

DR. GEFFERTH LÁSZLÓ — SIERANSKI MAREK
Budapesti Műszaki Egyetem
Híradástechnikai Elektronika Intézet

Számítógép programok nagyváltozású érzékenység meghatározására

ETO 519.68:621.3.089.52

A differenciális érzékenység számításánál feltételezzük, hogy az áramköri paraméterek értéke csak infinitesimalisan kicsit változik meg. Ily módon a differenciális érzékenység értéke adott frekvencián csak az áramkör felépítésétől, a paraméterek névleges értékétől függ. Ha az áramköri paraméter értéke nagyot változik, akkor a differenciális érzékenység számítási módszerek nem alkalmazhatók. Az áramköri paraméterek nagy megváltozásával több helyen is találkozhatunk: a minél olcsóbb áramkörökhöz szükséges a minél nagyobb toleranciájú elemek felhasználása; az áramkörök behangolásánál a hangolt elem paramétere változik nagyot; hibás áramkörök-nél a hibát éppen az okozza, hogy valamelyik áramköri paraméter értéke nagymértékben eltér az előírtól stb.

Az áramköri paraméterek véges nagy megváltozásával a nagyváltozású érzékenység foglalkozik [7]. A Budapesti Műszaki Egyetem Híradástechnikai Elektronika Intézetében programokat dolgoztunk ki a nagyváltozású érzékenység számítására. Most e programok elméleti alapjait és szolgáltatásait ismer-tjük.

I. Definíciók

Napjainkban több szerző is foglalkozik az áramköri paraméterek nagy megváltozásának hatásával, így a nagyváltozású érzékenységet is más és másféleképpen definiálták. Lényegileg azonban kétféle definíciója ismeretes.

Az első definíció szerint feltételezzük, hogy az áramköri paraméter véges megváltozása, Δx_i ismert. Ehhez meghatározzuk az F_j hálózatfüggvény megváltozását, ΔF_j -t, s a kettő hányadosa a nagyváltozású érzékenység [3, 5, 11]:

$$S_{j,i}^I = \frac{\Delta F_j}{\Delta x_i} \quad (1)$$

Az így definiált nagyváltozású érzékenység meg-
egyezik a differenciális érzékenységgel, ha $\Delta x_i \rightarrow 0$,
s abból is kiszámítható [4]:

$$S_{j,i}^I = \frac{S_j^I}{1 + \Delta x_i N' / N} \quad (2)$$

ahol $S_j^I = \partial F_j / \partial x_i$ a differenciális érzékenység, N az F_j hálózatfüggvény nevezője, N' pedig ennek x_i sze-
rinti deriváltja.

A nagyváltozású érzékenység ilyen definíciója ana-
lízis feladatoknál célszerű. A differenciális és a nagy-
változású érzékenység közötti kapcsolatot lineáris
áramkörök hibáinak lokalizálására is felhasználhat-
juk [8].

A másik definíciónál a helyzet fordított. A háló-
zatfüggvény megengedett toleranciáját, $\pm \varepsilon$ -t tekint-
jük adottnak, s ehhez határozzuk meg az áramköri
paraméternek azt a megváltozását, amely a hálózat-
függvény értékét a toleranciahatárra viszi. Jelöljük
 Δx_i^+ -val az áramköri paraméter növekedéséhez, Δx_i^- -
val a csökkenéséhez tartozó azon megváltozásokat,
amelyek mellett tehát a hálózatfüggvény értéke a
toleranciahatáron lesz. A nagyváltozású érzékenysé-
get az

$$L_i = \max \left\{ \frac{x_i}{\Delta x_i^+}; \frac{-x_i}{\Delta x_i^-} \right\} \quad (3)$$

képletből határozhatjuk meg, ahol a két hányados
nagyobbikát tekintjük [1, 2].

A nagyváltozású érzékenységnek ezt a definícióját
áramkörtervezésnél alkalmazhatjuk pl. az áramköri
elemek toleranciájának kiosztására.

