HÍRADÁSTECHNIKA

GEFFERTH LÁSZLÓ
Budapesti Műszaki Egyetem
Híradástechnikai Elektronika Intézet

Egyszeres hibák lokalizálása lineáris áramkörökben

ETO 519.876.5:621.3.011.71:621.3.004.6

Az elektronikus áramkörök gyártásának végső és igen fontos része az áramkörök ellenőrzése, bemérése. Az áramkörök méretének és bonyolultságának növekedésével az ellenőrző mérések kézi módszerekkel való elvégzéséhez szükséges idő rohamosan nő. A hibák felismerését hibadetektálásnak nevezzük. Az előírt specifikációt nem teljesítő, hibás áramkör javításához szükséges a hiba lokalizálása, behatárolása, más szóval a hiba helyének a meghatározása is. A bonyolultság növekedésével a hiba lokalizálása a tapasztalat alapján, heurisztikus módszerekkel, szintén egyre nehezebbé, gyakran lehetetlenné válik. A gazdaságos gyártás tehát mindinkább megköveteli az automatikus mérő és diagnosztizáló berendezések alkalmazását, amelyek a hiba detektálása után a hibát lokalizálják is.

A digitális áramkörök diagnosztikájára már többé-kevésbé kiforrott módszerek állnak rendelkezésre [2]. Az analóg áramkörök esetében a kutatás kiterjedten folyik és a témakörben megjelenő cikkekben különböző módszereket ismertetnek.

A tapasztalat azt mutatja, hogy a meghibásodások meglehetősen nagy hányada egyszeres hiba, a hibát egyetlen áramköri elem hibája, azaz a megtervezett névleges értéktől való nagy eltérése okozza. Többszörös hibáknak azokat a hibákat nevezzük, amelyeket több hibás elem okoz.

Ebben a cikkben áttekintjük azokat a módszereket, amelyek lineáris, koncentrált paraméterű, időinvariáns áramkörök egyszeres hibáinak lokalizálására alkalmasak.

A diagnosztizáló eljárások két részből állnak. Az első részben előzetes számításokat végzünk a megtervezett áramkör, a kapcsolási rajz és az elemek névleges értékének ismeretében. Ezek például olyan számítások lehetnek, amelyek alapján majd a mért értékeket is felhasználva a hibabehatárolás elvégezhető. De lehet hibaszimuláció is. Ilyenkor valamelyik áramköri elem értékét megváltoztatva, hibássá téve, vizsgáljuk az áramkör működését. Az eredményeket a névleges értékekkel összehasonlítjuk, kódoljuk és tároljuk. Mivel ezeket a számításokat csak egyszer kell elvégezni, ezért sem a számítógép memóriájával, sem a program futási idejével nem kell különösebben takarékoskodni.

A második részben a mért eredményekből az előzetes számítások felhasználásával meg kell határozni a hibás elemet. Mivel az automatikus diagnosztizáló berendezések általában miniszámítógépet használnak, fontos, hogy ezek a számítások minél kisebb helyet foglaljanak el a memóriában és minél rövidebb ideig tartsanak.

A számításoknál előnyös, ha a hálózatfüggvényt szimbolikus, betűs formában ismerjük. A hálózatfüggvény betűs felírására, az ún. szimbolikus analízisre különböző módszerek ismeretesek [6]. Ha az áramkörben csak egyetlen elem értéke változik meg, akkor hatásosan alkalmazható a nagyváltozású érzékenység számításánál bevezetett helyettesítő áramgenerátoros módszer, amely frekvenciatartománybeli programhoz könnyen illeszthető [4].

Az eljárások általában csak a be- és kimeneten mért jellemzőket használják fel a hiba lokalizálására. Mérőpontok alkalmazása különösen nagyfrekvenciás áramköröknél problematikus, mert maga a mérőműszer változtathatja meg az áramkör működését (pl. a szórt kapacitás). Mérőpontok alkalmazása akkor indokolt, ha az elem rövidrezárása vagy szakadása miatt nem jut jel a kimenetre, vagy ha ez elősegíti a gyorsabb és hatásosabb hibakeresést. Így a be- és kimeneti jellemzőket mérve ellenőrizhetjük az áramkört, és a hiba detektálása után ugyanezeket a mérési eredményeket használhatjuk fel a hibás elem lokalizálására.

A cikk első részében áttekintjük azokat a módszereket, amelyek valamilyen módon a Bode-féle bilineáris összefüggésen alapulnak. Elsőnek a bilineáris transzformáció alkalmazását mutatjuk be, amely a transzformáció körtartó tulajdonságát használja ki. A következő módszer ennek speciális esete, mely ellenállás- és reaktánshálózatoknál alkalmazható. Ennek a résznek utolsó módszere a diffe-

Beérkezett: 1976. V. 7.

renciális és a nagyváltozású érzékenységek kapcsolatán alapszik és többkapuk esetében használható előnyösen.

A második részben a hibaszimuláció két lehetséges alkalmazását ismertetjük. Az egyik módszer a hibaszótár „klasszikus" esete, míg a másik, az ún. szavazásos módszer, egy speciális hibaszótár alapján állapítja meg a hibás elemet.

1. Bilineáris összefüggésen alapuló módszerek

Kétpólusú elemekből és vezérelt generátorokból felépített áramkör hálózatfüggvénye és az áramköri paraméterek között az ún. Bode-féle bilineáris összefüggés teremt kapcsolatot [1].

Az x_i paraméterű hibás áramköri elemet az áramkör kapcsain mérhető értékekből szeretnénk meghatározni. A diagnosztika céljára tehát olyan hálózatfüggvényt kell választani, amely x_i-nek (bilineáris) függvénye:

$$F(p, x_i)=\frac{A(p)\,x_i+B(p)}{C(p)\,x_i+D(p)}, \qquad (1)$$

ahol p a komplex frekvencia,

x_i a kérdéses áramköri paraméter, $i=1, 2, \ldots, N$,
N az áramköri elemek száma, A, B, C, D p változójú polinomok és $AD-BC\neq 0$.

