# Híradástechnikai hálózati transzformátorok melegedésvizsgálata

PFLLEGEL PÉTER
BME
HÍRADÁSTECHNiKAi
ELEKTRONiKA
iNTÉZET

## Bevezetés

A transzformátorméretezés optimalizálásának sarkalatos pontja a melegedési viszonyok pontos ismerete. Az optimális tervezést legtöbbször éppen az hiúsítja meg, hogy a transzformátor hőátadási képességét — az erre vonatkozó pontos adatok hiányában — biztonsági okokból alábecsülik. A transzformátorok hőátadásának mechanizmusát ezért a korábbi méretezési eljárásban [2, 3] alkalmazott termikus modellnél részletesebb modell alapján tárgyaltuk, és a modell helyességét mérési sorozattal igazoltuk. A mérés eredményei alapján módosítottuk a méretezési eljárásnak [2] és a tervező programnak [3] a magméret kiválasztásával kapcsolatos részét. A módosítás hatását az eredeti és a módosított tervező programmal [1] is futtatott mintapélda eredményeinek összehasonlítása szemlélteti.

## A termikus modell

A transzformátor melegedésén ($\Delta T$) a transzformátor és a környezet hőmérsékletének különbségét értjük:

$$\Delta T = T_{tr} - T_k. \qquad (1)$$

A transzformátor melegedését a benne keletkező veszteségi teljesítmény ($P_d$) okozza:

$$P_d = P_r + P_v, \qquad (2)$$

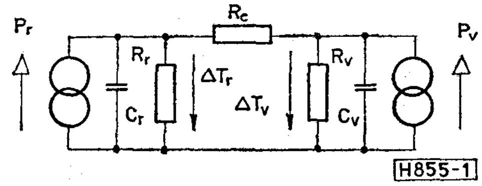
ahol $P_r$ a rézveszteségi teljesítmény, $P_v$ pedig a vasveszteségi (hiszterézis és örvényáramú) teljesítmény.

A transzformátor hőátadási képességét a veszteségi teljesítmény és a hozzá tartozó melegedés hányadosával, a hőátadási tényezővel ($k_T$) jellemzik [4, 5]:

$$k_T = P_d / \Delta T. \qquad (3)$$

Az eddigiek szerint a transzformátort egyetlen, mindenütt azonos hőmérsékletű testnek tekintettük. A tapasztalat azonban azt mutatja, hogy ez az esetek többségében nem igaz. A csévetest termikus szigetelése miatt a tekercselés és a mag melegedése egymástól eltérő, mivel a kétfajta veszteségi teljesítmény bizonyos fokig elkülönítve fejti ki hatását, azaz a rézveszteség főleg a tekercseket, a vasveszteség pedig főleg a magot melegíti. A tekercselés és a mag ugyan-

Beérkezett: 1982. XII. 3.




*1. ábra.* A transzformátor kétidőállandós termikus modellje

akkor külön-külön azonos hőmérsékletűnek vehető, mivel fémek lévén jó hővezetők.

A fenti elgondolások alapján — a hőtan és a villamosságtan alapfogalmai közötti analógiát felhasználva [6] — a transzformátort az *1. ábrán* látható termikus helyettesítő képpel modelleztük. Az ábrán $P_r$ és $P_v$ a réz- és a vasveszteségi teljesítmény (hőáram), $\Delta T_r$ és $\Delta T_v$ a tekercselés és a mag melegedése, $R_r$, $R_v$ és $C_r$, $C_v$ a tekercselés és a mag környezethez képesti hőellenállása és hőkapacitása, $R_c$ a csévetest hőellenállása a tekercselés és a mag között. A modellalkotás során elhanyagoltuk a csévetest hőkapacitását és a környezethez képesti hőellenállását, mivel a csévetest tömege és szabad felülete a tekercselés és a mag tömegéhez és szabad felületéhez képest kicsi.

A tervező a tekercselés maximális hőmérsékletét írja elő, mivel a transzformátor meghibásodása szempontjából ez a kritikus. A tekercselés állandósult (maximális) melegedése ($\Delta T_{rM}$) az 1. ábra alapján:

$$\Delta T_{rM} = \lim_{t\to\infty} \Delta T_r(t) = P_r[R_r \times (R_c + R_v)] + P_v[R_v \times (R_c + R_r)] \frac{R_r}{R_c + R_r}. \qquad (4)$$

Vezessük be a tekercselésre vonatkozó hőátadási tényező ($k_T$) és a hőellenállás-arány (r) fogalmát:

$$k_T = \frac{1}{R_r \times (R_c + R_v)}, \qquad r = \frac{R_v + R_c}{R_v}. \qquad (5)$$

E fogalmakkal a (4) összefüggés:

$$\Delta T_{rM} = \frac{P_r}{k_T} + \frac{P_v}{r k_T}. \qquad (6)$$

Célunk a helyettesítő kép hőellenállásainak meghatározása, mivel — (5) és (6) szerint — ezek szabják meg a tekercselés állandósult melegedését.

A hőellenállások elméleti úton történő meghatározása igen nehéz, közvetlen mérésük nem lehetséges. Meghatározásukat ezért ismert hőárammal gerjesztett hálózat melegedésmérésére vezetjük vissza.

## Számítási eljárás

A számítási eljárás egyszerűsítése érdekében a transzformátor tekercsein egyenáramot vezetünk át. Ekkor vasveszteség nem keletkezik ($P_v=0$), így az 1. ábra jobb oldali áramgenerátora elhagyható.

Milyen a rézveszteségi teljesítmény időfüggése? A számítás szempontjából az állandó rézveszteség lenne a legkedvezőbb. Ez azonban nem teljesül sem állandó feszültségű, sem állandó áramú meghajtáskor, mivel a melegedő tekercs a huzalanyag fajlagos ellenállásának hőfokfüggése miatt változtatja ellenállását:

$$R(t)=R_0[1+\alpha\Delta T_r(t)], \qquad (7)$$

ahol $R_0$ a tekercs ellenállása a környezeti hőmérsékleten, $\alpha$ a huzalanyag fajlagos ellenállásának hőfoktényezője, $\Delta T_r(t)$ a tekercs melegedésének időfüggvénye.

