

HÍRADÁSTECHNIKA

Elektronikus áramkörök gyártási selejtjének csökkentése a névleges értékek és toleranciák megváltoztatásával a kihozatali érzékenység alapján

D. R. G E F F E R T H
L Á S Z L Ó
BUDAPESTI MŰSZAKI
EGYETEM
HÍRADÁSTECHNIKAI
ELEKTRONIKA
INTÉZET

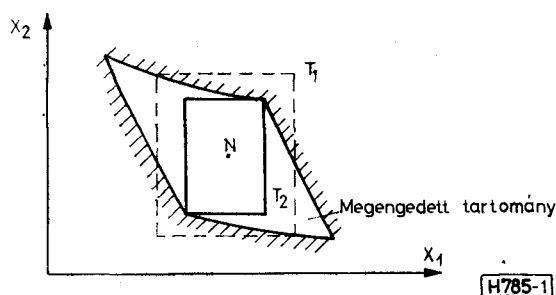
A gazdaságos gyártás megköveteli, hogy már a tervezés folyamán törekedjünk a várható gyártási selejt csökkentésére. A tervezés első lépése az adott előírásokat, a specifikációt kielégítő, ideális elemekből felépülő áramkör meghatározása. Ideális elemen most olyan elemet értünk, amelynek vesztesége nincs, értéke az időben vagy a hőmérséklet megváltozásának hatására nem változik. A tervezés következő lépésében, vagy ha lehetséges már az elsőben, figyelembe kell venni az elemek fentebb említett nem ideális tulajdonságait vagy azok egy részét is. Pl. az egyenletes veszteség elvének felhasználásával olyan eljárások születtek az LC szűrők tervezésére, amelyek a veszteséget már eleve figyelembe veszik.

Előbb a gyártási pontatlanság figyelembevételével foglalkozunk. Kérdésünk úgy fogalmazható meg, hogy a megtervezett névleges értékű elemeknek mekkora legyen a toleranciája egy adott selejtarány vagy kihozatal eléréséhez. Kihozatalnak nevezzük a specifikációt teljesítő áramkörök százalékos arányát az összes legyártott áramkör számához viszonyítva. 100%-os kihozatal esetén tehát nincs selejt.

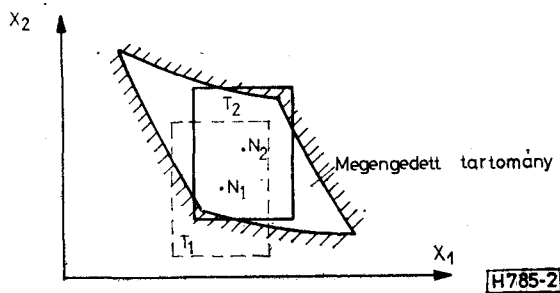
A megtervezett névleges értékeken tehát nem változtatunk, hanem meghatározzuk minden egyes elem toleranciáját. Ezt nevezzük *tolerancia kiosztásnak* [4].

Az 1. ábrán két paraméter esetében illusztráltuk a tolerancia kiosztást. Megengedett tartománynak nevezzük az áramköri paramétereknek azt a tartományát, amelyhez tartozó áramkör jellemző hálózatfüggvények teljesítik az előírt specifikációt. A tolerancia tartomány az áramköri paraméterek által felvett értékek lehetséges tartományát jelenti, amelyet a névleges értékek, valamint a paraméterek toleranciái határoznak meg. Az 1. ábrán a T_2 -vel jelzett tolerancia tartományhoz 100% kihozatal tartozik, míg a T_1 -hez kevesebb. A tolerancia kiosztásakor törekedhetünk 100%-os kihozatalra vagy a gyártás egészét tekintve legolcsóbb áramkört adó toleranciák meghatározására.

Adott toleranciák esetén a kihozatal növelésére a névleges értékek megváltoztatásával, a központossítással [5] is lehetőség nyílik. A 2. ábrán a központossítást illusztráltuk. A megtervezett áramkör para-



1. ábra. A tolerancia kiosztás fogalma



2. ábra. A központossítás fogalma

métereinek névleges értékét az ábrán N_1 -gyel jelöltük. Látható, hogy a névleges értékekkel az áramkör teljesíti a specifikációt, hiszen az áramkör adott specifikáció kielégítésére lett tervezve, de a tolerancia tartomány nagy része kívül került az elfogadható tartományon. A T_2 -vel jelzett tolerancia tartomány esetében a toleranciák változatlanul hagyása mellett nagyobb lett a kihozatal.

