

# Načrtovanje visokonapetostne dušilke

Mislav Trbušič, Marko Jesenik in Anton Hamler

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija

E-pošta: [mislav.trbusic@um.si](mailto:mislav.trbusic@um.si)

## Design of HV Shunt Reactor

**Abstract.** The article deals with a single-phase air-gapped core shunt reactor design. The principal approach to determining crucial constructions' parameters is described in detail.

## 1 Uvod

Visokonapetostne (VN) dušilke, so elektromagnetne naprave, ki se v elektroenergetskem sistemu uporabljajo za omejevanje kratkostičnih tokov ali pa za kompenzacijo jalove moči kapacitivnega značaja, ki jo povzročajo kabli, foto-napetostne elektrarne, visokonapetostni daljnovodi ali pa podobremenjeni transformatorji. Konstrukcijo VN dušilk z magnetnim jedrom delimo na dva tipa in sicer, na jedrnega in plaščnega. V članku bo predstavljen pristop k načrtovanju jedrnega tipa VN dušilke z razporejenimi zračnimi režami. Taka konstrukcijska rešitev se uporablja za dušilke namenjene kompenzaciji jalove moči, njihova korist za sistem pa je večkratna, saj omejujejo prenapetostna nihanja in izboljšajo prenosno učinkovitost omrežja. S tega stališča je pri načrtovanju dušilke potrebno izbrati takšno konstrukcijsko rešitev, ki v svoji pričakovani življenjski dobi povzroča najmanjše stroške. V uporabi so tudi zračne dušilke, torej take, ki ne vsebujejo feromagnetnega jedra in se praviloma uporabljajo za omejevanje kratkostičnih tokov, vendar v članku ne bodo obravnavane [1,2].

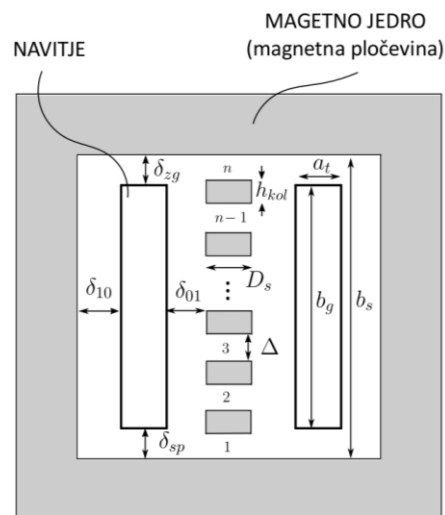
Študijski primer bo narejen za primer enofazne VN dušilke nazivne moči 5 MVar in nazivne napetosti 110 kV. Pri tem bo privzeto, da je dušilka neprekinjeno v obratovanju in da nima možnosti prilagajanja napetostnim spremembam oz., da nima regulacijskega navitja.

Članek je predvsem namenjen študentom na smeri močnostna elektrotehnika, ki se tekom študija bolj podrobno seznanjajo z načrtovanjem visokonapetostnih elektromagnetnih naprav in projektantom začetnikom.

## 2 Osnovni izračun VN dušilke

Načrtovanje dušilke se izvaja na podoben način kot načrtovanje energetskih transformatorjev. Pri električnem in toplotnem izračunu dušilke lahko uporabimo praktično enake enačbe oz. pristop, kot pri izračunu energetskega transformatorja, le ovrednotenje dodatnih električnih izgub, ki nastanejo kot posledica robnega pojava magnetnega polja v zračnih režah stebra, je potrebno upoštevati s primernim dodatnim

faktorjem [3]. Zaradi konstrukcije z zračnimi režami, bo reluktanca glavne magnetne poti določena s skupno debelino zračnih rež, ki jo lahko izračunamo s pomočjo Amperovega zakona. Če na tem mestu potegnemo vzporednico, je vpliv zračnih rež na konstrukcijo dušilke analogen vplivu kratkostične napetosti pri transformatorju.



Slika 1: Enofazna dušilka jedrnega tipa z zračnimi režami v stebri in pripadajočimi geometrijskimi oznakami

Ker je namen tega članka seznaniti bralca z osnovnim postopkom izračuna VN dušilke z analitičnimi formulami, bodo nekateri ključni parametri, kot so izolacijske razdalje med navitjem in ozemljenimi deli, polnilni faktor navitja in faktor dodatnih izgub določeni zgolj približno na podlagi izkušenj avtorjev teksta. Bolj natančna obravnava omenjenih parametrov in njihova določitev presega okvirje tega dela, bralec pa lahko več o tem izve v literaturi [4,5].