A tekercs állandó feszültségű ($U_0$) meghajtása egyszerűen megoldható. Ez esetben a rézveszteség:

$$P_r(t)=\frac{U_0^2}{R_0[1+\alpha\Delta T_r(t)]}=\frac{P_0}{1+\alpha\Delta T_r(t)}. \qquad (8)$$

A (8) függvény azonban a számítás szempontjából kedvezőtlen, mert $P_r(t)$ Laplace-transzformáltja, amelyre a későbbiekben szükség van, nem állítható elő zárt alakban. A tekercs állandó áramú táplálása esetén viszont

$$P_r(t)=I_0^2R_0[1+\alpha\Delta T_r(t)]=P_0[1+\alpha\Delta T_r(t)]. \qquad (9)$$

Ezzel az említett számítási nehézség elesik, ugyanakkor a feladat méréstechnikailag sem lett bonyolult [7].

Tételezzük fel továbbá, hogy egyidejűleg mérjük a tekercselés és a mag melegedését. Írjuk fel a melegedések időfüggvényeit a helyettesítő kép alapján a Kirchhoff-törvények felhasználásával:

$$\Delta T_r(t)=\frac{1}{C_r}\int_0^t\left[P_r(t)-\frac{\Delta T_r(t)}{R_r}-\frac{\Delta T_r(t)-\Delta T_v(t)}{R_c}\right]dt \qquad (10)$$

$$\Delta T_v(t)=\frac{1}{C_v}\int_0^t\left[\frac{\Delta T_r(t)-\Delta T_v(t)}{R_c}-\frac{\Delta T_v(t)}{R_v}\right]dt. \qquad (11)$$

A (10), (11) egyenletek csak akkor teljesülnének maradéktalanul, ha a felvett termikus modell tökéletesen fedné a valóságot, és a melegedés-idő függvényeket abszolút pontosan mérnénk. E két feltétel egyike sem teljesül. A véletlenszerű mérési hibák hatása azonban csökkenthető, ha a $\Delta T_r(t)$ és $\Delta T_v(t)$ melegedés-idő függvényeket több időpontban mérjük.

Írjuk fel a (10), (11) egyenleteket $t=t_i$ időpontokra ($i=1, 2, \ldots, n$), és képezzük az egyenletek nullára rendezett alakjainak négyzetösszegét. Ezt a négyzetösszeget a helyettesítő kép elemértékeinek függvényében minimalizálva meghatározható a termikus modell elemeinek olyan értékegyüttese, amellyel a modell a legkisebb hibával közelíti a mért melegedéseket [8].

Az elmondottak alapján legyen a minimalizálandó hibafüggvény:

$$H(R_r, R_v, R_c, C_r, C_v)=$$

$$=\sum_{i=1}^{n}\left\{\int_0^{t_i}\left[\frac{\Delta T_r(t)-\Delta T_v(t)}{R_c}-\frac{\Delta T_v(t)}{R_v}\right]dt-\Delta T_v(t_i)C_v\right\}^2+$$

$$+\sum_{i=1}^{n}\left\{\int_0^{t_i}\left[P_0[(1+\alpha\Delta T_r(t)]-\right.\right.$$

$$\left.\left.-\frac{\Delta T_r(t)}{R_r}-\frac{\Delta T_r(t)-\Delta T_v(t)}{R_c}\right]dt-\Delta T_r(t_i)C_r\right\}^2. \qquad (12)$$

A hibafüggvény minimumában grad $H=0$, azaz

$$\frac{\partial H}{\partial\frac{1}{R_r}}=\frac{\partial H}{\partial\frac{1}{R_v}}=\frac{\partial H}{\partial\frac{1}{R_c}}=\frac{\partial H}{\partial C_r}=\frac{\partial H}{\partial C_v}=0. \qquad (13)$$

A gradiens (13) szerinti összetevőit előállítva és zérussal egyenlővé téve, egy ötismeretlenes, inhomogén, lineáris algebrai egyenletrendszert kapunk:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} & a_{14} & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & 0 & a_{43} & a_{44} & 0 \\ 0 & a_{52} & a_{53} & 0 & a_{55} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1/R_r \\ 1/R_v \\ 1/R_c \\ C_r \\ C_v \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \\ b_3 \\ b_4 \\ 0 \end{bmatrix}, \qquad (14)$$

ahol

$$a_{11}=\sum_{i=1}^{n}\left[\int_0^{t_i}\Delta T_r(t)\,dt\right]^2, \qquad a_{22}=\sum_{i=1}^{n}\left[\int_0^{t_i}\Delta T_v(t)\,dt\right]^2,$$

$$a_{33}=2\sum_{i=1}^{n}\left\{\int_0^{t_i}[\Delta T_r(t)-\Delta T_v(t)]\,dt\right\}^2,$$

$$a_{44}=\sum_{i=1}^{n}[\Delta T_r(t_i)]^2, \qquad a_{55}=\sum_{i=1}^{n}[\Delta T_v(t_i)]^2$$

$$a_{13}=a_{31}=\left[\sum_{i=1}^{n}\int_0^{t_i}\Delta T_r(t)\,dt-\right.$$

$$\left.-\sum_{i=1}^{n}\int_0^{t_i}\Delta T_v(t)\,dt\right]\sum_{i=1}^{n}\int_0^{t_i}\Delta T_r(t)\,dt,$$

$$a_{23}=a_{32}=\left[\sum_{i=1}^{n}\int_0^{t_i}\Delta T_v(t)\,dt-\right.$$

$$\left.-\sum_{i=1}^{n}\int_0^{t_i}\Delta T_r(t)\,dt\right]\sum_{i=1}^{n}\int_0^{t_i}\Delta T_v(t)\,dt,$$

$$a_{14}=a_{41}=\sum_{i=1}^{n}\Delta T_r(t_i)\int_0^{t_i}\Delta T_r(t)\,dt,$$

$$a_{25}=a_{52}=\sum_{i=1}^{n}\Delta T_v(t_i)\int_0^{t_i}\Delta T_v(t)\,\mathrm{d}t,$$

