

# Előmágnesezett tekercsek méretezése EMG 666 asztali kalkulátoron

DR. GRANÁT JÁNOS—  
PFLIEGEL PÉTER  
BME Híradástechnikai  
Elektronika Intézet

Intézetünk Akusztika és Alkatrészek Osztálya kutatási és oktatási munkájának egy része a passzív áramkört elemek, elsősorban a különféle mágneses eszközök tervezési algoritmusainak kidolgozása és az ezek alapján történő számítógépes tervezés. Az alábbiakban előmágnesezett tekercsek EMG asztali kalkulátoron való méretezését kívánjuk bemutatni. A módszer elvi alapjai az irodalomban megtalálhatók [1].

Jelen cikk e módszernek programozható kalkulátorra készített változatát tárgyalja. Először ismertetjük a méretezés elvét, majd a folyamatábrán végigkövetjük a program működését, végül két számítási példát mutatunk be.

## A méretezés elve

A méretezés kiindulásául a specifikációs adatok szolgálnak, a realizálási lehetőségeket a szabványos vas- és huzalméret, valamint bizonyos anyagok választéka határozza meg.

## A specifikációs adatok:

- $L$  — a minimális induktivitás,
- $I_0$  — a maximális előmágnesező áram,
- $U_0$  — a maximálisan megengedhető egyenfeszültség a tekercsen.

Ezeket túlmenően ki kell még választanunk az alkalmazandó vasanyag fajtáját és a vasmag típusát. A méretezési eljárás tetszőleges alakú és anyagú szabványosított vasmagokra alkalmazható.

A tekercs maximális ellenállása:

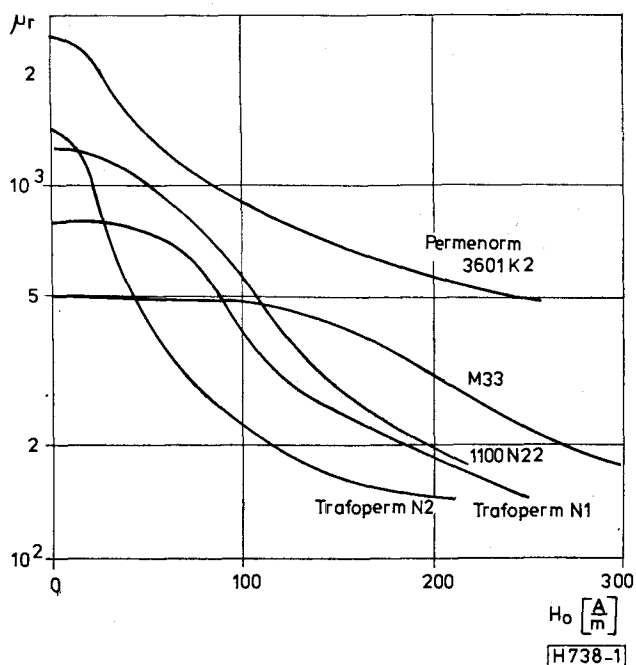
$$R_0 = \frac{U_0}{I_0}$$

A választott anyag kezdeti permeabilitásának ismeretében kiszámíthatjuk a  $\mu K_1$  vasmagjellemzőt [1]

$$\mu K_1 = \mu_k \frac{R_0}{L} \quad (1)$$

Ezen értéket a szabványos vasmagméret-választék  $\mu K_1$  értékeivel összevetve meghatározható a minimális vasmagméret arra az esetre, ha az anyag reverzibilis permeabilitása ( $\mu_r$ ) a specifikált előmágnesező áramhoz tartozó télerősség mellett még megtartaná az előmágnesezetlen állapothoz tartozó értékét ( $\mu_r = \mu_k$ ).

A nehézséget az okozza, hogy a reverzibilis permeabilitás az előmágnesezés hatására a kezdeti permeabilitáshoz képest jelentősen lecsökkenhet (1. ábra). A lecsökkenett permeabilitás értéke nem ismert, mivel az előmágnesező télerő csak a vasmagméret és a menetszám ismerete alapján számítható. További figyelembe veendő szempont a légrés alkalmazása. Légrés közbeiktatása esetén ugyanis a mágneskör egyenáramú gerjesztésének nagy része a légrésre jut, a vas kevésbé mágneseződik, így a relatív permeabilitás csökkenés kisebb lesz. A 2. ábráról leolvasható,



1. ábra. Lágymágneses anyagok reverzibilis permeabilitása az előmágnesező télerősség függvényében

Beérkezett: 1980. március 30.