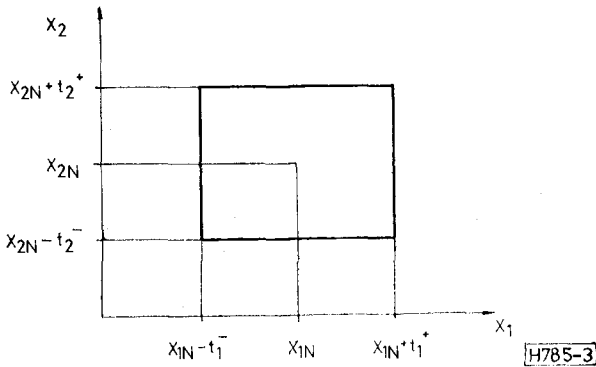
A fenti két feladat (központossítás és tolerancia kiosztás) esetében hasznos információt nyújthat a tervezőnek, ha a paraméter-toleranciák változásának a kihozatalra gyakorolt hatását a toleranciák tényleges megváltoztatása előtt ismeri. A központossítást és tolerancia kiosztást mind determinisztikus [8], mind statisztikus [21] módszerekkel elvégezhetjük. A továbbiakban a statisztikus tervezéshez segítséget nyújtó kihozatali érzékenységet definiáljuk, megadjuk a számítás algoritmusát, valamint megmutatjuk az alkalmazási lehetőségeket. Végül bőséges irodalomjegyzéket közlünk a témával közelebbről megismerkedni szándékozók részére.

Beérkezett: 1981. III. 12.

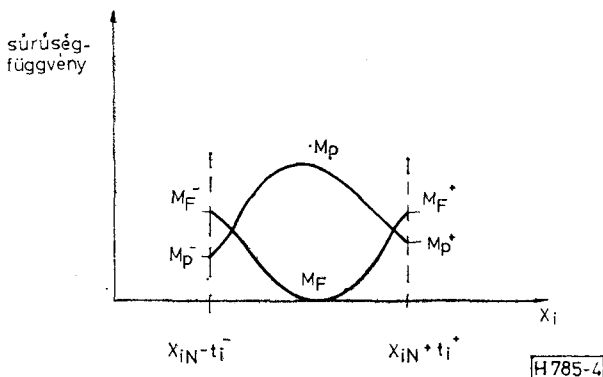
1. A kihozatal érzékenysége az áramköri elemek toleranciája szerint

Az érzékenység meghatározásához először egy Monte-Carlo analízisre van szükség, amelynek során K darab analízis végzünk. Az X_i áramköri paramétereknek véletlenszerűen adunk értéket a valószínűség sűrűségi függvényének megfelelően $X_{iN} + t_i^+$ és $X_{iN} - t_i^-$ között (3. ábra). A névleges értéket N , a felső toleranciát t_i^+ , míg az alsó toleranciát t_i^- jelöli. Az analízis során meghatározzuk a hálózatfüggvényének értékét.

A Monte-Carlo analízis által generált adatokból minden egyes komponensre egy histogramm párt állítunk elő (4. ábra), amelyben a követelményeket teljesítő jó és a követelményeket nem teljesítő, azaz rossz áramkörök sűrűségfüggvényét ábrázoltuk, mint az áramköri elem függvényét. A sűrűségfüggvényeket a szokásostól eltérő módon nem külön a jó és külön a rossz áramkörökre, hanem a jó és rossz áramkörök összességére normalizáljuk. Így a görbék alatti területek nem egységnyiek, mint [21]-ben, hanem területük összege egységnyi. Habár a gyakorlatban ezek a görbék nem folytonosak, megkönnyítendő a következőket, mi mégis folytonosnak ábrázoltuk. Jelöljük M_p^+ -val és M_F^+ -val a jó és a rossz áramkörök sűrűségfüggvényének értékét az X_i áramköri elem értékének felső határánál, $X_i + t_i^+$ -nál. Tételezzünk fel egy elhanyagolhatóan kicsiny Δt_i^+ megváltozást az X_i áramköri elem felső toleranciájában. Nézzük meg, hogyan változik meg a kihozatal a Δt_i^+ megváltozás hatására.



3. ábra. Az áramköri paraméterek tartománya kétdimenziós esetben



4. ábra. A jó és a rossz áramköri minták sűrűségfüggvénye

A kihozatalt az eredeti határok között az alábbi integrál adja:

$$Y = \frac{\int_{X_{iN} - t_i^-}^{X_{iN} + t_i^+} M_p dx_i}{\int_{X_{iN} - t_i^-}^{X_{iN} + t_i^+} (M_p + M_F) dx_i} = \int_{X_{iN} - t_i^-}^{X_{iN} + t_i^+} M_p dx_i, \quad (1)$$

hiszen a jó és a rossz áramkörök összege éppen az egységet, azaz a 100%-ot adja ki.