$$a_{34}=a_{43}=\sum_{i=1}^{n}\Delta T_r(t_i)\int_0^{t_i}[\Delta T_r(t)-\Delta T_v(t)]\,\mathrm{d}t,$$

$$a_{35}=a_{53}=\sum_{i=1}^{n}\Delta T_v(t_i)\int_0^{t_i}[\Delta T_v(t)-\Delta T_r(t)]\,\mathrm{d}t,$$

$$b_1=P_0\sum_{i=1}^{n}\left[t_i+\alpha\int_0^{t_i}\Delta T_r(t)\,\mathrm{d}t\right]\int_0^{t_i}\Delta T_r(t)\,\mathrm{d}t,$$

$$b_3=P_0\sum_{i=1}^{n}\left[t_i+\alpha\int_0^{t_i}\Delta T_r(t)\,\mathrm{d}t\right]\int_0^{t_i}[\Delta T_r(t)-\Delta T_v(t)]\,\mathrm{d}t,$$

$$b_4=P_0\sum_{i=1}^{n}\left[t_i+\alpha\int_0^{t_i}\Delta T_r(t)\,\mathrm{d}t\right]\Delta T_r(t_i).$$

Az egyenletrendszert Gauss—Jordan-féle részleges főelem-kiválasztással [9] megoldva kaptuk a helyettesítő kép elemértékeit.

Kétségtelen, hogy az így kapott elemértékekkel közelítjük meg legjobban a mért $\Delta T_r(t)$ és $\Delta T_v(t)$ melegedés-idő függvényeket. Ellenőriznünk kell azonban, hogy ez a közelítés mennyire jó, azaz — a mérési hibáktól eltekintve — mennyire közelíti az alkalmazott termikus modell a valóságot.

A közelítő elméleti melegedés-idő függvények meghatározására írjuk fel először ezek Laplace-transzformáltjait:

$$\Delta T_r\{p\}=P_r\{p\}Z_{11}(p), \tag{15}$$

$$\Delta T_v\{p\}=P_r\{p\}Z_{21}(p), \tag{16}$$

ahol $P_r\{p\}$ a $P_r(t)$ Laplace-transzformáltja, $Z_{11}(p)$ és $Z_{21}(p)$ a helyettesítő kép elemei által alkotott négypólus bemeneti és transzfer impedanciája:

$$P_r\{p\}=P_0\left[\frac{1}{p}+\alpha\Delta T_r\{p\}\right], \tag{17}$$

$$Z_{11}(p)=\frac{p+d}{C_r(p^2+pg+h)},\qquad Z_{21}(p)=\frac{e}{C_r(p^2+pg+h)}, \tag{18}$$

ahol

$$d=\frac{1}{(R_v\times R_c)C_v},\qquad e=\frac{1}{R_cC_v},$$

$$g=\frac{(1+R_r/R_v)C_r+2C_v}{R_cC_rC_v},\qquad h=\frac{R_r+R_v+R_c}{R_rR_vR_cC_rC_v}.$$

$P_r\{p\}$ és $Z_{11}(p)$ (17), (18) szerinti alakját a (15) egyenletbe helyettesítve, és ebből a melegedést kifejezve:

$$\Delta T_r\{p\}=\frac{P_0}{pC_r}\,\frac{p+d}{p^2+pg'+h'}, \tag{19}$$

ahol

$$g'=g-\frac{\alpha P_0}{C_r}\quad\text{és}\quad h'=h-\frac{d\alpha P_0}{C_r}.$$

A (16) egyenletből az előzőkhöz hasonlóan kapjuk:

$$\Delta T_v\{p\}=\frac{P_0}{pC_r}\,\frac{e}{p^2+pg'+h'}. \tag{20}$$

A (19) és (20) kifejezések inverz Laplace-transzformáltjai a melegedés-idő függvények:

$$\Delta T_r(t)=\operatorname{inv}\mathcal{L}[\Delta T_r\{p\}]=$$

$$=\frac{dP_0}{h'C_r}\left[1+\frac{(d-\alpha_1)\alpha_2}{d(\alpha_1-\alpha_2)}e^{-\alpha_1 t}+\frac{(d-\alpha_2)\alpha_1}{d(\alpha_2-\alpha_1)}e^{-\alpha_2 t}\right], \tag{21}$$

és

$$\Delta T_v(t)=\operatorname{inv}\mathcal{L}[\Delta T_v\{p\}]=$$

$$=\frac{eP_0}{h'C_r}\left[1+\frac{\alpha_2}{\alpha_1-\alpha_2}e^{-\alpha_1 t}+\frac{\alpha_1}{\alpha_2-\alpha_1}e^{-\alpha_2 t}\right], \tag{22}$$

ahol $\alpha_1\alpha_2=h'$ és $\alpha_1+\alpha_2=g'$.

A (21) és (22) függvényeket rárajzoltuk a méréssel felvett melegedésgörbékre, azokkal megegyező léptékben. A számított és a mért görbék sok esetben vonalvastagságon belül fedték egymást, de a többi esetben sem volt az eltérés nagyobb 2%-nál.

Az itt ismertetett számítási módszert követve programot írtunk az EMG 666 számítógépre. A program először bekéri a mérési időpontok számát (n), a szomszédos mérési pontok közötti időközt $(t_{i+1}-t_i)$ és a kezdeti rézveszteségi teljesítményt $(P_0)$. Ezután a program sorra lekérdezi a mért melegedéspárokat $(\Delta T_r(t_i), \Delta T_v(t_i), (i=1, 2, \ldots, n)$. Az utolsó adatpár beadása után kiszámítja a helyettesítő kép elemértékeit, majd bekéri az ellenőrzés céljából készítendő rajz vízszintes léptékét (s/mm). A függőleges lépték állandó, mivel a transzformátorokat közel azonos hőmérsékletre melegítettük. A vízszintes lépték beadása után a számítógép által vezérelt rajzoló elkészíti a helyettesítő kép elemértékeiből és a rézveszteségi teljesítményből kiszámított melegedésgörbéket a mért görbékkel azonos léptékben, ha a rajzoló érzékenységén időközben nem változtattunk.

