GAÁL JÓZSEF—GEFFERTH LÁSZLÓ—GÉHER KÁROLY—
HALÁSZ EDIT—TRÓN TIBOR
BME Híradástechnikai Elektronika Intézet

Szűrőbehangolást szimuláló statisztikus programrendszer

ETO 621.372.54.072.6:619.68

Nagy példányszámban készülő áramkörök gyártásának megkezdése előtt fontos lépés a tervezés ellenőrzése abból a szempontból, hogy a gyártás során milyen selejtszázalék várható. Az ellenőrzés hitelessége attól függ, mennyire pontosan tudjuk szimulálni a gyártási folyamat egyes fázisait.

LC szűrők gyártásának legfontosabb lépése a szerelt áramkörök behangolása. Az előadás a Telefongyár megbízásából a Híradástechnikai Elektronika Intézetben elkészített ISOA (az ISOA rövidítés az input-statisztika-optimalizálás-analízis szavakból származik) statisztikus programrendszert [1] ismerteti, melynek alapfeladata a fenti gyártási fázis szimulálása, statisztikus kiértékelése.

A programrendszer ICL 4—70 számítógépre készült FORTRAN nyelven. Helyfoglalása overlay struktúrában (3 egymást váltó szegmens) 110 kByte.

Áramköri jellemzők, specifikációk

Az LC szűrők gyakorlatilag csak létrafelépítésben használatosak. Az elemek veszteségének kompenzálása érdekében a szűrőnek gyakran szerves része a korrektor is. A programrendszer adott ágkészletből (25 különböző ág, max. 5 elemmel) felépülő, létra struktúrájú, egymást nem terhelő szűrő és korrektoregységből álló áramkör vizsgálatára alkalmas. Bármely ág lehet akár hosszági, akár keresztági pozícióban, hosszágak (keresztágak) egymás után is következhetnek.

Az áramköri elemek (a programbeli kezelésmód szerint) az alábbi sajátosságokkal rendelkezhetnek:

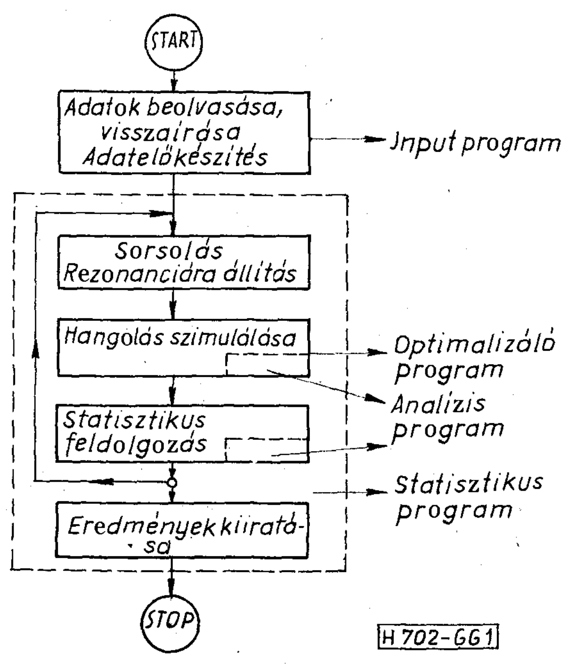
- statisztikus elemek (általában kapacitások): a névleges érték körüli tolerancia-intervallumban tetszőlegesen előírt eloszlással rendelkeznek,
- változó elemek (általában induktivitások): a behangolási folyamat során adott intervallumban változhatnak,
- rezonanciára állítandó induktivitások: a vizsgálat megkezdése előtt egy adott kapacitással vagy kapacitáskombinációval előírt rezonanciára állítandók,
- fix elemek: mind a statisztikus vizsgálatban, mind a behangolás során változatlan értékűek,
- bármely reaktáns elem lehet ideális, vagy rendelkezhet konstans, ill. kvadratikus frekvenciafüggésű jósági tényezővel,
- bármely jósági tényező lehet statisztikusan kezelendő adott intervallumban egyenletes eloszlással.

Beérkezett: 1979. X. 12.

A szűrőspecifikációk a szokásos lépcsős toleranciasémában adhatók meg. Vonatkozhatnak üzemi csillapításra, vagy üzemi és reflexiós csillapításra. A statisztikus vizsgálathoz egyidejűleg több specifikáció is megadható. Lehetőség van arra, hogy a statisztikus ellenőrzés több frekvencián történjen, mint amenynyit a behangolási folyamathoz írtunk elő. A csillapításelőírás lehet abszolút (beleértve az alapcsillapítást is) vagy relatív: adott referenciafrekvencián fellépő vagy egy képzeletbeli alapcsillapításhoz képesti eltérés (utóbbi esetben a program automatikusan veszi fel az alapcsillapítás legkedvezőbb értékét).