Kakorkoli, konstrukcijo dušilke v osnovi določajo trije parametri in sicer; ovojna napetost  $u_{ov}$ , gostota magnetnega pretoka v jedru  $B$  in gostota električnega toka v navitju  $g$ . Z variranjem teh treh parametrov in ob upoštevanju tehnoloških ter ekonomskih omejitev lahko dokaj enostavno določimo optimlano konstrukcijo.

V nadaljevanju je podan celosten postopek določitve osnovnih dimenzij VN dušilke. Praviloma se le te določijo na podlagi nazivne moči  $Q_n$ , nazivne napetosti  $U_n$  in predpostavljene gostote magnetnega pretoka v stebri  $B$  ter tokovne gostote v navitju  $g$  [5].

V prvem koraku načrtovanja je potrebno na podlagi nazivne moči  $Q_n$  [kVAr] izbrati primerno ovojno napetost, ki jo za primer enofazne dušilke določimo glede na nazivno moč po obrazcu (1), pri tem je vrednost faktorja  $k$  odvisna od napetostnega nivoja, gostote toka v navitjih, gostote magnetnega pretoka v jedru, frekvence, cene izgub itd. V tem primeru je privzeta vrednost  $k \sim 0,85$ .

$$u_{ov} = k \cdot \sqrt{Q_n} \quad , \quad [V] \quad (1)$$

Enkrat, ko je ovojna napetost določena, je s tem določeno tudi število ovojev v navitju dušilke  $N$  (2):

$$N = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot u_{ov}} \quad (2)$$

Čisti presek magnetnega jedra  $S_{Fe}$  [cm<sup>2</sup>] je podan z obrazcem (3), na podlagi katerega se določi tudi premer stebra  $D_s$  [mm] (4), kjer  $k_{Fe}$  podaja polnilni faktor feromagnetnega jedra, ki zavzema vrednosti 0,80~0,93. Izpeljavo izraza (3) se nahaja v dodatku (A1), na koncu dokumenta.

$$S_{Fe} = \frac{45 \cdot u_{ov}}{B} \quad , \quad [cm^2] \quad (3)$$

$$D_s = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{Fe}}{\pi \cdot k_{Fe}}} \cdot 10 \quad , \quad [mm] \quad (4)$$

Nazivni tok dušilke se prav tako določi na podlagi nazivne moči in napetosti (5),

$$I_n = \frac{\sqrt{3} \cdot S_n}{U_n} \quad , \quad [A]. \quad (5)$$

Skupna debelina zračnih rež v jedru je prek Amperovega zakona podana z izrazom (6), pri tem je predpostavljeno, da je padec magnetne napetosti na magnetnem jedru zanemarljiv:

$$\sum \delta = \frac{\sqrt{2} I_n \cdot N \cdot \mu_0 \cdot f_f}{B} \cdot 1000 \quad , \quad [mm], \quad (6)$$

kjer  $f_f$  predstavlja korekcijski faktor, ki zajema t.i. robni efekt oz. nehomogenost magnetnega polja v zračni reži in je odvisen od višine zračne reže, njegova vrednost pa je približno 1,2; zanj se pogosto uporablja izraz Carterjev faktor. Zaradi robnega efekta in posledičnih dodatnih izgub ter zaradi tehnoloških razlogov, se prej dobljena vrednost zračne reže doseže tako, da se enakomerno razdeli vzdolž stebra. Pri tem je vnaprej potrebno določiti bodisi debelino posamezne reže  $\Delta$  [mm] ali pa število rež v stebru  $n$ . V našem primeru bomo privzeli, da je debelina posamezne reže znana. Število potrebnih zračnih rež je potemtakem določljivo z enačbo (7)

$$n = \frac{\sum \delta}{\Delta} \quad . \quad (7)$$

Smiselno je debelino posamezne reže izbrati tako, da je  $n$  celoštevilčna vrednost. Po navadi je izbira števila rež pogojena s tehnološkimi omejitvami in zahtevi. Namreč, večje število manjših rež zahteva več delovnih ur pri izdelavi in sestavi enote. Po drugi strani, pa se pri večjem številu rež da induktivnost bolj natančno umeriti na želeno vrednost. Potrebno je omeniti še, da se pri manjših zračnih režah ni tako izrazite razširitve magnetnega polja vzdolž jedra in so posledično tudi dodatne izgube v navitjih bistveno nižje. Kakorkoli, odločitev o višini in številu rež je zmeraj stvar tehnološko ekonomskega kompromisa.