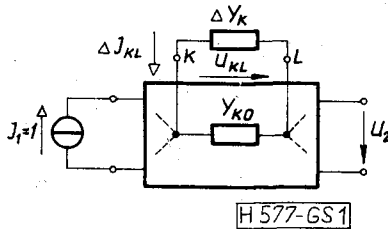
2. Számítási módszer

A hálózat leírására az indefinit admittancia mát-
rixot használjuk. Megfelelő átalakítással elérhető,
hogy a vezérelt generátorok mindegyike, beleértve a
műveleti erősítőt is, rendelkezék indefinit admittan-

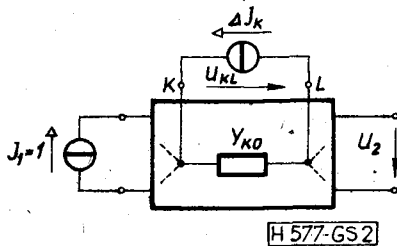
cia mátrixszal. A mátrix tetszőleges sorának és oszlopának törlése után a csomóponti admittancia mátrixot kapjuk meg, amely általában invertálható. A bemeneten egységnyi áramú gerjesztést alkalmazva az inverz mátrix elemei a hálózat csomópontjainak a feszültségét adják. A feszültségek ismeretében tetszőleges hálózatfüggvény értéke számítható. Az áramköri paraméterek megváltozását járulékos áramgenerátorral helyettesítjük, így a mátrix nem változik, csak az új áramgenerátor árama jelentkezik a gerjesztő áramok vektorában.

2.1. Számítás ismert megváltozás esetén

Tekintsük az 1. ábrát. Az ábrán feltüntettük az eredeti hálózatot, melyen az eredeti bemeneti és kimeneti kapu mellé egy harmadik kaput képeztünk. A kapu két csomópontját annak az Y_k elemnek bekötéseivel alkottuk meg, amelyre vonatkozóan a nagyváltozású érzékenységet számítani kívánjuk. Az Y_k admittancia ΔY_k megváltozását kiemeltük a hálózatból, s mint az új kapun jelentkező terhelést vesszük figyelembe. Ezáltal a hálózat nem változott meg, az Y_k admittancia értéke maradt a névleges. Ezt jelöltük Y_{k0} -val.



1. ábra. Az admittancia megváltozása mint az eredeti hálózat újonnan képzett kapujának lezárása



2. ábra. Az admittancia megváltozásának helyettesítése járulékos áramgenerátorral

A kompenzációs tétel szerint a megváltozott hálózatban a feszültségek és az áramok nem változnak, ha az admittancia megváltozását olyan áramgenerátorral helyettesítjük, amelynek árama egyenlő a ΔY_k -n átfolyó árammal (2. ábra) [9].

Tetszőleges csomóponton a feszültséget most már a két áramgenerátor együttesen határozza meg:

$$U_j = z_{j1} + z_{jk} \Delta I_k - z_{jl} \Delta I_k, \quad (4)$$

ahol z -vel az invertált mátrix elemeit jelöltük.

Az Y_k admittancián a feszültség:

$$U_{kl} = U_k - U_l = z_{k1} - z_{l1} + (z_{kk} - z_{kl} - z_{lk} + z_{ll}) \Delta I_k. \quad (5)$$

A ΔY_k -n átfolyó áram az Ohm-törvény szerint:

$$\Delta I_k = -\Delta Y_k U_{kl} = -\Delta Y_k \{z_{k1} - z_{l1} + (z_{kk} - z_{kl} - z_{lk} + z_{ll}) \Delta I_k\}, \quad (6)$$

ahonnan

$$\Delta I_k = \frac{-\Delta Y_k (z_{k1} - z_{l1})}{1 + (z_{kk} - z_{kl} - z_{lk} + z_{ll}) \Delta Y_k}. \quad (7)$$

A kapott értéket a (4) kifejezésbe helyettesítve tetszőleges csomóponton levő feszültség, ebből pedig tetszőleges hálózatfüggvény számítható. Ha a hálózat vezérelt generátort is tartalmaz, a számítás elve akkor is hasonló [7], de itt most nem részletezzük.