Rögzítsük a frekvencia értékét, azaz p=állandó. Az (1) egyenlet az alábbi alakba írható:

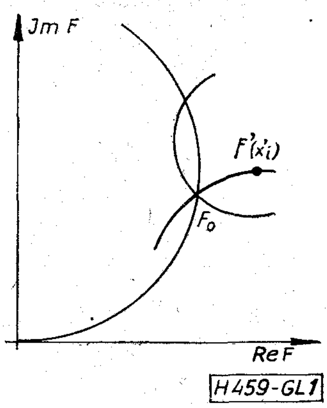
$$F(x_i)=\frac{Ax_i+B}{Cx_i+D}. \qquad (2)$$

A rögzített frekvencia miatt az A, B, C, D polinomok komplex konstanssá változtak. Ezzel a (2) egyenlettel definiált bilineáris transzformációt kaptuk meg, mely körtartó, kört és egyenest körbe vagy egyenesbe transzformál át. Az áramköri elemek pozitív értékei mellett a leképzéskor körívet vagy félegyenest kapunk, ha feltételezzük, hogy eközben az összes többi áramköri elem értéke a névleges, tehát változatlan.

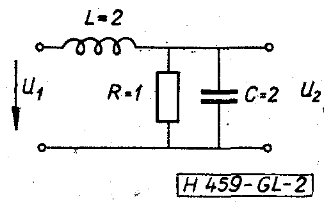
1.1 A bilineáris transzformáció alkalmazása

A módszer azt használja ki, hogy az egyes elemekhez tartozó, a (2) egyenletben szereplő A, B, C, D konstansok különböznek, s ezért az egyes áramköri elemekre kapott görbék különbözni fognak egymástól. Az F komplex síkon tehát egy görbesereget kapunk. Az áramköri elemek névleges értékének megfelelő pontban a görbék metszik egymást (1. ábra). Ez a pont a hálózatfüggvény névleges értéke.

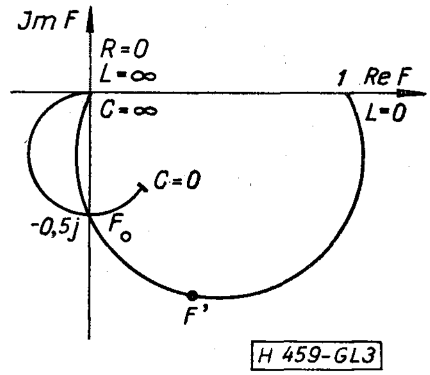
Ha valamelyik áramköri elem értéke a névlegestől eltér, akkor a hálózatfüggvény értéke az egyik görbe mentén mozdul el. A vizsgálandó áramkör F hálózatfüggvényének valós és képzetes részét lemérve (vagy az abszolút értékből és a fázisból kiszámolva), a kapott értékeket az F síkon ábrázolva egy pontot kapunk. A kapott pont a mérési hibától eltekintve



1. ábra. A bilineáris transzformáció alkalmazásával nyert körök



2. ábra. 1. mintaáramkör



3. ábra. A 2. ábra áramköréhez tartozó körök

valamelyik görbére esik (az 1. ábrán az F' jelű pont). Ismervén, hogy a görbe melyik áramköri elemhez tartozik, a hibás elem azonnal kiválasztható [7].

Példa

A módszer szemléltetésére tekintsük a 2. ábra egyszerű áramkörét. Az áramkör jellemzésére a feszültség transzfer függvényt választottuk:

$$\frac{U_2}{U_1}=\frac{R}{R+pL+p^2RLC}.$$

A vizsgálati frekvencia relatív értéke 1. Itt a hálózatfüggvény névleges értéke $-0{,}5j$. A bilineáris transzformáció alkalmazásával kapott köröket a 3. ábra mutatja.

Egy hibás áramkör feszültség transzfer függvényére $0{,}4-0{,}8j$ értéket kaptunk, ami jó közelítéssel az induktivitáshoz tartozó körre esik.

Elvileg egyetlen frekvencián felvett görbesereg is elegendő a hiba lokalizálásához. Azonban pusztán a mérési hiba miatt is lesznek olyan görbék, melyeket nem lehet egymástól megkülönböztetni, mert túl közel futnak egymáshoz. De más probléma is adódhat. Pl. egy csatoló kondenzátor megváltozásának hatása magasabb frekvenciákon elhanyagolható, a hozzá tartozó kör is kicsi lesz. Alacsonyabb frekvenciákon azonban a hatás nagyobb és így a kör is nagyobb. Egy csatoló kondenzátor hibája tehát alacsony frekvencián mutatható ki. Látható, hogy a hatásos diagnosztikához több frekvenciát célszerű választani, mégpedig annyit és úgy, hogy lehetőleg minden elem jól megkülönböztethető körökkel rendelkezzen (l. a 2.1. pontot).

1.2. *Hibalokalizálás ellenálláshálózatokban és reaktánshálózatokban*

Az előző pontban leírt módszer nem alkalmazható abban az esetben, ha a hálózatfüggvénynek csak valós vagy csak képzetes része van. Ellenálláshálózatokban csak valós részt, reaktánshálózatokban csak képzetes részt kapunk. Ilyenkor az összes kör egyetlen egyenessé válik, amelyik vagy a valós vagy a képzetes tengellyel esik egybe.

Válasszuk meg az $F_1(x_i)$ és az $F_2(x_i)$ hálózatfüggvényeket oly módon, hogy a két függvény egyazon mátrix két eleme legyen. Pl. a Z üresjárási impedancia mátrix két eleme: Z_{11} és Z_{12} vagy Z_{11} és Z_{22}; vagy az S reflexiós mátrix két eleme: valamelyik reflexiós tényező és az átviteli tényező. Legalább az egyik függvénynek függenie kell az x_i áramköri elemtől. Reaktáns áramköröknél válasszunk megfelelő vizsgálati frekvenciát.

Ha az áramköri elem változik, akkor a két függvény között az alábbi összefüggés áll fenn [11]:

$$F_1(x_i) = \mathrm{m}F_2(x_i) + \mathrm{c}, \tag{3}$$

ahol c és m állandók.