Hasznosnak tartjuk röviden utalni azokra a próbálkozásokra is, amelyek a fentiekben közölt számítási módszert megelőzték, néhány ponton azzal hasonlóságot mutatnak, de nem jártak kellő sikerrel.

Kezdetben a helyettesítő kép elemértékeinek meghatározására a melegedés-idő függvények (21) és (22) szerinti alakjából indultunk ki. Egyszerűsítő jelölésekkel e függvények:

$$\Delta T_r(t)=\Delta T_{rM}[1+a_r e^{-\alpha_1 t}+(1-a_r)e^{-\alpha_2 t}], \tag{23}$$

$$\Delta T_v(t)=\Delta T_{vM}[1+a_v e^{-\alpha_1 t}+(1-a_v)e^{-\alpha_2 t}]. \tag{24}$$

A továbbiakban a fenti függvények ismeretlen paramétereit $(\Delta T_{rM}, \Delta T_{vM}, a_r, a_v, \alpha_1, \alpha_2)$ állapítottuk meg kétféle módszerrel.

1. Az irodalom mért görbék exponenciális függvényekkel való közelítésére direkt módszert is megad [10]. Ennek alkalmazása azonban csak akkor járt eredménnyel, ha a mért görbék elég nagy pontossággal közelítették a (23) és (24) exponenciális függvényeket. Ellenkező esetben a számítás egyes lépéseit nem lehetett végrehajtani a standard függvények $(\ln x, \sqrt{x})$ meg nem engedett argumentuma miatt.

2. A (10)—(13) összefüggések kapcsán leírtakhoz hasonlóan megpróbálkoztunk hibafüggvény felírásával és minimalizálásával. A hibafüggvény:

$$H(\Delta T_{rM},\ \Delta T_{vM},\ a_r,\ a_v,\ \alpha_1,\ \alpha_2)=$$

$$=\sum_{i=1}^{n}\{\Delta T_{rM}[1+a_r e^{-\alpha_1 t}+(1-a_r)e^{-\alpha_2 t}]-\Delta T_r(t_i)\}^2+$$

$$+\sum_{i=1}^{n}\{\Delta T_{vM}[1+a_v e^{-\alpha_1 t}+(1-a_v)e^{-\alpha_1 t}]-\Delta T_v(t_i)\}^2, \qquad (25)$$

ahol $\Delta T_r(t_i)$ és $\Delta T_v(t_i)$ a $t_i$ időpontokban mért melegedések.

Grad $H$ összetevőit előállítva és zérussal egyenlővé téve azonban itt egy nemlineáris egyenletrendszert kapunk. Ennek megoldása helyett gradiens-módszerrel kerestük a hibafüggvény minimumát. A hibafüggvény azonban a minimumhely közelében igen lassú változású, emiatt a konvergencia is lassú, és a kapott eredményt az is befolyásolja, hogy a minimumhely keresését milyen pontból kezdtük.

Feltéve, hogy a (23) és (24) függvények ismeretlen paramétereit mégis sikerül meghatározni, a (18)—(22) összefüggések visszafelé történő alkalmazásával minden további nehézség nélkül meghatározhatók a $Z_{11}(p)$ impedancia (18) szerinti alakjának együtthatói. A helyettesítő kép elemértékei ezután a hálózatelmélet szintézis módszerével —$Z_{11}$(p)-nek adott struktúrában való realizálásával — határozhatók meg.

## Mérési módszer

A hőátadási viszonyok részletesebb vizsgálatát az indokolta, hogy a transzformátorok melegedésére való méretezésénél azt tapasztaltuk, hogy az irodalomból vett [4] hőátadási tényezővel számolva, az elkészült transzformátorok mindig a vártnál kevésbé melegedtek. Az említett irodalomban a mérés körülményei nincsenek egyértelműen rögzítve. Úgy döntöttünk, hogy a saját méréseinket az üzemi feltételekhez közeli, de azoknál egyértelműen kedvezőtlenebb körülmények között végezzük. Ennek érdekében:

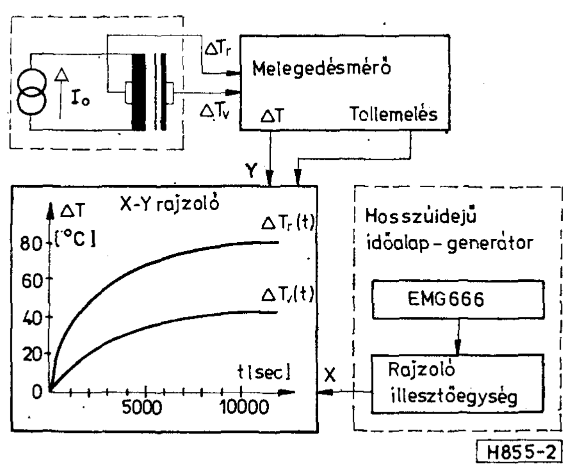
— a tekercsekte enegyárammal gerjesztettük, így a transzformátort teljes egészében rézveszteség melegíti,

— korlátoztuk a szabad levegőáramlást azzal, hogy a transzformátort egy 300×280×170 mm beméretű Kontaset dobozba helyeztük, amelynek fedő- és fenéklemezén, a hátlaphoz közeli részén két sorban 20—20 db 18×3 mm-es szellőzőnyílást készítettünk,

— a transzformátort rossz hővezetőre (10 mm vastag, 30×150 mm felületű fa lapkára) állítottuk a doboz előlapjához közel.

A mérések céljára tizennyolc mintatranszformátort készítettünk az M és a TM sorozat összes méretében, a legkisebb (20/5) méret kivételével, ami hálózati transzformátor készítésére nem alkalmas.

A transzformátorok tekercselése két azonos menetszámú és huzalátmérőjű tekercsből áll, amelyek a tekercselési keresztmetszetet egészében kitöltik. A tekercsek menetszáma és huzalátmérője a transzformátor 220 V-os hálózati feszültséghez tartozó primer tekercs szokásos értékeinek megfelelő.




