

Lineáris hálózatok érzékenység és tolerancia vizsgálata

ETO 621.372.011.71:621.3.089.52

1. Az érzékenység- és toleranciamérték fogalma

Az elektronikus áramkörök tervezésénél és gyártásánál napjainkban nagy figyelmet szentelünk az áramkörök toleranciájának [1, 4, 12]. A kérdés tárgyalásakor az $y(x_i)$ hálózat jellemző kis változású, differenciálais érzékenységből indulunk ki:

$$S_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (1)$$

Bevezetjük az

$$S'_i = \frac{x_i}{y} \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (2)$$

relatív érzékenységet és a

$$\frac{\Delta y_i}{y} = S'_i \frac{\Delta x_i}{x_i} \quad (3)$$

relatív résztoleranciát, majd a relatív toleranciát a

$$\frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^N S'_i \frac{\Delta x_i}{x_i} \quad (4)$$

kifejezéssel definiáljuk. A tolerancia értékét alapvetően a következő tényezők befolyásolják:

(i) Az előírt specifikációt hogyan teljesítettük az $y(x_i)$ hálózatjellemzővel? Például ha a hálózatjellemző az $A(\omega, x_i)$ amplitúdó-karakterisztika, akkor milyen approximációt választottunk a frekvenciatartományban?

(ii) Milyen áramköri felépítést választottunk? Például aktív RC áramkörök esetén milyen topológiát (létra, kaszkád, vagy visszacsatolt) és milyen áramköri elemeket használunk?

(iii) Milyen technológiai lehetőségeink vannak? Ez határozza meg $\frac{\Delta x_i}{x_i}$ értékét és a (4)-ben előírt összegezés módját. Például van-e korreláció az egyes áramköri paraméterek toleranciái között, vagy van-e lehetőség beállításra?

A tervezés céljának kitűzésénél, a gyártás eredményének megítélésénél olyan toleranciakritériumra van szükségünk, melynek segítségével az optimalizálást elvégezhethetjük és az összehasonlítást megtehetjük. Az ilyen jellemzőt toleranciamértéknek nevezzük. Az ideális az lenne, ha egyetlen számmal tudnánk jellemzeni a toleranciaviszonyokat. Egy ilyen mérték bevezetése azonban számos elméleti és gyakorlati nehézségbe ütközik. A kérdés kiterjedt

irodalmának ismertetésével most nem foglalkozunk [1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17], hanem figyelmünket az alapvető nehézségek megvilágítására koncentráljuk.

A legrosszabb esetre való tervezésnél $\Delta x_i = d_i$, ahol d_i az áramköri paraméter maximális eltérése, továbbá a résztoleranciák abszolút értékét adjuk össze:

$$\frac{\Delta y}{y} \leq \sum_{i=1}^N |S'_i| \left| \frac{d_i}{x_i} \right| \quad (5)$$

Az (5)-ből származtatott toleranciamérték

$$\varphi = \sum_{i=1}^N k_i |S'_i| \quad (6)$$

alakú, ahol $k_i = \left| \frac{d_i}{x_i} \right|$ az érzékenység abszolút értékének súlyozását jelenti. Ha ezen — technológiától függő — súlyozástól eltekintünk, akkor

$$\varphi = \sum_{i=1}^N |S'_i| \quad (7)$$

alakú érzékenységmértéket kapunk.

Az egyenletes tolerancia feltételezése, vagyis a $\frac{d_i}{x_i}$ értékek megegyezésének feltételezése (4) alapján

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{d_i}{x_i} \sum_{i=1}^N S'_i = k \sum_{i=1}^N S'_i \quad (8)$$

összefüggésre vezet. Mivel a relatív érzékenységek előjeles összege invariáns:

$$\sum_{i=1}^N S'_i = M \quad (9)$$

(8) az alábbi alakba írható:

$$\frac{\Delta y}{y} = kM. \quad (10)$$

A

$$\varphi = kM \quad (11)$$

toleranciamérték az M érzékenységösszeg invariáns tulajdonságait tükrözi vissza és így az optimalizálás célfüggvénye vagy az áramkörök összehasonlításának alapja nem lehet [5].

Statisztikus tervezésnél, ha az áramköri paraméterek toleranciái között nincs korreláció, akkor az eredő szórásnégyzet egyszerűen számolható

$$D^2 = \sum_{i=1}^N |S'_i|^2 D_i^2. \quad (12)$$

(Egyenletes eloszlás esetén $D_i^2 = \frac{d_i^2}{3}$). A statisztikus tervezés

$$\varphi = \sum_{i=1}^N k_i^2 |S_i|^2 \quad (13)$$

alakú toleranciamértékhez vezet. Ha a technológiától függő súlyozástól eltekintünk, akkor

$$\varphi = \sum_{i=1}^N |S_i|^2 \quad (14)$$

alakú érzékenysgmértéket kapunk.