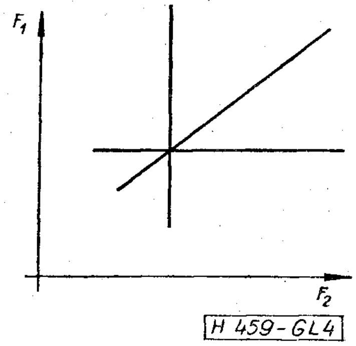
Tehát a két hálózatfüggvény között lineáris kapcsolat van akkor, ha az áramkörben egyetlen elem értéke változik, míg az összes többi elem értéke változatlan.

Vegyünk fel egy olyan koordinátarendszert, ahol az egyik tengelyre az F_1, a másikra az F_2 függvényt visszük fel. Ebben a koordinátarendszerben ábrázolva a (3) összefüggést a különböző x_i áramköri elemekre, N darab egyenest kapunk, melyek egy pontban, a hálózatfüggvények névleges értékénél metszik egymást (4. ábra).

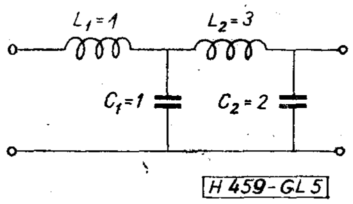
A hibás elem azonosítása az előbbiek alapján a következő. Lemérjük a két hálózatfüggvényt. A két mért érték a koordinátarendszerben egy pontot ad meg, amely valamelyik egyenesre esik, ha a mérési hibától eltekintünk. A hibás elem azonnal azonosítható, mert tudjuk, hogy a kérdéses egyenes melyik elemhez tartozik [5].

Példa

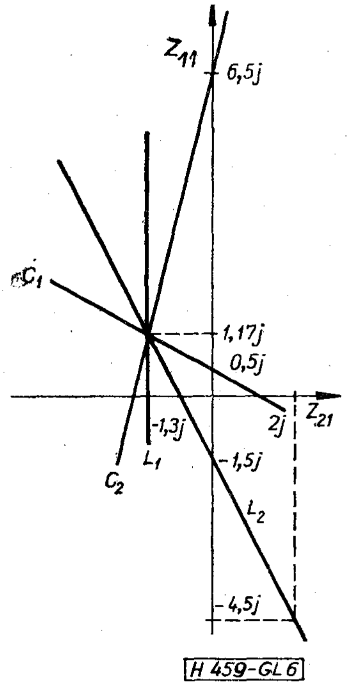
Tekintsük az 5. ábrán felrajzolt reaktáns áramkört. Válasszuk az egyik függvénynek a Z_{11} üresjárási bemenő impedanciát:



4. ábra. Két hálózatfüggvény közötti lineáris kapcsolat illusztrálása



5. ábra. 2. mintaáramkör



6. ábra. Az 5. ábra áramköréhez tartozó egyenesek

$$Z_{11} = \frac{1 + p^2(L_1C_1 + L_1C_2 + L_2C_2) + p^4 L_1 L_2 C_1 C_2}{p(C_1 + C_2) + p^3 C_1 C_2 L_2}.$$

Legyen a másik függvény a transzfer impedancia:

$$Z_{21} = \frac{1}{p(C_1 + C_2) + p^3 C_1 C_2 L_2}.$$

Az elemek névleges értékét behelyettesítve az egyeneseket a 6. ábrán ábrázoltuk. A vizsgálati frekvencia értéke $\mathrm{p} = j\ 1/\sqrt{2}$.

Egy hibás áramkör mért értékei:

$$Z_{11}=-j\;4{,}5 \quad \text{és} \quad Z_{21}=j\;2,$$

Mivel a kapott pont $(2j;\;-4{,}5j)$ az L_2 induktivitáshoz tartozó egyenesre esik, ezért az L_2 induktivitás a hibás elem.

1.3. Diagnosztikai érzékenységek segítségével

Az F_j hálózatfüggvény x_i elemre vonatkoztatott differenciális érzékenységét a (2) kifejezés differenciálásával kapjuk:

$$S_i^j=\frac{\partial F_j(x_i)}{\partial x_i}=\frac{A(Cx_i+D)-(Ax_i+B)C}{(Cx_i+D)^2}=\frac{AD-BC}{(Cx_i+D)^2}. \tag{4}$$

Definiáljuk a nagyváltozású érzékenységet az alábbi módon [9]:

$$S_{i\Delta}^j=\frac{\Delta F_j}{\Delta x_i}, \tag{5}$$

ahol $S_{i\Delta}^j$ az F_j hálózatfüggvény nagyváltozású érzékenysége az x_i elem véges megváltozása esetén, Δx_i az x_i elem véges megváltozása, ΔF_j az F_j hálózatfüggvény megváltozása Δx_i hatására: $\Delta F_j=F_j(x_i+\Delta x_i)-F_j(x_i)$.
Helyettesítsük be a (2) egyenletbe x_i, valamint $x_i+\Delta x_i$ értékeket és fejezzük ki $S_{i\Delta}^j$-t:

$$S_{i\Delta}^j=\frac{AD-BC}{(Cx_i+C\Delta x_i+D)(Cx_i+D)}. \tag{6}$$

Ha Δx_i nullához tart, visszakapjuk a differenciális érzékenységet. A két érzékenység között az összefüggés [3]:

$$\frac{S_i^j}{S_{i\Delta}^j}=1+\Delta x_i\frac{C}{Cx_i+D}. \tag{7}$$

Osszuk el a (7) egyenlet mindkét oldalát Δx_i-vel:

$$\frac{S_i^j}{\Delta F_j}=\frac{1}{\Delta x_i}+\frac{C}{Cx_i+B}. \tag{8}$$

A (8) egyenlet bal oldalán számítható (S_i^j) és mérhető (ΔF_j) mennyiség áll, a jobb oldal értéke pedig Δx_i mellett csak a hálózatfüggvény nevezőjétől és annak x_i szerinti deriváltjától függ. Egy hálózatjellemző mátrix elemeinek nevezője azonos, tehát a (8) egyenlet jobb oldalának második tagja konstans a különböző F_j függvények esetén, más szóval független F_j-től:

$$\frac{S_i^j}{\Delta F_j}=\frac{1}{\Delta x_i}+k. \tag{9}$$

Ha a differenciális és a nagyváltozású érzékenységet nem azonos elemekre vonatkoztatjuk, akkor a (4) és (6) egyenletekben szereplő A, B, C, D állandók egymástól különbözni fognak, ezért a (7) kifejezést sem kaphatjuk meg ilyen egyszerű formában, az egyszerűsítéseket nem lehet elvégezni.