A programrendszer működése, statisztikus vizsgálatok

A programrendszer működése az 1. ábrán követhető. Az adatok beolvasása, visszaírása és adatelőkészítés után a program kisorsolja a statisztikus elemek értékét, elvégzi a rezonanciára állításokat, majd hívja a behangolást szimuláló optimalizáló programot. Ha a behangolás adott iterációszámon belül nem sikerül, a program a kisorsolt szűrőpéldányt nem behangolhatónak veszi. Egyébként az optimalizálás csak a specifikáció teljesítésének eléréséig tart. A hangolás befejeztével tárolódnak a statisztikus kiértékeléshez szükséges adatok, majd újabb sorsolás következik.



1. ábra. A programrendszer blokkvázlata

A Monte Carlo-ciklus után elkészülnek a megfelelő statisztikák és az eredményeket megjelenítő hisztogramok.

A hangolás utáni állapotról a program a következő statisztikus eredményeket szolgáltatja:

— selejtarány (a nem behangolható példányok aránya — reflexiós követelmény esetén külön a csillapításra és külön a reflexióra vonatkozóan),
— frekvenciánkénti hisztogram 32 intervallumos bontásban az egyes példányok hangolás utáni karakterisztikájáról (áteresztő sávban külön a reflexióra is),
— összesítő hisztogram az áteresztő sávban előfordult legrosszabb esetekről.

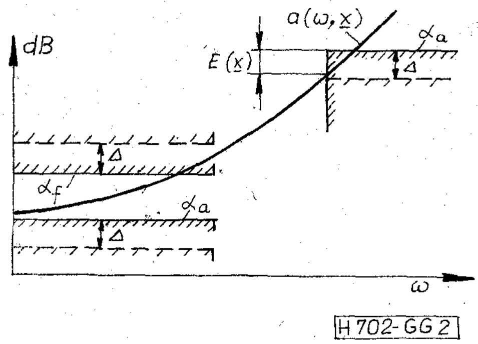
A programrendszer biztosítja a szűrők gyártás utáni állapotának (hőfokfüggés, öregedés) statisztikus ellenőrzési lehetőségét is. Ha a bemenő adatok erre vonatkozó statisztikus információkat és specifikációt (egyidejűleg több is megadható!) is tartalmaznak, a behangolt áramköri példányokból kiindulva a programrendszer mindazokat a statisztikus kiértékeléseket elvégzi és kiírja az öregedésre vagy hőfokfüggésre nézve is, mint a behangolás szimulálása után.

A programrendszer — alapfeladatán túlmenően — speciális célokra is használható.

1. Ha egyetlen elemet sem adunk meg változóként, elmarad az optimalizáló program működése, így az áramkör direkt Monte Carlo-analízise végezhető el (nincs hangolás).
2. Ha a Monte Carlo-ciklusok számát nullának írjuk elő, a statisztikus program működése marad el, csak egyetlen példány optimalizálására kerül sor a névleges értékekből indulva. Mivel bármely (akár az összes) áramköri elem tekinthető változónak, kellően szigorú specifikációt írva elő az optimalizáló program egy közelítő tervezés eredményét javítja tovább. Így a programrendszer tényleges számítógépes tervezésre használható.

A behangolás, mint optimalizálási feladat

A szűrő hangolása során a hangolható elemeket addig változtatják, amíg nem sikerül a specifikációt teljesítő beállítást létrehozni. A behangolás szimulálása matematikailag optimalizálási feladatként fogalmazható meg [2].



2. ábra. Specifikáció és karakterisztika az optimalizálási feladat megfogalmazásához

Tekintsük a 2. ábrán bemutatott esetet. Hangolásra akkor van szükség, ha a szűrő $a(\omega, x)$ karakterisztikája nem teljesíti az $\alpha_a(\omega)$ és $\alpha_f(\omega)$ specifikációt. A hangolás csökkenti az $E(x)$ maximális hibát, sikeres behangolás esetén $E(x) \leq 0$.

