

Cirkulátorok alkalmazási kérdései

DR. MARKÓ SZILÁRD
Távközlési Kutató Intézet



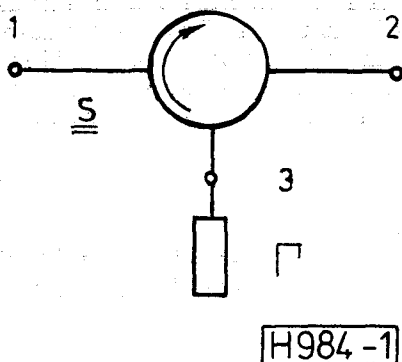
ÖSSZEFOGLALÁS

A cirkulátorok a leggyakrabban és legsokoldalúbban használt passzív nonreciprok eszközök. Az alkalmazók azonban gyakran nincsenek teljes egészében birtokában a cirkulátorok tulajdonságainak hatékony felhasználásához szükséges ismereteknek. Ezért a cikk röviden áttekinti a cirkulátorok megvalósítási, kiviteli formáit, majd részletebben tárgyalja hálózatelméleti tulajdonságaikat, paramétereik közötti kapcsolatokat, lezárási, összekapcsolási kérdéseket. Végül ezek jelentőségét egy áramkörti példa: a cirkulátoros fázis-toló (fázis-modulátor) elemzésével illusztrálja.

I. Bevezetés

A cirkulátorok ma már széles körűen ismert és alkalmazott passzív nonreciprok eszközök. A felhasználók azonban nem mindig vannak teljes egészében birtokában azoknak az ismereteknek, amelyek a cirkulátorok tulajdonságainak leghatékonyabb kihasználását teszik lehetővé. Ezért nem tűnik haszontalannak ezeknek a felhasználás szempontjából legfontosabb tulajdonságoknak a rövid áttekintése, amelyre a cikk vállalkozott.

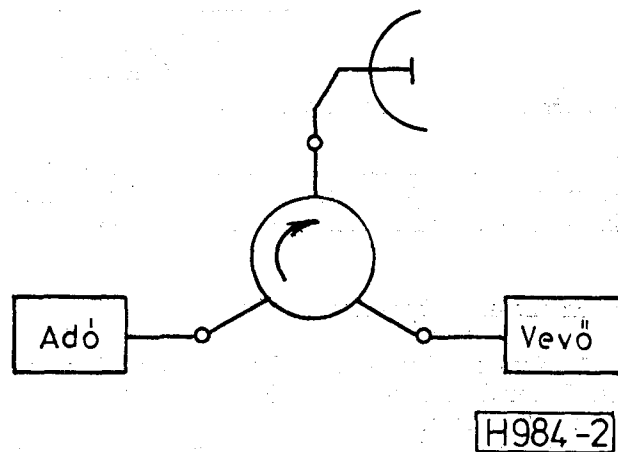
A cirkulátorok sokoldalú felhasználási lehetőségeit illusztrálják az 1., 2., 3. és 4. ábrán bemutatott kapcsolások.



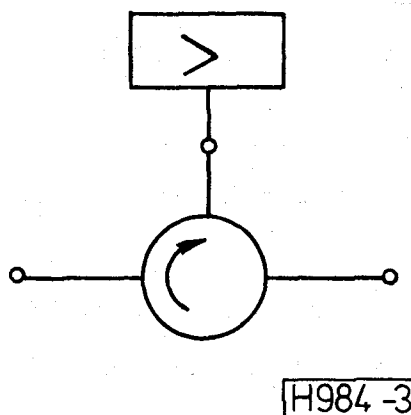
1. ábra. Izolátor kialakítása cirkulátorral

Az 1. ábrán a 3. kapuján illesztett lezárt cirkulátor izolátorként működik, a 2. kapun belépő reflektált teljesítményt a 3. kapuban levő lezáró nyeli el.

A 2. ábrán a cirkulátor az adó-vevő váltó szerepét betöltve biztosítja az egy antennán történő adás és vétel lehetőségét.



2. ábra. Cirkulátoros adó-vevő váltó

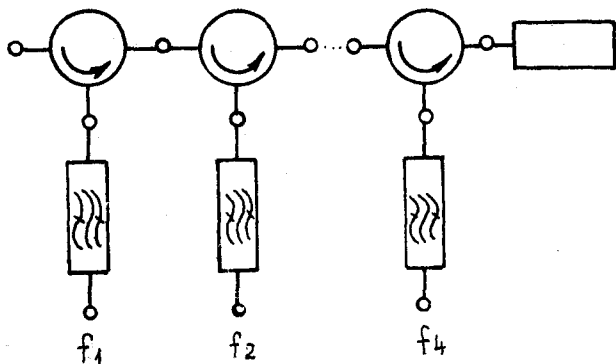


3. ábra. Reflexiós erősítő ki- és bemenetének szétválasztása

DR. MARKÓ SZILÁRD

A BME Villamosmérnöki Karán szerzett villamosmérnöki oklevelet 1957-ben. 1978-ban nyerte el a műszaki tudományok kandidátusa fokozatot. 1980-ban Állami Díjjal tüntették ki. 1957 óta a Távközlési Kutató Intézetben dolgozik, jelenleg

