

Elektronikai áramkörök gazdaságos tervezése és a toleranciaelmélet*

DR. GÉHER KAROLY

BME Híradástechnikai Elektronika Intézet



ÖSSZEFOGLALÁS

Az elektronikus áramkörök tervezésének újabb módszerei lehetővé teszik nemcsak a gyártási kihozatal meghatározását, hanem új névleges elemértékek és toleranciák kiszámítását is. A tervezési módszert tolerancia optimalizálásnak vagy tolerancia központosításnak nevezzük. E gazdaságosság szempontjából jelentős eljárások kidolgozása a toleranciaelmélet továbbfejlesztése alapján lehetséges. A szerző bemutatja az optimális kihozatalra történő tervezés fogalmainak kialakulását. Útal a Budapesti Műszaki Egyetem Híradástechnikai Elektronika Intézetében kidolgozott algoritmusokra és számítógép programokra. A módszerek Monte-Carlo szimuláción és optimalizálási eljárásokon alapulnak. Az LC szűrőkre és az aktív RC szűrőkre vonatkozó programokat az oktatáson kívül az iparban is használják. Segítségükkel a gyártás kihozatala és/vagy a megengedett toleranciák értéke növelhető.

Bevezetés

A Hírközlési Világévben elsősorban a híradástechnikai szolgáltatások kérdései kerülnek előtérbe. A szolgáltatások híradástechnikai rendszerek működésén alapulnak. E mögött azonban nemcsak a híradástechnikai berendezéseket kell látnunk, hanem egy mélyebb szintet is: az elektronikus áramköröket. Most ne folytassuk tovább a szintek vizsgálatát az alkatrészek kérdéskörével, hanem koncentráljuk figyelmünket az elektronikus áramkörök tervezésére.

Az elektronikus áramkörök tervezésének lépései közül különösen fontos a kiinduló áramkör megalakítása (szintézis), ennek vizsgálata (analízis) és módosítása (optimalizálás). Az igények és lehetőségek kölcsönhatása az elmúlt évtizedben a számítógépes elektronikai tervezés kialakulásához vezetett. Az új tervezési eljárások között kitüntetett figyelmet érdemel a tömeggyártás igényeit kielégítő, gazdaságos gyártást eredményező módszerek kialakulása. A tolerancia optimalizálásnak vagy tolerancia központosításnak nevezett tervezési eljárás a kihozatal növelésével (a selejt csökkentésével) és/vagy a toleranciák növelésével éri el a gazdaságosság javulását.

A toleranciaelmélet a névleges és mért értékek közötti eltérések vizsgálatával és káros következményeinek csökkentésével foglalkozik. Kialakulásában kulcsfontú szerepet játszott az érzékenység fogalma, ami a hálózatjellemző függvény n változós Taylor-sorában szereplő parciális deriváltakat jelenti. Az áramköri paraméterek változására érzéketlen áramkört a régóta elterjedt tervezői gyakorlat a következő módszerekkel érte el: (i) a specifikáció alkalmas teljesítése (pl. túlméretezés), (ii) a felépítés alkalmas megválasztása (pl. visszacsatolás, létra kapcsolás).

* Elhangzott a MTA 1983. V. 2-i tudományos ülés-szakán.

DR. GÉHER
KÁROLY

Villamosmérnöki oklevelet 1952-ben a Budapesti Műszaki Egyetemen szerezte meg. 1952-től a BME Elméleti Villamoságtan Tanszékén, 1959-től a BME Vezetékes Híradástechnika Tanszékén dolgozott, 1974-től a BME Híradástechnikai Elektronika Intézetében egyetemi tanár. Mellékfoglalkozásban 1957-től 1967-ig a Távközlési Kutató Intézetben tevékenykedett. A

műszaki tudományok doktora. Szakterülete a lineáris hálózatok elmélete és a számítógépes áramkörtervezés. A Híradástechnikai Tudományos Egyesület elnökségének és végrehajtó bizottságának tagja, a Virág-Pollák díj és a Puskás Tivadar emlékérem tulajdonosa. A Nemzetközi Rádió Tudományos Unió (URSI) 1981-ben a „Jelek és rendszerek” szakkbizottság alelnökének választotta meg.