Korreláció esetén az eredő szórásnégyzet:

$$D^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N r_{ij} S_i^* S_j = \varphi, \quad (15a)$$

ahol r_{ij} a normalizálatlan korrelációs együttható. Mátrixos írásmódban

$$\varphi = \underline{S}^r * \underline{R} \underline{S}^r \quad (15b)$$

ahol

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} D_1^2 & \dots & \dots & \dots & r_{1N} \\ \vdots & & & r_{ij} & \vdots \\ \vdots & & & \vdots & \vdots \\ \vdots & & r_{ij} & \vdots & \vdots \\ r_{1N} & \dots & \dots & \dots & D_N^2 \end{bmatrix} \quad \text{és} \quad \underline{S}^r = \begin{bmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_i \\ \vdots \\ S_N \end{bmatrix} \quad (16)$$

vagyis a főátlóban a szórásnégyzetek szerepelnek és $r_{ij} = r_{ji}$. (A * konjugálást, t transzponálást jelöl.)

A frekvenciatartománybeli leírásra szorítkozva a (6), (7), (13), (14) és (15) alatt bevezetett mértékek közös tulajdonsága, hogy mindegyik még a frekvenciának is függvénye. Ez előny abból a szempontból, hogy a tervező ki tudja választani a feladat szempontjából kritikus frekvenciaértéket és az érzékenység- és tolerancia viszonyokat ott vizsgálja részletesen. Hátrányos viszont azért, mert egyetlen szám helyett egy függvényt kell tekinteni a frekvenciatartományban.

Fontosnak tartjuk megjegyezni, hogy a (6), (13) és (15) típusú mértékek az $y(x_i)$ hálózatjellemező toleranciájára jellemzőek, mivel a technológiai változásokat is tartalmazzák és ezért nevezzük ezeket toleranciamértéknek. A (7), (14) érzékenység mértékek viszont csak az áramkör felépítésétől függenek, mivel a k_i súlyozást nem tartalmazzák. A bevezetett mértékek az y hálózatiüggvényre vonatkoznak és a specifikációval csak közvetett kapcsolatban vannak.

2. A számítógépprogramok tulajdonságai

Az érzékenység- és toleranciamértékek számításának alapvető feltétele az áramkörök analizisét végző számítógépprogram. Esetünkben a KEPAN-74 programot [9] használtuk az érzékenységek meghatározására. A KEPAN-74 program koncentrált és elosztott paraméterű lineáris hálózatok analizisét

végzi a frekvenciatartományban. Az áramköri elemek a következők lehetnek: R, L, C , véges vezérlési tényezőjű vezérelt generátorok, véges erősítésű műveleti erősítő, elosztott paraméterű, homogén, háromrétegű RC vonal. A program a hálózatot az indefinit admittancia mátrixával írja le. A program az (üresjárású feszültség) transzfer függvény abszolút értékét, fázisát, futási idejét, a be- és kimeneti impedancia valós és képzetes részét és a transzfer függvény tetszőleges áramköri elem szerinti relatív érzékenységét számítja. Az érzékenységeket differenciálás nélkül, transzfer függvények szorzatából határozza meg. A program RAZDAN 3 gépre, ALGOL nyelven készült.

Az erősítők és a szűrők nagy jelentősége következtében érdemes emlékeztetni arra [4], hogy $K = Ae^{-jb}$ ill. $1a K = a - jb$ esetén a tolerancia (4) alatti kifejezése:

$$\Delta a = \sum_{i=1}^N \operatorname{Re} S_i \frac{\Delta x_i}{x_i} \quad (17)$$

$$\Delta b = - \sum_{i=1}^N \operatorname{Im} S_i \frac{\Delta x_i}{x_i} \quad (18)$$

Ezért a KEPAN-74 program a transzfer függvény érzékenységét valós és képzetes rész formában írja ki.

Az érzékenysgmértékeket számító program készítésénél az alábbi szempontok játszottak szerepet:

(i) a mérték alkalmas legyen a toleranciaviszonyok összehasonlítására, minden lényeges effektust figyelembe vegyen,

(ii) a mérték egyszerűen számítható legyen,

(iii) erősítőkre, szűrőkre jellemző legyen.