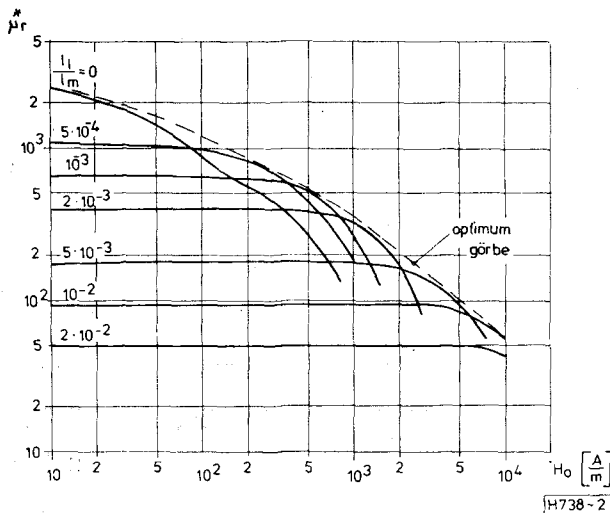
hogy a légrést tartalmazó mágneskör előmágnesezetlen permeabilitása ugyan kisebb, de az előmágnesezett permeabilitás többszöröse lehet a légrést nélküli előmágnesezett permeabilitásnak. Ha a görbék lezálló ágára egy közös burkoló görbét fektetünk, (az ábrán szaggatott vonallal van berajzolva), akkor láthatóan az adott vasanyaggal elérhető maximális reverzibilis permeabilitás értékek, azaz az optimális munkapontok helyét kapjuk meg (optimum görbe). A burkoló görbe az adott előmágnesezéshez egyértelműen hozzárendeli az optimális relatív légrést. A 2. ábrán olyan egyenes sereget is feltüntetünk, amely adott induktivitás, előmágnesező áram és vasmag térfogat esetén megadja a permeabilitás és a gerjesztő térerősség kapcsolatát [2].

$$\mu_2^* = \left( \frac{LI_0^2}{V_m} \right) \cdot \frac{1}{\mu_0 H_0^{*2}}, \quad (2)$$

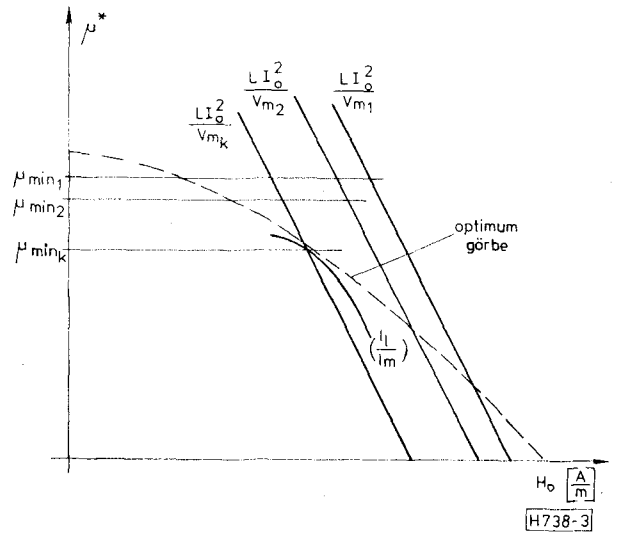
ahol:

- $V_m$  — a vasmag térfogata,
- $\mu_0$  — az abszolút permeabilitás,
- $H_0^*$  — az átlagtérerősség a légrésezett vasmagban,
- $\mu_2^*$  — a légrésezett vasmag reverzibilis permeabilitása.