2.2. Számítás a hálózatfüggvény adott tűrése esetén

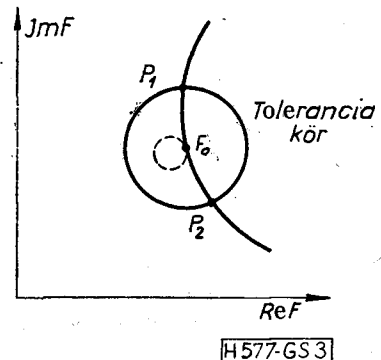
Egy F_j hálózatfüggvény tűrése többféleképpen is megadható. Az egyszerűség kedvéért tételezzük azonban most fel, hogy a tűrés körként van megadva a komplex F_j síkon. Nevezzük ezt a kört a továbbiakban toleranciakörnek. E kör bármely pontján a hálózatfüggvény még éppen teljesíti az előírást. Ahhoz, hogy a (4) kifejezésben szereplő járulékos áramgenerátor ΔI_k áramát meghatározhassuk, a (4) bal oldalán meghatározott értéknek kell állnia. Kérdés, hogy a toleranciakör mely pontját kell megadni a számításhoz.

Az áramköri paraméterek és a hálózatfüggvények közötti bilineáris kapcsolatot kihasználva a toleranciakörnek meghatározott pontját jelölhetjük ki. Ismeretes, hogy az

$$F = \frac{Ax_i + B}{Cx_i + D} \quad (8)$$

bilineáris transzformáció a valós x_i tengelyt körbe vagy egyenesbe viszi át a komplex F síkon. A (8)-ban szereplő eddig ismeretlen betűk komplex konstansokat jelölnek. A kört vagy egyenest az eredeti, névleges hálózat adatait is felhasználva határozhatjuk meg.

Rajzoljuk fel a komplex F síkon a hálózatfüggvény F_0 névleges értéke köré a toleranciakört, valamint az x_i változásának következtében leírt kört (3. ábra). A két kör metszéspontja (3. ábra P_1 és P_2 pont) megadja a járulékos áramgenerátor áramának meghatározásához szükséges értékeket. Ha a két körnek nincs metszéspontja, azaz a (8)-ból kapott kör a toleranciakör belsejébe esik (3. ábra szaggatott



3. ábra. A P_1 és P_2 pontokból a hálózatfüggvény értéke a tolerancia határain meghatározható

vonallal rajzolt kör), akkor ez azt jelenti, hogy a kérdéses áramkörü paraméter bármekkora változhat, a hálózatfüggvény ezen a frekvencián mindig teljesíti az előírást. Ezt az esetet relatív érzéketlenségnek neveztük el, mivel ez függ az előírásoktól. Ha a hálózatfüggvény egyáltalán nem változik egy adott x_i paraméter változásakor, azaz a hálózatfüggvény független x_i -től, akkor pontot kapunk a transformációval. Ezt az esetet abszolút érzéketlenségnek neveztük el, mivel ez független az előírásoktól, és csak az áramkör felépítésétől függ.

3. A programok ismertetése

A nagyváltozású érzékenység számítására a két definíciónak megfelelően két program készült el: ANATOL (ANALízis és TOLERancia számítása), valamint BERTOLD (Butler-féle ERZékenység és TOLERancia Direkt meghatározása). E programok az Egyetemi Számítóközpont RAZDAN 3 gépére készültek ALGOL nyelven. A programok a KEPAN-74 analízisprogram [6] bővítései, illetve módosításai, segítségével analóg, lineáris, koncentrált paraméterű, időinvariáns hálózatok nagyváltozású érzékenysége számítható [10]. Megengedett elemek:

- koncentrált paraméterű ellenállás, induktivitás, kapacitás,
- véges vezérlési tényezőjű, de egyébként ideálisnak tekintett műveleti erősítő,
- ideális vezérelt generátorok,
- elosztott paraméterű, homogén, háromrétegű RC vonal, de erre nagyváltozású érzékenység számítása nem kérhető.