E szempontok alapján az alábbi mértékeket választottuk:

$$Ia \quad \varphi_1 = \sum_{i=1}^N k_i (\operatorname{Re} S_i)^2, \quad (19a)$$

$$Ib \quad \varphi_2 = \sum_{i=1}^N k_i (\operatorname{Im} S_i)^2, \quad (19b)$$

$$Ic \quad \varphi_3 = \sum_{i=1}^N k_i |S_i|^2, \quad (19c)$$

vagy

$$IIa \quad \varphi_4 = (\operatorname{Re} \underline{S}^r)^t \underline{R} (\operatorname{Re} \underline{S}^r) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N r_{ij} \operatorname{Re} S_i \operatorname{Re} S_j, \quad (20a)$$

$$IIb \quad \varphi_5 = (\operatorname{Im} \underline{S}^r)^t \underline{R} (\operatorname{Im} \underline{S}^r) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N r_{ij} \operatorname{Im} S_i \operatorname{Im} S_j, \quad (20b)$$

$$IIc \quad \varphi_6 = \underline{S}^r * \underline{R} \underline{S}^r = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N r_{ij} S_i^* S_j. \quad (20c)$$

A program $R=0$ esetén korrelálatlan (I típusú), $R=1$ esetén korrelált (II típusú) mértéket számol. A program $E3=1$, illetve $E3=0$ előírástól függően számolja mindhárom típusú mértéket, illetve csak a c típusú érzékenység mértékét. Eredményül a számított mértékeket táblázatosan, frekvencia, érzékenysgmérték oszlopokkal kapjuk. A programtól kérhetjük az eredmények sornymatatóval történő ábrá-

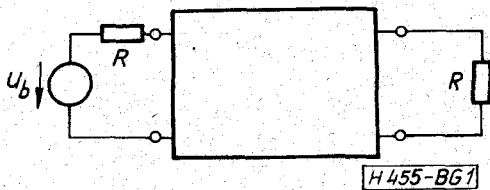
zolását. A program szintén RAZDAN 3 gépre, ALGOL nyelven készült. Elkészült a toleranciamérték-számító programnak a KEPAN-74 analízisprogrammal egybeépített változata is, ami a számítás gyorsaságát és kényelmességét fokozza.

A következőkben számszerű értékek bemutatásával világitjuk meg az érzékenységmértékek használatát.

3. Példák a mértékek számítására

Az alábbiakban két példacsoportot vizsgálunk, először csillapítók, majd egyszerű sávszűrő kapcsolások összehasonlítását végezzük el.

(i) Szimmetrikus csillapítók. Az 1. ábrán látható szimmetrikus csillapítót hat, egymással ekvivalens áramkörrel valósítottuk meg: hidkapcsolással, T-taggal, áthidalt T-taggal, π -taggal, földszimmetrikus T-taggal, földszimmetrikus π -taggal (0-taggal). Az



1. ábra. Szimmetrikus csillapító

elemértékeket úgy határoztuk meg, hogy mindegyik kapcsolás 40 dB csillapítást szolgáltasson. Az érzékenységek valóságosak, frekvenciafüggetlenek. A számított érzékenységmértékek alapján készítettük el az 1. táblázatot. Figyelmet érdemel a hidkapcsolás kiugróan nagy érzékenységmértéke. Hangsúlyozzuk, hogy a táblázat sorrendjét érzékenység szempontjából állítottuk össze. Az áramköri elemek száma szerinti sorrend vagy a legnagyobb és legkisebb ellenállás hányadosa szerinti sorrend ettől különbözik.

1. táblázat

Csillapítók érzékenységmértékének összehasonlítása

Érzékenység sorrend	Kapcsolás	$\sum_{i=1}^N s_i ^2$
1.	Áthidalt T-tag	0,99
2.	Földszimmetrikus π -tag	1,46
3.	Földszimmetrikus T-tag	1,70
4-5.	π -tag	1,94
4-5.	T-tag	1,94
6.	Hidkapcsolás	625,50

(ii) Sávszűrők. Negyedfokú sávszűrőket hasonlítottunk össze LC és aktív RC megvalósításában. Az utóbbi esetben két eljárással is megvalósítottuk a hálózatfüggvényt: kaszkád realizálással és PRB (Primary Resonator Block) realizálással [10]. Mindkét aktív RC realizálásnál a Deliyannis sávszűrő alaptagot használtuk (2. ábra). A kapcsolás transzfer függvénye

$$K^D = \frac{U_2^D}{U_1^D} = \frac{-pAR_2C_2}{i + pB + p^2R_1R_2C_1C_2} \quad (21)$$