A méretválasztás menete ezek után a következő: A választott vasmagtípus legkisebb mérete ( $\mu K_1$ )<sub>1</sub> és  $V_{m1}$  magállandóinak ismeretében meghatározzuk az  $LI_0^2/V_{m1}$  és a  $\mu_{\min 1} = (\mu K_1)_1 / (R_0/L)$  mennyiségeket és ezeket a választott vasanyaghoz tartozó optimum görbével együtt közös diagramban ábrázoljuk. Ha a két egyenes metszéspontja (a munkapont) az optimum görbe felett helyezkedik el, akkor a méret nem megfelelő. A méret növelésével a munkapont fokozatosan a megengedett terület felé tolódik el. A 3. ábrán pl. a  $k$ -adik vasmaghoz tartozó munkapont az optimum görbe alatti területre esik, tehát ez a vasmagméret már megfelelő. Megkeresve a munkaponton áthaladó permeabilitás-görbéhez tartozó relatív légrést ( $l_l/l_m$ ), kiszámíthatjuk a szükséges légrésméretet



2. ábra. Permenorm 3601 K2 reverzibilis permeabilitása az előmágnesező térerősség függvényében, a relatív légrésmérettel paraméterezve



3. ábra. A munkapont helyzetének változása a vasmagméret növelésekor

$$l_l = \left( \frac{l_l}{l_m} \right) l_{mk}$$

ahol  $l_{mk}$  a  $k$ -adik vasmag közepes mágneses erővonalhossza.

Számítógépes méretezésnél a 2. ábra permeabilitás-görbéit csak igen nagy adatmennyiséggel lehetne megadni. Ezt az alkalmazott kalkulátor memóriakapacitása nem teszi lehetővé. Mivel a légréssel ellátott mágneskörökhöz tartozó permeabilitás-görbék az anyag  $\mu = \mu(H)$ , ill.  $B = B(H)$ , valamint a légrésvizony ismeretében meghatározhatók, elegendő a választott anyag kellő mennyiségű összetartozó  $H - \mu(H) - B(H)$  adathármasának megadása. Ezekből az adott légrésvizonyhoz tartozó  $\mu_r^* = f(H_0^*)$  permeabilitás-görbe előállítható.

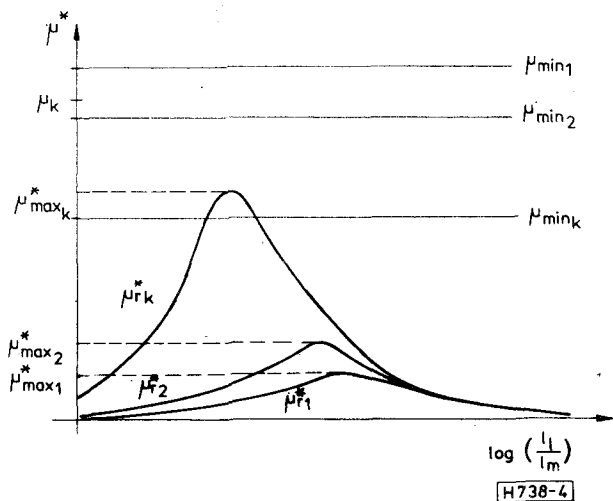
$$H_0^* = H \cdot \left( \frac{l_m - l_l}{l_m} \right) + \frac{B(H)}{\mu_0} \frac{l_l}{l_m}$$

$$\mu_1^* = \mu(H) \times \frac{l_m}{l_l} \quad (3)$$

A munkapont helyét ebben az esetben másképpen kell megállapítanunk, ugyanis a légrésezett permeabilitás görbék előre nem ismertek, azaz a burkoló háttérgörbét sem ismerjük.

A méretválasztás elve ebben az esetben a 4. ábra alapján követhető. Az ábrán  $\mu_{\min 1}, \mu_{\min 2}, \dots, \mu_{\min k}$ -val jelöltük a vasmagméretű 1, 2, ...,  $k$ -adik tagjainak  $\mu K_1$  állandójából meghatározható permeabilitást,  $\mu_{r1}^*, \mu_{r2}^*, \dots, \mu_{rk}^*$ -val az adott vasmagmérettel realizálható permeabilitásokat. A legkisebb vasmag- és légrésméretből kiindulva  $H_0^*$  értékét addig növeljük, míg megkapjuk a (2) és (3) egyenletek közös megoldását  $\mu_{1,2}^*$ -ra.

Az ábrából látható, hogy ez az érték a légrésméret növelésével kezdetben növekszik, majd egy helyi maximum elérése után csökken. A számítás során megkeressük ezt a maximumot, a legkisebb mag esetén ez  $\mu_{\max 1}^*$ . Mivel  $\mu_{\max 1}^* < \mu_{\min 1}$ , a vasmagméretet növelni kell és  $l_l/l_m = 0$ -ról indulva megismételni az



4. ábra. Különböző vasmagméretekhez tartozó munkaponti permeabilitások a relatív légrésméret függvényében, adott  $L$  és  $I_0$  esetén

előző számítás. A 4. ábrán a  $k$ -edik vasmag már éppen kielégíti a  $\mu_{r, \max}^* > \mu_{\min, k}$  feltételt, tehát ez a méret az előírásoknak megfelel.

