wert der

Abschreibung der luftgekühlten Kabeln erreichen. Für das Jahr 1981 reduziert sich dieses Verhältniss auf 2.0 bis 2.5-maligen Wert, vor allem als die Folge der schnelleren Preiserhöhung für die elektrische Energie. Es wird auch die Bestimmung des optimalen Verhältnisses der Stromdichte α auf Grund der Preisverhältnisse behandelt. Im Jahre 1971 schwankte das optimale Verhältnis im Bereich $\alpha = 4-8$, im Jahre 1981 wird der Bereich enger und zwar $\alpha = 3-6$.

SUMMARY

The paper treats the economy of water-cooled flexible cables on the electric arc furnace. The evaluation shows the relationship between the maximal allowable yearly costs of technical amortization of those cables and the amortization of air-cooled cables, and the electric energy prices. According to the ratio of corresponding current densities $\alpha = 4$ and prices in 1971 the yearly amortization of water-cooled cables can reach the 2.5 to 3 fold value

of the amortization of air-cooled cables. In year 1981 this ratio is reduced to 2.0 to 2.5 fold value as the consequence of higher growth of electric energy prices. The paper discusses also the determination of the optimal ratio of current densities α based on the price ratio. In 1971 the optimal ratio varied between 4 and 8, but this interval is reduced to 3 to 6 in 1981.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена экономичность упругости кабелей в электрической дуговой печи охлажденных с водой. Расчетом определено несколько максимальные, еще допустимые годовые расходы на техническую амортизацию этих кабелей зависят от амортизации кабелей охлажденных с воздухом и от цены электрической энергии.

При соотношении соответствующих течений густоты $\alpha = 4$ и цен из года 1971 может годовая амортизация кабелей, охлажденных с водой достигнуть значение, которое составляет 2,5 до 3

раза значения амортизации кабелей, охлажденных с воздухом. В течении 1981 г. это отношение уменьшилось на 2,0 до 2,5 раза, главным образом вследствие быстрого повышения цен электрической энергии.

В статье также рассмотрены определения оптимального отношения течений густот на основании отношения цен.

В течении 1971 года это отношение колебалась в пределах $\alpha = 4-8$, между тем как в 1981 года оно сузилось в пределы $\alpha = 3-6$.