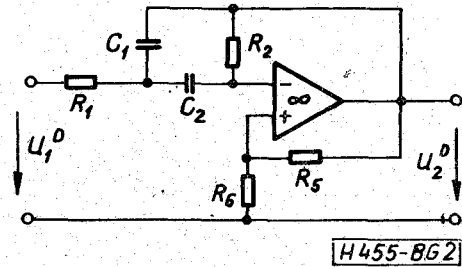
ahol

$$A = 1 + \frac{R_6}{R_5} \quad (22a)$$

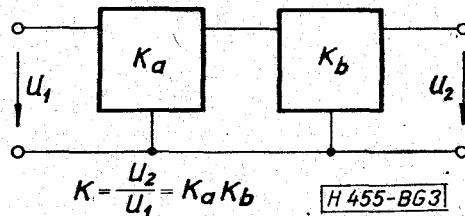
$$B = R_2C_2 + R_1C_1 + R_1C_2 - AR_2C_2 \quad (22b)$$

A sávszűrő kaszkád realizálását a 3. ábra, a PRB realizálást a 4. ábra mutatja. A sávszűrő LC realizálása pedig az 5. ábrán látható.

A szűrők Csebisev jellegű amplitúdó-karakteristikájának ingadozása a $0,9 \leq \omega \leq 1,111$ áteresztő tartományban 1 dB értékű. Az amplitúdó-karak-

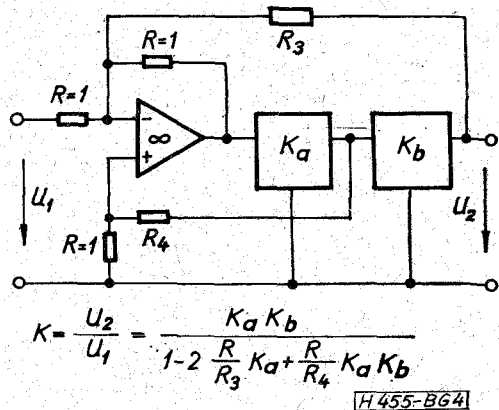


2. ábra. Deliyannis-féle sávszűrő alaptag



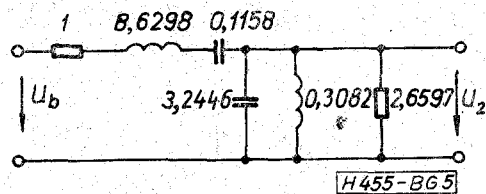
3. ábra. Kaszkád kapcsolás. Az áramköri elemek értéke a két alaptagnál:

$$\begin{aligned} C_{1a} = C_{1b} = C_{2a} = C_{2b} &= 1 \\ R_{1a} &= 0,218 & R_{2a} &= 3,79 \\ R_{1b} &= 0,264 & R_{2b} &= 4,58 \\ R_{5a} = R_{5b} &= 1 & R_{6a} = R_{6b} &= 0,0876 \end{aligned}$$



4. ábra. PRB kapcsolás. Az áramköri elemek értéke:

$$\begin{aligned} C_{1a} = C_{1b} = C_{2a} = C_{2b} &= 1 \\ R_{1a} = R_{1b} &= 0,1 & R_{2a} = R_{2b} &= 10 \\ R_3 &= 2325,8 & R_4 &= 106,157 \\ R_{5a} = R_{5b} &= 1 & R_{6a} = R_{6b} &= 0,018 \end{aligned}$$



5. ábra. A lezárásokkal kiegészített LC létrakapcsolás

terisztikák különben csak egy konstans szorzóban térnek el egymástól. A KEPAN-74 program által szolgáltatott eredmények a kapcsolások ekvivalens voltát igazolták. Az érzékenységekből látható volt, hogy az aktív elemek még erősebben súlyozott esetben sem fognak a mértékbe gyakorlatilag beleszólni, így ezeket el is hagytuk a mértékek számításánál.

