

DK 628.81:624.94

## Izračun toplotnih izgub pri skeletnih zgradbah

PETER NOVAK

Članek prikazuje prehod toplote pri stebrih v stavbah s skeletno konstrukcijo. Dodane so tabele in diagrami, ki omogočajo določanje toplotne prehodnosti  $k$  z upoštevanjem prestopa toplote na bokih stebrov. Izračuni so narejeni po dveh metodah. Po prvi je temperatura na površini stebrov konstantna, po drugi pa se temperatura na površini spreminja. Vmes je prikazana tudi napaka pri uporabi prve metode.

### 1. Uvod

Pri ogrevanju zgradb je treba poznati toplotne izgube. Te izgube sestojijo iz toplotnega toka skozi konstrukcijo, izgube toplote zaradi udora hladnega zraka in dodatkov zaradi nebesne usmerjenosti, načina obravnanja in izpostavljenosti prostora. Tu se omejimo samo na določanje toplotnega toka skozi betonske stebre skeletne zgradbe.

Pri homogeni večplastni steni je toplotni tok določljiv po enačbi

$$\Phi = k(t_1 - t_2) A$$

Toplotna prehodnost za večplastno steno pa je

$$k = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \sum_i \frac{b_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_2}}$$

Z znano konstrukcijo in temperaturami lahko izračunamo toplotni tok. Za analizo toplotnega toka v skeletni konstrukciji vzemimo navadno izvedbo. Med enakomerno razporejenimi stebri so montažni parapeti z dobrimi izolacijskimi lastnostmi. Nad parapetom imamo zvezno leseno ali aluminijasto okno, ki sega do stropa. Slika 1 kaže takšno konstrukcijo.

### 2. Sedanji način računanja

Po nemških normah DIN 4701 za določanje toplotnih izgub v zgradbah, po katerih je pri nas računana večina projektov, so toplotne izgube v eni osi takele:

$$\begin{aligned} \text{betonski steber: } & \Phi_s = a(h + h_2) \cdot k_b \cdot (t_1 - t_2) \\ \text{parapet: } & \Phi_p = l(h_1 + h_2) \cdot k_p \cdot (t_1 - t_2) \\ \text{okno: } & \Phi_o = l(h - h_1) \cdot k_o \cdot (t_1 - t_2) \end{aligned}$$

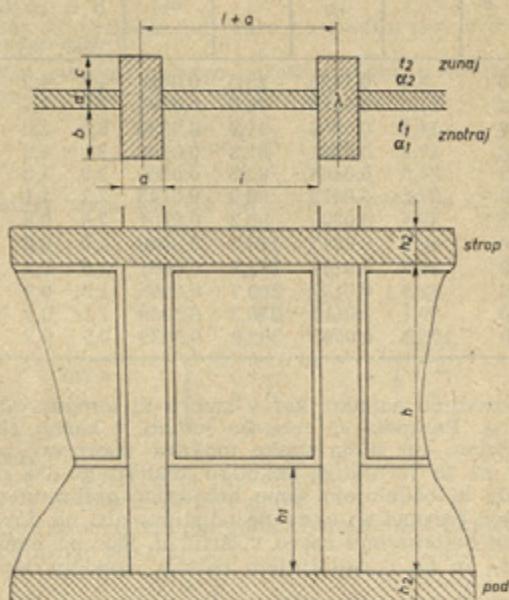
Skupna izguba v osi  $(l + a)$  znaša torej

$$\begin{aligned} \Phi_{l+a} &= \Phi_s + \Phi_p + \Phi_o \\ &= [a \cdot (h + h_2) \cdot k_b + l \cdot (h_1 + h_2) \cdot k_p + \\ &\quad + l \cdot (h - h_1) \cdot k_o] \cdot (t_1 - t_2) \end{aligned}$$

Pri parapetu in stebru je upoštevana etažna višina  $h + h_2$ . Prehod toplote skozi stebre določa toplotna prehodnost, ki je izračunana po enačbi

$$k_b = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{b + c + d}{\lambda} + \frac{1}{a_2}}$$

Tu je sedaj upoštevano, da pri prehodu toplote navzven sodeluje samo površina, ki je pravokotna na smer toplotnega toka. Dejansko pa prehaja toplota povsod, kjer se zrak dotika stene, torej tudi na površinah  $b \cdot h$  in  $c \cdot h$ . Stebri sestavljajo s steno ravno orebreno ploskev, pri kateri ni mogoče več uporabljati enostavne enačbe za toplotno prehodnost ravne večplastne stene. V članku sta obdelani dve metodi, po katerih lahko določamo dejansko toplotno prehodnost, kakor tudi njuna uporabnost.



Slika 1

### 3. Dejanski prehod toplote skozi stebre

Prehod toplote skozi betonski stebri-rebro določamo na dva načina:

- a) površinska temperatura stebra je konstantna vzdolž rebra,
- b) površinska temperatura stebra je funkcija njegove dolžine.

#### 3.a. Temperatura na površini rebra je konstantna

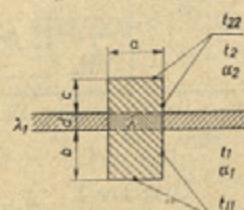
Ta predpostavka ni v skladu z dejanskim stanjem, omogoča pa zelo enostavno določati toplotno prehodnost. Tu ne upoštevamo sprememb toplotnega toka vzdolž rebra niti vpliva sevanja okolice na rebro (npr. sevanje boka radiatorja, ki je lahko med stebri, na stebri). Na sliki 2 je razvidna konstrukcija z ustreznimi označbami. Površinski temperaturi  $t_{11}$  in  $t_{22}$  sta konstantni. Tudi toplotni prestopnosti  $a_1$  in  $a_2$  se ne spremenjata. Pri danih temperaturah  $t_1$  (znotraj) in  $t_2$  (zunaj) imamo stacionaren toplotni tok, za katerega veljajo naslednje zakonitosti:

toplota, ki prestopa na stebre, je

$$\Phi = a_1 \cdot (a + 2b) \cdot h \cdot (t_1 - t_{11})$$

toplota, ki se prevaja skozi stebre v delu med parapetom,

$$\Phi = \frac{\lambda}{d} \cdot (a \cdot h) \cdot (t_{11} - t_{22})$$



Slika 2

TABELA 1

$\frac{b}{a} = \frac{c}{a}$	$a_{II}$	$\frac{1}{a_{II}}$	$a_{22}$	$\frac{1}{a_{22}}$	$d = 0,1 \text{ m } d/\lambda = 0,0667$								$d = 0,2 \text{ m } d/\lambda = 0,1335$							
					$k_b$				$k_{bI}$				$k_b$				$k_{bI}$			
					$b = c$	$b \neq c$	$c = 0$	$b = c$	$b = 0$	$c = 0$	$b = c$	$b \neq c$	$c = 0$	$b = c$	$b \neq c$	$c = 0$	$b = c$	$b = 0$	$c = 0$	
0,0	8,1	0,1235	23,3	0,0429	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
0,2	11,3	0,0882	32,6	0,0307	3,9	2,7	4,05	3,3	5,4	4,5	5,0	3,1	2,3	3,2	2,7	4,0	3,5	3,8		
0,4	14,6	0,0686	41,9	0,0239	3,5	2,0	3,9	2,7	6,2	4,6	5,6	2,8	1,8	3,1	2,3	4,4	3,6	4,1		
0,6	17,8	0,0561	51,3	0,0195	3,2	1,6	3,7	2,3	7,0	4,7	6,0	2,6	1,4	3,0	2,0	4,8	3,8	4,3		
0,8	21,5	0,0466	60,6	0,0165	2,9	1,3	3,5	2,0	7,7	4,8	6,4	2,5	1,2	2,8	1,8	5,1	3,7	4,5		
1,0	24,3	0,0412	69,9	0,0143	2,7	1,1	3,3	1,8	8,1	4,9	6,6	2,3	1,0	2,7	1,6	5,3	3,7	4,6		
1,5	32,4	0,0309	93,2	0,0107	2,3	0,8	3,0	1,4	9,1	5,0	7,1	2,0	0,8	2,5	1,3	5,7	3,7	4,8		
2,0	40,5	0,0247	116,5	0,0086	2,0	0,6	2,7	1,1	9,9	5,0	7,4	1,8	0,6	2,3	1,0	6,0	3,8	5,0		
3,0	56,7	0,0177	163,1	0,0061	1,6	0,4	2,3	0,8	10,9	5,1	7,8	1,4	0,4	2,0	0,8	6,4	3,8	5,2		
4,0	72,9	0,0137	209,7	0,0048	1,3	0,3	2,0	0,6	11,6	5,1	8,1	1,2	0,3	1,8	0,6	6,6	3,8	5,3		
5,0	89,1	0,0112	256,3	0,0039	1,1	0,3	1,8	0,5	12,1	5,1	8,2	1,0	0,3	1,6	0,5	6,7	3,8	5,3		
6,0	105,3	0,0095	302,9	0,0033	0,9	0,3	1,6	0,5	12,4	5,1	8,3	0,9	0,3	1,5	0,5	6,8	3,9	5,4		

Tu naredimo napako, ker v stebri ni temperature  $t_{II}$  niti  $t_{22}$ . Parapeta ni mogoče jemati v račun skupaj s stebrom, ker nima enake topotne upornosti, zaradi česar se ta izvajanja nekoliko razlikujejo od doslej znanih, ki obdelujejo samo homogeno otrebreno steno. Pri tem parapet in okno ne odvajata niti ne dovajata topote betonskemu rebru v širini  $d$ . Ker pa temperature  $t_{II}$  in  $t_{22}$  v nadaljnjem računu izpadeta, topotni tok pa je proporcionalen po Fourierovem zakonu  $\frac{\lambda}{d}$ , napaka ni groba. Topota, ki prestopa s stebrom, je

$$\Phi = a_2 \cdot (a + 2c) \cdot h \cdot (t_{22} - t_2)$$

Ce seštejemo gornje enačbe, dobimo:

$$t_I - t_2 = \Phi \left[ \frac{1}{a_I \cdot (a + 2b) \cdot h} + \frac{d}{\lambda} \cdot \frac{1}{a \cdot h} + \frac{1}{a_2 \cdot (a + 2c) \cdot h} \right]$$

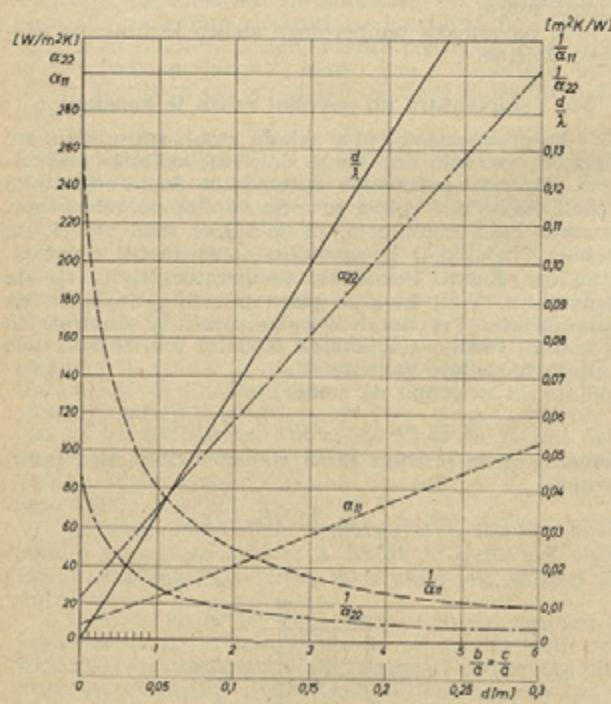


Diagram 1

Topotna prestopnost in upornost pri betonskem rebru  
 $a_I = 8,1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ,  $a_2 = 23,3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ,  $\lambda = 1,5 \text{ W/m K}$ .