A hálózatot elemenként adjuk meg, az elemre jellemző kódszámmal, a bekötési csomópontok sorszámmal és az elem értékével. A vizsgálati frekvenciákat pontonként vagy intervallumként adhatjuk meg. Ez utóbbi esetben a határok mellett csak a frekvenciapontok számát kell megadni.

Mindkét program kiszámítja a névleges hálózathoz a feszültség transzfer függvény abszolút értékét és fázisát, e függvénynek, valamint a bemeneti és a kimeneti impedanciának a valós és képzetes részét a kért frekvenciákon. Az egyes programok ezen túlmenő számításait a bemenő adatokban szereplő ún. opciók segítségével vezérelhetjük.

3.1. Az ANATOL program szolgáltatásai

Ezzel a programmal minden frekvencián az összes kijelölt passzív és aktív elemre meghatározhatjuk az előbb említett hálózatfüggvények megváltozott értékét vagy a névleges értéktől való eltérését az elemek értékének adott megváltozása esetén. A bemenő adatokkal adható meg, hogy a program a következők közül mivel számol:

- egyetlen toleranciával, pl. 10%,
- két, lineárisan szimmetrikus toleranciával, pl. +20% és -20%,
- két, logaritmikusan szimmetrikus toleranciával, pl. +100% és -50%,

- rövidzár és szakadás,
- logaritmikusan léptékű tolerancia értékekkel.

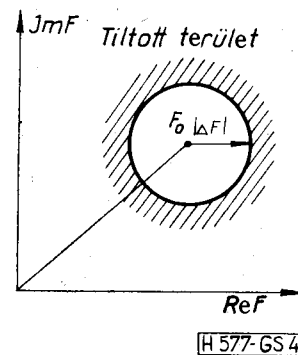
Egy elemhez többféle számítás is rendelhető.

3.2. A BERTOLD program szolgáltatásai

A BERTOLD programmal minden frekvencián meghatározható a kijelölt passzív és aktív elemek megváltozása ahhoz, hogy a hálózatfüggvények ne lépjenek ki a tűrésmezőből. A nagyváltozású érzékenység számításánál feltételezzük, hogy csak egyetlen áramkörü paraméter értéke változik.

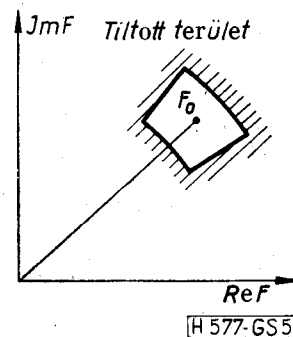
A hálózatfüggvények tűrésmezeje megadható a névleges értéktől való eltérés abszolút értékének a névleges érték abszolút értékéhez viszonyított százalékkal (4. ábra):

$$r = \frac{|\Delta F|}{|F_0|} [\%]. \quad (9)$$



4. ábra. A hálózatfüggvény tűrésmezeje lehet kör

A feszültség transzfer függvény esetén a tűrésmezőt másféleképpen is megadhatjuk. Előírhatjuk az abszolút toleranciáját dB-ben, valamint a fáziszög toleranciáját fokban (5. ábra).



5. ábra. A hálózatfüggvény tűrésmezeje lehet dB-ben és fokban is megadva

Nem szükséges, hogy a feszültség transzfer függvény, a bemeneti és a kimeneti impedancia toleranciái mind szerepeljenek. Ilyenkor a program csak a megadott toleranciát tekinti, a többi figyelmen kívül hagyja. Ha több hálózatfüggvényre van előírás, akkor az áramkörü paraméternek a legszigorúbb előírás is kielégítő megváltozását határozza meg a program. A program külön kijelzi a 2.2. pontban definiált abszolút és relatív érzéketlenséget.