2. táblázat

Az amplitúdó-karakterisztika érzékenységmértéke korrelálatlan esetben

Frekvencia	LC	K	PRB
0,100	2,04	4,11	6,09
0,158	2,11	4,25	6,22
0,251	2,29	4,63	6,60
0,398	2,92	5,94	7,88
0,631	6,69	14,1	15,6
1,000	0,15	135	4,86
1,58	6,69	14,1	15,6
2,51	2,92	5,94	7,88
3,98	2,29	4,63	6,60
6,31	2,11	4,25	6,22
10,00	2,04	4,11	6,09

3. táblázat

Az amplitúdó-karakterisztika érzékenységmértéke korrelálatlan esetben a 0,877-1,141 frekvenciatartományban

Frekvencia	LC	K	PRB
0,877	37,7	117	101
0,900	16,1	94,0	73,8
0,924	0,74	106	36,9
0,949	1,65	137	19,9
0,974	0,99	139	8,94
1,000	0,15	135	4,86
1,027	0,99	139	8,94
1,054	1,65	139	19,9
1,082	0,74	108	36,9
1,111	16,1	94,6	73,8
1,141	37,7	118	101

4. táblázat

Az amplitúdó-karakterisztika toleranciamértéke korrelált esetben

Frekvencia	LC	K	PRB
0,100	0,612	1,233	1,826
0,158	0,632	1,275	1,867
0,251	0,688	1,390	1,981
0,398	0,876	1,782	2,365
0,631	2,007	4,221	4,675
1,000	0,044	40,53	1,459
1,58	2,007	4,230	4,675
2,51	0,876	1,783	2,365
3,98	0,688	1,390	1,981
6,31	0,632	1,275	1,867
10,00	0,612	1,233	1,826

5. táblázat

Az amplitúdó-karakterisztika toleranciamértéke korrelált esetben a 0,877-1,141 frekvenciatartományban

Frekvencia	LC	K	PRB
0,877	11,31	35,07	30,33
0,900	4,817	28,19	22,15
0,924	0,221	31,87	11,07
0,949	0,495	41,21	5,977
0,974	0,295	41,54	2,683
1,000	0,044	40,53	1,459
1,027	0,295	41,71	2,683
1,054	0,495	41,71	5,977
1,082	0,222	32,48	11,07
1,111	4,821	28,39	22,15
1,141	11,31	35,49	30,33

A hálózatok elsődleges jellemzője az amplitúdó-karakterisztika, ezért elsősorban az érzékenységek valós részéből származtatott mértékeket ismertetjük. Korrelálatlan esetben, az ellenállásokra, induktivitásokra és kapacitásokra azonos súlyozást választva a 2. táblázatban látható eredményeket kaptuk. A 3. táblázat az áteresztő tartományt részletesebb bontásban mutatja (a táblázatban a 0,877 és 1,141 frekvenciákhoz tartozó értékeket is feltüntettük).

Korrelált esetben az ellenállások egymás között, az induktivitások egymás közötti és a kapacitások egymás közötti korrelációs tényezőjét 0,7-nek választottuk. Ugyancsak 0,7-nek választottuk az ellenállások és induktivitások közötti korrelációs tényezőt. Az ellenállások és kapacitások közötti, illetve az induktivitások és a kapacitások közötti korrelációs tényezőt -0,7-nek vettük fel. Az eredményeket a 4. és 5. táblázat mutatja.

Befejezésül ábrázoljuk, korreláció nélküli esetben, mindhárom kapcsolásra az érzékenység mértékeket. A 6. ábra a logaritmikus amplitúdó-karakterisztika érzékenység mértékét, a 7. ábra a fázisérzékenység mértékét mutatja. A 8. ábra az érzékenységek abszolút értékének négyzete alapján számított mértéket tünteti fel. A diagramok és az előzőleg bemutatott táblázatok jól demonstrálják az érzékenységmérték-számító program hatékonyságát.