A megváltozott határok között a kihozatal

$$Y' = \frac{\int_{X_{iN} - t_i^-}^{X_{iN} + t_i^+ + \Delta t_i^+} M_p dx_i}{\int_{X_{iN} - t_i^-}^{X_{iN} + t_i^+ + \Delta t_i^+} (M_p + M_F) dx_i}. \quad (2)$$

Tekintettel arra, hogy a Δt_i megváltozás elhanyagolhatóan kicsiny, feltételezhetjük, hogy a sűrűségfüggvény értéke ugyanakkora $X_{iN} + t_i^+ + \Delta t_i^+$ helyen, mint $X_{iN} + t_i^+$ helyen. Ekkor Y' az alábbi formában írható:

$$Y' = \frac{Y + M_p^+ \Delta t_i^+}{1 + (M_p^+ + M_F^+) \Delta t_i^+}, \quad (3)$$

ahonnan a kihozatal megváltozása

$$\Delta Y = \frac{Y + M_p^+ \Delta t_i^+}{1 + M_p^+ \Delta t_i^+ + M_F^+ \Delta t_i^+} - Y. \quad (4)$$

A kihozatalnak a felső határ megváltoztatására vonatkozó differenciális érzékenységét megkapjuk, ha vesszük a $\Delta t_i^+ \rightarrow 0$ határértéket és átrendezzük a (4) kifejezést:

$$S_{it_i^+}^Y = \frac{\partial Y}{\partial t_i^+} = M_p^+ (1 - Y) - M_F^+ Y. \quad (5)$$

Hasonló kifejezés vezethető le az alsó határra, azaz az alsó toleranciára vonatkozó érzékenységre is.

Megállapítható tehát, hogy a kihozatalnak az egyes áramköri elemek szerint vett differenciális érzékenységének meghatározásához egy Monte-Carlo analízisre, az Y kihozatal becslésére, az M_p és M_F histogrammok előállítására van szükség. Ahhoz azonban, hogy az M_p és M_F histogrammokat pontosan előállíthassuk, végtelen számú mintára lenne szükség a Monte-Carlo analízisben. Véges számú minta és a histogramm véges számú intervalluma esetén a kihozatal érzékenységét csak becslhetjük, amely becslés annál jobb, minél több minta esik egy intervallumra.

2. Központosítás és tolerancia kiosztás a kihozatal érzékenységének segítségével

Központosítási feladatnál a névleges értéket változtatjuk meg. Ez az áramköri elem értékének határai-

val kifejezve azt jelenti, hogy ha a felső toleranciát növelem, akkor az alsót ugyanannyival csökkentem, és viszont. A kihozatal érzékenységet a névleges érték szerint tehát az

$$S_{X_{iN}}^Y = \frac{\partial Y}{\partial X_{iN}} = S_{i^+}^Y - S_{i^-}^Y, \quad (6)$$

kifejezés adja.

Tolerancia kiosztási feladatnál a névleges érték nem változik, hanem egyszerre növelem vagy csökkentem mind a felső, mind az alsó toleranciát. A kihozatal érzékenysége a tolerancia szerint

$$S_{t_i}^Y = \frac{\partial Y}{\partial t_i} = S_{i^+}^Y + S_{i^-}^Y, \quad (7)$$

kifejezésből számítható.

3. Szimultán központosítás és tolerancia kiosztás a kihozatali érzékenységek segítségével

A kihozatal érzékenysége külön veszi figyelembe az alsó és a felső tolerancia megváltozását, így kézenfekvő, hogy ezeket a toleranciákat külön-külön is változtassuk meg. Ezzel a szimultán központosítási és tolerancia kiosztási feladat megoldása az érzékenység definíciójából természetesen következik.

A feladat megoldása iteratív úton történik, ahol először kijelöljük azt az irányt, amerre a kihozatal növekszik.

Az irány kijelölése a kihozatali érzékenységek meghatározását jelenti, ugyanis a toleranciákat a hozzájuk tartozó kihozatali érzékenységgel arányosan megváltoztatva növekszik a kihozatal a legnagyobb mértékben. A folytatás lehet az, hogy a kijelölt irányban megkeressük a kihozatal maximális értékét vagy egy előre meghatározott nagyságú lépés után újra irányt állapítunk meg és lépünk. Ez utóbbi esetben a kihozatali érzékenység számításánál szükségszerűen fellépő véletlenszerű hibák egymást kiegyenlíthetik, de hatásuk legalábbis csökken. A lépésméret meghatározásánál abból indulnak ki, hogy a kihozatal egy bizonyos, általunk megadott százalékkal növekedjék. A kihozatal megváltozása a kihozatal érzékenységevel kifejezve:

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^N S_{i^+}^Y \Delta t_i^+ + \sum_{i=1}^N S_{i^-}^Y \Delta t_i^-. \quad (8)$$

A megváltozások arányosak a megfelelő érzékenységekkel azaz:

$$\Delta t_i^+ = K S_{i^+}^Y \quad \text{és} \quad \Delta t_i^- = K S_{i^-}^Y. \quad (9)$$

Helyettesítsük be (9)-et (8)-ba:

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^N S_{i^+}^Y \cdot K \cdot S_{i^+}^Y + \sum_{i=1}^N S_{i^-}^Y \cdot K \cdot S_{i^-}^Y. \quad (10)$$

Átrendezve:

$$\Delta Y = K \left\{ \sum_{i=1}^N (S_{i^+}^Y)^2 + \sum_{i=1}^N (S_{i^-}^Y)^2 \right\}. \quad (11)$$

Ahonnán:

$$K = \frac{\Delta Y}{\sum_{i=1}^N (S_{i^+}^Y)^2 + \sum_{i=1}^N (S_{i^-}^Y)^2}. \quad (12)$$

A kívánt ΔY meghatározásához ismerjük az előző iterációban kiszámított (az első iteráció esetén a kezdeti) kihozatalt, Y_{i-1} -et, pontosabban annak becslését.