Če izpostavimo  $\frac{1}{a \cdot h}$  — (čelnji prerez stebra) in preuredimo enačbo, dobimo

$$\frac{\Phi}{a \cdot h \cdot (t_I - t_2)} = \frac{1}{\frac{1}{a_I \cdot (1 + 2 \frac{b}{a})} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{a_2 \cdot (1 + 2 \frac{c}{a})}}$$

Po analogiji s  $\Phi = a \cdot h \cdot k_{bI} (t_I - t_2)$  za ravno steno je

$$k_{bI} = \frac{\Phi}{a \cdot h \cdot (t_I - t_2)} = \frac{1}{\frac{1}{a_I} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{a_2}}$$

pri čemer sta

$$a_{II} = a_I \left( 1 + 2 \frac{b}{a} \right) \quad a_{22} = a_2 \left( 1 + 2 \frac{c}{a} \right)$$

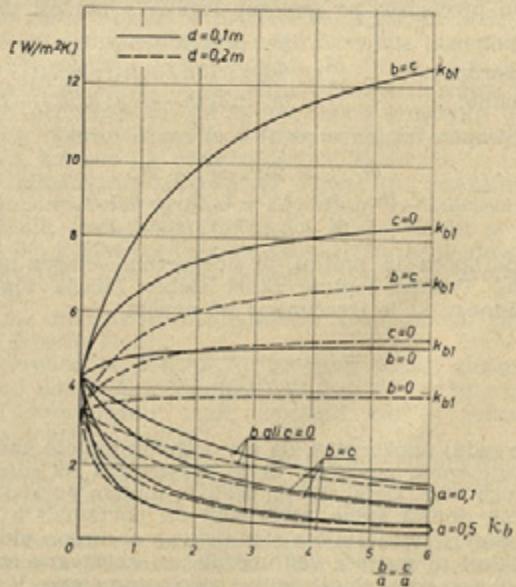


Diagram 2

Topotna prehodnost pri betonskem stebru  $k_{bI}$  in  $k_b$

V primeru, če sta  $b$  ali  $c$  enaka nič, tedaj steber ne gleda iz stene, je  $a_{II} = a_I$  ali  $a_{22} = a_2$ .

V tabeli 1 ter diagramih 1 in 2 so podane nekatere praktične vrednosti za  $a_{II}$ ,  $a_{22}$ ,  $k_b$  in  $k_{bI}$  v odvisnosti od geometrijskih parametrov. Za osnovo v računu so vzeti tile podatki:

$$a_I = 8,1 \text{ W/m}^2 \text{ K} (7 \text{ kcal/m}^2 \text{ hK})$$

$$a_2 = 23,3 \text{ W/m}^2 \text{ K} (20 \text{ kcal/m}^2 \text{ hK})$$

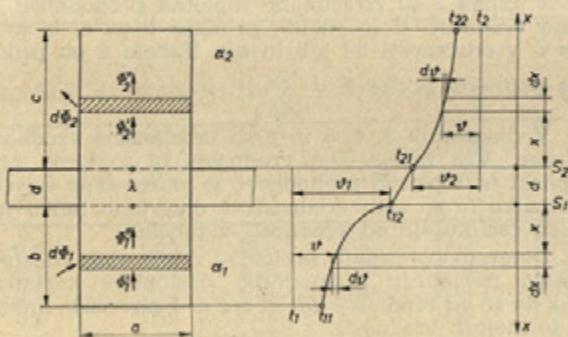
$$\lambda = 1,5 \text{ W/mK} (1,3 \text{ kcal/mhK}), \text{ ki velja pri gostoti betona } \rho = 2200 \text{ kg/m}^3.$$

Iz diagrama 2 se razločno vidi, da dosega novi  $k_{bI}$ , ki upošteva tudi prehod toplotne ob bokih, večkratno vrednost dosedaj uporabljenih vrednosti  $k_b$ . Prav tako lahko opazimo tudi večji vpliv stebera v notranjosti ( $c = 0$ ) kakor na zunanjih strani ( $b = 0$ ).

### 3 b. Površinska temperatura stebra je funkcija njegove dolžine

Ce površinska temperatura betonskega stebra ni stalna, tedaj izračunavamo toplotni tok po enačbah o prevodu toplotne po palici končne dolžine.

Oglejmo si splošno rešitev za prehod toplotne v betonskem stebru, ki ga na obeh straneh omejuje zrak različnih temperatur, loč pa stena debeline  $d$ , ki stebru niti ne odvaja niti ne dovaja toplotne! S tem si račun poenostavimo, napaka pa ni velika, ker je toplotna upornost ločilne stene velika v primerjavi z betonskim stebrom. S slike 3 je razvidno, da lahko nalogo rešimo, tako da jo razdelimo v dva dela. Prvi del ponazarja prestop toplotne iz notranjosti na steber in prevajanje do ravnine  $S_1$ . Drugi del prikazuje prevajanje od ravnine  $S_2$  in prestop toplotne s stebera na okolico. Oboje pa povezuje bilančna enačba za prevajanje toplotne med ravninama  $S_1$  in  $S_2$ .



Slika 3

Pri tem so  $\lambda$ ,  $a_I$ ,  $a_2$ ,  $t_1$  in  $t_2$  konstantni. Rebro je dovolj visoko, tako da je toplotni tok v smeri  $h$  enak 0. V teh pogojih in za sorazmerno dolgo rebro (majhno razmerje  $a/b$ ), imamo lahko ploskove v rebru kot izotermne. Harper in Brown sta ugotovila, da zanemarjanje temperaturnih gradientov  $dt/dh$  in  $dt/da$  tudi v sorazmerno debelem rebru povzroča napako velikostnega reda 1 %. S tako natančnostjo pa smo lahko povsem zadovoljni.

Po Fourierovem zakonu velja za prevajanje toplotne po homogeni steni:

$$\frac{\Phi}{A} = -\lambda \text{ grad } t$$

Toplotni tok  $d\Phi_I$ , ki prestopa na steber na elementarni dolžini  $dx$ , se po stebru tudi prevaja. Pri  $x$  izstopa iz prereza toplotni tok  $\Phi_I''$ , pri  $(x+dx)$  pa vstopa  $\Phi_I'$ . Pri stacionarnem toku velja naslednja bilanca:  $d\Phi_I + \Phi_I' - \Phi_I'' = 0$ . Po Fourieru pišemo tudi

$$\Phi_I'' = -\lambda(a, h) \cdot \frac{d\theta}{dx}$$

$$\Phi_I' = -\lambda(a, h) \frac{d}{dx} \left( \theta + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx \right)$$

Toplotna, ki prestopa na rebro na dolžini  $dx$ , je  $d\Phi_I = a_I \cdot 2h \cdot \partial \theta$ .