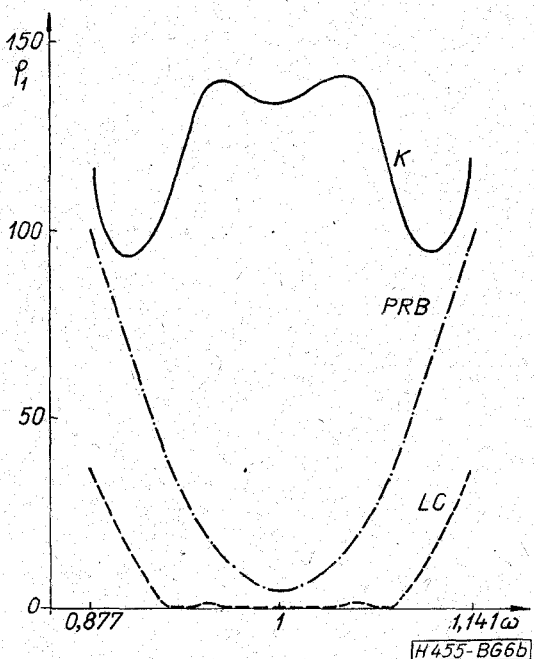
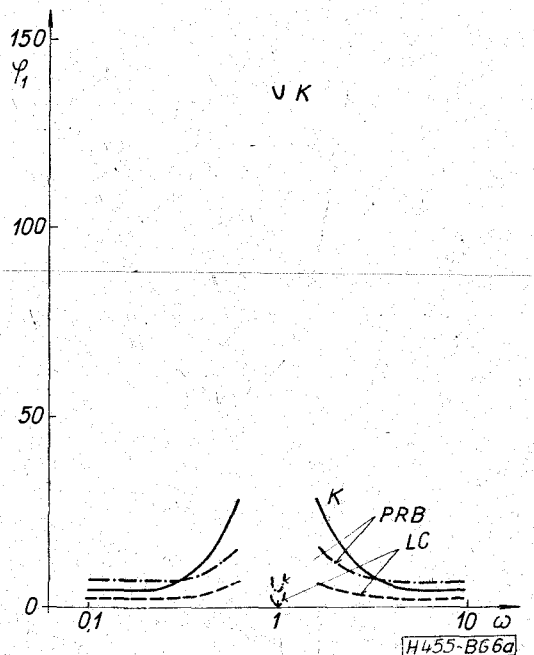
4. Összefoglalás

A hálózatjellemző toleranciája függ (i) a specifikáció teljesítésének módjától, (ii) az áramkör felépítésétől és (iii) az alkalmazott technológiától. Az optimalizálás célfüggvényének meghatározásához és a különböző áramköri megvalósítások használhatóságának megítéléséhez kívánatos lenne egyetlen jellemző mértéket megadni. A dolgozatban négy-mutatunk, hogy célszerű különbséget tenni a toleranciamérték és az érzékenység mérték között. Az előbbi a technológiai paramétereket is tartalmazza, az utóbbi csak az áramkör felépítésétől függ.

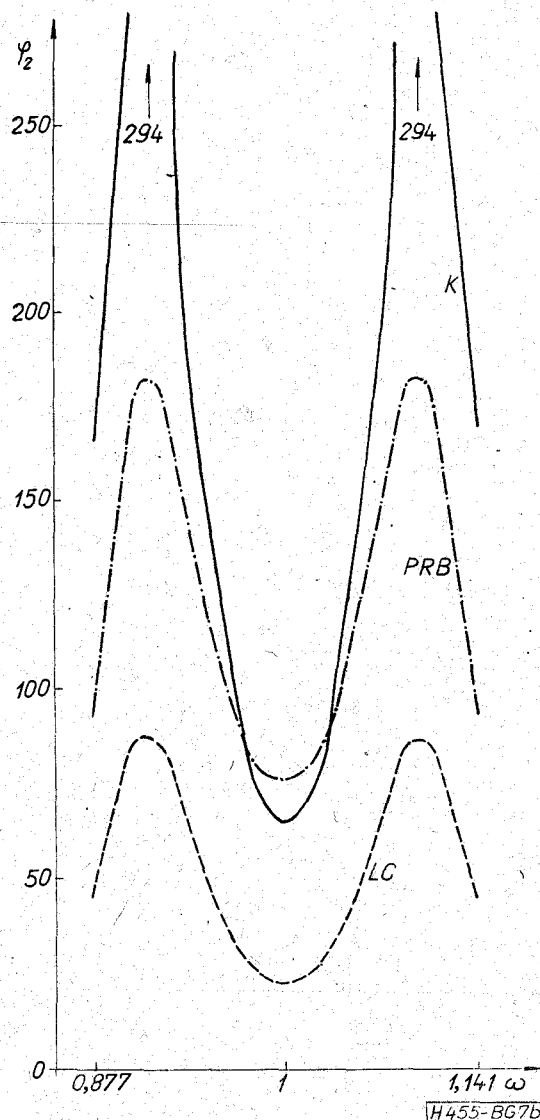
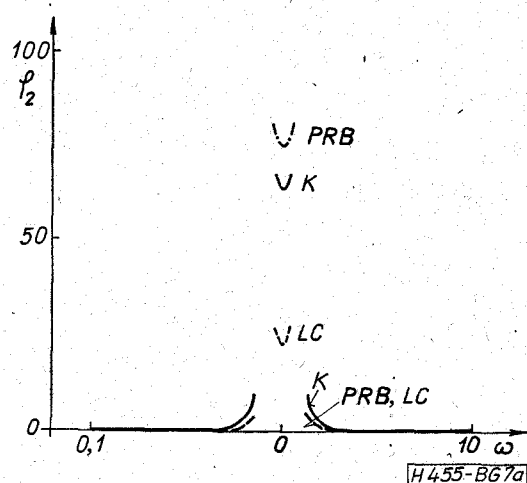
Az érzékenységek valós részének súlyozott négyzetösszege az amplitúdó-karakterisztika toleranciájára jellemző. Az érzékenységek képzetes részének súlyozott négyzetösszege a fáziskarakterisztika to-