(iii) szigorú technológia előírása (pl. kis toleranciák). Kritikus esetekben elvégezték a legrosszabb esetre történő ellenőrzést (worst case design) és a választott felépítést érzékenység mértékek összehasonlításával minősítették.

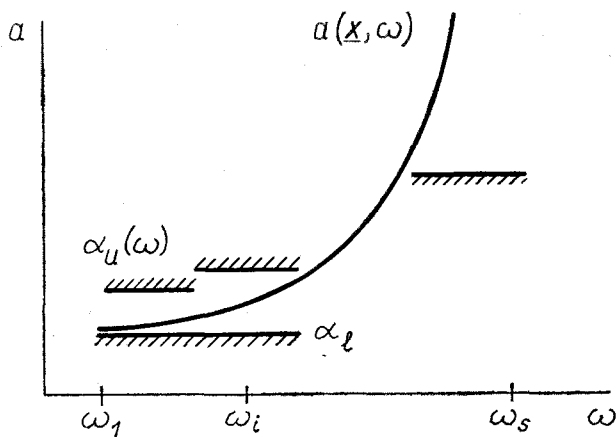
A számítógépek megjelenésével lehetővé vált a tömeggyártás Monte-Carlo szimulációja és megvalósult a környezeti hatások (pl. hőmérséklet) szimulációja is. A toleranciák kiosztása továbbra is tervezői tapasztalat alapján történt.

A tolerancia optimalizálása vagy más néven tolerancia központosítás, a kiinduló áramkör elemeire új névleges értéket szolgáltat és az elemekre új toleranciát ad meg a maximális kihozatal érdekében, így a jó áramkörök költségének csökkentése útján hozzájárul a gazdaságosság növeléséhez.

A következőkben a részletek mellőzésével a toleranciaközpontosítás feladatának matematikai megfogalmazását tekintjük át, megvilágítjuk a megoldás lehetőségeit és utalunk az elkészült számítógép-programokra. A beszámoló a BME Híradástechnikai Elektronika Intézetben folyó munkákon alapszik. Ez részben indokolja azt, hogy az irodalomjegyzékben csak intézeti munkatársak publikációi szerepelnek. A témakör részletes irodalomjegyzékét az érdeklődő Olvasó [10]-ben találja meg.

A feladat kitűzése

Az 1. ábrán egy hálózatjellemzőt (csillapítást) látunk a frekvencia függvényében. A hálózatjellemző a frekvencián kívül az áramköri paramétereknek is függvénye, melyeket az x vektorban foglaltunk össze.



$$\alpha_{Li} \leq a_i(x) \leq \alpha_{Ui}$$

$$i = 1, \dots, s$$

H898-1

1. ábra. A frekvenciatartománybeli előírás

A specifikációt az α_L (lower) és α_U (upper) értékek adják. A specifikáció teljesülését s darab frekvencián vizsgáljuk. Így a specifikációt teljesítő áramkör elég tesz az

$$\alpha_{Li} \leq a_i(x) \leq \alpha_{Ui} \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, s$$

előírásoknak. A következőkben általában feltételezzük, hogy van már egy olyan kiinduló áramkörünk, amelyik a specifikációt teljesíti. Célunk ennek az áramkörnek további javítása. Ennek érdekében be kell vezetnünk az áramköri paraméterek megengedett tartományát.