A megoldandó optimalizálási feladat a következő:

$$E(x)=\max_{\Omega_a,\,\Omega_f}\{[a(\omega_k, x)-\alpha_f(\omega_k)]_{\omega_k\in\Omega_f},\ [\alpha_a(\omega_k)-a(\omega_k, x)]_{\omega_k\in\Omega_a}\} \qquad (1)$$

és teljesítendők az

$$a(\omega_k, x)\geq\alpha_a(\omega_k) \qquad \omega_k\in\Omega_a$$

$$a(\omega_k, x)\leq\alpha_f(\omega_k) \qquad \omega_k\in\Omega_f \qquad (2)$$

egyenlőtlenségek, mint mellékfeltételek ($E/x/\leq 0$ ugyanis csak így lehetséges). A kifejezésekben x a hangolandó elemek vektora (az optimalizálás változói), $a(\omega_k, x)$ a szűrő csillapítása az ω_k frekvencián az aktuális x elemértékeknél, Ω_a, ill. Ω_f azon frekvenciák halmaza, melyre az α_a alsó, ill. α_f felső korlátelőírások vonatkoznak. Mivel $a(\omega_k, x)$ x-nek nemlineáris függvénye, az (1) és (2)-ben megfogalmazott probléma nemlineáris kötött optimalizálási feladat.

A kötött szélsőérték-feladat visszavezetése kötetlen feladatra pl. az ún. SUMT (sequential unconstrained minimization technique) módszerrel lehetséges [3]. Ilyenkor az eredeti

$$\begin{aligned}&\text{minimalizálandó } f(x)\\&\text{miközben } g_k(x)\geq 0 \qquad k=1, 2, \ldots\end{aligned} \qquad (3)$$

kötött feladat a

$$\text{minimalizálandó } F(x, r_j)=f(x)+r_jP(x)$$

$$P(x)=\sum_k\frac{1}{g_k(x)}\,r_j>r_{j+1}>0 \qquad j=0, 1, \ldots \qquad (4)$$

kötetlen feladatsorozatra vezet. A megkötéseket figyelembe vevő $P(x)$ „büntető tag" hatását az egyre csökkenő r_j értékekkel nyomjuk el, így F minimuma f minimumához konvergál.

A SUMT-módszer alkalmazhatóságának feltétele olyan kezdeti x_0 érték, amelynél a (3)-beli egyenlőtlenségek már teljesülnek. F és f nullához közeli minimummal csak akkor rendelkezhet, ha az iterációk során a g_k-k nem váltanak előjelet, mert a nullátmenet környezetében P nagy negatív értéket venne fel. A hangolás kezdetekor a (2) egyenlőtlenségek közül legalább egy nyilvánvalóan nem teljesül, így a feltételek átfogalmazására van szükség.

Ha a specifikációt $\Delta>E(x_0)$ értékkel lazábbra módosítjuk a 2. ábra szaggatott vonalai szerint, de $E(x)$-et továbbra is az eredeti specifikáció alapján határozzuk meg, a

$$g_k(x)=a(\omega_k, x)-[\alpha_a(\omega_k)-\Delta]>0, \qquad (5)$$

$$g_k(x)=[\alpha_f(\omega_k)+\Delta]-a(\omega_k, x)>0$$

feltételekkel az (1) célfüggvényre már alkalmazható a SUMT-módszer. Az így adódó

$$\text{minimalizálandó } F(x, r_j)=E(x)+r_jP(x) \qquad (6)$$

$$P(x)=\sum_{\omega_k\in\Omega_a}\frac{1}{a(\omega_k, x)-\alpha_a(\omega_k)+\Delta}+$$

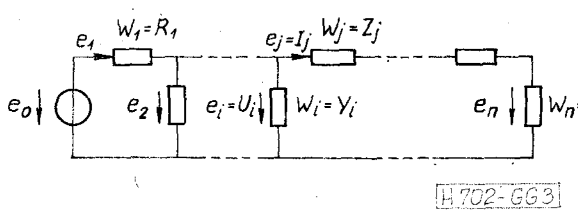
$$+\sum_{\omega_k\in\Omega_f}\frac{1}{-a(\omega_k, x)+\alpha_f(\omega_k)+\Delta} \qquad (7)$$

kötetlen szélsőérték feladatban $P(x)>0$. A minimumot adó $\hat{x}$ megoldás akkor jelenti a specifikáció teljesítését (a szűrő behangolhatóságát), ha $E(\hat{x})\leq 0$.

A (6)-ban nyert nemlineáris kötetlen optimalizálási feladat megoldására olyan kvadratikus iterációs eljárást [4] alkalmaztunk, mely az $F(x)$ célfüggvénynek csak elsőrendű deriváltjait igényli. Iterációnként először $F(x)$ csökkenésének irányát kell meghatározni, majd az adott irányban következik $F(x)$ minimumának megkeresése. Mivel a mi esetünkben az $F(x)$ célfüggvény az $E(x)$ tag miatt nem differenciálható (az $E(x)$ maximális hiba mindig másmás frekvencián léphet fel), az irány meghatározásánál csak a $P(x)$ differenciálható tagot vettük figyelembe, az iránymenti minimum megkeresésénél viszont a tényleges hibát jelentő $E(x)$ minimumát kerestük a Fibonacci eljárást alkalmazva. A módosítások lényegesen kevesebb számítást és jobb konvergenciát eredményeztek [2].