lerancia mértékét adja. Sok esetben az érzékenységek abszolút értékeinek súlyozott négyzetösszege a kedvező toleranciamérték. Mindhárom mérték az áramköri paraméterek közötti korreláció esetére is kiterjeszhető.

A felsorolt hatféle toleranciamérték számítására RAZDAN 3 gépre ALGOL nyelven programot készítettünk. A program használatát a csillapítók érzékenység mértékeinek és sávszűrők toleranciamértékeinek bemutatásával illusztráltuk. Az eredmények többek között azt mutatják, hogy érzékenység szempontjából a csillapítóknál az áthidalt T kapcsolás, a sávszűrők esetén pedig az LC létra kapcsolás a legjobb. Az aktív RC szűrők PRB



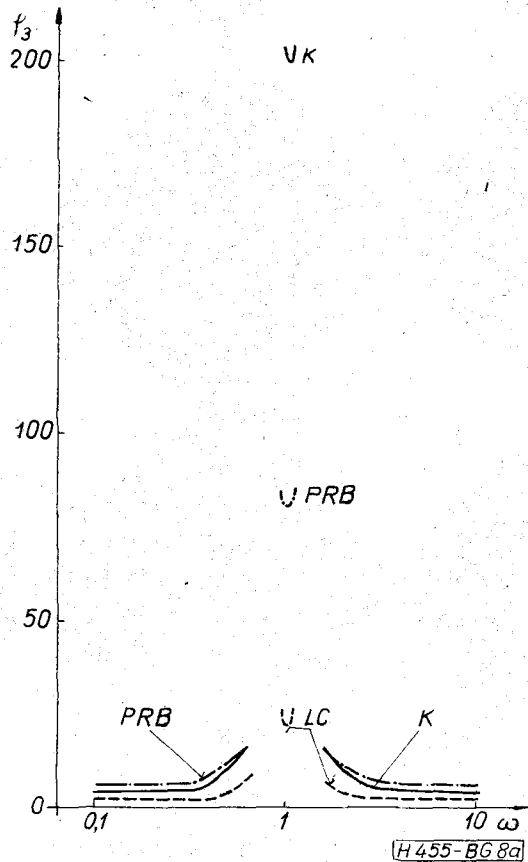
6. ábra. Az amplitúdó karakterisztika érzékenységmértéke a) 0,1—10 frekvenciatartományban, b) 0,877—1,141 frekvenciatartományban



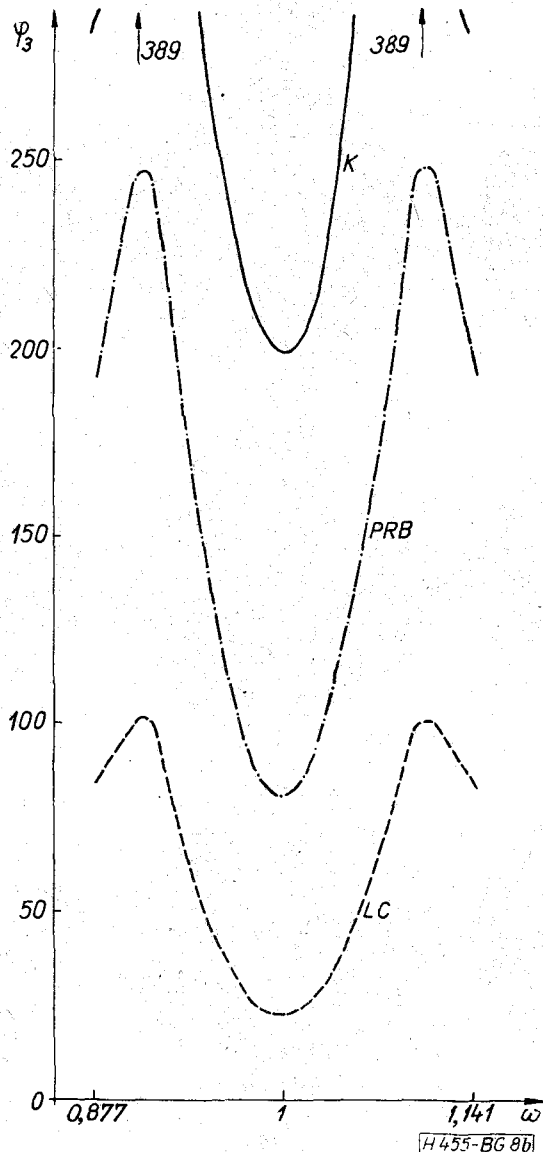
7. ábra. A fázisérzékenység mértéke a) 0,1—10 frekvenciatartományban, b) 0,877—1,141 frekvenciatartományban