A két érzékenység hányadosa csak akkor konstans, ha ugyanazon elemre vonatkozik. Egyébként a különböző függvények esetén más és más lesz. Ezt a tulajdonságot használjuk ki a diagnosztika céljára [8].

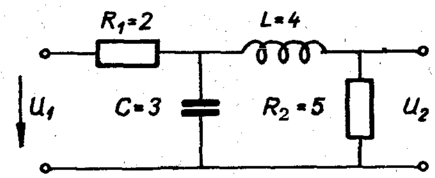
Vegyük fel a J érzékenységmátrixot, legyen M sora és N oszlopa. A sorok a hálózatfüggvényeknek, az oszlopok az áramköri paramétereknek felelnek meg. A mátrix elemei a sor által meghatározott hálózatfüggvénynek az oszlop által meghatározott paraméter szerinti differenciális érzékenysége.

Mérjük le a hibás áramkör M számú hálózatfüggvényét és a kapott értékekkel osszuk el a J mátrix megfelelő sorait. A hibás elemnek megfelelő oszlopban a hányadosok értéke azonos lesz. Ha a hibás elem értékét is ki akarjuk számolni, akkor az a (9) egyenletből kifejezhető:

$$\Delta x_i=\frac{1}{\dfrac{S_i^j}{\Delta F_j}-k}. \tag{10}$$

Példa

Tekintsük a 7. ábrán felrajzolt kapcsolást. Az áramkör jellemzésére az inverz hibrid (D) mátrixot vá-



H 459-GL 7

7. ábra. 3. mintaáramkör

lasztottuk:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ U_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} D_{11} & -D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} U_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

A D_{11} paraméter üresjárási bemeneti admittencia:

$$D_{11}=\frac{1+pCR_2+p^2LC}{R_1+R_2+p(L+CR_1R_2)+p^2LCR_1}.$$

A D_{21} paraméter feszültség transzfer függvény:

$$D_{21}=\frac{R_2}{R_1+R_2+p(L+CR_1R_2)+p^2LCR_1}.$$

Mivel a hálózat reciprok $D_{12}=D_{21}$.

$$D_{22}=\frac{R_1R_2+pLR_2+p^2LCR_1R_2}{R_1+R_2+p(L+CR_1R_2)+p^2LCR_1}$$

A D_{22} paraméter rövidzárási kimeneti impedancia. Az inverz hibrid mátrix választásával elértük, hogy mindegyik áramköri elem szerepel a mátrix mindegyik elemében.

Az érzékenységmátrix első sorához a D_{11} paraméter értékei, a másodikhoz a D_{21}, a harmadikhoz a D_{22} paraméter értékei tartoznak. Az első oszlop az R_1 ellenállás, a második oszlop az R_2 ellenállás, a harmadik az L induktivitás, a negyedik pedig a C kapacitás szerinti érzékenységeket tartalmazza. Az érzékenységmátrix a 0,5 vizsgálati frekvencián a következő értékeket veszi fel:

$$\begin{bmatrix} -0{,}166-0{,}12j & 0{,}0034+0{,}0004j & -0{,}0002+0{,}0017j & 0{,}038-0{,}32j \\ -0{,}048+0{,}12j & 0{,}0144-0{,}0052j & -0{,}0266+0{,}0056j & 0{,}043+0{,}08j \\ 0{,}085-0{,}01j & -0{,}047+0{,}049j & 0{,}217+0{,}372j & -0{,}019+0{,}17j \end{bmatrix}$$

Egy hibás áramkör mért értékei:

$D_{11}=0{,}435+0{,}138j$ $D_{21}=0{,}102-2{,}286j$

$D_{22}=0{,}194-0{,}092j$

A hálózatfüggvények megváltozásait kiszámolva és az első sort ΔD_{11}-gyel, a másodikat ΔD_{21}-gyel, a harmadikat ΔD_{22}-vel elosztva az alábbi mátrixot kapjuk:

$$\begin{bmatrix} -28-12{,}7j & 0{,}5-0{,}046j & 0{,}025+0{,}25j & 4{,}56-5{,}83j \\ -2{,}6+3{,}5j & 0{,}5-0{,}046j & -0{,}9-0{,}04j & -2+2{,}56j \\ 0{,}43+0{,}47j & 0{,}5-0{,}046j & 0{,}59+3{,}16j & 0{,}94+0{,}86j \end{bmatrix}$$

A kapott mátrix második oszlopának elemei azonosak. Mivel tudjuk, hogy ehhez az oszlophoz az R_2 ellenállás tartozik, a hibás elem az R_2 ellenállás.

2. Hibaszimuláció

A hibaszimulációs módszereknél az áramköri elem értékét a névlegestől eltérően, „hibásnak" vesszük fel, s így analizáljuk az áramkört. Megvizsgáljuk, hogy a hálózatfüggvény értéke hogyan tér el a névlegestől, ezt az eltérést valamilyen módon kódoljuk és tároljuk. Az összes lehetséges vagy szimulálni kívánt hibára az analízist, kódolást és tárolást elvégezve egy táblázatot kapunk, amelyben az áramköri elemek hibája és a hálózatfüggvény eltérése, hibája van kölcsönösen egymáshoz rendelve. Az alkalmazáskor a mért értékeket összehasonlítjuk a tárolt értékekkel, s az egymáshoz rendelés alapján megkapjuk, hogy melyik áramköri elem a hibás.