*2. ábra.* Mérési összeállítás transzformátorok melegedésmérésére

A mérési összeállítás a *2. ábrán* látható. A melegítő áram ($I_0$) értékét úgy választottuk meg, hogy az irodalomból [4] átvett hőátadási tényezőt feltételezve a tekercselés állandósult melegedése mintegy 80 °C legyen. Ez a kiértékelhetőség szempontjából elegendően nagy érték, és a transzformátor épségét még nem veszélyezteti. Így (3) és (9) alapján:

$$I_0 \cong \sqrt{\frac{k_T \Delta T_{rM}}{R_0(1+\alpha\Delta T_{rM})}},$$

ahol $k_T$ az irodalomból átvett hőátadási tényező, $\Delta T_{rM}=80$ °C, $\alpha=0{,}004$/°C, a réz fajlagos ellenállásának hőfoktényezője.

A transzformátorokba két-két darab hőérzékelő elemet helyeztünk el, egyet a tekercselés közepén, egyet pedig a magon. A hőérzékelők melegedéssel arányos jelét egy melegedésmérő műszer [11] fogadja, amely egyrészt a mért melegedéssel arányos jelet ad az $X—Y$ rajzoló függőleges bemenetére, másrészt mérőpontváltáskor gondoskodik a tollemelésről, így a tekercselés és a mag melegedésgörbéje egyidejűleg vehető fel. Tekintettel a hosszú mérési időkre, a rajzoló saját időalapja nem elegendő. Ezt a funkciót az EMG 666 számítógép és a rajzoló illesztő egység X csatornája tölti be egy időalapot szimuláló program segítségével.

## Mérési eredmények

A mintatranszformátorok tekercseinek adatait az *1. táblázat* foglalja össze. Minden azonos névleges méretű M—TM magpárhoz azonos csévetest tartozik, így a tizennyolc transzformátorhoz csak kilenc tekercs készült. A táblázatban megadtuk a tekercsek menetszámát ($n$), huzalátmérőjét ($d$), 25 °C-on mért és számított egyenáramú ellenállását ($R_0$), a melegítő áramot ($I_0$), a kezdeti rézveszteségi teljesítményt ($P_0$) és a mérés idejét ($t_m$).

A melegedésmérések számítógépes kiértékelésével kapott helyettesítő kép elemértékeit a *2. táblázatban*

*1. táblázat*

A mintatranszformátorok tekercseinek adatai

| Méret | $n$ | $d$ mm | $R_0$ $\Omega$ szám. | $R_0$ $\Omega$ mért | $I_0$ mA | $P_0$ W | $t_m$ s |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 30/10 | 4800 | 0,1 | 575 | 566 | 60 | 2,04 | 6 000 |
| 42/15 | 7900 | 0,1 | 1472 | 1415 | 50 | 3,54 | 6 000 |
| 55/20 | 4200 | 0,18 | 314 | 306 | 125 | 4,78 | 12 000 |
| 65/26 | 2700 | 0,28 | 103,2 | 102,1 | 250 | 6,38 | 12 000 |
| 74/32 | 2100 | 0,35 | 58,5 | 55,7 | 380 | 8,09 | 15 000 |
| 85/32 | 1450 | 0,5 | 21,2 | 21,7 | 650 | 9,30 | 15 000 |
| 85/45 | 1100 | 0,5 | 18,3 | 17,9 | 750 | 10,10 | 30 000 |
| 102/35 | 1500 | 0,6 | 17,4 | 17,0 | 900 | 13,80 | 30 000 |
| 102/53 | 800 | 0,8 | 6,2 | 5,9 | 1500 | 13,30 | 30 000 |

foglaltuk össze. A hőkapacitások ($C_r$, $C_v$) mellett — egybevetés céljából — feltüntettük a tekercselés és a mag tömeg-fajhő szorzataival adott hőkapacitásokat is ($C_r(m)$, $C_v$(m)).

A 2. táblázatban adott hőellenállásokból az (5) összefüggésekkel kiszámítható a tekercselésre vonatkoztatott hőátadási tényező ($k_T$) és a hőellenállás-arány (r). Ezeket a *3. táblázatban* foglaltuk össze. Az összehasonlítás kedvéért ugyanitt tüntettük fel az irodalomból átvett adatokat.

A mérések reprodukálhatóságának ellenőrzésére a TM 55/20 és a TM 65/26 méretű transzformátorokat négy-négy alkalommal mértük, ezen belül két-két esetben állandó teljesítményű ($\sim$1,3 $P_0$) gerjesztéssel is. Az eredményeket a *4. táblázat* tartalmazza. Tekintettel arra, hogy a mérést és a kiértékelést szubjektív tényezők is befolyásolták (nagy számú, mintegy 80 melegedésérték leolvasása, az állandó teljesítmény kézi szabályozással való biztosítása), az eredmények reprodukálhatósága megfelelőnek mondható. Megjegyezzük még, hogy a fenti nyolc mérést mindig más mérőpáros (egyetemi hallgatók) végezte és értékelte ki.

Ugyancsak ellenőriztük azt, hogy mennyire függenek az eredmények a leolvasott $\Delta T_r(t_i)-\Delta T_v(t_i)$ melegedéspárok számától. Ezt az *5. táblázat* mutatja az állandó árammal táplált TM 65/26 méretű transzformátor esetében. A melegedésgörbéket a transzformátor egyidőállandós modelljéből számítható időállandó mintegy ötszöröséig, tehát a gyakorlatilag állandósultnak tekinthető melegedésig vettük fel. A táblázatból kitűnik, hogy az eredmények gyakorlatilag függetlenek attól, hogy a melegedéseket a görbék teljes hosszában olvastuk-e le (40×2 pontban) avagy csupán azok első negyedéről (10×2 pontban), azaz elgendő a transzformátorokat csupán az időállandóval összemérhető ideig melegíteni. Ez a felismerés lehetőséget mutat nagyobb teljesítménnyel végzett, gyorsított melegedésvizsgálatokra és ezzel a mérési idők lerövidítésére.