A fentiek alapján tehát ismert a vasmagméret, a légrésvizony és a légrésezett permeabilitás. Ezekből a tekercs menetszáma:

$$n = \sqrt{\frac{L l_{mk}}{A_{mk} \mu_{\max, k}^* \mu_0}}$$

ahol  $l_{mk}$  és  $A_{mk}$  a  $k$ -edik vasmag mágneses erővonalhossza és keresztmetszete.

A minimális huzalátmérő a megengedett ohmos ellenállásból

$$d_{\min} = 2 \sqrt{\frac{R_0}{n l_{kk} \pi \rho}}$$

ahol:

$l_{kk}$  — a  $k$ -edik vasmag közepes menethossza,  
 $\rho$  — a huzal anyagának fajlagos ellenállása.

Ezek után ellenőrizni kell a tekercs melegedését, ill., ha a vasmag hőátadási tényezője nem ismert (pl. ferrit magok esetén), a huzalban kialakuló áram-sűrűséget. Előfordulhat, hogy a disszipációs teljesítmény miatt a megengedettnél nagyobb melegedés lép fel. Ilyenkor az egész számítást a következő nagyobb vasmagon meg kell ismételni.

### A program

A program [3] működése a vázlatos folyamatábrán alapján követhető (5. ábra).

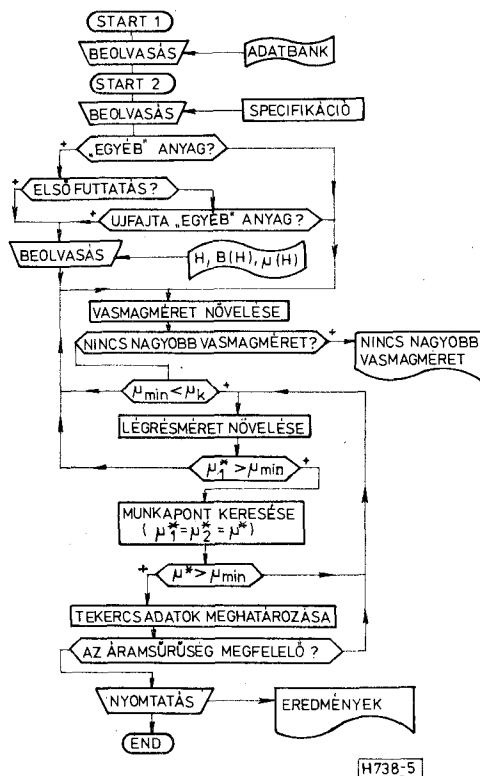
Indítás után a program kazettáról betölti az adatkérő idézeteket, majd interaktív üzemből (6. és 7. ábra) bekéri az alábbi bemenő adatokat:

- VASMAGFAJTA: FAZÉKMAG=1, EMAG=2; a vasmag típusának a kódja (az egyes vasmagtípusok és a hozzájuk tartozó csévetes adatbankját szabványok alapján állítottuk össze [4, 5, 6]),

- MINIMÁLIS INDUKTIVITÁS,  $H$ ; a tekercs inductivitása legnagyobb előmágnesező áram esetén,
- MAXIMÁLIS FESZÜLTÉG,  $V$ ; a tekercs kapcsain megengedhető egyenfeszültségés,
- MAXIMÁLIS ÁRAM,  $A$ ; a tekercsen átfolyó egyenáram megengedett értéke,
- FERRITANYAG: N22=1, T26=2, M33=3, EGYÉB=0, az alkalmazni kívánt vasanyag kódja. Ha 0-t adunk meg, akkor lehetőség van az adatbankban nem szereplő vasanyag adatainak bevitelére is.