A hibaszimuláció elve nem új és a műszaki élet bármely területén alkalmazható. Különösen ott van jelentősége, ahol egyéb módszerek nem, vagy csak igen nehezen alkalmazhatók. Az előzetes számításokra fordítódik a munka igen nagy része, a felhasználáshoz alig van szükség számításra.

2.1. Hibaszótár

A hibaszótár ismert hibák esetén fellépő mérési eredmények rendszerezett összeállítása.

A módszer bemutatásához válasszuk hálózatfüggvénynek a feszültség transzfer függvényt: $F=U_2/U_1$, amelynek csak abszolút értékére van előírás [10].

Koncentrált paraméterű, lineáris, idővariáns áramkör hálózatfüggvénye racionális törtfüggvény, amelyet egy konstanssal és gyökeivel, a pólusokkal és zérusokkal jellemezhetünk. Ha egy áramköri elem megváltozik, akkor ennek hatása jelentkezik a Bode-diagramban is: megváltozhat a konstans nagysága, a gyökök helye. Ha a gyök egy kör mentén mozdul el, akkor a törésponti frekvencia nem változik a Bode-diagramban, de a törésponti frekvencián és környezetében a függvény értéke megváltozik.

Általában az egyes elemek a Bode-diagramot különféleképpen változtatják meg. Ezt használjuk ki a hibás elem lokalizálására.

A Bode-diagramot nem teljes egészében vizsgáljuk, hanem a vizsgálati frekvenciákat választunk a függvény jellemzésére. Legyenek a frekvenciák a töréspontok, a töréspontok között egy-egy, a legalsó alatt egy és a legfelső fölött egy [10, 12].

Állítsuk össze a hibaszótárt.

Először a hálózatfüggvény névleges értékét számítsuk ki a vizsgálati frekvenciákon. Ezután egyetlen elem értékét változtassuk meg, míg az összes többi értékét a névlegesen tartjuk. Számítsuk ki a hálózatfüggvény értékeit, s tároljuk. Végezzük el ezt az összes lehetséges hibás esetre valamennyi elemnél.

Míg digitális áramköröknél az állapotok száma véges, addig analóg áramköröknél végtelen. Ezért szükséges, hogy a szimulált állapotok számát észszerű módon csökkentsük.

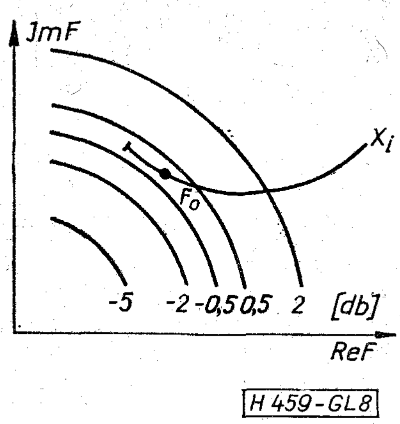
Osszuk fel a hálózatfüggvény értékeit pl. az alábbi módon. Legyen a hálózatfüggvény megengedett toleranciája $\pm 0{,}5$ dB. Ha a hálózatfüggvény értéke ebbe az intervallumba esik, akkor az áramkör hibátlan, független attól, hogy esetleg valamelyik elem értéke a megengedett toleranciáját túllépi. Az elem ilyen hibája tehát nem jelentkezik az áramkör hibájaként. A többi intervallum legyen a következő: az eltérés nagyobb, mint -10 dB, az eltérés -10 dB és -5 dB közé esik, az eltérés -5 dB és -2 dB közé esik, az eltérés -2 dB és $-0{,}5$ dB közé esik. Valamint ugyanezek az intervallumok pozitív értékekre is. Az intervallumokhoz rendeljünk hozzá nullától kezdve növekvő egész számokat, mint kódszámokat. A mért értékeket eszerint kódoljuk, azaz nem a pontos értéket tároljuk, hanem azt, hogy melyik intervallumba esik. A kódszó annyi kódszámból áll, ahány vizsgálati frekvencia van.

Egy kódszó azt mutatja meg, hogy a vizsgálati frekvenciákon a hálózatfüggvény értéke melyik intervallumba esik.

Határozzuk meg, hogy egy-egy kódszóhoz az áramköri elemek milyen értéktartománya tartozik.

Az 1. pontban láttuk, hogy ha egy áramköri elem értéke megváltozik, akkor az F hálózatfüggvény értéke egy kör mentén („elemkör") mozdul el a komplex F síkon. A hálózatfüggvény eltéréseinek fenti felosztása ugyanezen a síkon origóközéppontú körökkel („toleranciakör") ábrázolható (8. ábra).

Az F_0 pont a hálózatfüggvény névleges értékét jelenti. A „toleranciakörök" és az „elemkörök" metszéspontjából kiszámolható az elem értéke. Így meg-



8. ábra. „Toleranciakörök” és egy „elemkör”

kapjuk, hogy egy-egy frekvencián a hálózatfüggvény egyes tolerancia-intervallumaihoz az áramköri elemek milyen értéktartományai tartoznak. Az intervallumok közös területei megadják, hogy az áramköri elem milyen értéktartománya jellemezhető egyetlen kódszóval. A kódszavak a hozzájuk tartozó értéktartományokkal alkotják a hibaszótárt.

A szótár alkalmazásakor lemérjük egy tényleges áramkör hálózatfüggvényét a vizsgálati frekvenciákon. Ha az áramkör hibás, akkor az eltéréseket a fenti módon kódoljuk és a szótárból kikeressük a megfelelő esetet.

Példa

Vizsgáljuk újra a 7. ábrán felrajzolt kapcsolást. Az áramkör jellemzésére a feszültség transzfer függvényt választottuk. Vizsgálati frekvenciáknak 0,2 valamint 0,3 és 0,5 értékeket választottunk. Az előbbiekben részletezett intervallumokhoz az 1. táblázat szerint rendeltünk kódszámokat.