*2. táblázat*

**A helyettesítő kép elemértékei**

| | Méret | $C_r$ J/°C $C_r(m)$ | $C_r$ J/°C $C_r(\Delta T)$ | $C_v$ J/°C $C_v(m)$ | $C_v$ J/°C $C_v(\Delta T)$ | $R_r$ °C/W | $R_v$ °C/W | $R_c$ °C/W |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M | 30/10 | 9,3 | 8,2 | 21 | 22 | 171 | 16,2 | 14,4 |
| TM | | | 9,8 | 21 | 33 | 199 | 14,1 | 15,1 |
| M | 42/15 | 23,2 | 23,3 | 61 | 63 | 75,2 | 11,2 | 13,8 |
| TM | | | 24,4 | 77 | 64 | 48,1 | 15,6 | 15,7 |
| M | 55/20 | 47,1 | 49,6 | 188 | 110 | 66,9 | 5,3 | 7,9 |
| TM | | | 47,6 | 186 | 188 | 24,3 | 8,7 | 9,1 |
| M | 65/26 | 85,4 | 80,0 | 298 | 302 | 24,1 | 5,4 | 6,0 |
| TM | | | 84,6 | 305 | 265 | 17,1 | 9,1 | 8,8 |
| M | 74/32 | 119 | 119 | 457 | 437 | 25,8 | 4,63 | 4,52 |
| TM | | | 119 | 433 | 408 | 16,2 | 5,6 | 6,5 |
| M | 85/32 | 160 | 161 | 581 | 579 | 23,5 | 3,92 | 4,29 |
| TM | | | 139 | 597 | 545 | 16,4 | 5,25 | 5,03 |
| M | 85/45 | 135 | 137 | 785 | 819 | 26,6 | 3,11 | 4,37 |
| TM | | | 124 | 773 | 775 | 14,3 | 7,75 | 5,87 |
| M | 102/35 | 289 | 317 | 910 | 912 | 11,8 | 3,36 | 2,96 |
| TM | | | 263 | 890 | 909 | 10,2 | 3,67 | 3,44 |
| M | 102/53 | 318 | 269 | 1290 | 1293 | 14,4 | 2,14 | 2,89 |
| TM | | | 287 | 1450 | 1463 | 11,7 | 3,52 | 3,35 |

3. *táblázat*

**A hőátadási tényező és a hőellenállás-arány értékei**

| | Méret | $k_T$ mW/°C mérés | $k_T$ mW/°C irodalom [4] | $k_T$ mW/°C irodalom [12] | r mérés |
|---|---|---|---|---|---|
| M | 30/10 | 39 | 30 | — | 1,89 |
| TM | | 39 | | | 2,07 |
| M | 42/15 | 53 | 60 | 45 | 2,23 |
| TM | | 53 | | | 2,01 |
| M | 55/20 | 91 | 80 | 71 | 2,49 |
| TM | | 97 | | | 2,05 |
| M | 65/26 | 129 | 100 | 100 | 2,11 |
| TM | | 114 | | | 1,97 |
| M | 74/32 | 148 | 130 | 128 | 1,98 |
| TM | | 144 | | | 2,16 |
| M | 85/32 | 164 | 150 | 152 | 2,09 |
| TM | | 158 | | | 1,96 |
| M | 85/45 | 171 | 170 | 169 | 2,41 |
| TM | | 164 | | | 2,24 |
| M | 102/35 | 243 | 200 | 208 | 1,88 |
| TM | | 239 | | | 1,94 |
| M | 102/53 | 268 | 220 | 232 | 2,35 |
| TM | | 231 | | | 1,95 |

## Az eredmények értékelése

A 3. táblázatban szereplő mért és az irodalomból átvett hőátadási tényezőket ($k_T$) összehasonlítva megállapíthatjuk, hogy a pesszimális hűlési körülmények ellenére a mért értékek általában kedvezőbbek az eddig ismerteknél, az eltérés azonban nem jelentős. Mivel az azonos méretű M- és TM-magok mért hőátadási tényezői között sincs nagy eltérés, a továbbiakban azok átlagolt értékét tekintjük mérvadónak mindkét magtípusra.

A hőellenállás-arány ($r$) a mért transzformátoroknál kettő körül mozog, Lörcher [12] ennél valamivel nagyobb értéket (2,5) ad meg, míg Feldtkeller [4] az egész transzformátort azonos hőmérsékletűnek tekintette (r=1). Mi a továbbiakban — magtípustól és mérettől függetlenül — r=2 értéket tételezünk fel. Kivételt képeznek a tekercselt toroid (TT) magok, amelyeknél r≅1. A toroid mag környezethez képesti hőellenállása ($R_v$) ugyanis sokkal nagyobb, mint a mag és a tekercselés közötti hőellenállás ($R_c$). Ennek oka egyrészt az, hogy a magot a tekercselés teljesen körülveszi, így a mag nem képes hőt leadni közvetlenül a környezetnek, másrészt csévetest hiányában a mag és a tekercselés közötti hőellenállás is jóval kisebb, mint a csévetesttel ellátott magtípusoké.

A (6) összefüggéssel adott tekercsmelegedésnek az indukció függvényében minimuma van, mivel a vasveszteség az indukció négyzetével egyenesen, a rézveszteség pedig fordítottan arányos [2]:

$$\Delta T_{rM}=\frac{P_r}{k_T}+\frac{P_v}{rk_T}=\frac{2A_{tr}}{k_T\omega^2B_1^2}\left(\sum_{i=1}^{N}U_iI_i\right)^2+\frac{\gamma V_mV_1B_1^2}{rk_T}. \tag{26}$$

Szélsőérték-kereséssel megállapítható, hogy a melegedés akkor a legkisebb, ha $P_v=\mathrm{r}P_r$. Ez az arány a jelenlegi izotrop, de még inkább a kis veszteségű anizotrop lágy mágneses anyagokkal csak a telítési indukciót megközelítve érhető el. A nagy üzemi indukció azonban egyéb szempontokból kedvezőtlen. A vasveszteség a telítési indukciót megközelítve a négyzetes aránynál gyorsabban növekszik, értéke nehezen tartható kézben. Másrészt a telítési indukció közelében a mag permeabilitása és mágneses vezetése rohamosan csökken, emiatt a transzformátor üresjárási primer árama és szórt mágneses tere jelentősen megnő. A nagy térerősség miatt ugyancsak nagy a magon belüli erőhatás, ami erős transzformátorzajt idéz elő [13]. A gyakorlatban ezért az izotrop anyagokban 1—1,2 $T$, az anizotrop anyagokban 1,5—1,7 $T$ indukció-amplitúdót engednek meg. Ekkora indukciónál a transzformátorok vasvesztesége általában jóval alatta marad a rézveszteségnek, annak mindössze tizede-harmada.