A megengedett tartomány azon lehetséges x áramköri paraméterek halmaza, melyek esetén a specifikáció teljesül:

$$R = \{x \mid \alpha_{Li} \leq a_i(x) \leq \alpha_{Ui}\} \quad (2)$$

A megengedett tartomány alakjáról nagyon bonyolult általános megállapításokat tenni. Szemléltetése is csak két áramköri paraméter esetén egyszerű, erre mutat példát a 2. ábra. Az R tartományon belüli paraméter értékekre a specifikáció teljesül, a kívüliekre nem. Látjuk azt is, hogy a névleges értéket a tartomány „közepére” célszerű helyezni, innen származik a tolerancia központosítás kifejezés. A 2. ábrán mutatott speciális esetben a megengedett tartomány egyszerűen összefüggő és konvex.

Az i -edik áramköri elem névleges értékét jelöljük x_i^0 -val. Tétélezzük fel, hogy a tényleges x_i érték $x_i^0 \pm \varepsilon_i$ között változik, ahol ε_i az áramköri paraméter toleranciája. Kézenfekvő megállapítás, hogy az ε_i toleranciák növekedésével az áramkör költsége csökken:

$$C_i = c_i \frac{x_i^0}{\varepsilon_i} \quad (3)$$

Ezt szemlélteti a 3. ábra. n áramköri paraméter esetén az összköltség minimumát kívánjuk elérni, vagyis a célfüggvény:

$$\sum_{i=1}^n c_i \frac{x_i^0}{\varepsilon_i} \rightarrow \min! \quad (4)$$

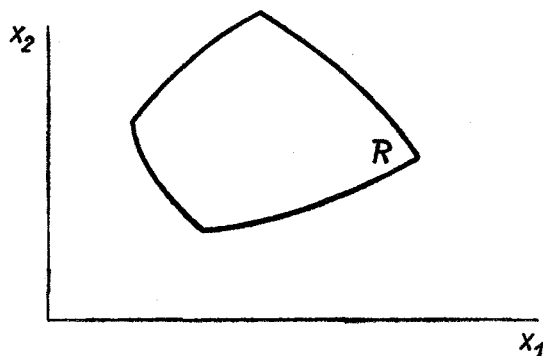
Természetesen csak olyan áramkörök jöhetnek szóba, melyek az (1) feltételt teljesítik. Így a tolerancia központosítási feladat egyik lehetséges megfogalmazása:

$$\sum_{i=1}^n c_i \frac{x_i^0}{\varepsilon_i} \rightarrow \min! \quad (5)$$

$$\alpha_{Li} \leq a_i(x) \leq \alpha_{Ui}$$

Ez egy nemlineáris programozási feladat, melynek megoldása az optimális új névleges értékeket és toleranciákat adja.

$$R = \left\{ x \mid \alpha_{Li} \leq a_i(x) \leq \alpha_{Ui} \right\}$$



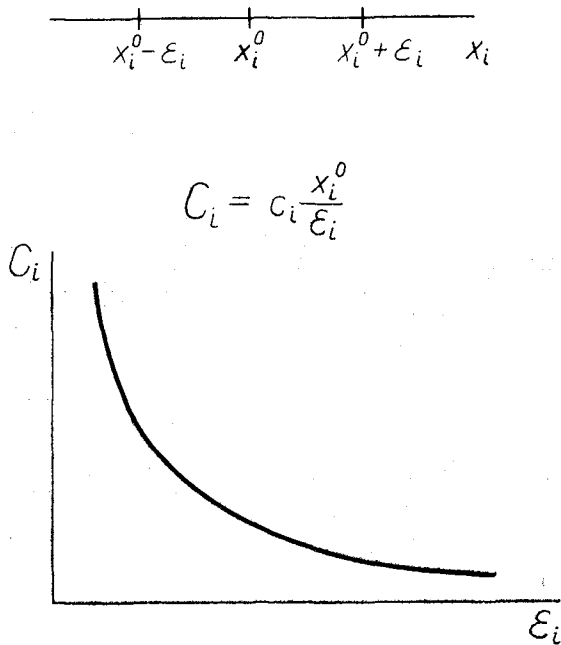
H898-2

2. ábra. A megengedett tartomány

Megoldási módszerek

A feladat megoldását sok esetben célszerű két lépésre bontani. Az első lépésben meghatározzuk az új névleges értékeket, a másodikban a toleranciákat. A 2. ábrán látható tartomány középpontját például az áramköri paraméterek vonalmenti változtatásával és a tartományt feltérképező vonalmetszetek felvezésével megkaphatjuk.