Kot rezultat dobimo karakteristično diferencialno enačbo za razporeditev temperatur

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} = \frac{2 \cdot h \cdot a_I}{a \cdot h \cdot \lambda} \cdot \theta$$

Ker lahko vzamemo, da sta  $a_I$  in  $\lambda$  neodvisni od  $x$ , pišemo izraz  $\frac{2a_I}{a \cdot \lambda} = m_I^2 = \text{konst}$ .

$$m_I = \pm \sqrt{\frac{2a_I}{a \cdot \lambda}}$$

ali

$$m_I b = \pm \sqrt{\frac{2 \cdot h \cdot b \cdot a_I}{a \cdot h \cdot \lambda}} = \pm \sqrt{\frac{A_p}{A_n}}$$

kjer sta

$$A_p = \text{površinska prevodnost}$$

$$A_n = \text{notranja prevodnost}.$$

Gornja enačba dobi obliko homogene diferencialne enačbe druge stopnje

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} = m_I^2 \theta.$$

Splošna rešitev enačbe je

$$\theta = C_{II} \cdot e^{m_I x} + C_{2I} \cdot e^{-m_I x}.$$

Konstanti  $C_{II}$  in  $C_{2I}$  dobimo z robnimi pogoji. Ko je  $x = 0$ , je  $\theta = \theta_I$  in  $\theta'_I = C_{II} + C_{2I}$ .

Pri  $x = b$  pa prestopa na rebro toplota

$$a_I(a, h) \theta_I = -\lambda(a, h) \left( \frac{d\theta}{dx} \right)_{x=b}$$

$$\left( \frac{d\theta}{dx} \right)_{x=b} = C_{II} \cdot m_I \cdot e^{m_I b} - C_{2I} \cdot m_I \cdot e^{-m_I b}$$

Iz obeh enačb dobimo konstanti  $C_{II}$  in  $C_{2I}$

$$C_{II} = \theta_I \cdot \frac{\left( 1 - \frac{a_I}{m_I \lambda} \right) \cdot e^{-m_I b}}{2 \left( \cosh m_I b + \frac{a_I}{m_I \lambda} \sinh m_I b \right)}$$

$$C_{2I} = \theta_I \cdot \frac{\left( 1 + \frac{a_I}{m_I \lambda} \right) \cdot e^{m_I b}}{2 \left( \cosh m_I b + \frac{a_I}{m_I \lambda} \sinh m_I b \right)}$$

Potek temperature vzdolž prvega dela rebra je

$$\theta = \theta_I \cdot \frac{\left( 1 - \frac{a_I}{m_I \lambda} \right) \cdot e^{-m_I b} \cdot e^{m_I x} + \left( 1 + \frac{a_I}{m_I \lambda} \right) \cdot e^{m_I b} \cdot e^{-m_I x}}{2 \left( \cosh m_I b + \frac{a_I}{m_I \lambda} \sinh m_I b \right)}$$

Toplotni tok, ki prestopa iz prostora na rebro, je enak toplotnemu toku, ki prihaja skozi ravnino  $S_1$  pri  $x = 0$

$$\Phi = -\lambda(a, h) \left( \frac{d\theta}{dx} \right)_{x=0}$$

$$\left( \frac{d\theta}{dx} \right)_{x=0} = (C_{II} - C_{2I}) m_I$$

Ce vstavimo vrednosti za  $C_{II}$  in  $C_{2I}$  v enačbo, dobimo po preureditvi

$$\Phi = \lambda m_1 (a \cdot h) \vartheta_I \frac{\frac{a_I}{m_1 \lambda} + \operatorname{th} m_1 b}{1 + \frac{a_I}{m_1 \lambda} \operatorname{th} m_1 b}$$

Rešitev za drugi del stebra od ravnine  $S_2$  dalje je analogna. Z

$$\frac{2}{a} \frac{a_2}{\lambda} = m_2^2 \text{ in } m_2 = \pm \sqrt{\frac{2 a_2}{a \cdot \lambda}}$$

dobimo za topotni tok, ki prestopa s stebra na okolico:

$$\Phi = \lambda m_2 (a \cdot h) \vartheta_2 \frac{\frac{a_2}{m_2 \lambda} + \operatorname{th} m_2 c}{1 + \frac{a_2}{m_2 \lambda} \operatorname{th} m_2 c}$$

Temperatura vzdolž drugega dela stebra pa poteka po enačbi

$$\vartheta = \vartheta_2 \frac{\left(1 - \frac{a_2}{m_2 \lambda}\right) e^{-m_2 c} \cdot e^{m_2 x} + \left(1 + \frac{a_2}{m_2 \lambda}\right) e^{m_2 c} \cdot e^{-m_2 x}}{2 \left(\operatorname{ch} m_2 c + \frac{a_2}{m_2 \lambda} \operatorname{sh} m_2 c\right)}$$

Topotni tok, ki se prevaja med ravninama  $S_1$  in  $S_2$ , je

$$\Phi = \frac{\lambda}{d} (a \cdot h) (t_{12} - t_{21})$$

Topotni tok, ki prehaja skozi rebro, je enak tudi

$$\Phi = a \cdot h \cdot k_{b2} (t_1 - t_2)$$

Izrazimo sedaj temperaturne diference  $\vartheta$  iz enačb za topotni tok:

$$\vartheta_I = t_1 - t_{12} = \frac{\Phi}{\lambda \cdot m_1 \cdot (a \cdot h) \cdot \left( \frac{a_I}{m_1 \lambda} + \operatorname{th} m_1 b \right)} \\ 1 + \frac{a_I}{m_1 \lambda} \operatorname{th} m_1 b$$

$$t_{12} - t_{21} = \frac{\Phi}{\frac{\lambda}{d} \cdot a \cdot h}$$

$$\vartheta_2 = t_{21} - t_2 = \frac{\Phi}{\lambda \cdot m_2 \cdot (a \cdot h) \cdot \left( \frac{a_2}{m_2 \lambda} + \operatorname{th} m_2 c \right)} \\ 1 + \frac{a_2}{m_2 \lambda} \operatorname{th} m_2 c$$

S seštetjem gornjih enačb dobimo

$$t_1 - t_2 = \frac{\Phi}{a \cdot h} \cdot \left( \frac{1}{\frac{a_I}{m_1 \lambda} + \frac{a_2}{m_2 \lambda} \operatorname{th} m_1 b} + \frac{d}{\lambda} + \right. \\ \left. + \frac{1}{\frac{a_2}{m_2 \lambda} + \operatorname{th} m_2 c} \right)$$