Legyen ΔY a 100% kihozatalhoz szükséges különbség egy bizonyos része:

$$\Delta Y = \frac{100 - Y_{c-1}}{C} [\%]. \quad (13)$$

A C konstanssal való osztásra az alábbi megfontolások miatt van szükség:

- a kihozatal értékére csak becslést tudunk adni,
- a kihozatal érzékenységet is csak becsülni tudjuk,
- pontos értékek esetén is csak kis megváltozásra igaz a differenciális érzékenység,
- kis elsőrendű differenciális érzékenység értékek esetén már a magasabbrendűek dominálhatnak.

A fentiek miatt az iteráció során a kihozatal növekedésével együtt C értékét is növeljük.

4. Mintapélda

Az 5. ábrán látható negyedfokú szűrő kapacitásai veszteségmentesek, az induktivitások veszteségesek. Az előírások a csillapításra vonatkoznak, amelyeket a szűrőnek két megadott hőmérsékleten kell teljesítenie két, alkalmasan választott áteresztő és egy záró frekvencián.

Az áramköri paraméterek értékére egyenletes eloszlást tételeztünk fel. Kiindulásul 50 mintát vettünk a Monte-Carlo analízishez, majd a továbbiakban csak ott vettünk mintákat, ahol az áramköri paraméterek értéktartománya különbözött az előzőtől.

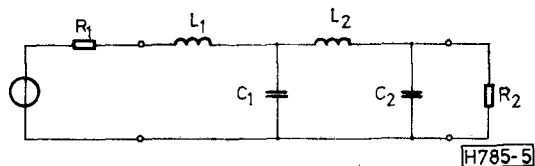
A 6. ábrán a kihozatal növekedése látható az iterációk során.

Az áramköri elemek kezdeti értéke és tolerancia relatív értékben:

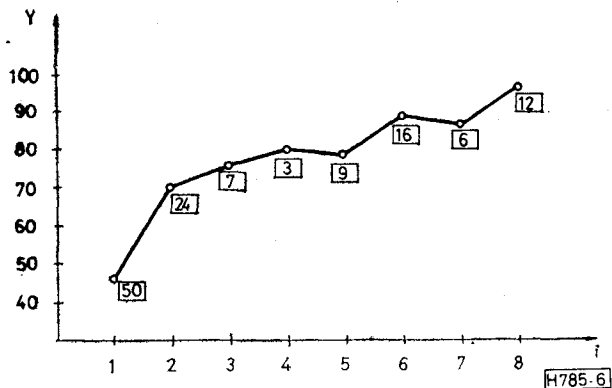
$$\begin{aligned} L_1 &= 0,9332 \pm 3\%, \\ L_2 &= 1,58 \pm 3\%, \\ C_1 &= 1,292 \pm 1\%, \\ C_2 &= 0,7636 \pm 1\%. \end{aligned}$$

A hőmérséklet-változás hatására az áramköri elemek értéke az alábbiak szerint változik

$$\begin{aligned} L_1 &: +0,5\%, \\ L_2 &: +0,2\%, \\ C_1 &: -0,18\%, \\ C_2 &: -0,34\%. \end{aligned}$$



5. ábra. Az IBM 5100 asztali számítógép APL programjának mintaáramköre



6. ábra. A kihozatal növekedése és minták száma iterációnként, folytonos toleranciák esetén

A kezdeti 46%-ról 8 lépésben 96%-ra sikerült növelni a kihozatalt, s ehhez összesen 127 mintára volt szükség 8×50 , azaz 400 helyett.

Az áramköri elemek módosított értéke és toleranciája relatív értékben:

$$\begin{aligned} L_1 &= 0,9321 \pm 3,25\%, \\ L_2 &= 1,5614 \pm 1,7\%, \\ C_1 &= 1,2823 \pm 0,78\%, \\ C_2 &= 0,7624 \pm 1,01\%. \end{aligned}$$

5. Központosítás és tolerancia kiosztás diszkrét toleranciaértékekkel

Láttuk, hogyan lehet alkalmazni a kihozatal érzékenységet központosítási vagy tolerancia kiosztási feladatra. Ha a toleranciák csak diszkrét értékeket vehetnek fel, akkor az alábbiak szerint járhatunk el.