További lehetőség a Monte-Carlo szimuláció alkalmazása. A 4. ábra az R megengedett tartományon kívül folyamatos vonallal kihúzva egy tolerancia testet is mutat. Kétdimenziós esetben a tolerancia test téglalap, középpontja a névleges érték, oldalhosszúságai a kétszeres toleranciák. Monte-Carlo analízissel meghatározhatjuk a specifikációt teljesítő jó áramkörök és a specifikációt nem teljesítő rossz áramkörök súlypontjait. Ezek ismeretében a név-

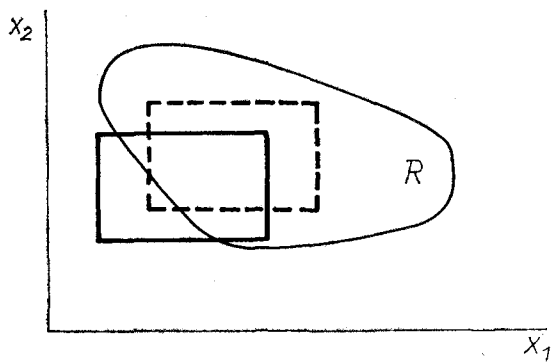


$$\sum_{i=1}^n c_i \frac{x_i^0}{\epsilon_i} \rightarrow \min!$$

$$\alpha_{li} \leq a_i(x) \leq \alpha_{ui}$$

H898-3

3. ábra. Az áramköri paraméter toleranciája, a költségfüggvény és a matematikai programozási feladat



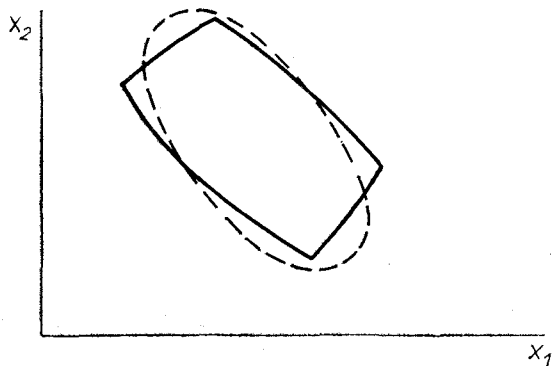
H898-4

4. ábra. A szaggatott vonallal jelölt eset jobb kihozalt ad

leges értéket a jó áramkörök súlypontja irányába eltolhatjuk. Az új helyzetet szaggatott vonallal jelöltük. Látjuk, hogy a jó áramkörök aránya növekedett, tehát a kihozatal nagyobb lett.

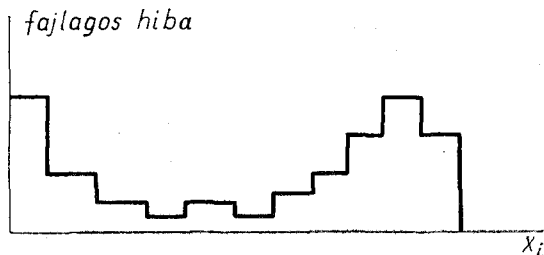
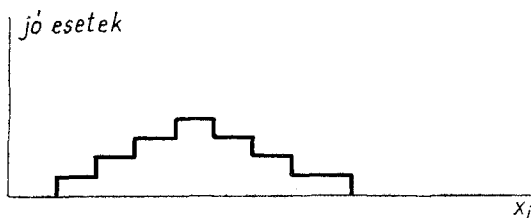
A Monte-Carlo analízist felhasználhatjuk a megengedett tartomány szabályos testtel történő lefedésére. Az 5. ábra azt mutatja, amikor a lefedést n dimenziós ellipszoiddal végezzük, ami két dimenzió esetén ellipszist jelent.