Enako lahko pišemo, da je

$$t_1 - t_2 = \frac{\Phi}{a \cdot h} \cdot \frac{1}{k_{b2}}$$

Po primerjanju gornjih enačb lahko zapišemo, da je

$$\frac{1}{k_{b2}} = \frac{1}{a'_{II}} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{a'_{22}}, \text{ pri čemer pomenijo}$$

$$a'_{II} = \frac{a_I + \lambda m_1 \cdot \operatorname{th} m_1 b}{1 + \frac{a_I}{m_1 \lambda} \operatorname{th} m_1 b}$$

$$\text{ali z vstavitvijo } m_1 = \pm \sqrt{\frac{2 \cdot a_I}{a \cdot \lambda}}$$

$$a'_{II} = \frac{a_I + \sqrt{\frac{2 \cdot a_I \cdot \lambda}{a}} \operatorname{th} \sqrt{\frac{2 b^2}{a} \cdot \frac{a_I}{\lambda}}}{1 + \sqrt{\frac{a}{2} \cdot \frac{a_I}{\lambda}} \operatorname{th} \sqrt{\frac{2 b^2}{a} \cdot \frac{a_I}{\lambda}}}$$

$$a'_{22} = \frac{a_2 + \lambda m_2 \cdot \operatorname{th} m_2 c}{1 + \frac{a_2}{m_2 \lambda} \operatorname{th} m_2 c}$$

$$\text{ali z vstavitvijo } m_2 = \pm \sqrt{\frac{2 \cdot a_2}{a \cdot \lambda}}$$

$$a'_{22} = \frac{a_2 + \sqrt{\frac{2 \cdot a_2 \cdot \lambda}{a}} \operatorname{th} \sqrt{\frac{2 c^2}{a} \cdot \frac{a_2}{\lambda}}}{1 + \sqrt{\frac{a}{2} \cdot \frac{a_2}{\lambda}} \operatorname{th} \sqrt{\frac{2 c^2}{a} \cdot \frac{a_2}{\lambda}}}$$

Za  $b = 0$  je  $a'_{II} = a_I$

za  $c = 0$  je  $a'_{22} = a_2$

za  $c = \infty$  je  $a'_{II} = a_I$  in  $a'_{22} = a_2$ .

V tabeli 2 so izračunane vrednosti za  $a'_{II}$ ,  $a'_{22}$  za razne vrednosti  $a/b$ ,  $a/c$  in  $a$ .

V tabeli 3 so izračunane topotne prehodnosti za razne vrednosti  $d$  in mejne primere  $b = c$ ,  $b = 0$ ,  $c = 0$  v odvisnosti od  $a/b$  in  $a/c$ . Tabela 4 pa prikazuje popravni faktor  $r = \frac{k_{b2}}{k_b}$

V diagramih 3, 4, 5 in 6 so tabelarične vrednosti izrisane. Vse tabelarične vrednosti za topotno prestopnost in topotno prehodnost so zaokrožene na eno decimalko in se zato vrednosti v diagramu lahko nekoliko razlikujejo od vrednosti v tabelah.

Diagram popravnih faktorjev  $r$  je zaradi enostavnega računanja in majhnih odstopkov korigiran tako, da se od vrednosti  $a/b = a/c = 1$  povečuje linearno do mejnih vrednosti.

Ce analiziramo dobljene izraze za  $a'_{II}$  in  $a'_{22}$ , vidimo, da obstaja pri nekem konstantnem  $a$  natanko določena vrednost za  $b$  ali  $c$ , do katere topotna prestopnost narašča, pri kateri je konstantna in od katere dalje se manjša. Dokaz za to dobimo, ce poiščemo odvod  $\frac{d a'_{II}}{d b}$  ali  $\frac{d a'_{22}}{d c}$ .

Rezultat odvajanja je  $\frac{d a'_{II}}{d b} = \frac{\lambda m_1 - \frac{a'_{II}^2}{m_1 \lambda}}{\left( \operatorname{ch} m_1 b + \frac{a_I}{m_1 \lambda} \operatorname{sh} m_1 b \right)^2}$

Ce prvi odvod izenačimo z 0 in poiščemo korene enačbe, dobimo maksimum ozir. minimum. Vrednost izraza je enaka 0, ce je  $\lambda m_1 - \frac{a'_{II}^2}{m_1 \lambda} = 0$ .

Iz tega pa izhaja:

$$\frac{\lambda^2 \cdot m_1^2}{a'_{II}^2} = 1; \text{ ce za } m_1^2 \text{ vstavimo } \frac{2 a'_U}{a \cdot \lambda} \text{ in izraz}$$

TABELA 2

$\frac{b}{a} = \frac{c}{a}$	$a = 0,1\text{ m}$			$a = 0,2\text{ m}$			$a = 0,3\text{ m}$			$a = 0,4\text{ m}$			$a = 0,5\text{ m}$		
	$b$	$a'_{II}$	$a'_{22}$												
0,0	0,0	8,1	23,3	0,0	8,1	23,3	0,0	8,1	23,3	0,0	8,1	23,3	0,0	8,1	23,3
0,2	0,02	10,3	24,8	0,04	9,3	20,3	0,06	8,6	17,2	0,8	7,9	15,1	0,10	6,4	13,5
0,4	0,04	11,7	25,7	0,08	10,1	19,5	0,12	8,8	16,1	0,6	7,9	13,6	0,20	5,8	12,1
0,6	0,06	13,0	26,1	0,12	10,6	18,9	0,18	8,9	15,5	0,24	7,8	13,3	0,30	5,5	11,9
0,8	0,08	13,8	26,4	0,16	10,7	18,7	0,24	8,9	15,3	0,32	7,8	13,2	0,40	5,4	11,8
1,0	0,10	14,4	26,4	0,20	10,8	18,7	0,30	9,0	15,3	0,40	7,8	13,2	0,50	5,4	11,8
1,5	0,15	15,2	26,5	0,30	11,0	18,7	0,45	9,0	15,3	0,60	7,8	13,2	0,75	5,4	11,8
2,0	0,20	15,5	26,5	0,40	11,1	18,7	0,60	9,0	15,3	0,80	7,8	13,2	1,00	5,4	11,8
3,0	0,30	15,6	26,5	0,60	11,1	18,7	0,90	9,0	15,3	1,20	7,8	13,2	1,50	5,4	11,8
4,0	0,40	15,6	26,5	0,80	11,1	18,7	1,20	9,0	15,3	1,60	7,8	13,2	2,00	5,4	11,8
5,0	0,50	15,6	26,5	1,00	11,1	18,7	1,50	9,0	15,3	2,00	7,8	13,2	2,50	5,4	11,8
6,0	0,60	15,6	26,5	1,20	11,1	18,7	1,80	9,0	15,3	2,40	7,8	13,2	3,00	5,4	11,8