4. A programok felhasználási lehetőségei

Az ANATOL program az áramköri paraméterek ismert megváltozásához határozza meg a hálózatfüggvények értékét, így ez a program analízisfeladatoknál használható. Ellenőrizhető vele a differenciális érzékenységgel végzett számítások helyessége, ha az áramköri paraméter értéke nem elhanyagolhatóan kicsit változik meg. Az analóg, lineáris áramkörök diagnosztikájában a direkt módszerek görbéinek felvételéhez, a hibaszimulációs módszereknél pedig a „hibás” eset szimulálásához nyújt hasznos segítséget [8].

A BERTOLD program előírt hálózatfüggvény toleranciához keresi meg az egyes áramköri paraméterek megengedett megváltozását. Az analóg diagnosztikában egyszeres hibák lokalizálására szolgáló néhány direkt módszernél használható. A program csekély átalakítással önálló diagnosztikai programként is használható. A BERTOLD program az áramköri elemek toleranciakiosztásához is hasznos segítséget nyújthat.

5. Mintapéldák

5.1. Wien-osztó

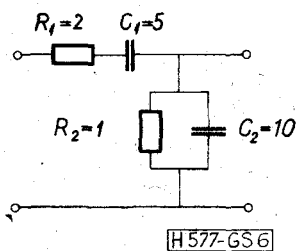
Tekintsük a 6. ábrán felrajzolt Wien-osztót. Az osztó a 0.1 relatív frekvenciára van kihangolva. Ezen a frekvencián a feszültség transzfer függvény abszolút értéke -10.881 dB, a fázisszöge 0 fok.

A $0.09 - 0.111$ frekvenciatartományban vizsgáltuk a kapcsolást. Először a BERTOLD programot alkalmaztuk oly módon, hogy a hálózatfüggvény eltéréseit relatív értékekkel adtuk meg: a feszültség transzfer függvény abszolút értéke 0.5 dB-t, a fázisa 5 fokot térhet el a névleges értéktől. A Butler szerinti nagyváltozású érzékenységet a 7. ábra mutatja. Látható, hogy a relatív toleranciák miatt az érzékenység közel állandó ebben a szűk frekvenciasávban, valamint a kapcsolás a kapacitásokra érzékenyebb.

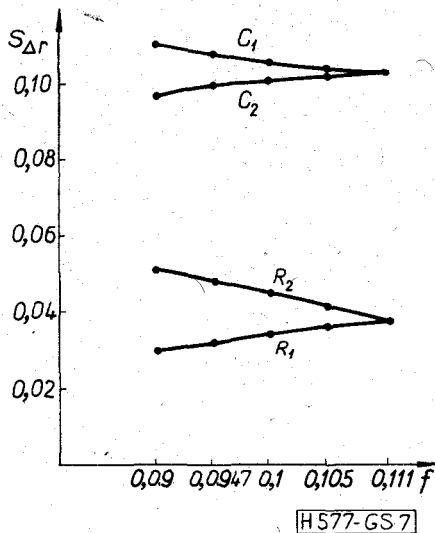
Az érzékenység ilyen számítása a differenciális érzékenység számításához áll közel.

Gyakran kíváncsiak vagyunk arra, hogy a megtervezett kapcsolás hogyan teljesíti az előírt specifikációt. Ilyenkor fix toleranciahatárokat, specifikációt adunk meg.

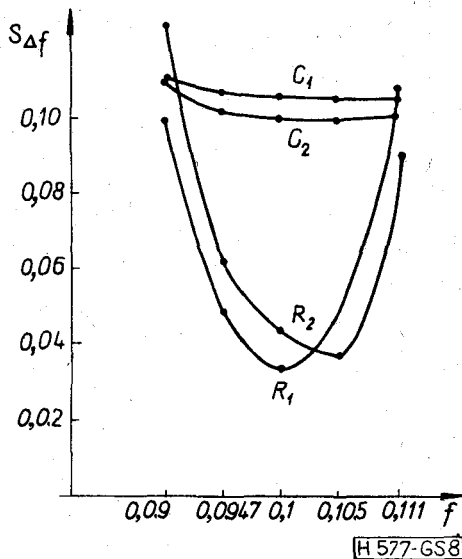
Legyen a Wien-osztó feszültség transzfer függvényének specifikációja: az abszolút érték $-10,381$ és $-11,381$ között, a fázisszög 5° és -5° között változhat. A bemenő impedanciára nem teszünk előírást. A BERTOLD program eredményeit a 8. ábrán rajzoltuk fel. Látható, hogy az érzékenység