Az ellipszis nagysága és helyzete ismételt Monte-



H898-5

5. ábra. A megengedett tartomány lefedése szabályos testtel



H898-6

6. ábra. Az új névleges érték és az új tolerancia meghatározásához használt hisztogramok

Carlo ciklusokkal optimalizálható, ezért az eljárás a rekurzív Monte-Carlo módszerek családjába tartozik. A lefedő szabályos test ismeretében direkt úton lehet a tolerancia hasábot elhelyezni. A lefedő szabályos test középpontja az új névleges értékeket, a tolerancia hasáb pedig az új toleranciákat szolgáltatja.

A Monte-Carlo analízisek alapján heurisztikus módszert adhatunk az optimális névleges érték és tolerancia meghatározására. Tekintsük a 6. ábrán látható hisztogramokat. A felső hisztogram azoknak az eseteknek az előfordulását mutatja, amikor az áramkör teljesíti a specifikációt. Az ábrán rajzolt speciális esetben már ezen hisztogram alapján tudnánk új névleges értéket és toleranciát javasolni, azonban a gyakorlati esetekben egy további hisztogram felhasználására is szükség van. Célszerű azt is kigyűjteni a Monte-Carlo analízisek eredményeiből, hogy a rossz áramkörök milyen erősen sértik meg a specifikációt. Erről ad felvilágosítást a 6. ábra

hisztogramja, a fajlagos hibáról. A két hisztogram alapján egyszerű utasítások adhatók az optimális értékek kiszámítására.

A tolerancia központosítás eredményeként kapott áramkört minden esetben egy különálló, független Monte-Carlo szimulációval kihozatal szempontjából ellenőrizzük.

Számítógép programok

Az előzőekben vázolt statisztikus áramkör analízisre és tolerancia központosításra a BME Híradástechnikai Elektronika Intézetében több számítógép program készült. Ismertetésük több publikációban megtörtént, adataik a programkatalógusban megtalálhatók, ezért itt csak felsorolásukat mutatjuk be a 7. ábrán.

MTA	OPÁL
TELEFONGYÁR	VISOA
	INTOPT
	RMC
	GHU
	SPERZ
REMIX	STARCAN
	TOCENT

7. ábra. A BME—HEI-ben készült programok neve és a kidolgozást támogató intézmények, az 1983. évi állapotnak megfelelően

A kutatás megindulása és az első programok a Magyar Tudományos Akadémia támogatásával készültek, demonstrációs és oktatási célból. A TELEFONGYÁR megbízásából az LC szűrőkre vonatkozóan születtek gyakorlatilag használható programok, jelenleg a REMIX megbízásából aktív RC áramkörök újratervelésére készülnek programok a hibrid technológia lehetőségeinek és korlátainak figyelembevételével. Rendszeres használatuk eredményéről a TELEFONGYÁR tapasztalatai alapján kaphatunk tájékoztatást. A programok által vizsgált szűrők áramköri elemeinek száma 5—6-tól 25—30-ig terjedt. A kezdeti kihozatal 60—80%-ról 90—100%-ra növekedett. A kezdeti toleranciák 0,5—1%-os értéke 2—5%-ra nőtt. Ha csupán a kihozatal növekedését tekintjük, akkor is érzékelhetjük a gazdaságos tervezés hasznát.

A gazdaságilag értékelhető eredményt hozó új tervezési módszer kidolgozását az MTA támogatása, továbbá a TELEFONGYÁR és REMIX által nyújtott ipari együttműködés tette lehetővé.