A bemenő adatokat a sornymotató is rögzíti. A választott vasanyaghoz tartozó kód beütése után a program megvizsgálja a kód értékét. Ha ez 0, tehát az adatbankban nem szereplő anyagot kívánunk alkalmazni, akkor a program egy szubrutin segítségével bekéri a kívánt anyag 20 db összetartozó  $H$ ,  $B(H)$ ,  $\mu(H)$  adathármasát. Ezeket az adatokat a kezdeti mágnesezéstől a telítési szakaszig lehető egyenletes elosztásban kell megadni, mivel ezek alapján történik a  $B=B(H)$  és  $\mu=\mu(H)$  függvények törtvonalas közelítése. Másodszori ill. többszöri futtatás esetén a program nem kérdezi le újra az EGYÉB vasanyag adatait. Ha a tervező újfajta EGYÉB anyaggal kíván tervezni, úgy az azzal történő első futtatás idejére be kell nyomnia a programkapcsolót. Ez a futtatások számától függetlenül mindig aktivizálja a  $H$ ,  $B(H)$ ,  $\mu(H)$  adatokat bekérő szubrutint.

A program ezután kiszámítja a specifikációs adatokból a rézveszteségi állandót ( $K_1$ ) és a legkisebb magméretből kiindulva ennek alapján meghatároz-



5. ábra. A program folyamatábrája

VASMAGNEZŐTÁR:  
 FAZEK MAG = 1  
 F MAG = 2  
 1  
 MINIMÁLIS  
 INDUKTIVITÁS: H  
 0000000  
 MAXIMÁLIS  
 FESZÜLTSEK: V  
 0500  
 MAXIMÁLIS  
 ÁRÁM: A  
 2000  
 FERRITMAGY  
 M22 = 1, T26 = 2  
 M33 = 3, EGYEK = 0  
 1

TERVEZÉS ADATAI  
 EREDMÉNYEK  
 \*-----\*  
 VASMAGNEZŐTÁR:  
 47828  
 LENYEN: MM  
 190  
 INDUKTIVITÁS: H  
 0000000  
 FESZÜLTSEK: V  
 0468262  
 MENETSZÁM  
 81  
 HÖZELTÁRTERÜLET: MM  
 0250  
 MENETSZÁM/SOR  
 18  
 SOROKSZÁMA  
 5  
 ELLENMÉRÉS: MM  
 0234  
 DISSZIPACIÓ: W  
 0932

H738-6

6. ábra. Kis induktivitású, nagy előmágnesező áramú tekercs specifikációs adatai és a tervezés eredményei sornyomtatón

VASMAGNEZŐTÁR:  
 FAZEK MAG = 1  
 F MAG = 2  
 2  
 MINIMÁLIS  
 INDUKTIVITÁS: H  
 5000000  
 MAXIMÁLIS  
 FESZÜLTSEK: V  
 10000  
 MAXIMÁLIS  
 ÁRÁM: A  
 0050  
 FERRITMAGY  
 M22 = 1, T26 = 2  
 M33 = 3, EGYEK = 0  
 0

TERVEZÉS ADATAI  
 EREDMÉNYEK  
 \*-----\*  
 VASMAGNEZŐTÁR:  
 F 42  
 LENYEN: MM  
 035  
 INDUKTIVITÁS: H  
 5000000  
 FESZÜLTSEK: V  
 9661236  
 MENETSZÁM  
 2628  
 HÖZELTÁRTERÜLET: MM  
 0160  
 MENETSZÁM/SOR  
 145  
 SOROKSZÁMA  
 19  
 ELLENMÉRÉS: MM  
 192229  
 DISSZIPACIÓ: W  
 0483

H738-7

7. ábra. Nagy induktivitású, kis előmágnesező áramú tekercs specifikációs adatai és a tervezés eredményei sornyomtatón