A 8. ábrán felvázolt elvnek megfelelően a „tolerancia-körök” és az „elem-körök” metszéspontjaihoz tartozó elemértékeket a 2. táblázatban foglaltuk össze. Ezen elemértékek mellett a hálózatfüggvény értéke az intervallumok határára esik. A kódszavak előállítására a C kapacitás értékeivel mutatunk példát. Ha a kapacitás értéke 4,61 és 6 relatív értékek között van, akkor a hálózatfüggvény értéke −2 és −5 dB közé esik mindhárom vizsgálati frekvencián. Az 1. táblázat szerint a kódszó 222 lesz. Ha a kapacitás értéke 6 és 6,23 relatív értékek között van, akkor a 0,2 és 0,3 relatív frekvencián a hálózatfüggvény értéke változatlanul −2 és −5 dB közé esik, de a 0,5 relatív frekvencián már a hálózatfüggvény értéke −5 és −10 dB közé esik, ezért a kódszó 223 lesz. A teljes hibaszótárt a 3. táblázat mutatja. A 30 hibás esetből 17 olyan, hogy a hiba egyértelműen azonosítható. A többi esetben már nem egyetlen elem tartozik a kódszóhoz. Hatásosabb hibaszótárt más frekvencia, más függvény vagy több frekvencia és több függvény alkalmazásával érhetünk el.

1. táblázat

A hibaszótár felvételénél alkalmazott intervallumok és kódszámok

A hálózatfüggvény eltérése dB-ben	−10	−5	−2	−0,5	0,5	2	5	10	
Kódszámok	4	3	2	1	0	5	6	7	8

2.2. *Szavazásos módszer*

A klasszikus hibaszótár nagy hátránya, hogy csak a hiba és valamelyik kódszó azonosítására van lehetőség, s ha ez nem sikerül, akkor semmilyen további információt nem nyerünk a tényleges hibára vonatkozóan. Ezt a hátrányt kiküszöböli ki az ún. szavazásos módszer, amelynél a hibás elem kiválasztásához csak a hálózatfüggvény eltérésének előjelét használjuk fel.

Az előzetes számítások során felépítjük az alább részletezett felismerési mátrixot, amely a hibaszimu-

2. táblázat

A 7. ábra áramkörénél az intervallumok határán a hálózatfüggvény értéke (Pozitív elemértékeknél az üres mezőkbe nem eshet)

x_i	frekvencia	−10	−5	−2	−0,5	0,5	2	5	10 [dB]
R_1	0,2	8,76	4,53	2,88	2,18	1,84	1,31	0,047	
	0,3	7,6	4,07	2,7	2,18	1,84	1,31	0,62	
	0,5	6,81	3,76	2,59	2,18	1,84	1,51	0,94	
R_2	0,2	0,31	0,77	1,77	3,52	8,28			
	0,3	0,22	0,56	1,33	3,05	13,5			
	0,5	0,45	0,94	1,8	3,32	16,25			
L	0,2	92	47,7	27,1	15,14				
	0,3	57,6	29,7	16,9	9,34				
	0,5	33,6	17,3	9,9	5,8				
C	0,2	13,9	7,34	4,61	3,4	2,58	0,95		
	0,3	11,5	6,23	4,14	3,27	2,75	1,93		
	0,5	10	6	3,88	3,27	2,75	2,26	1,3	

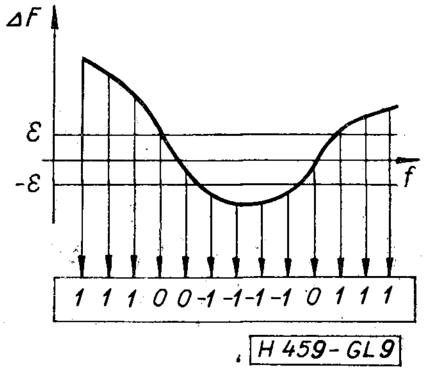
3. táblázat

A hibaszótár

0 0 0	R_1: 1,84—2,2; R_2: 3,52—8,28; L: 0—5,8; C: 2,75—3,27
0 0 1	L: 5,8—9,34
0 1 1	L: 9,34—9,9; C: 3,27—3,4
0 1 2	L: 9,9—15,14
1 0 0	R_2: 3,32—3,52
1 0 1	R_2: 3,05—3,32
1 1 1	R_1: 2,2—2,59; R_2: 1,8—3,05; C: 3,4—3,88
1 1 2	R_1: 2,59—2,7; C: 3,88—4,14; R_2: 1,77—1,8; L: 15,14—16,9
1 2 2	R_1: 2,7—2,88; C: 4,14—4,61; L: 16,9—17,3
1 2 3	L: 17,3—27,1
2 1 2	R_2: 1,33—1,77
2 2 2	R_1: 2,88—3,76; R_2: 0,94—1,33; C: 4,61—6
2 2 3	R_1: 3,76—4,07; R_2: 0,77—0,94; L: 27,1—29,7; C: 6—6,23
2 3 3	R_1: 4,07—4,53; L: 29,7—33,6; C: 6,23—7,34
2 3 4	L: 33,6—47,7
3 2 3	R_2: 0,56—0,77
3 3 3	R_1: 4,53—6,81; R_2: 0,45—0,56; C: 7,34—10
3 3 4	R_1: 6,81—7,6; R_2: 0,31—0,45; L: 47,7—57,6; C: 10—11,5
3 4 4	R_1: 7,6—8,76; L: 57,6—92; C: 11,5—13,9
4 3 4	R_2: 0,22—0,31
4 4 4	R_1: 8,76—∞; R_2: 0—0,22; L: 92—∞; C: 13,9—∞
0 5 5	C: 2,58—2,75
5 0 0	R_2: 8,28—13,5
5 5 0	R_2: 13,5—16,25
5 5 5	R_1: 1,51—1,84; R_2: 16,25—∞; C: 2,26—2,58
5 5 6	R_1: 1,31—1,51; C: 1,93—2,26
5 6 6	C: 1,3—1,93
5 6 7	C: 0,95—1,3
6 6 6	R_1: 0,94—1,31
6 6 7	R_1: 0,62—0,94; C: 0—0,95
6 7 7	R_1: 0,047—0,62
7 7 7	R_6: 0—0,47

lációból nyert eredmények kódolt formáját tartalmazza.