Ob predpostavki, da se amporni ovoji porabijo le za magnetenje zračnih rež, bo pričakovana induktivnost dušilke določljiva z enačbo (8),

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot S_{Fe}}{10 \cdot n \cdot \Delta} \quad , \quad [H] \quad (8)$$

pri tem je  $\mu_0$  permeabilnost praznega prostora (zraka),  $S_{Fe}$  in  $\Delta$  pa sta podana v že omenjenih enotah cm<sup>2</sup> in mm.

Višino stebra  $b_s$  [mm] lahko določimo glede na premer stebra  $D_s$  [mm] (9). Kot bo vidno v nadaljevanju, je ugodno izbrati nekoliko višji steber in s tem nekoliko višje navitje, saj bo s tako izbiro debelina navitja  $a_t$  manjša. Zaradi tehnoloških, pa tudi tehničnih in ekonomskih razlogov, je priporočljiva debelina navitja med 70 in 110 mm. Omenjene omejitve veljajo za enofazne enote moči med 1 in 15 MVar.

$$b_s = 3 \cdot D_s \quad , \quad [mm] \quad (9)$$

V magnetnem jedru z zračnimi režami je potrebno doreči še zadnji parameter in sicer višino koluta  $h_{kol}$  [mm], ki ga izračunamo z enačbo (10).

$$h_{kol} = \frac{b_s - \sum \delta}{n - 1} \quad , \quad [mm]. \quad (10)$$

S tem zadnjim parametrom je osnovni izračun magnetnega jedra zaokrožen, potrebno je izračunati še navitje, težo potrebnega materiala in izgube v magnetnem jedru ter navitjih.

Geometrijska višin navitja  $b_g$  [mm] je že pravzaprav določena z višino stebra (11)

$$b_g = b_s - \delta_{sp} - \delta_{zg} \quad , \quad [mm], \quad (11)$$

kjer sta  $\delta_{sp}$  in  $\delta_{zg}$  razdalji navitja do spodnjega oz. zgornjega jarma podani v mm.

Presek ovoja (čisti presek ovoja, brez izolacije) v navitju  $S_{cu}$  [mm<sup>2</sup>], je potrebno izbrati tako, da tokovna gostota  $g$  [A/mm<sup>2</sup>] ne preseže predpisane vrednosti (12)

$$S_{cu} = \frac{I_n}{g} \quad , \quad [mm^2]. \quad (12)$$

Navitje VN dušilke je praviloma zvrnjenega ali pa prepletene tipa. Pri takem tipu navitja je polnilni faktor približno  $f_p \sim 0,4$  in nam pove razmerje med čistim presekom bakra v navitju  $N \cdot S_{cu}$  in produktom

$a_t \cdot b_g$ . Iz slednjega razmerja lahko izračunamo debelino navitja  $a_t$  [mm] (13).

$$a_t = \frac{N \cdot S_{cu}}{b_g \cdot f_p}, \quad [\text{mm}]. \quad (13)$$

Z ozirom na sliko 1 je masa vgrajenega bakra v dušilki določljiva z izrazom (14).

$$m_{cu} = 28 \cdot (D_s + 2\delta_{01} + a_t) \cdot S_{cu} \cdot N \cdot 10^{-6}, \quad [\text{kg}] \quad (14)$$

kjer  $\delta_{01}$  predstavlja razdaljo med navitjem in stebrom (slika 1). Dimenzije  $D_s$ ,  $\delta_{01}$  in  $a_t$ , so podane v mm,  $S_{cu}$  pa v  $\text{mm}^2$ .