za a szükséges permeabilitás ( $\mu_{\min}$ ) értékét. Ha ez meghaladja a választott anyag kezdeti permeabilitásának ( $\mu_k$ ) értékét, akkor a tekercs az adott magméreten előmágnesezés nélkül sem teljesítené a specifikációt. A számítás ez esetben a következő nagyobb magmérettel ismétlődik mindaddig, amíg a  $\mu_k > \mu_{\min}$  feltétel nem teljesül. A méretválasztási ciklusból való kilépés után a program kiszámítja az  $(LI_0^2)/V_m$  segédmennyiséget, majd megkezdi a légrés méretét meghatározó ciklust. Ha a vasmag fazék típusú és anyaga az adatbankban szereplő anyagok valamelyike, akkor a légrésméret szabványos értékű és a program ezt az adatbankból veszi. Egyéb vasanyag illetve magalak esetén a légrés 0,05 mm-es lépésekben növelhető. A ciklus elején megtörténik a geometriai és a hatásos légrés közötti eltérés korrekciója, majd egy újabb ciklus lépteti a vasban levő térerősséget. Egy adott munkaponti térerősség ismeretében — lineáris interpolációval — a program kiszámítja a munkaponti indukciót és permeabilitást. Ez utóbbi alapján az aktuális légrésméret figyelembevételével meghatározható a munkaponti eredő permeabilitás ( $\mu_1^*$ ). A program kiszámítja a mágnescörre jutó átlagtérerősséget ( $H_0^*$ ), aminek ismeretében meghatározható a (2) egyenlet által megadott, a mágnescör energiataralmára jellemző permeabilitás ( $\mu_2^*$ ) értéke. Ezt követően kerül sor a munkapont meghatározására. A program a térerősséget olyan irányban változtatja, hogy  $\mu_1^*$  és  $\mu_2^*$  értéke egymáshoz közelítsen. Ha ezek relatív eltérése 1%-nál kisebbé válik, a munkapontot meghatározottnak tekinti. Ha a munkapont keresése közben  $\mu_1^*$  értéke  $\mu_{\min}$  alá csökken és eközben  $\mu_2^* > \mu_1^*$ , úgy az adott légrés mellett a további keresésnek nincs értelme, mivel a munkapont ekkor biztosan a  $\mu_{\min}$  által behúzható egyenes alatt fekszik, tehát a specifikációt nem teljesíti. A program ekkor visszaugrik a légrésnövelő ciklus elejére, ill. ha ez mindjárt az első térerősségnél következik be, akkor a vasmag méretét kell növelni. Kis térerősségnél ui. a légrés növelése  $\mu_1^*$  értékét csak csökkenteni tudja (2. ábra).

Ha a térerősség léptetése közben az aktuális érték túllépné az adatbankban szereplő legnagyobb értéket, akkor a program a megadott maximális térerősséggel és a hozzá tartozó  $B(H)$ ,  $\mu(H)$  adatpárral számolna tovább. A gyakorlatban ez azonban nem fordulhat elő, mivel a megadott maximális térerősség a telítési szakaszra esik, ahol  $\mu(H)$  értéke olyan kicsiny, hogy a  $\mu_1^* > \mu_{\min}$  feltétel nem teljesül.

Amikor a program megtalálja a  $\mu_1^* \approx \mu_2^* \approx \mu_{\min}$  munkapontot, akkor a permeabilitást meghatározó többszörös ciklus lezárul. Ismerve a permeabilitás értékét, a program kiszámítja a menetszámot és a huzalátmérőt, majd kiválasztja a legközelebbi nagyobb átmérőjű szabványos huzalt. Ez utóbbi ismeretében a program ellenőrzi a tekercs áramsűrűségét, amelyet 4 A/mm<sup>2</sup>-ben (empirikus érték) korlátoztuk.

Ennek kézbe tartásáról egy — a huzalátmérőt növelő — ciklus gondoskodik, amely szükség esetén új huzalátmérőt választ ki.

A program ezután kiszámítja az egy sorban elhelyezhető menetek számát, a sorok számát és a teljes tekercs magasságát 20  $\mu\text{m}$ -es sorok közötti, és 0,4 mm-es borító szigetelés figyelembevételével. Ha az eredő magasság nagyobb, mint a csévetest ablakma-

gasságának 85%-a (15%-os biztonsági tartalék), akkor vasmagméretet kell növelni. Ha a helyfoglalás megfelelő, a program kiszámítja a tekercs egyenáramú ellenállását és a veszteségi teljesítményt. A számítások befejeztével a program a sornyomatón az alábbi kimenő adatokat közli:

- VASMAGMÉRET,
- LÉGRÉS, mm,
- INDUKTIVITÁS, H; a tekercs tényleges inductivitása a max. megengedett előmágnesező áram esetén,
- FESZÜLTSEG, V; a tekercsen ténylegesen felépő egyenfeszültség a max. megengedett előmágnesező áram esetén,
- MENETSZÁM,
- HUZALÁTMÉRŐ, mm, a szabványos rézhuzal szigetetlen átmérője,
- MENETSZÁM/SOR, soronkénti menetszám,
- SOROK SZÁMA,
- ELLENÁLLÁS, ohm; a tekercs egyenáramú ellenállása,
- DISSZIPÁCIÓ, W; a tekercs egyenáramú veszteségi teljesítménye a max. megengedett előmágnesező áram esetén.