TABELA 3

$\frac{b}{a} = \frac{c}{a}$	$k_{b2}$ za $d = 0,1\text{ m}$						$d/\lambda = 0,0667$						$k_{b2}$ za $d = 0,2\text{ m}$						$d/\lambda = 0,1335$								
	$b = c$		$b = o$		$c = o$		$b = c$		$b = o$		$c = o$		$b = c$		$b = o$		$c = o$		$b = c$		$b = o$		$c = o$				
	$a = 0,1$	$a = 0,5$	$a = 0,1$	$a = 0,5$	$a = 0,1$	$a = 0,5$	$a = 0,1$	$a = 0,5$	$a = 0,1$	$a = 0,5$	$a = 0,1$	$a = 0,5$	$a = 0,1$	$a = 0,5$	$a = 0,1$	$a = 0,5$	$a = 0,1$	$a = 0,5$	$a = 0,1$	$a = 0,5$	$a = 0,1$	$a = 0,5$	$a = 0,1$	$a = 0,5$			
0,0	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	3,7	3,7	2,7	3,4	3,0	3,7	3,0	3,7	3,0	3,7	3,0	3,7	3,0	3,7	3,0	3,7	3,0	3,7		
0,2	4,9	3,3	4,3	3,8	4,8	3,7	3,7	3,7	3,7	2,7	3,4	3,0	3,7	3,0	3,7	3,0	3,7	3,0	3,7	3,0	3,7	3,0	3,7	3,0	3,7		
0,4	5,2	3,1	4,4	3,7	5,1	3,5	3,9	3,9	2,6	3,4	3,0	3,8	3,0	3,8	3,0	3,8	3,0	3,8	3,0	3,8	3,0	3,8	3,0	3,8	3,0	3,8	
0,6	5,5	3,0	4,4	3,6	5,4	3,4	4,0	2,5	3,4	2,5	3,4	2,9	3,9	2,9	3,9	2,9	3,9	2,9	3,9	2,9	3,9	2,9	3,9	2,9	3,9	2,9	3,9
0,8	5,6	3,0	4,4	3,6	5,5	3,4	4,1	2,5	3,4	2,5	3,4	2,9	4,0	2,9	4,0	2,9	4,0	2,9	4,0	2,9	4,0	2,9	4,0	2,9	4,0	2,9	4,0
1,0	5,7	3,0	4,4	3,6	5,6	3,4	4,2	2,5	3,4	2,5	3,4	2,9	4,1	2,9	4,1	2,9	4,1	2,9	4,1	2,9	4,1	2,9	4,1	2,9	4,1	2,9	4,1
1,5	5,9	3,0	4,4	3,6	5,7	3,4	4,2	2,5	3,4	2,5	3,4	2,9	4,1	2,9	4,1	2,9	4,1	2,9	4,1	2,9	4,1	2,9	4,1	2,9	4,1	2,9	4,1
2,0	5,9	3,0	4,4	3,6	5,7	3,4	4,3	2,5	3,4	2,5	3,4	2,9	4,2	2,9	4,2	2,9	4,2	2,9	4,2	2,9	4,2	2,9	4,2	2,9	4,2	2,9	4,2
3,0	6,0	3,0	4,4	3,6	5,8	3,4	4,3	2,5	3,4	2,5	3,4	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3
4,0	6,0	3,0	4,4	3,6	5,8	3,4	4,3	2,5	3,4	2,5	3,4	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3
5,0	6,0	3,0	4,4	3,6	5,8	3,4	4,3	2,5	3,4	2,5	3,4	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3
6,0	6,0	3,0	4,4	3,6	5,8	3,4	4,3	2,5	3,4	2,5	3,4	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3	2,9	4,3

TABELA 4. Popravni faktor  $r = k_{b2}/k_b$ 

$\frac{b}{a} = \frac{c}{a}$	$a = 0,1\text{ m}$						$a = 0,5\text{ m}$					
	$k_{b2}/k_b = r$ za $d = 0,1\text{ m}$		$k_{b2}/k_b = r$ za $d = 0,2\text{ m}$		$k_{b2}/k_b = r$ za $d = 0,1\text{ m}$		$k_{b2}/k_b = r$ za $d = 0,2\text{ m}$		$k_{b2}/k_b = r$ za $d = 0,1\text{ m}$		$k_{b2}/k_b = r$ za $d = 0,2\text{ m}$	
	$b = o$	$c = o$	$b = c$	$c = o$	$b = o$	$c = o$	$b = o$	$c = o$	$b = c$	$c = o$	$b = c$	$c = o$
0,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,2	1,05	1,19	1,26	1,06	1,16	1,19	1,15	1,12	1,24	1,11	1,11	1,17
0,4	1,10	1,31	1,49	1,10	1,23	1,39	1,37	1,20	1,55	1,31	1,26	1,45
0,6	1,16	1,46	1,72	1,13	1,30	1,54	1,57	1,47	1,88	1,45	1,40	1,78
0,8	1,22	1,57	1,93	1,22	1,43	1,64	1,80	1,70	2,29	1,61	1,55	2,08
1,0	1,30	1,70	2,13	1,26	1,52	1,83	2,00	1,89	2,70	1,82	1,75	2,50
1,5	1,43	1,90	2,56	1,36	1,64	2,10	2,57	2,43	3,72	2,23	2,16	3,12
2,0	1,59	2,12	2,97	1,48	1,83	2,39	3,27	3,09	4,95	2,90	2,80	4,17
3,0	1,86	2,52	3,72	1,70	2,10	3,17	4,50	4,26	7,42	3,63	3,50	6,25
4,0	2,12	2,90	4,58	1,89	2,34	3,58	6,00	5,68	10,00	4,84	4,67	8,34
5,0	2,38	3,22	5,40	2,13	2,62	4,30	7,20	6,80	10,00	5,80	5,60	8,34
6,0	2,68	3,63	6,22	2,27	2,80	4,77	7,20	6,80	10,00	5,80	5,60	8,34

obrnemo, dobimo optimalno Nusseltovo število

$$Nu_{opt} = \frac{a'_{II} a}{2 \lambda} = 1$$

Iz zadnje enačbe izhaja, da ima rebro pri  $Nu < 1$  hladilno sposobnost, pri  $Nu > 1$  pa povečuje izolacijo.