Növeljük meg az i-edik elem értékét annyira, hogy a hálózatfüggvény értékét észrevehetően megváltoztassa. Tételezzük fel, hogy a névlegesnél kisebb értékhez ellenkező előjelű eltérés tartozik. A 9. ábra a frekvencia függvényében a hálózatfüggvény megváltozását mutatja. A felismerési mátrix i-edik oszlopához rendeljük hozzá az i-edik elem által okozott megváltozásokat, a soraihoz pedig a vizsgálati frekvenciákat. Az i-edik oszlop valamely eleme akkor 0, ha a hálózatfüggvény eltérése a megengedett $\pm\varepsilon$ között van. Ha az eltérés ε-nál nagyobb és pozitív, a mátrix eleme 1, ha negatív, akkor -1. Körülbelül háromszor annyi frekvenciapontot kell választani, mint ahány elem van [13].



9. ábra. A felismerési mátrix egy oszlopának felvétele

Alkalmazáskor lemérjük a hibás áramkör hálózatfüggvényét a vizsgálati frekvenciákon. Az előzőekkel összhangban a kapott mérési eredményekhez is hozzárendelünk 0, 1 vagy -1 értéket. Minden elemhez két változó tartozik: H_i és J_i. A H_i változóban gyűjtjük azokat a szavazatokat, amelyekkel arra szavazunk, hogy a szóban forgó vizsgálati frekvencián az i-edik elem hibás. A J_i változó értékét növeljük akkor, ha az i-edik áramköri elemet jónak minősítjük a szavazáskor. Ha a felismerési mátrix elemének és a mért érték kódjának előjele megegyezik, akkor ez arra mutat, hogy ezen a frekvencián az i-edik elem létrehozhatta a hibát. Ezért arra szavazunk, hogy ez az elem hibás, H_i értékét növeljük eggyel. Ha az előjelek nem egyeznek, akkor H_i értékét csökkentjük eggyel. Ha a mátrix eleme nulla, akkor nem szavazunk. Ha a mátrix eleme nem nulla, de a mért érték kódja nulla, akkor arra szavazunk, hogy az i-edik elem jó, J_i értékét növeljük eggyel (4. táblázat).

4. táblázat

Szavazási séma

A mért adat kódja / A mátrix eleme	-1	0	1
-1	H_i+1	J_i+1	H_i-1
0	—	—	—
1	H_i-1	J_i+1	H_i+1

Az összes elemre a választott vizsgálati frekvenciákon elvégezve a fentieket, minden elemhez kiszámítjuk V_i-t:

$$V_i = |H_i| - J_i \qquad \text{(ii)}$$

Az az elem a hibás, amelyre V_i a legnagyobb. H_i előjele a megváltozás irányába mutat. Természetesen azzal a feltételezéssel, hogy az áramköri elem növekedéséhez és csökkenéséhez a hálózatfüggvény ellentétes előjelű megváltozásai tartoznak. Ha ez nem igaz, akkor külön hibának kell tekinteni az áramköri elem növekedését és csökkenését. Ha az így kiválasztott elem mégse lenne hibás, akkor vesszük a következő legnagyobb V_i-t, és az ehhez tartozó elemet nézzük meg.

Példa

A módszer bemutatására tekintsük újra a 7. ábrán felrajzolt kapcsolást. Hálózatjellemzőnek megint a feszültség transzfer függvényét választottuk. A vizsgálati frekvenciák: 0,01 0,02 0,05 0,1 0,2 0,3 0,35 0,4 0,45 0,5 0,7 1 2 4 8. Az egyszerűség kedvéért

5. táblázat

Felismerési mátrix a 7. ábra áramköréhez és egy hibás áramkör mért adatai

Frekvencia	R_1	R_2	L	C	Mért adat
0,01	−1	1	0	0	1
0,02	−1	1	0	0	1
0,05	−1	1	0	−1	1
0,1	−1	1	0	−1	1
0,2	−1	1	0	−1	0
0,3	−1	0	−1	−1	0
0,35	−1	0	−1	−1	0
0,4	−1	0	−1	−1	0
0,45	−1	0	−1	−1	0
0,5	−1	1	−1	−1	0
0,7	−1	1	−1	−1	1
1	−1	1	−1	−1	1
2	−1	1	−1	−1	1
4	−1	1	−1	−1	1
8	−1	1	−1	−1	1

6. táblázat

A szavazás menete

Frekvencia	H_{R1}	J_{R1}	H_{R2}	J_{R2}	H_L	J_L	H_C	J_C
0,01	−1	0	1	0	—	—	—	—
0,02	−2	0	2	0	—	—	—	—
0,05	−3	0	3	0	—	—	−1	0
0,1	−4	0	4	0	—	—	−2	0
0,2	−4	1	4	1	—	—	−2	1
0,3	−4	2	—	—	0	1	−2	2
0,35	−4	3	—	—	0	2	−2	3
0,4	−4	4	—	—	0	3	−2	4
0,45	−4	5	—	—	0	4	−2	5
0,5	−4	6	4	2	0	5	−2	6
0,7	−5	6	5	2	−1	5	−3	6
1	−6	6	6	2	−2	5	−4	6
2	−7	6	7	2	−3	5	−5	6
4	−8	6	8	2	−4	5	−6	6
8	−9	6	9	2	−5	5	−7	6

csak a pozitív irányú megváltozást vizsgáljuk. A felismerési mátrix összeállításához az R_t ellenállás értékét 5-re, az R_2-ét 15-re, az L induktivitását 10-re, a C kapacitását pedig 6-ra változtattuk külön-külön, s közben a többi elem értéke mindig a névleges volt. A felismerési mátrixot az 5. táblázat mutatja. **Példánkban** ε: 0,5 dB.