Először megvizsgáljuk, hogy az egyes elemekre vonatkozó kihozatali érzékenységek a felső és az alsó tolerancia szerint azonos előjelűek-e. Csakis akkor lehetséges a toleranciát változtatni, ha igen. Ha nem egyeznek az előjelek az azt jelenti, hogy a névleges értéket kell megváltoztatni.

Kiszámítjuk a (12) kifejezés szerint a lépésméretre jellemző K állandót. Ezt felhasználva kapjuk a

$$\Delta t_i = K \frac{S_{t_i}^+ + S_{t_i}^-}{2}, \quad (14)$$

mennyiséget, amelyet egész százalékra kerekítünk.

Figyelembe véve, hogy a tolerancia egy meghatározott értéknél (pl. 1%) kisebb nem lehet, döntünk arról, hogy toleranciát vagy névleges értéket változtatunk-e. Ha a toleranciát, akkor a (14), ha a névleges értéket, akkor

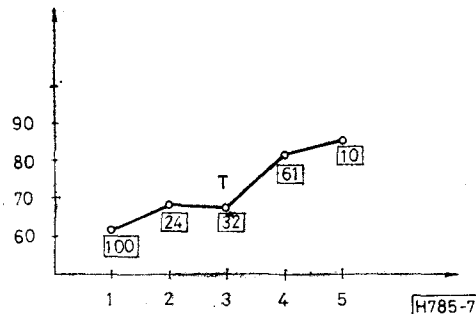
$$X_{i0} = K \frac{S_{t_i}^+ - S_{t_i}^-}{2} \quad (15)$$

kifejezést használjuk.

6. Mintapélda diszkrét toleranciákkal

Az 5. ábrán felrajzolt áramkört tekintjük ebben az esetben is. Az előírások most egyetlen hőmérsékleti értékre vonatkoznak.

A kezdeti 62%-ról 85%-ra növekedett a kihozatal



7. ábra. A kihozatal növekedése és a minták száma iterációként, diszkrét értékű toleranciák esetén. A T betű utal a tolerancia megváltoztatására

összesen 5 lépésben. 227 mintával, a 3. lépésben tolerancia megváltoztatással. Az eredeti toleranciák az induktivitások esetében 3%, a kapacitásoknál 1% voltak. Az L_2 induktivitás toleranciája a harmadik lépésben 2%-ra csökkent. Az új névleges értékek

$$\begin{aligned} L_1 &= 0,9225, \\ L_2 &= 1,5601, \\ C_1 &= 1,2928, \\ C_2 &= 0,7642. \end{aligned}$$

7. Számítógépprogramok

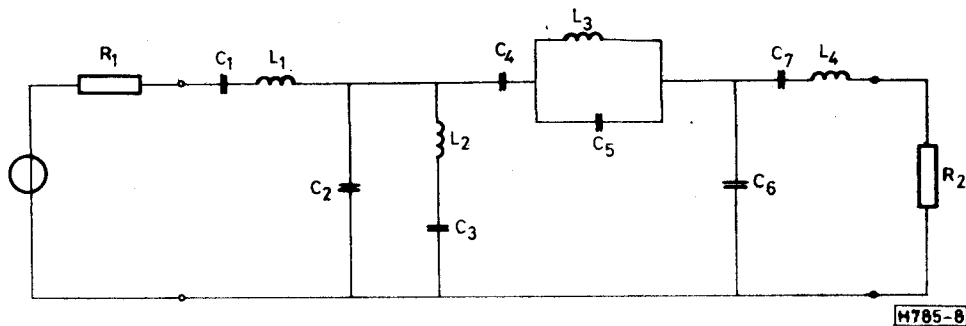
A bemutatott algoritmusok alkalmazására számítógépprogramok születtek. Az IBM 5100 asztali számítógépen APL nyelven készült el a program első változata, amellyel az 5. ábrán látható szűrővel végeztünk kísérleteket. A program előnye az interaktivitás, amely kellően ellensúlyozza a viszonylag lassú működést.

A program FORTRAN változata az IBM 370/115 gépen [59] ideális LC létra szűrőket kezel. Maximális elemszám jelenleg 25, ebből induktivitás 12, maximális mintaszám a Monte-Carlo analízishez 200. Tekintettel arra, hogy az algoritmus nem használ ki speciális tulajdonságokat, csak az analízis és az input részt kell megváltoztatni, ha más típusú áramkörökre kívánjuk a programot alkalmazni.