Ce pišemo zadnjo enačbo v obliki  $a'_{II} \geq \frac{2 \lambda}{a}$ , tedaj vidimo, da vselej, kadar je notranja topotna prevodnost manjša od topotne prestopnosti, rebro ne odvaja topote iz prostora in nasprotno; kadar je notranja

topotna prevodnost večja od  $a'_{II}$ , rebro pospešeno odvaja topoto iz prostora. Analogno velja za  $a'_{22}$ , kadar dobimo, da je

$$Nu_{opt} = \frac{a'_{22} a}{2 \lambda} = 1$$

Tudi tu pišemo enačbo v obliki  $a'_{22} \leq \frac{2 \lambda}{a}$ .

Kadar je notranja topotna prevodnost  $\frac{2 \lambda}{a}$  večja od topotne prestopnosti  $a'_{22}$ , rebro ohlaja prostor, kadar je manjša, pa je izolator.

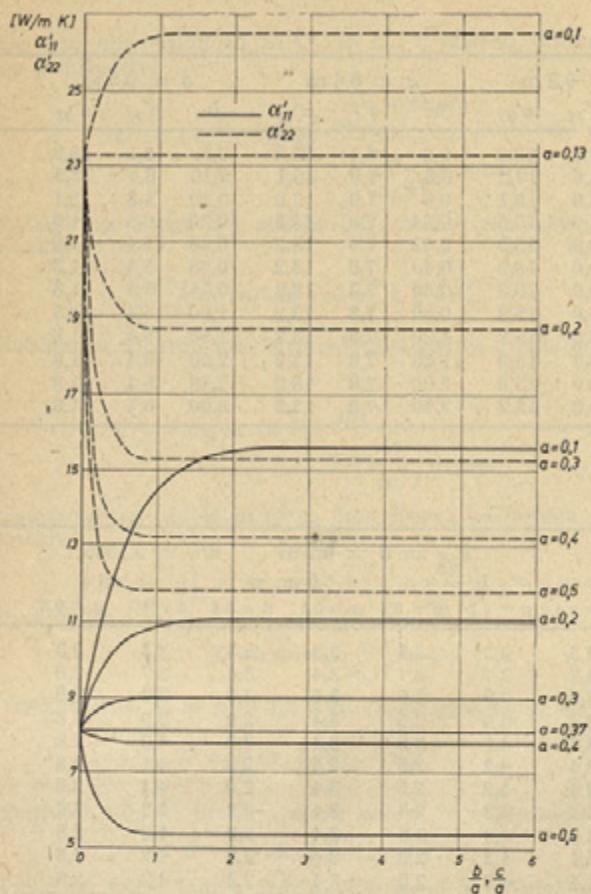


Diagram 3

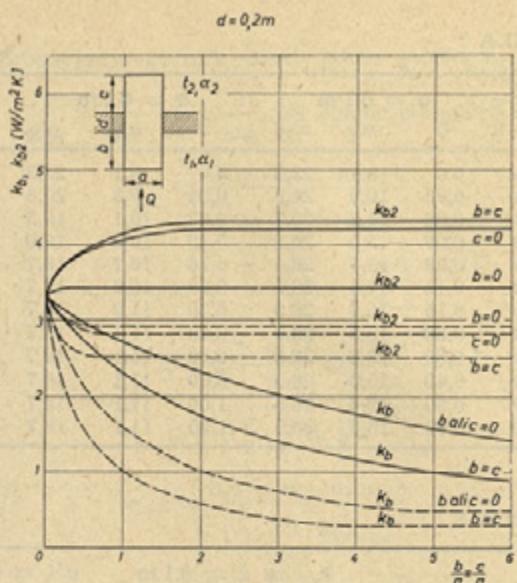


Diagram 5

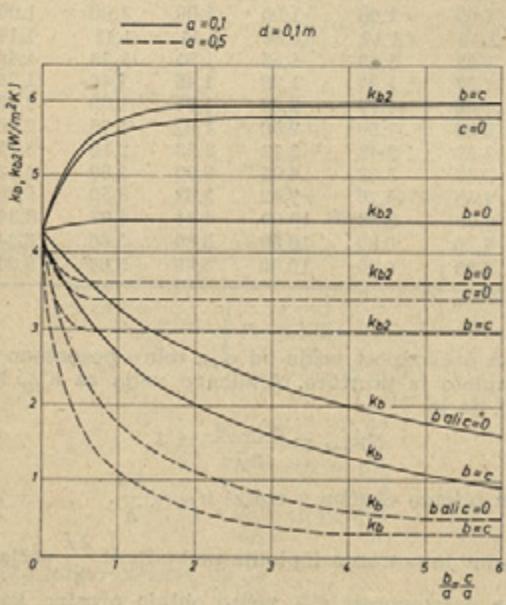


Diagram 4

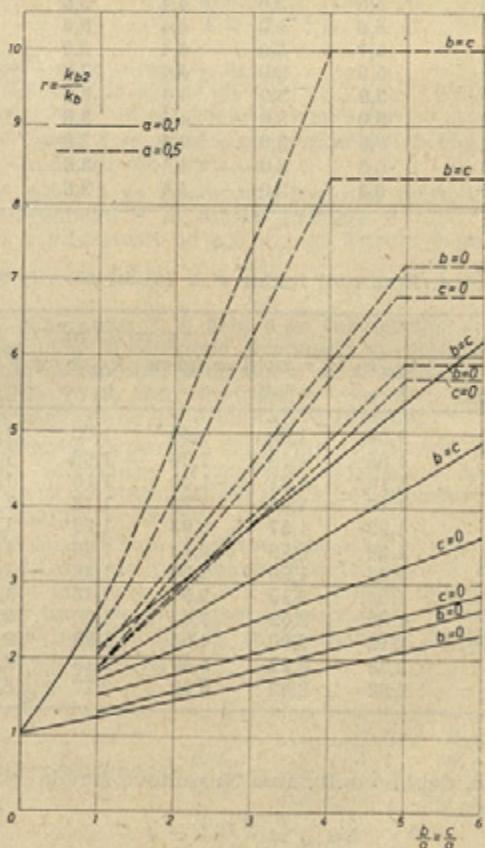


Diagram 6

V diagramu 3 sta narisani tudi liniji za  $\alpha'_{11}$  in  $\alpha'_{22}$  v odvisnosti od  $b/a = c/a$ , za kateri je pri konstantnem  $a$  toplotna prestopnost stebra enaka toplotni prestopnosti ravne stene.