6. ábra. Wien-osztó



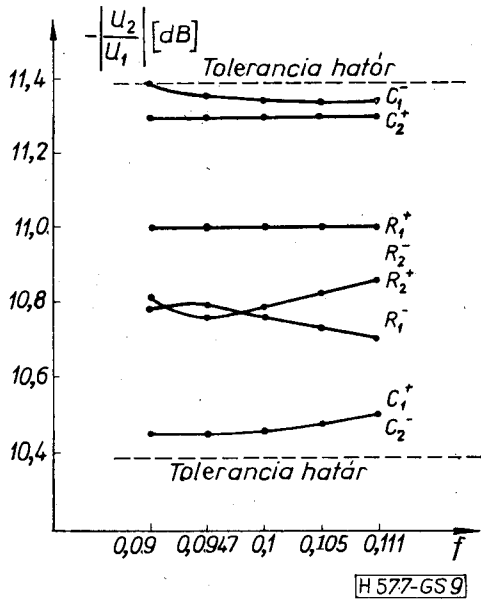
7. ábra. A Wien-osztó nagyváltozású érzékenysége Butler szerinti értelmezésben relatív toleranciával



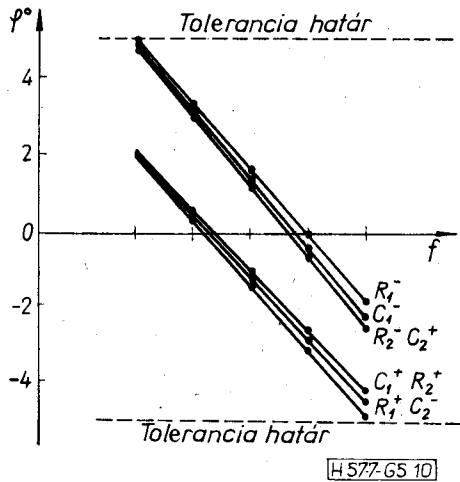
8. ábra. A Wien-osztó nagyváltozású érzékenysége Butler szerinti értelmezésben fix toleranciával

menete megváltozott. Ez abból következik, hogy a hálózatfüggvény névleges értéke a sávhatárokon jobban megközelíti a specifikációban megengedett értékeket, s így az egyes elemek értéke kevesebbet változhat, ami a (3) képlet alapján nagyobb érzékenységet jelent. Ha tehát elő kívánjuk írni az egyes elemek toleranciáit, akkor a 8. ábra alapján a sávhatárokon mutatott érzékenységeket kell figyelembe venni.

Az ANATOL programmal megvizsgáltuk az áramkört abban az esetben, ha az egyes elemek toleranciáit a BERTOLD program alapján a sávhatárokon mutatott érzékenységből szimmetrikusan határoztuk meg. A 9. ábra a feszültség transzfer függvény abszolút értékét, a 10. ábra a fázisát mutatja. Szaggatott vonallal bejelöltük a hálózatfüggvény megengedett toleranciáit. Az ábrákból leolvashatóan a Wien-osztó fázisa az adott sávban lényegesen változik, míg az amplitúdó karakterisztikája lényegében állandó.



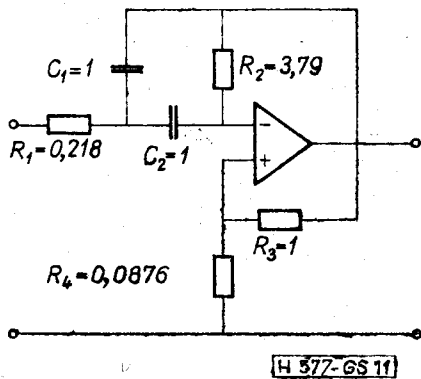
9. ábra. A Wien-osztó feszültség transzfer függvénye