Masa magnetne pločevine  $m_{Fe}$  [kg] ob privzeti polovičnem preseku jarmov in stranskih stebrov je podana z izrazom (15)

$$m_{Fe} = 7,65 \cdot S_{Fe} \cdot 10^{-4} \cdot (2D_s + 2\delta_{01} + 2\delta_{10} + 2a_t + 2b_s - \Sigma\delta), \quad [\text{kg}], \quad (15)$$

pri tem so vrednosti v oklepaju podane v mm, presek magnetnega jedra  $S_{Fe}$  pa v  $\text{cm}^2$ .

Izgube v navitju se izražajo prek mase navitja  $m_{cu}$  [kg] in gostote električnega toka  $g$  [ $\text{A}/\text{mm}^2$ ] ter dodatnih izgub, ki so zajete v faktorju dodatnih izgub  $f_{dod}$  (16). Zaradi prisotnosti zračnih rež v jedru, je faktor dodatnih izgub občutno večji, kot pa pri energetskih transformatorjih in dosega vrednost  $f_{dod} \sim 1,5$  [3].

$$P_k = m_{cu} \cdot g^2 \cdot 2,36 \cdot f_{dod}, \quad [\text{W}] \quad (16)$$

Zgornja enačba drži za bakreno navitje pri  $75^\circ\text{C}$ . Izpeljava enačbe (16) je podana v dodatku (A2).

Izgube v magnetnem jedru so prav tako odvisne od mase magnetne pločevine  $m_{Fe}$  [kg] v jedru in specifičnih izgub  $p_0$  [ $\text{W}/\text{kg}$ ], ki so odvisne od tipa uporabljene pločevine in gostote magnetnega pretoka v jedru  $B$  (17). Za lasersko obdelano pločevino debeline lamel 0,27 mm so pri 1,2 T specifične izgube približno  $p_0 \sim 0,6 \text{ W}/\text{kg}$ .

$$P_0 = m_{Fe} \cdot p_0, \quad [\text{W}] \quad (17)$$

### 3 Ekonomsko ovrednotenje VN dušilke

Pri ekonomski evalvaciji dušilke, se postopa podobno, kot pri transformatorju in sicer, nabavni ceni, ki zajema ceno vgrajenega materiala, dela in opreme, je potrebno dodati še strošek izgub. Podrobne stroškovne analize na tem mestu ne bomo izvajali, podane bodo le okvirne smernice za izračun lastne cene dušilke. Privzeto bo, da je razmerje med ceno bakra in magnetne pločevine  $\sim 3$  ter da je delež v lastni ceni, ki se nanaša na delo približno 30%. S temi predpostavkami in ob upoštevanju trenutnih cen bakrene žice ter magnetne pločevine, bi ocenjena vrednost lastne cene dušilke bila (18):

$$C_d = c_d \cdot m_d \cdot 1,3, \quad [€], \quad (18)$$

kjer  $C_d$  predstavlja lastno ceno dušilke [€],  $c_d$  specifično ceno dušilke na enoto teže, ki je v razponu med 6 in 8

[€/kg],  $m_d$  pa težo dušilke [kg], ki je približno podana z izrazom  $m_d \approx 1,6 \cdot (m_{cu} + m_{Fe})$ .

Ekonomska cena dušilke, ki upošteva še ceno (stroške) izgub je podana s spodnjo enačbo (19). Pri transformatorjih je izraz (19) poznan kot »Total Owning Cost«, ali krajše kar *TOC*, zato je tudi tukaj uporabljeno enako poimenovanje, čeprav se nanaša na dušilko.

$$TOC = C_d + X(P_0 + P_k), \quad [€] \quad (19)$$

Faktor  $X$  je t.i. evalvacijski faktor, ki pove, kolikšen strošek predstavlja kupcu 1kW izgub. Izračun vrednosti  $X$  lahko bralec zasledí v literaturi [2,6].

### 4 Rezultati izračuna

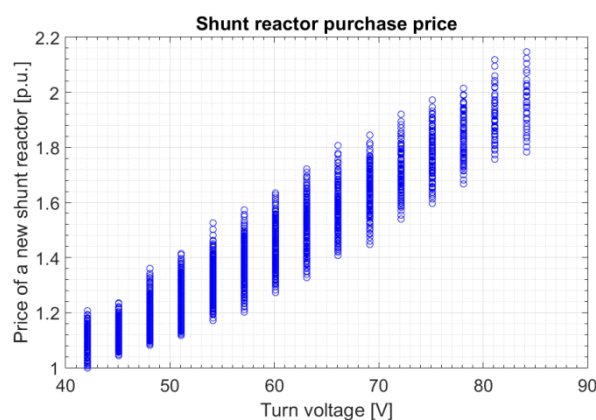
Na podlagi prej opisanih postopkov, je bila izračunana optimalna konstrukcija enofazne dušilke z nazivnimi podatki v tabeli 1.