#### 4. Sklep

Če primerjamo obe metodi, po katerih smo izračunali toplotno prehodnost za betonski steber, vidimo, da daje prva metoda občutno prevelike vrednosti, saj se toplotni prestopnosti  $\alpha'_{11}$  in  $\alpha'_{22}$  povečujejo proporcionalno z razmerjem  $b/a$  oziroma  $c/a$ . Prva metoda je uporabna samo za zelo majhna razmerja  $b/a$  in  $c/a$ .

Po drugi metodi pa smo prišli do realnejših rezultatov, ki jih lahko koristno uporabimo v praksi. Toplotna prehodnost pri stebru se močno povečuje z razmerjem  $b/a$  oziroma  $c/a$  in dosega v ekstremnem računskem primeru celo desetkratno vrednost normalno sedaj uporabljenih vrednosti.

Toplotna prehodnost v računih je reducirana na čeli prerez stebra; ker ta sestavlja samo del celotne površine, skozi katero izstopa toplota, to povečanje pri celotnih toplotnih izgubah ni tako izdatno.

Na primer za $h = 2,5 \text{ m}$	$k_b = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$
$h_1 = 1 \text{ m}$	$k_a = 2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$
$h_2 = 0,4 \text{ m}$	$k_b = 1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$
$t = 1,2$	$k_{b2} = 4,1 \text{ W/m}^2\text{K}$
$a = 0,3 \text{ m}$	
$b = c = 0,25 \text{ m}$	
$d = 0,1 \text{ m}$	

dobimo, da je skupna izguba v osi  $l + a$  po starem načinu računanja enaka

$$\Phi(l+a) = 7,93(t_1 - t_2)$$

Po novem

$$\Phi(l+a) = 9,93(t_1 - t_2)$$

$$\frac{\Phi(l+a)}{\Phi(l+a)} = \frac{9,93}{7,93} = 1,25$$

Toplotni tok se potem takem povečuje za približno 25 % v eni osi, kar je že vredno upoštevati, saj znašajo približno toliko tudi maksimalno možni dodatki pri računu toplotnih izgub.

Iz diagrama 3 se tudi zelo jasno vidi, kako dolgo vpliva orehenje v notranjosti.  $\alpha'_{11}$  se povečuje v odvisnosti od  $a$  in  $b$  samo do neke vrednosti  $b/a$ , potem pa je konstantna. To pomeni: če bi betonski steber spremenili v predelno steno prostora, se dodatno ohlajanje prostora zaradi take predelne stene povečuje samo do meje, dokler se povečuje  $\alpha'_{11}$ , to je v območju  $b/a = 1$  do 2. za  $a = 0,5 \dots 0,1 \text{ m}$ . Glede na to je tudi utemeljeno, da v novih domačih normah za računanje toplotnih izgub upoštevamo dodatno ohlajanje prostorov po tako imenovanih toplotnih mostovih, to je po predelnih stenah, ki so neposredno povezane z zunanjim obodom stavbe. Seveda je omenjeni račun za  $\alpha'_{11}$  izdelan za železobeton in bi ga bilo treba ustreznno prirediti še za druge materiale.

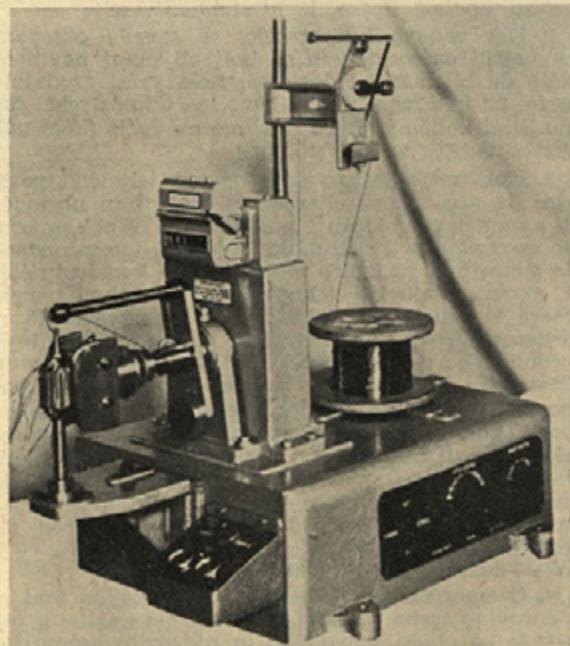
Avtorjev naslov: dipl. ing. Peter Novak,  
Fakulteta za strojništvo  
univerze v Ljubljani

## P O R O Č I L A

DK 621.313.13

### NAVIJALNI STROJI ZA MOTORJE

Midland Dynamo Co Ltd. izdeluje vrsto navijalnih strojev, ki so primerni za navijanje ali previjanje rotorjev na majhnih elektromotorjih za gospodinjstva, prenosna orodja ali za pomožne avtomobilske naprave — grelnike, otiralke šip idr.

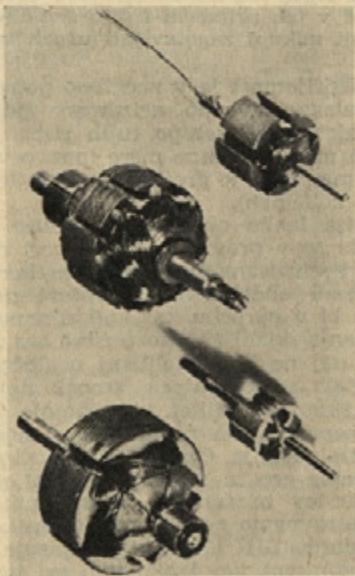


Sl. 1. Navijalni stroj Quickway®, model 2 B MK II

Na izbiro so trije modeli iz serije »Quickway«. Model 2 B MK II je primeren za popravljalnice, v katerih previjajo različne velikosti rotorjev, model 2 C MK II je primeren za serijsko izdelovanje, avtomati-

zirani navijalni stroj 2 D pa je namenjen za velikoserijsko izdelovanje.

Med navijanjem je rotor vpet med konicama, navijalni mehanizem pa žico trdno navija v utore. Tuljava z žico je položena na vrtljivo mizo in se kratko malo izmenja. Napetost navijane žice se nastavlja avtomatično s posebno zavoro. Število navojev se nastavlja z mehaničnim števecem. Stroj se ustavi, ko je doseženo pravo število navojev.



Sl. 2. Primeri rotorjev majhnih elektromotorjev

(Podrobnejše informacije dobite pri: N. Hunter, Midland Dynamo Co, Ltd, 64 Belgrave Gate, Leicester, Great Britain.)

Z. S.