10. ábra. A Wien-osztó fázisa

5.2. Deliyannis-féle alaptag

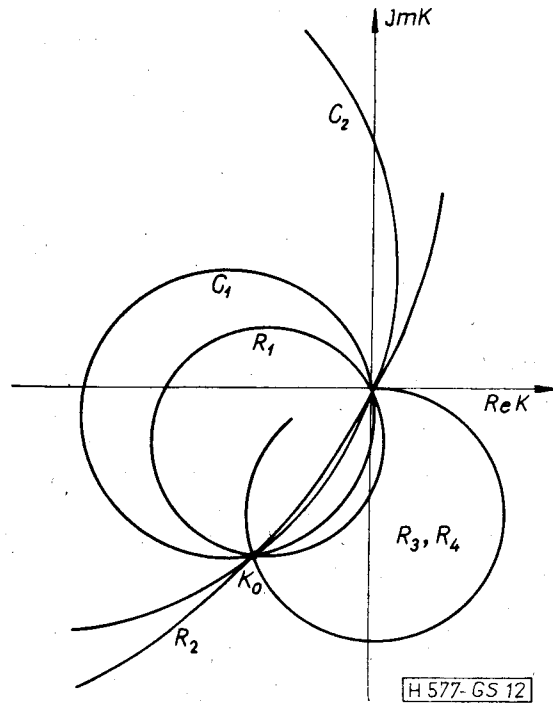
Tekintsük a 11. ábrán felrajzolt Deliyannis-féle alaptagot. Említettük, hogy e programok segítséget nyújthatnak analóg, lineáris áramkörök diagnosztikájához. A [8]-ban ismertetett hibalokalizációs mód-



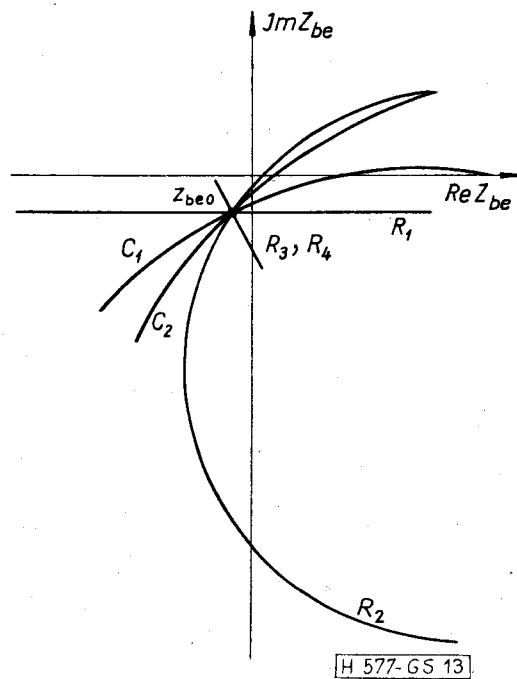
11. ábra. Deliyannis-féle alaptag

szer alkalmazásához szükség van a (8) egyenlet által definiált bilineáris transzformációval nyerhető görbék felvételére. Célunk olyan frekvencia és hálózatfüggvény választása, hogy lehetőleg minden elem megkülönböztethető görbével rendelkezzen.

A görbék felvételéhez szükséges adatok kiszámítására az ANATOL programot használtuk. Vizsgálati frekvenciának az egységnyi frekvenciát, hálózatfüggvénynek a feszültség transzfer függvényt választottuk. A kapott görbék a 12. ábrán láthatók. A görbék



12. ábra. A Deliyannis-féle alaptag feszültség transzfer függvényének változása az egyes elemek megváltozásakor



13. ábra. A Deliyannis-féle alaptag bemenő impedanciájának változása az egyes elemek megváltozásakor

felrajzolása után kitűnt, hogy $0 \leq R_1 \leq R_{10}$ és $0 \leq C_1 \leq C_{10}$ tartományban R_1 és C_1 elemekhez tartozó görbék túl közel futnak egymáshoz. Ugyanez a helyzet a $0 \leq R_2 \leq R_{20}$ és $0 \leq C_2 \leq C_{20}$ esetekben is. Így az R_1 és C_1 , valamint az R_2 és C_2 elemek a hibalokalizálás során a mérési pontatlanság és a többi elem toleranciája miatt valószínűleg nem különböztethetők meg egymástól.