Tabela 1: Nazivni podatki enofazne kompenzacijske dušilke jedrnega tipa

| parameter | vrednost | opis             |
|-----------|----------|------------------|
| $Q_n$     | 5000 kVA | Nazivna moč      |
| $U_n$     | 110 kV   | Nazivna napetost |
| $I_n$     | 78,73 A  | Nazivni tok      |
| št. faz   | 1        | Število faz      |
| $f$       | 50 Hz    | frekvenca        |

Pri izračunih so bili v spodaj navedenih mejah varirani sledeči parametri:  $u_{ov}$ ,  $B$ ,  $g$ ,  $h_{kol}$  in  $\Delta$ .

|                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| $42 < u_{ov} < 84$    | V                      |
| $1,0 < B < 1,4$       | T                      |
| $1,2 < g < 2,2$       | $\text{A}/\text{mm}^2$ |
| $100 < h_{kol} < 200$ | mm                     |
| $10 < \Delta < 20$    | mm                     |

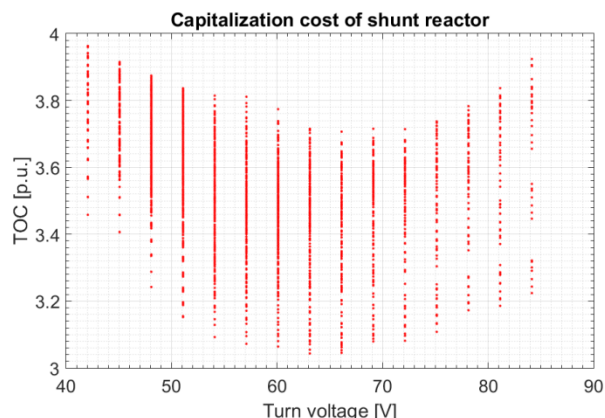


Slika 2: Prikaz lastne cene dušilke v odvisnosti od ovojne napetosti

Slika 2 prikazuje lastno ceno enofazne dušilke brez upoštevanja stroškov izgub, pri tem so cene podane v p.u. oz. normirane na najnižjo lastno ceno. Iz slike je

prav tako razvidno, da se cenejše dušilke projektirajo pri nižjih ovojnih napetostih.

Z upoštevanjem cene izgub se optimalna rešitev pomakne k višjim vrednostim ovojne napetosti. Rezultati izračuna optimalne konstrukcije na podlagi evalvirane cene TOC kaže slika 3. Tudi v tem primeru so vrednosti normirane z najnižjo lastno ceno.



Slika 3: Prikaz evalvirane cene dušilke v odvisnosti od ovojne napetosti

Slika kaže konkavno odvisnost cene glede na ovojno napetost, kjer se optimalna izbira nahaja med 60 V in 70 V. S stališča načrtovanja je zelo pomembno, da je na voljo več rešitev, ki se le malo razlikujejo glede na najcenejšo izbiro, kar omogoča opredelitev za tehnično najustreznejšo rešitev.

Primerjava vrednosti parametrov najcenejše in najbolj ekonomične konstrukcije je podana v tabeli 2. Če se na tem mestu ozremo le na ekonomsko vrednost investicije, vidimo, da najcenejša dušilka pomeni skozi življenjsko dobo (~ 40 let) občutno dražjo izbiro, kot pa najbolj ekonomična dušilka.