Létrahálózat analízise

Mind a behangolást szimuláló optimalizáláshoz, mind a statisztikus vizsgálatokhoz szükséges a szűrő analízise. A lehető gyors működés érdekében a kontinuánsokon [5] alapuló speciális létraanalízis-programot használtunk.



3. ábra. Létraszűrő kapcsolása

A kontinuánsok a létrahálózat áram—feszültség kapcsolataiban szereplő mennyiségek. A 3. ábra jelöléseit véve alapul, bármely e_{i-1} ágjellemző kifejezhető a két következő ág e_i és e_{i+1} jellemzőivel, és lépésenkénti helyettesítéssel az utolsó ág e_n feszültségével:

$$e_{i+1}=W_ie_i+e_{i+1}=\ldots=K_i^ne_n, \qquad (8)$$

$$K_n^n=W_n, \quad K_{n+1}^n=1.$$

(8)-ban e_i és e_{i+1} helyére szintén az e_n-nel kifejezett alakokat helyettesítve

$$K_i^n=W_iK_{i+1}^n+K_{i+2}^n \qquad (9)$$

adódik. A $K_\cdot^\cdot$ mennyiségek a kontinuánsok, (8) adja definíciójukat, (9) a számításukra vonatkozó rekurziós formula.

Ha az ábrán a generátort a kimenetre tesszük és az áramirányokat megfordítjuk, az analóg

$$e_{i+1}=K_1^ie_1, \quad K_1^1=W_1, \quad K_1^0=1, \qquad (10)$$

$$K_1^i=W_iK_1^{i-1}+K_1^{i-2} \qquad (11)$$

összefüggések adódnak.

Az átviteli tényezőre, a szűrő bemeneti impedanciájára és primer oldali reflexiójára a fentiekből a

$$\Gamma\equiv\frac{U_0}{2U_n}\sqrt{\frac{R_n}{R_1}}=\frac{K_1^n}{2\sqrt{W_1W_n}}, \qquad Z_{\text{be}}\equiv\frac{e_2}{e_1}=\frac{K_3^n}{K_2^n}$$

$$r\equiv\frac{Z_{\text{be}}-R_1}{Z_{\text{be}}+R_1}=2\,\frac{K_3^n}{K_1^n}-1 \qquad (12)$$

kifejezéseket kaphatjuk. Az optimalizáláshoz szükséges elsőrendű érzékenységek az

$$S_i^a=\frac{\partial a}{\partial W_i}=\text{Re}\,\frac{\partial \ln \Gamma}{\partial W_i}=\text{Re}\,\frac{K_1^{i-1}K_{i+1}^n}{K_1^n},$$

$$S_i^{a_r}=\frac{\partial a_r}{\partial W_i}=-\text{Re}\,\frac{\partial \ln r}{\partial W_i}=2W_i(-1)^i\text{Re}\left(\frac{K_{i+1}^n}{K_1^n}\right)^2 \qquad (13)$$

összefüggésekkel határozhatók meg [5].

A programban megengedett ágkészlet ágainak felépítése olyan, hogy a W_i ágimmittanciák és azok $\partial W_i/\partial x_j$ elemek szerinti deriváltjai szintén — az ágelemekből számolható — kontinuánsokkal fejezhetők ki.

A kontinuánsok rekurzív számolhatósága és a (12), (13) formulák egyszerűsége hatékony analízisprogramot eredményeznek.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki *Radvány Jenőnek* és *Szente Lászlónak* (Telefongyár) a program kidolgozása során nyújtott támogatásukért, a hasznos eszmecserékért.

IRODALOM

[1] Az ISOA programrendszer használati utasítása. BME—HEI, 1978. (Telefongyár megbízásából)

[2] *Halász E.:* Simulation of LC filter tuning by optimization. Proceedings of the Fourth International Symposium on Network Theory, Ljubljana, 1979, pp. 185—191.

[3] *Fiacco, A. V.—McCormick, G. P.:* Nonlinear programing: sequential unconstrained minimization techniques. Wiley, New York, 1968.

[4] *Jacobson, D. H.—Oksman, W.:* An algorithm that minimizes homogeneous functions of N variables in N+2 iterations and rapidly minimizes general functions. Journal Math. Anal. Appl., 38 (1972), p. 535.

[5] *Herendi Miklós:* A kontinuánsok és alkalmazásuk lánckapcsolású hálózatok gépi számítására. Híradástechnika, XIX. évf. (1968), 1. sz. 2—9. old.