8. Mintapélda rezonanciára hangolt induktivitásokkal

A 8. ábrán látható szűrőnél két induktivitás (L_2 és L_3) a C_3 , ill. C_5 kapacitáshoz rezonanciára hangolható. Az áramkör elemei ideálisak. Az előírások a csillapításra vonatkoznak, öt frekvencián. A nem hangolható elemek toleranciája $\pm 10\%$ volt. Az elemek kezdeti értéke:

$$\begin{aligned} L_1 &= 1,1376, \\ L_4 &= 1,1376, \\ C_1 &= 0,9749, \\ C_2 &= 1,3058, \\ C_3 &= 9,5335, \\ C_4 &= 1,1413, \\ C_5 &= 0,121, \\ C_6 &= 0,7399, \\ C_7 &= 1,8177. \end{aligned}$$



8. ábra. Az IBM 370/115 számítógép FORTRAN programjának mintaáramkörre rezonanciára hangolt induktivitásokkal

A kezdeti 41%-ról 10 lépésben 79%-ra növekedett a kihozatal. A minták száma összesen 498 volt $10 \times 100 = 1000$ helyett. A példát az IBM 370/115 számítógépen futtattuk.

Az áramkör elemeinek módosított értéke és toleranciája:

$$\begin{aligned} L_1 &= 1,1317 \pm 9,97\%, \\ L_4 &= 1,1293 \pm 8,56\%, \\ C_1 &= 0,932 \pm 10,78\%, \\ C_2 &= 1,3202 \pm 8,43\%, \\ C_3 &= 9,5203 \pm 9,98\%, \\ C_4 &= 1,1738 \pm 10,1\%, \\ C_5 &= 0,1288 \pm 1,34\%, \\ C_6 &= 0,7733 \pm 7\%, \\ C_7 &= 1,8013 \pm 10,2\%. \end{aligned}$$

A program által elhasznált CPU idő 120 sec volt.

9. Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki értékes tanácsaiért dr. R. Spence-nek, aki az Imperial College-ban (London) ráirányította figyelmemet a statisztikus áramkörtervezésre.

Köszönet illeti Turmezei Péter szakmérnök hallgatót, a TKI munkatársát, aki a FORTRAN nyelvű programot elkészítette, valamint dr. Trón Tibort, a kézirat gondos átnézéséért és hasznos észrevételeiért.

I R O D A L O M

- [1] H. L. Abdel-Malek—J. W. Bandler: Yield optimization for arbitrary statistical distributions. ISCAS '78. Proc. of the 1978 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, New York, pp. 664—674, May 1978.
- [2] H. L. Abdel-Malek—J. W. Bandler: Centering, tolerancing, tuning and minimax design employing biquadratic models. ISCAS '79. Proc. of the 1979 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, Tokyo, pp. 284—287, July 1979.
- [3] H. L. Abdel-Malek—J. W. Bandler: Yield estimation for efficient design centering assuming arbitrary statistical distributions. Proc. Conf. Computer Aided Design of Electronic and Microwave Circuits and Systems, Hull, England, pp. 66—71, July 1977.
- [4] P. R. Adby: Component tolerance assignment using the pseudo-inverse sensitivity matrix. Int. J. Circuit Theory and Appl., Vol. 4, No. 2, pp. 199—201, April 1976.
- [5] K. J. Antreich—R. K. Koblitz: A new approach to design centering based on a multiparameter yield-prediction formula. ISCAS '80. Proc. of the 1980 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems Houston, pp. 886—889, April 1980.
- [6] J. W. Bandler—H. L. Abdel-Malek: Optimal centering, tolerancing, and yield determination via updated approximations and cuts. IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol. CAS—25, No. 10, pp. 853—870, October 1978.
- [7] J. W. Bandler—P. C. Liu—J. H. K. Chen: Worst case network tolerance optimization. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT—23, No. 8, pp. 630—641, August 1975.
- [8] J. W. Bandler—P. C. Liu—H. Tromp: A non-linear programming approach to optimal design centering, tolerancing and tuning. IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol. CAS—23, No. 3, pp. 155—165, March 1976.
- [9] J. W. Bandler—M. R. M. Rizk: Optimization of electrical circuits. Mathematical Programming Study 11 (1979), pp. 1—64, North-Holland Publ. Comp., Amsterdam.
- [10] P. W. Becker—F. Jensen: Design of systems and circuits for maximum reliability or maximum production yield. McGraw-Hill, New York 1977.
- [11] R. K. Brayton—G. D. Hachtel—S. W. Director: Arbitrary norms for statistical design via linear programming. ISCAS '78. Proc. of the 1978 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, New York, pp. 161—164, May 1978.
- [12] R. K. Brayton—S. W. Director—G. D. Hachtel—L. M. Vidigal: A new algorithm for statistical circuit design based on quasi-Newton methods and function splitting. ISCAS '79, Proc. of the 1979 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, Tokyo, pp. 280—283, July 1979.
- [13] C. Charalambous—F. M. El-Turky: Circuit design using a recent minimax approach. ISCAS '78. Proc. of the 1978 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, New York, pp. 690—694, May 1978.
- [14] S. W. Director—G. D. Hachtel: The simplicial approximation approach to design centering and tolerance assignment. ISCAS '76. Proc. of the 1976 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, Munich, Germany, pp. 706—709, April 1976.
- [15] S. W. Director—G. D. Hachtel: Yield estimation using simplicial approximation. ISCAS '77, Proc. of the 1977 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, Phoenix, April 1977.
- [16] S. W. Director—G. D. Hachtel: The simplicial approximation approach to design centering. IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol. CAS—24, No. 7, pp. 363—372, July 1977.
- [17] S. W. Director—G. D. Hachtel: A point basis for statistical design. ISCAS '78, Proc. of the 1978 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, New York, pp. 165—169, May 1978.
- [18] S. W. Director—G. D. Hachtel—L. M. Vidigal: Computationally efficient yield estimation procedures based on simplicial approximation. IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol. CAS—25, No. 3, pp. 121—130, March 1978.
- [19] S. W. Director—W. Maly: A dimension reduction