A program működési feltételei:

Az adatbank fazék és EE-típusú magokat tartalmaz. (Ez utóbbival gyakorlatban egyező méretűek az azonos számozású M(TM) típusú magok is). A vasmag anyaga tetszőlegesen megválasztható. Az N22, T26 vagy M33 anyagok használata azzal az előnnyel jár, hogy adataikat az adatbank tartalmazza, ettől eltérő anyag alkalmazása esetén szükséges az anyag 20 db térerősség-indukció-reverzibilis permeabilitás összetartozó adathármasának megadása.

A sorok közötti szigetelés, valamint a borítószigetelés vastagsága kötött (0,02 és 0,4 mm). A szigetelések vastagsága az előírt átütési szilárdságnak [10] minden esetben megfelel, a legkisebb vasmagméreteknél azonban némileg túlméretezett, így a rézkitöltési tényezőt kedvezőtlenül befolyásolja.

A program maximális tárkiépítéssel (8 K) ellátott EMG 666 számítógépen futtatható. A tervezésben használt adatbankok méretei:

Fazékmagok:  $17 \times 5 = 85$  adat  
 E-magok:  $4 \times 5 = 20$  adat  
 Cu MZZ huzalok:  $60 \times 2 = 120$  adat

Ferritanyagok mágneses adatai:  $3 \times 20 \times 3 = 180$  adat

A program 1002 utasításból áll, kontrollszummája 116945. A tervezés időtartama a magmérettel és a légréssel arányosan növekszik, közepes értékek esetén ez átlagosan 5 perc.

Számítási példák

Az alábbiakban bemutatunk két példát különféle rendeltetésű előmágnesezett tekercsek tervezésére.

- Első példa (6. ábra): Kis inductivitású, nagy előmágnesező áramú ferrit fazékmagok tekercs

méretezése. A megengedhető feszültségesés is viszonylag kicsi (0,5 V). Az adott specifikáció és vasanyag pl. egy kapcsolóüzemű tápegység szűrőkörében alkalmazható tekercs méretezésére mutat jellegzetes példát. A számítási idő 4,5 perc.

— Második példa (7. ábra): Nagy induktivitású, kis előmágnesező áramú, lemezeit vasmagú fojtótekercs méretezése. A specifikációs adatok egy jellegzetes hálózati frekvenciájú tápegység fojtótekercsének felelnek meg. A számítást 3601 K2 anyaggal végeztük.

Köszönetet mondunk *Haddad Hedi*-nek, aki diplomaterv feladatként a megadott tervezési algoritmus alapján elkészítette az asztali kalkulátorra alkalmas program-változatot, és összeállította a futtatáshoz szükséges adatbankot, valamint *dr. Takács Ferenc* docensnek, aki a kéziratot átnézte és a munkánkat számos értékes megjegyzéssel segítette.

## I R O D A L O M

- [1] *Takács Ferenc*: Híradástechnikai alkatrészek, Egyetemi jegyzet, Tankönyvkiadó, 1978.
- [2] *Takács Ferenc*: Híradástechnikai alkatrész katalógus, Egyetemi jegyzet, Tankönyvkiadó, 1978.
- [3] *Haddad Hedi*: Előmágnesezett tekercsek tervezése, Diplomaterv, BME-HEI, 1978.
- [4] MSZ 15 800/3—74: Zománchuzal. Felület. Méretek.
- [5] KGSZ 61 3200—70: Fazékmagok. Méretek, jellemzők.
- [6] KGSZ 61 3207—75: „E”-magok. Méretek, jellemzők.
- [7] KGSZ 61 3300—70: Fazékmag csévetestek. Követelmények és vizsgálati módszerek.
- [8] KGSZ 61 3113—71: Összerakható csévetestek „M” maglapokhoz.
- [9] Siemens: Weichmagnetisches Siferrit, Sirufer—Materiale, Datenbuch 1972/73.
- [10] KGSZ 61 3001—71 K (1975): Hálózati transzformátorok 1 kVA-ig. A biztonsági kivitel követelményei.