A 2. táblázatból látható, hogy a magok hőellenállása ($R_v$) jelentősen kisebb a tekercselés hőellenállásánál ($R_r$). Az előbbiek szerint viszont éppen a

4. *táblázat*

**Mérési sorozat a reprodukálhatóság ellenőrzésére**

| Méret | Gerjesztés | $C_r$ J/°C | $C_v$ J/°C | $R_r$ °C/W | $R_v$ °C/W | $R_c$ °C/W |
|---|---|---|---|---|---|---|
| TM 55/20 | Állandó áram | 47,6 | 188 | 24,3 | 8,7 | 9,1 |
| | | 45,1 | 212 | 26,3 | 8,1 | 8,6 |
| | Állandó teljesítmény | 47,8 | 185 | 28,7 | 8,4 | 8,6 |
| | | 48,0 | 185 | 28,1 | 8,6 | 9,0 |
| TM 65/26 | Állandó áram | 84,6 | 265 | 17,1 | 9,1 | 8,8 |
| | | 75,5 | 279 | 19,5 | 8,2 | 8,1 |
| | Állandó teljesítmény | 97,3 | 257 | 18,0 | 9,0 | 8,5 |
| | | 92,6 | 247 | 18,1 | 8,3 | 8,7 |

5. *táblázat*

**Kiértékelési sorozat a szükséges mérési idő megállapítására**

| A leolvasott pontok száma | $C_r$ J/°C | $C_v$ J/°C | $R_r$ °C/W | $R_v$ °C/W | $R_c$ °C/W |
|---|---|---|---|---|---|
| 40×2 | 75,5 | 279 | 19,5 | 8,2 | 8,1 |
| 30×2 | 76,1 | 275 | 19,0 | 8,4 | 8,2 |
| 20×2 | 76,5 | 271 | 18,6 | 8,6 | 8,4 |
| 10×2 | 76,1 | 274 | 19,1 | 8,3 | 8,2 |
| 5×2 | 76,6 | 237 | 15,3 | 9,5 | 9,5 |

*6. táblázat*

**Hagyományos és jó hővezető csévetesttel felépített transzformátor termikus jellemzői**

| Csévetest | $R_r$ °C/W | $R_v$ °C/W | $R_c$ °C/W | $k_T$ mW/°C | $r$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Hagyományos | 17,1 | 9,1 | 8,8 | 114 | 1,97 |
| Alumínium | 18,3 | 6,4 | 4,3 | 150 | 1,67 |

mag vesztesége a kisebb, a mag kedvezően kicsi hőellenállása tehát nincs kihasználva. Kézenfekvő a tekercselés és a mag közötti hőellenállás ($R_c$) csökkentésével a rézveszteségi hőáram nagyobb részét vezetni át a mag kis hőellenállásán. Az $R_c$ hőellenállás csökkentésére az M-magokat szorosan lemezeltük. A várt hatás kétségkívül jelentkezett (vö. az azonos méretű M- és TM-magok $R_c$ hőellenállásait a 2. táblázatban), ezzel együtt azonban nőtt a tekercselés hőellenállása ($R_r$), mivel a csévetest belső nyílásában a szoros lemezelés miatt megszűnt a levegőáramlás.

A csévetest hőellenállásának csökkentésére hatásosabb módszer is kínálkozik. Legyen a csévetest anyaga jó hővezető, de egyben villamos szigetelő is. Ilyen anyagokat a híradástechnikai ipar elterjedten használ — hasonló okokból — pl. monolit integrált áramkörök tokozására. Mivel az ilyen anyagokból készült egyedi csévetest a szerszám elkészítése miatt igen drága lenne, a kísérleti csévetestet alumíniumból készítettük el, kihasználva azt, hogy a csévetest által alkotott rövidzár menet a tekercsek egyenáramú gerjesztése miatt nem okoz zavart.

A kísérleti csévetestet a TM 65/26 méretű magon próbáltuk ki. A fontosabb eredményeket a *6. táblázatban* hasonlítottuk össze a hagyományos csévetesttel felépített TM 65/26-os transzformátor adataival. Látható, hogy a csévetest hőellenállásának jelentős csökkenése folytán a hőátadási tényező ($k_T$) olyan mértékben javult, hogy meghaladja még a méretsor következő tagjához (74/32) tartozó értéket is.

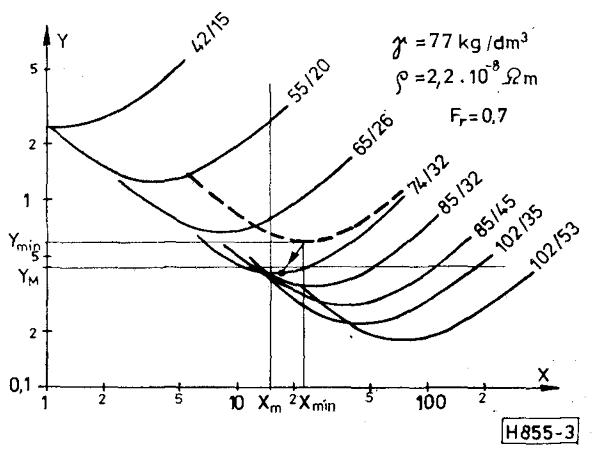
## A méretezési eljárás módosítása

A (26) egyenlet — az eredeti méretezési eljárással [2, 3] azonos módon — magméret-választási diagramok szerkesztésére alkalmas alakra hozható:

$$\frac{2\Delta T_{rM}}{\sqrt{V_1}\sum\limits_{i=1}^{N} U_i I_i} = \frac{8A_{tr}}{k_T\omega^2}\,\frac{\sum\limits_{i=1}^{N} U_i I_i}{2\sqrt{V_1}B_1^2} + \frac{\gamma V_m}{rk_T}\,\frac{2\sqrt{V_1}B_1^2}{\sum\limits_{i=1}^{N} U_i I_i}, \tag{27}$$

illetve egyszerűsíthető jelölésekkel:

$$Y = AX + \frac{C}{X}, \tag{28}$$




*3. ábra.* M- és TM-magok méretválasztási diagramjai előírt melegedés alapján

ahol $A$ és $C$ mérettői és anyagtól függő állandókat (és a hálózati frekvenciát), az $X$ változó pedig a specifikációs adatokat tartalmazza:

$$A = \frac{8A_{tr}}{k_T\omega^2}, \qquad C = \frac{\gamma V_m}{rk_T}, \qquad X = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} U_i I_i}{2\sqrt{V_1}B_1^2}. \tag{29}$$

A (28) függvény magméretekkel paraméterezhető görbesereget alkot, amelyet példaképpen az M- és a TM-magokra adtunk meg a *3. ábrán.*

A specifikációs adatok megszabják $X$ minimális és $Y$ maximális értékét. Ezeket a korlátokat az ábrán $X_m$, $Y_M$-mel jelöltük. A specifikációt kielégítő magok görbéi az egyenesek által kijelölt jobb alsó térnegyedben találhatók. Ezek közül célszerűen a legkisebb magmérethez tartozót választjuk.

Szélsőérték-számítással könnyen belátható, hogy a görbék minimumhelyének koordinátái:

$$X_{min} = \sqrt{C/A}, \qquad Y_{min} = 2\sqrt{AC}. \tag{30}$$

A korábbi méretezési eljárás [2, 3] egyidőállandós termikus modellre épített (r=1). Mérési eredményeink alapján r=2 hőellenállás-arányt véve a korábbi méretválasztási görbék minimumhelyei balra lefelé tolódnak, az eredeti $X$ és $Y$ koordináták $\sqrt{r}$-ed részére. Ennek köszönhetően a specifikációt a korábbiak szerint nem teljesítő mag (l. a szaggatott görbét) r=2 hőellenállás-arány esetén a specifikációt teljesíti. Ennek illusztrálására tekintsünk egy gyakorlati példát.

### *Mintapélda*

Műszaki előírások:

Szekunder tekercsek száma: egy, terhelése: ohmos.
Szekunder feszültség: 24 V, áram: 2 A.
Maximális üzemi hőmérséklet: 70 °C
Maximális környezeti hőmérséklet: 40 °C
Maximális indukció: 1,7 T
Vasveszteségi szám 1 T-nál: 0,6 W/kg
Alkalmazható magtípus: TM-mag

*7. táblázat*

Egy- és kétidőállandós termikus modell alapján méretező programok futtatási eredményei

| Program: | Korábbi [3] | új [1] |
|---|---|---|
| Magméret | 85/32 | 74/32 |
| Melegedés | 28,3 °C | 28,9 °C |
| Veszteség | 4,3 W | 5,0 W |
| Réztömeg | 190 g | 160 g |

A korábbi, egyidőállandós termikus modell szerint méretező program [3] és a kétidőállandós termikus modell alapján méretező új program [1] összehasonlítás szempontjából lényeges futtatási eredményei a *7. táblázatban* találhatók. Látható, hogy az új programmal kapott transzformátor eggyel kisebb magmérettel és kevesebb rézmennyiséggel — tehát olcsóbban — realizálható. Hasonló javulás volt jellemző a legtöbb futtatási kísérletre.


## Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok dr. Granát Jánosnak, aki értékes ötletekkel járult hozzá a számítási és mérési módszer kidolgozásához. Köszönöm úgyszintén dr. Barát Zoltánnak és dr. Takács Ferencnek a kézirat átnézését és az ezzel kapcsolatos észrevételeiket, valamint Czapek Zsoltnak a mintatranszformátorok elkészítésében és a mérési eredmények feldolgozásában nyújtott segítséget.


## IRODALOM


[1] *Pfliegel P.:* Híradástechnikai hálózati transzformátorok anyag-, energia- és technológiai optimumra való méretezése. Egyetemi doktori értekezés, BME—HEI, 1982.

[2] *Granát J.—Takács F.:* Vas- és ferritmagos transzformátorok tervezése. Híradástechnika, XXII. évf. 7. sz. 201—205. o.

[3] *Granát J.—Pfliegel P.:* Hálózati transzformátorok méretezése EMG 666 asztali kalkulátoron. Híradástechnika, XXX. évf. 5. sz. 135—141. o.

[4] *Feldtkeller, R.:* Theorie der Spulen und Überträger. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1958.

[5] *Ermolin, N. P.— Vaganov, A. P.:* Raszcset malomoscsnüh transzformatorov. Goszenergoizdat, Moszkva, 1957.

[6] *Almássy Gy.:* Elektronikus készülékek szerkesztése. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979, 51—128. o.

[7] *Granát J.:* Szóbeli közlés.

[8] *Erdélyi I.—Granát J.:* Szóbeli közlés.

[9] *Ormai L.:* Lineáris egyenletrendszer megoldása. EMG 666 programozási mintapéldák, 35—38. o. BME Folyamatszabályozási Tanszék, 1974.

[10] *Bronstein, I. N.—Szemengyajev, K. A.:* Matematikai zsebkönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1963.

[11] *Helmich T.:* Programozható hőmérséklet- és melegedésmérő műszer tervezése és építése. Diplomaterv, BME—HEI, 1981.

[12] *Lörcher O.:* Stromversorgung, Kapital 2.5., s. 351—355. in Taschenbuch der Nachrichtenverarbeitung. Hrsg. K. Steinbuch, Springel Verlag, Berlin, 1962.

[13] *Gobbi I.—Facsády T.:* Az elektronika korszerű transzformátorai I—IV., Finommechanika—Mikrotechnika, XII. évf., 3. sz., 89—95. o., 4. sz., 101—106. o., 5. sz., 151—154. o., 6. sz., 215—220. o.