I R O D A L O M

- [1] Béres V.—Géher K.: Lineáris hálózatok érzékenységi- és toleranciavizsgálata. Híradástechnika, XXVII. évf. 9. sz. 1976. 269—274. o.
- [2] V. Béres—K. Géher: Sensitivity and Tolerance Analysis of Linear Networks. Proceedings 1976 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. TU Munich, 1976 pp. 201—204.
- [3] Gaál J.—Gefferth L.—Géher K.—Halász E.—Trón T.: Szűrőbehangolást szimuláló statisztikus programrendszer. Híradástechnika, XXX. évf. 11—12. sz. 1979. 329—331. o.
- [4] J. Gaál—L. Gefferth—K. Géher—E. Halász—T. Trón: Statistical Program Simulating LC Filter Tuning. Periodica Polytechnica, El. Eng. Vol. 24. No. 1—2. 1980. pp. 3—10.
- [5] J. Gaál—L. Gefferth—K. Géher—E. Halász—T. Trón: Computer Aided Optimization, Tuning Simulation and Statistical Yield Estimation of LC Filters. ECCTD '80. 1980 European Conference on Circuit Theory and Design. Proceedings Vol. 2. pp. 486—490. Warsaw, Poland, September 2—5. 1980.
- [6] J. Gaál—L. Gefferth—K. Géher—E. Halász—T. Trón: New Algorithms and Computer Programs for Design Centering, Tolerancing and Tuning under Environmental Influence. Circuit Theory and Design. Edited by R. Boite and P. Dewilde. Delit University Press/North-Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford, 1981. pp. 696—703.
- [7] Gaál J.: Elektronikus áramkörök statisztikus analízise és szintézise Monte-Carlo módszerrel. Akadémiai Kiadó, Budapest, megjelenés alatt.
- [8] L. Gefferth: Specification Sensitivity and its Use in System Design. IEE Proc. Vol. 129, Pt. G. No. 4. August 1982. pp. 181—185.
- [9] L. Gefferth: Specification Sensitivity, a System Designer Approach to Yield Improvement of Electronic Circuits. Proceedings of the Seventh Colloquium on Microwave Communication. Vol. I. OMIKK—TECHNOINFORM Budapest, 1982. pp. 191—194.
- [10] Gefferth L.: Elektronikus áramkörök gyártási selejtjének csökkentése a névleges értékek és toleranciák megváltoztatásával a kihozatali érzékenység alapján. Híradástechnika, XXXIII. évf. 8. sz. 1982. 337—343. o.
- [11] Géher K.: Lineáris hálózatok, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1968. 478. o.
- [12] K. Géher: Theory of Network Tolerances. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1971.
- [13] K. Géher: Theory of Sensitivity Invariants and their Application to Optimization of Tolerances and Noises. Periodica Polytechnica El. Eng. Vol. 19. No. 1. 1975. pp. 25—34.
- [14] E. Halász: Simulation of LC Filter Tuning by Optimization. Proceedings of the Fourth International Symposium on Network Theory, Ljubljana, 1979. pp. 185—191.
- [15] Halász E.: Design Centering and Tolerancing, Considering Environmental Effects Via a New Type Minimax Optimization. IEE Proc. Vol. 129. Pt. G. No. 4. August, 1982. pp. 134—138.
- [16] Halász E.: Lineáris áramkörök tervezése optimalizálással. Kandidátusi értekezés. Budapest, 1982. 171. o.
- [17] OPAL használati utasítás. Budapesti Műszaki Egyetem, Híradástechnikai Elektronika Intézet, 1980. június.
- [18] Prónay G.—Solymosi J.—Trón T.: Lineáris áramkörök gyártási selejtarányának csökkentése. HTE Alkatrész Szeminárium, Kecskemét, 1982. október 18—20. 39 o.
- [19] R. Spence—A. Ilumoka—N. Maratos—L. Gefferth—R. Soim: The Statistical Exploration Approach to Tolerance Design. Proceedings IEEE International Conference on Circuits and Computers, New York, 1980. pp. 582—585.