Tabela 2: Primerjava optimalnih parametrov najcenejše in najbolj ekonomične konstrukcije dušilke

| parameter     | Enota             | Najcenejša dušilka | Najbolj ekonomična dušilka |
|---------------|-------------------|--------------------|----------------------------|
| $u_{ov}$      | V                 | 42,1               | 63,1                       |
| $B$           | T                 | 1,30               | 1,17                       |
| $g$           | A/mm <sup>2</sup> | 2,2                | 1,27                       |
| $h_{kol}$     | mm                | 100                | 125                        |
| $\Delta$      | mm                | 12,5               | 10                         |
| $S_{cu}$      | mm <sup>2</sup>   | 35,8               | 61,9                       |
| $b_g$         | mm                | 1254               | 1422                       |
| $a_t$         | mm                | 108                | 110                        |
| $b_s$         | mm                | 1654               | 1820                       |
| $N$           |                   | 1510               | 1006                       |
| $n$           |                   | 16                 | 14                         |
| $D_s$         | mm                | 460                | 590                        |
| $m_{Fe}$      | kg                | 7018               | 13281                      |
| $m_{Cu}$      | kg                | 1101               | 1500                       |
| $m_d$         | kg                | 13470              | 23322                      |
| $\sum \delta$ | mm                | 195                | 144                        |
| $P_0$         | W                 | 3937               | 1758                       |
| $P_k$         | W                 | 19802              | 9013                       |
| $L$           | H                 | 2,569              | 2,569                      |

|             |      |      |      |
|-------------|------|------|------|
| Lastna cena | p.u. | 1,00 | 1,71 |
| TOC         | p.u. | 3,94 | 3,04 |

## 5 Zaključek

V članku so predstavljeni osnovni koraki za izračunu visokonapetostne dušilke jedrnega tipa brez regulacijskih zmožnosti. Podane so tudi smernice za ekonomsko ovrednotenje dušilke, na podlagi česa se izbere najprimernejšo konstrukcijsko rešitev. Čeprav se podani računski postopki temeljijo na analitičnih izrazih, pa je pri bolj resnem pristopu k projektiranju takšnih naprav potrebno uporabiti numerične postopke, saj je zaradi prisotnosti zračnih rež magnetno polje v oknu dušilke zelo izrazito in povzroča nemajhne dodatne izgube v električno prevodnih konstrukcijskih delih.

## Literatura

- [1] C. T. Bengtsson, J. A. Kern (2020), "Shunt reactors improve voltage stability and power quality", *Transformers Magazine*, vol. 7, no. 1, pp 78-82
- [2] »Transformer handbook 3<sup>th</sup> ed.«, ABB, 2007.
- [3] K. Lenasi, M. Berlec, D. Makuc (2001), "Tonfrekvenčni Transformator", *Sloko Cigre* 2001, 12-1-8
- [4] K. Karsai, D. Kerényi, L. Kiss, *Large Power Transformers*, Budapest: Académia Kiadó, 1987.
- [5] A. Dolenc, »Transformatorji«, Učbenik, Univerza v Ljubljani - Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1970.
- [6] M. Trbušič, I. Lugarič, M. Jesenik, M. Trlep, A. Hamler (2021), "Izbira materialov za visokoučinkovite distribucijske transformatorje", ERK 2021, Portorož, pp 230-233

## Dodatek

Izpeljava izraza za inducirano napetost oz. čisti presek presek magnetnega jedra (enačba 3 v članku). Pri tem je upoštevana vrednost omrežne frekvence  $f = 50$  Hz

$$\sqrt{2} u_{ov} = \frac{d}{dt} \int_{S_{fe}} B \sin(2\pi ft) dS, \quad (A1)$$

$$u_{ov} = \frac{2\pi f B S_{fe}}{\sqrt{2}} \rightarrow S_{fe} = \frac{45 u_{ov}}{B}, [\text{cm}^2]$$

Formula za izračun izgub v bakrenem navitju zaradi toka (enačba 16 v članku) je izpeljana kot sledi; pri tem je upoštevana vrednost električne prevodnosti bakra  $\sigma_{cu}$  pri 75°C, ki je  $\sigma_{cu} = 0,0216 \Omega\text{m}$  in gostota bakra  $\rho_{cu} = 8,9 \text{ kg/dm}$ .

$$P_k = R_{cu} I^2 = \sigma_{cu} \frac{l}{S_{cu}} g^2 S_{cu}^2 = m_{cu} \cdot g^2 \cdot 2,36, [\text{W}] \quad (A2)$$

V zgornji izpeljavi je masa bakra izražena kot produkt gostote in volumna  $m_{cu} = \rho_{cu} l S_{cu}$ , pri tem se  $l$  [m] nanaša na dolžino navitja,  $S_{cu}$  [mm<sup>2</sup>] pa na presek navitja.