(Primary Resonator Block) megvalósítása kedvezőbb a kaszkád realizálásnál.

A KEPAN—74 analízis programot Gefferth László írta a BME Híradástechnikai Elektronika Intézetben, a REMIX Rádiótechnikai Vállalat megbízására.



8. ábra. Az érzékenységek abszolút értékének négyzetösszege
a) 0,1–10 frekvenciatartományban, b) 0,877–1,141 frekvenciatartományban



sából. Az összehasonlítás tárgyát képező sávszűrőket Scultéty László tervezte a Műszeripari Kutató Intézetben. Simonyi Ernő (Távközlési Kutató Intézet) a dolgozat alapjául szolgáló diplomaterv részletes bírálatát készítette. A szerzők hálásan köszönik támogatásukat és segítségüket.

I R O D A L O M

[1] Béres V.: Elektronikus áramkörök érzékenysége és toleranciája. Diplomaterv. BME Híradástechnikai Elektronika Intézet, 1975.

[2] R. N. Biswas—E. S. Kuh.: Multiparameter sensitivity for linear systems. IEEE Trans. on CT—18 1971, No. 6. pp. 718—19.

[3] N. Fitege: Statistical error and sensitivity measures. Proc. of the SSCT, 1974. Vol. 2. pp. 212—16, Prague.

[4] K. Géher: Theory of network tolerances. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1971.

[5] K. Géher: The theory of sensitivity invariants and their application to optimization of tolerances and noises. Periodica Polytechnica El. Eng. 1975 Vol. 19. No. 1. pp. 25—34.

[6] A. J. Goldstein—F. F. Kuo: Multiparameter sensitivity. IEEE Trans. on CT—8 1961, No. 2. pp. 177—78.

[7] S. S. Haykin—W. J. Butler: Multiparameter sensitivity indexes of performances for linear, time-invariant networks. Proc. of the IEE, 1970. No. 7. pp. 1239—47.

[8] D. Hilberman: An approach to the statistical variability and sensitivities of biquadratic filters. IEEE Trans. on CT—20 1973, No. 4. pp. 382—390.

[9] KEPAN—74. Koncentrált és elosztott paraméterű hálózatok analízise. Programleírás. A program a REMIX Rádiótechnikai Vállalat megbízásából készült. BME Híradástechnikai Elektronika Intézet, 1974.

[10] K. R. Laker—M. S. Ghauri: Synthesis of low sensitivity multiloop feedback active RC filter. IEEE Trans. on CAS—21 1974, No. 2. pp. 252—59.

[11] K. R. Laker—M. S. Ghauri: Large-change sensitivity — a dual pair of approximate statistical sensitivity measures. Journal of the Franklin Institute. Vol. 298. Nos. 5 and 6. December 1974. pp. 395—413.

[12] K. Reinschke: Zuverlässigkeit von Systemen Band 1, 2. Verlag Technik, Berlin, 1973., 1974.

[13] A. L. Rosenbaum—M. S. Ghauri: Multiparameter sensitivity in active RC networks. IEEE Trans. on CT—18. 1971, No. 6. pp. 592—99.

[14] Roska T.: Aktív RC hálózatok szintézise. Aktív RC hálózatok optimalizálásának és tervezésének néhány kérdése. Egyetemi doktori dolgozat. BME Villamosmérnöki Kar, 1967.

[15] Roska T.: The designing of optimum sensitive linear networks. Acta Imeco 1967. Tome IV. pp. 23—31, Warszawa.

[16] J. D. Schoeffler: Synthesis of minimum sensitivity networks. IEEE Trans. on CT—11 1964. No. 2. pp. 271—276.

[17] B. A. Sheno: Optimum variability design and comparative evaluation of thin film active filters. IEEE Trans. on CAS—21 1974 No. 2. pp. 263—68.