Ezért ugyanezen a frekvencián újabb hálózatfüggvényt választottunk: a bemenő impedanciát. A kapott görbéket a 13. ábra mutatja. Az ábráról leolvasható, hogy az előbbi kritikus esetekben a görbék most távol vannak egymástól. Így diagnosztika céljára a két ábra együttesen használandó. Az R_3 és R_4 ellenállások görbéi azonosak, mivel a műveleti erősítő erősítési tényezőjét beállító feszültségosztóról van szó. Természetesen a görbe egy pontjához más R_3 és más R_4 érték tartozik.

6. Összefoglalás

A cikk a BME—HEI-ben kidolgozott programokat ismerteti, amelyekkel nagyváltozású érzékenység számolható. Az ANATOL program az áramkörü paraméter ismert megváltozásához számolja ki a feszültség transzfer függvény, a bemeneti és a kimeneti impedancia megváltozott értékeit. A BERTOLD programmal az előbbi függvények külön-külön vagy együttesen előírt toleranciáikhoz határozható meg az egyes áramkörü paraméterek megengedett megváltozása, ha közben a többiek névleges értékűek. Az áramkörü paraméterek megváltozását járulékos áramgenerátorral helyettesítjük. Így egy frekvencián egyetlen inverzióval az összes paraméter tetszőleges számú megváltozása egyszerű aritmetikai műveletekkel kezelhető. A programok RAZDAN számítógépre készültek ALGOL nyelven.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki dr. Géher Károly egyetemi tanárnak, a műszaki tudományok doktorának értékes tanácsaiért.

IRODALOM

- [1] E. M. Bufler: Realistic Design Using Large-Change Sensitivities and Performance Contours. IEEE Tr. on Circuit Theory vol. CT-18 No. 1. January 1971. pp. 58—66.
- [2] E. M. Bufler: Large-Change Sensitivities for Statistical Design. The Bell System Technical Journal vol. 50 No. 4. April 1971. pp. 1209—1224.
- [3] T. Downs: A Note on the Computation of Large-Change Sensitivities. IEEE Tr. on Circuit Theory vol. CT-20 No. 6. November 1973. pp. 741—742.
- [4] J. K. Fidler, C. Nightingale: Differential-incremental relationships. Electronics Letters vol. 8. 1972. pp. 626—627.
- [5] R. N. Gadenz, M. G. Rezaei-Fakhr, G. C. Temes: A Method for the Computation of Large Tolerance Effects. IEEE Tr. on Circuit Theory vol. CT-20 No. 6. November 1973. pp. 704—708.
- [6] Gefferth László: KEPAN—74 Koncentrált és elosztott paraméterű hálózatok analízise. Tanulmány és programleírás a REMIX Rádiótechnikai Vállalat részére, 1974.
- [7] Gefferth László: A nagyváltozású érzékenység és alkalmazása. Híradástechnika XXVI. évf. 6. szám, 169—176. oldal, 1975 június.
- [8] Gefferth László: Egyszeres hibák lokalizálása lineáris áramkörökben. Híradástechnika XXVIII. évf. 2. szám, 33—41. oldal, 1977 február.
- [9] P. J. Goddard, P. A. Villalaz, R. Spence: Method for the Efficient Computation of the Large-Change Sensitivity of Linear Nonreciprocal Networks. Electronics Letters vol. 7. No. 4. February 1971. pp. 112—113.
- [10] Sieranski, Marek: Az elemtoleranciák számítógépes vizsgálata és a nagyváltozású érzékenység számítása. Diplomaterv, BME—HEI 1976.
- [11] E. V. Sorensen: General Relations Governing the Exact Sensitivity of Linear Networks. Proc. IEE vol. 114. No. 9. September 1967. pp. 1209—1212.