Egy hibás áramkör mért eredményeinek kódolt formáját szintén az 5. táblázat tartalmazza. A 6. táblázat mutatja az egyes elemekhez hozzárendelt H_i és J_i változók értékeit a vizsgálati frekvenciákon a szavazás után. Végül az alábbi értékeket kapjuk a különböző V_i-kre a (11) kifejezés felhasználásával:

$$V_{R1}=|-9|-6=3$$
$$V_{R2}=|\ 9|-2=7$$
$$V_L=|-5|-5=0$$
$$V_C=|-7|-6=1$$

A legnagyobb értéke V_{R2}-nek van, tehát a hibás elem az R_2 ellenállás.

3. Problémák

Az ismertetett algoritmusok egyik kiinduló feltételezése, hogy csak egyetlen áramköri elem értéke változik meg és az összes többi elem értéke pontosan a névleges. Ekkor az összefüggések valóban teljesen igazak. A valóságban azonban a többi elem értéke is megváltozhat, a névleges értéktől a megengedett tolerancián belül eltérhet. Ez azt eredményezi, hogy pl. az 1.1. és 1.2. pontban leírt görbék elmosódnak, sávokká szélesülnek. Az 1.3. pontban ismertetett módszernél az érzékenységek hányadosa nem lesz azonos. Az eddig megkülönböztethető elemek egy része tehát megkülönböztethetetlenné válik.

Ezért nem azt vizsgáljuk, hogy a mért pont ráesik-e valamelyik görbére, vagy hogy az érzékenységhányadosok azonosak-e, hanem az eltérések négyzetét összegezzük, s azt az elemet tekintjük hibásnak, amelynél ez az összeg minimális. A jobb megoldás érdekében célszerű több frekvenciát és több hálózatfüggvényt választani. Így ezeknél a módszereknél is egy sorrendet lehet összeállítani.

Egy másik probléma, hogy lesznek eleve megkülönböztethetetlen elemek is. Ezeket az elemcsoportokat a módszerek egyetlen elemként kezelik, s hiba esetén a csoportra mutatnak rá, amelyből a hibás elem egyéb módszerekkel választható ki (pl. kiforrasztás és külön mérés).

4. Összefoglalás

Ebben a cikkben olyan diagnosztikai módszereket ismertettünk, amelyekkel analóg, lineáris, koncentrált paraméterű, idővariáns áramkörök egyszeres hibái lokalizálhatók. Az első részben azokat a módszereket tekintettük át, amelyek a Bode-féle bilineáris összefüggésen alapulnak. Az egyik módszer a bilineáris transzformáció körtarfó voltát használja ki, a másik azt, hogy egy hálózatjellemző mátrix két eleme között a kapcsolat lineáris. Ezek a módszerek lineáris hálózatokban előnyösen alkalmazhatók. Az elvileg szükséges egyetlen vizsgálati frekvencia helyett többet (ellenálláshálózatok esetén több függvényt) választva a hiba megbízhatóan lokalizálható. A harmadik módszer a differenciális és a nagyváltozású érzékenység közötti kapcsolaton alapul, s többkapuknál alkalmazható előnyösen, ahol több függvény is mérhető.

A második részben a hibaszimuláció két lehetséges alkalmazását mutattuk be, a hibaszótár klasszikus esetét, valamint a szavazásos módszert, amely a hibaszótár speciális esete. A hibaszótár felvételére olyan új módszert ismertettünk, amely kihasználja a bilineáris összefüggést, s lehetővé teszi, hogy az áramköri paraméter értékét nullától végtelenig változtathassuk.

Végezetül közsönetemet fejezem ki Dr. *Géher Károly*-nak, a műszaki tudományok doktorának értékes tanácsaiért.

IRODALOM

[1] *H. W. Bode:* Network Analysis and Feedback Amplifier Design. Princeton, N. J. Van Nostrand, 1945.

[2] *Bohus Miklós,* Dr. *Géher Károly:* Logikai hálózatok számítógépes vizsgálata. Híradástechnika XXIII. évf. 7. szám, 199—203 oldal, 1972 július.

[3] *J. K. Fidler, C. Nightingale:* Differential-incremental relationships. Electronics Letters vol. 8. pp. 626—627. 1972.

[4] *Gefferth László:* A nagyváltozású érzékenység és alkalmazása. Híradástechnika XXVI. évf. 6. szám, 169—176 oldal, 1975 június.

[5] *L. Gefferth:* Fault Identification in Resistive and Reactive Networks. Int. J. of Circuit Theory and Applications vol. 2. No. 3. Sept. 1974. pp. 273—277.

[6] *P. L. Lin:* A Survey of Applications of Symbolic Network Functions. IEEE Tr. on Circuit Theory vol. CT—20. No. 6. Nov. 1973. pp. 732—737.

[7] *G. O. Martens, J. D. Dyck:* Fault Identification in Electronic Circuits with the Aid of Bilinear Transformation. IEEE Tr. on Reliability vol. R—21. No. 2. May 1972. pp. 99—104.

[8] *E. C. Neu:* A New n-port Network Theorem. The Proc. of the 1970 Midwest Symposium on Circuit Theory, May 1970. pp. IV. 5. 1.—IV. 5. 10.

[9] *S. R. Parker, E. Peskin, P. M. Chirlian:* Application of a Bilinear Theorem to Network Sensitivity. IEEE Tr. on Circuit Theory vol. CT—12. No. 3. Sept. 1965. pp. 448—450.

[10] *S. Seshu, R. Waxman:* Fault Isolation in Conventional Linear System — A feasibility study. IEEE Tr. on Reliability vol. R—15. No. 1. May 1966. pp. 11—16.

[11] *J. Shekel:* Some Properties of Networks with One Variable Element. IEEE Tr. on Circuit Theory vol. CT—14. No. 1. March 1967. pp. 89—92.

[12] *W. J. Stahl, J. Maenpa, C. J. Stehman:* Fault Isolation in Conventional Linear System — A progress Report. IEEE Tr. on Rel. vol. R—18. No. 1. Febr. 1969. pp. 12—14.

[13] *H. Sriyananda, D. R. Towill:* Fault Diagnosis Using Time Domain Measurements. The Radio and El. Eng. vol. 43. No. 9. Sept. 1973. pp. 523—533.