- procedure for the simplicial approximation approach to design centering. ECCTD, '80. Proc. of the 1980 European Conference on Circuit Theory and Design, Warsaw, Vol. 2. pp. 115–120, Sept. 1980.
- [20] T. Downs—A. S. Cook: A numerical integration approach to manufacturing yield calculation and component tolerancing. ECCTD '80, Proc. of the 1980 European Conference on Circuit Theory and Design, Warsaw, Vol. 2. pp. 132–144, Sept. 1980.
- [21] N. Elias: New statistical methods for assigning device tolerances. ISCAS '75, Proc. of the 1975 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, Newton, MA, pp. 329–332, April 1975.
- [22] D. H. Evans: Statistical tolerancing: the state of the art. Part II. Shifts and Drifts. Journal of Quality Technology vol. 7. pp. 72–75, 1975.
- [23] A. Filipkowski—Le Tue—Z. Michalski: Optimization of large change tolerances of linear integrated circuits. Int. J. of Circuit Theory and Application. Vol. 8. No. 3. July 1980. pp. 237–243.
- [24] Gaál J.—Géher K.—Halász E.—Trón T.: LC szűrők tolerancia központosítása tekintettel a hangolásra és hőfokfüggésre. Tanulmány a Telefongyár részére. Budapest, 1980. BME—HEI.
- [25] Gaál J.—Trón T.: Tolerancia központosítás rekurzív Monte Carlo algoritmussal. Tanulmány a Telefongyár részére, BME—HEI 1980.
- [26] K. Géher: Theory of Network Tolerances. Akadémiai Kiadó, Budapest, Hungary, 1971.
- [27] K. Gopal—K. Singhal—J. Vlach: Statistical method for tolerance assignment in electrical networks. ECCTD '78, Proc. of the 1978 European Conference on Circuit Theory and Design, Lausanne, Switzerland, pp. 578–581, September 1978.
- [28] G. D. Hachtel—S. W. Director: A point basis for design centering. CADEMICS '77, Proc. Conference CAD of Electronic and Microwave Circuits And Systems, Hull, England, pp. 41–46, July 1977.
- [29] G. D. Hachtel—S. W. Director: A point basis for statistical design. ISCAS '78, Proc. of the 1978 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, New York, pp. 165–169, May 1978.
- [30] Halász E.—Gefferth L.—Trón T.: Tolerancia központosítás optimalizáló algoritmussal. Tanulmány a Telefongyár részére. BME—HEI 1980.
- [31] M. H. Hamza—A. I. A. Salama: Tolerance optimization using stochastic programming. Inf. J. of Circuit Theory and Application, Vol. 6. No. 2. April. 1978. pp. 203–207.
- [32] A. Ilumoka—R. Spence: A statistical approach to the reduction of circuit performance variability in electrical circuits. ECCTD '80. Proc. of the 1980 European Conference on Circuit Theory and Design, Warsaw, Vol. 2. pp. 589–594, Sept. 1980.
- [33] B. J. Karafin: The optimum assignment of component tolerances for electrical networks. Bell Syst. Techn. J., Vol. 50, No. 4, pp. 1225–1242, April 1971.
- [34] G. Kjellström: Network optimization by random variation of component values. Ericsson Technics, No. 3, 1969.
- [35] G. Kjellström: Optimization of electrical networks with respect to tolerance costs. Ericsson Technics, No. 3, 1970.
- [36] G. Kjellström—L. Taxén—L. Blomgren: Optimization methods for statistical network design. ISCAS '75. Proc. of the 1975 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, Newton, MA, April 1975.
- [37] G. Kjellström—L. Taxén: On the efficient use of stochastic optimization in network design. ISCAS '76. Proc. of the 1976 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, Munich, Germany, pp. 714–717, April 1976.
- [38] R. Koblitz: Zur Entwurfszentrierung und Toleranzzuordnung elektrischer Schaltungen, mit gaußverteilten Parameter abweichungen. AEU Band 34, pp. 30–37 Jan. 1980.
- [39] M. R. Lightner—S. W. Director: Yield maximization for use in multiple criterion optimization of electronic circuits. ISCAS '79. Proc. of the IEEE 1979. Int. Symp. on Circuits and Systems, Tokyo, pp. 288–291. July 1979.
- [40] K. Madsen—H. Schjaer-Jacobson: New algorithms for worst case tolerance optimization. ISCAS '78. Proc. of the 1978. IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, New York, pp. 681–685, May 1978.
- [41] J. T. Ogradzki—M. A. Stębłinski: Optimal tolerancing, centering and yield optimization by one-dimensional orthogonal search (ODOS) Technique. ECCTD '80. Proc. of the 1980 European Conference on Circuit Theory and Design, Warsaw, Vol. 2. pp. 480–485, Sept. 1980.
- [42] J. F. Pinel—K. A. Roberts: Tolerance assignment in linear networks using nonlinear programming. IEEE Trans. Circuit Theory, Vol. CT-19, No. 5, pp. 475–479, September 1972.
- [43] E. Polak—A. Sangiovanni-Vincentelli: An algorithm for design centering, tolerancing and tuning (DCTT). ECCTD '78. Proc. of the 1978 European Conf. on Circuit Theory and Design, Lausanne, Switzerland, pp. 582–586, September 1978.
- [44] P. Schwartz: Simplified methods for design centering and tolerance assignment. Proc. Sixth Coll. Microwave Communication. Budapest, Hungary, pp. II-6/34. 1–4, August 1978.
- [45] K. Shinghal—J. F. Pinel: Statistical design centering and tolerancing using parameter sampling. ISCAS '80. Proc. of the 1980 Int. Symp. on Circuits and Systems Houston, pp. 882–885, IEEE April 1980.
- [46] R. S. Soin—R. Spence: Statistical design centering for electrical circuits. Electronics Letters, Vol. 14, No. 24, pp. 772–774, November 1978.
- [47] R. Spence—K. S. Tahim: Statistical circuit analysis. A practical algorithm for linear circuits. ISCAS '78. Proc. of the 1978 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, New York, pp. 180–184, May 1978.
- [48] R. Spence—A. Ilumoka—N. Maratos—L. Gefferth—R. Soin: The statistical exploration approach to tolerance design. Proc. of the 1980 IEEE International Conference on Circuits and Computers ICCS '80. New York, pp. 585–585.
- [49] W. Straszczyński—M. Stębłinski: A second derivative Monte Carlo optimization of the production yield. ECCTD '80. Proc. of the 1980 European Conference on Circuit Theory and Design, Warsaw, Vol. 2. pp. 121–131, Sept. 1980.
- [50] M. Stębłinski: Sensitivity-cost minimization with optimal tolerances in design of integrated circuits. CADEMICS '77. Proc. of Electronic and Microwave Circuits and Systems. Conf. CAD Hull, England. July 1977. pp. 78–83.
- [51] M. Stębłinski: Cost and sensitivity optimization in integrated active filter, SSCT '77. Proc. of the Summer Symp. on Circuit Theory Kladno, Czechoslovakia. pp. 295–299. Sept. 1977.
- [52] M. Stębłinski: Estimation of yield and its derivatives by Monte Carlo sampling and numerical integration in orthogonal subspaces. ECCTD '80. Proc. of the 1980 European Conference on Circuit Theory and Design, Warsaw, Vol. 2. pp. 474–479, Sept. 1980.
- [53] M. Stębłinski: Tolerance analysis and optimization in electronic circuits. ECCTD, '80. Proc. of the 1980 European Conference on Circuit Theory and Design, Warsaw, Vol. 2. pp. 97–114, Sept. 1980.
- [54] K. S. Tahim—R. Spence: An integrated approach to manufacturing yield estimation and design centering. ECCTD '78. Proc. of the 1978 European Conference on Circuit Theory and Design, Lausanne, Switzerland, pp. 573–577, September 1978.
- [55] A. R. Thorbjørnsen—S. W. Director: Computer-

aided tolerance assignement for linear circuits with correlated elements. IEEE Trans. Circuit Theory, Vol. CT-20, No. 5, pp. 518-524, September 1973.

- [56] *H. Tromp*: The generalized tolerance problem and worst case search. CADEMICS '77. Proc. of the Conf. Computer Aided Design of Electronic and Microwave Circuits and Systems, Hull, England, pp. 72-77, July 1977.
- [57] *H. Tromp*: A semi-heuristic algorithm for effi-

cient worst-case analysis. ISCAS '79. Proc. of the 1979 IEEE Int. Symp. Circuits and Systems, Tokyo, pp. 276-279, July 1979.

- [58] *L. M. Vidigal-S. W. Director*: Design centering: the quasi-convex, quasi-concave performance function case. ISCAS '80. Proc. of the 1980 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems Houston, pp. 43-46, April 1980.
- [59] *Turmezei Péter*: Tolerancia középpontosítás. Szakmérnöki feladat. BME-HEI 1980.
-