tudományos főmérnöki beosztásban. Fő szakmai tevékenységét a giromágneses nonreciprok eszközök kutatás-fejlesztése területén fejtette ki. Tagja a HTE-nek, az Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak, valamint a Nemzetközi Mikrohullámú Ferrit Konferencia Nemzetközi Rendezőbizottságának.



H984-4

4. ábra. Cirkulátoros szűrőváltó

A 3. ábrán az egykapus reflexiók (parametrikus, alagútdiódás stb.) erősítő ki- és bemenő jeleit választja szét a cirkulátor.

A 4. ábrán pedig egy cirkulátoros szűrőváltó elrendezés látható, amely a frekvencia multiplex rendszerek csatornáinak a szétválasztására szolgál.

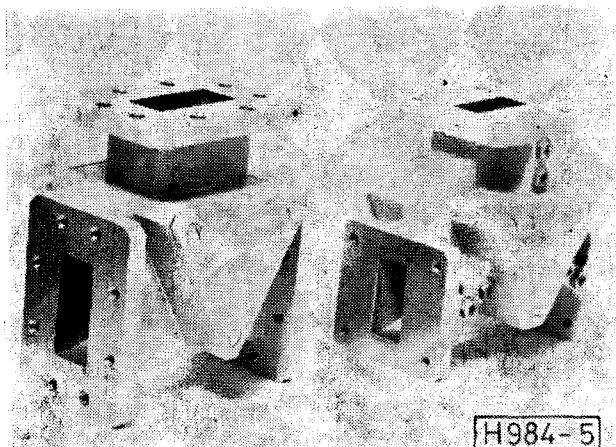
2. A cirkulátorok megvalósítása, kiviteli formái

Az ideális cirkulátor egy olyan három- vagy többkapus veszteségmentes, passzív, lineáris, nonreciprok elem, amelynek valamelyik kapuján belépő elektromágneses teljesítmény (jel) csak egy adott sorrend szerint rákövetkező kapuban jelenik meg, ill. halad ki csillapításmentesen.

(A többi kapuban a jel nem jelenik meg — a jelcsillapítás végtelen — és a kapuk saját reflexiók tényezője zérus.)

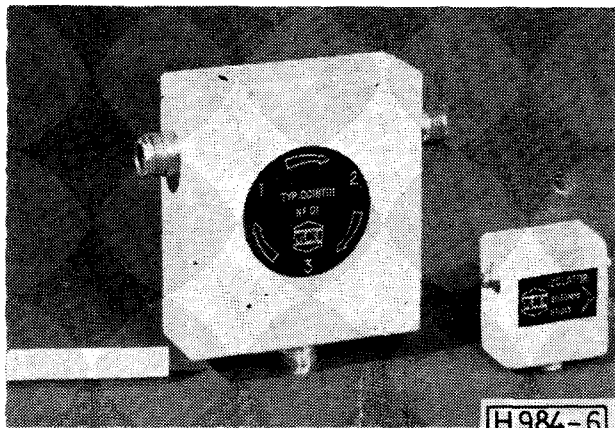
A definíció alapján az ideális cirkulátor szórás-mátrixa: (1 → 2, 2 → 3 stb. cirkulációs iránnyal):

$$S_{\text{id. cirkl.}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \dots & 1 \\ 1 & 0 & 0 \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$



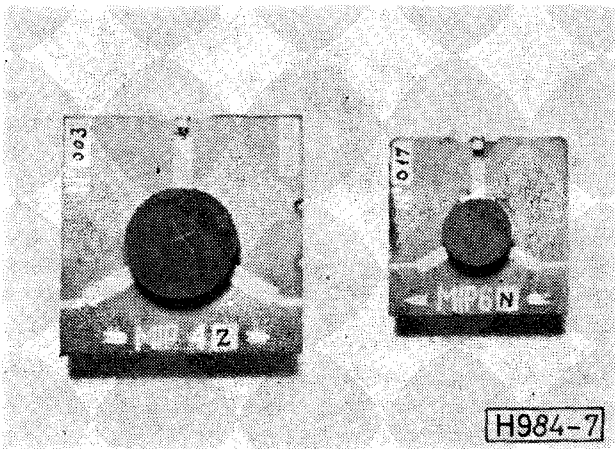
H984-5

5. ábra. Csőtápvonalas cirkulátorok



H984-6

6. ábra. Szalagtápvonalas cirkulátorok



H984-7

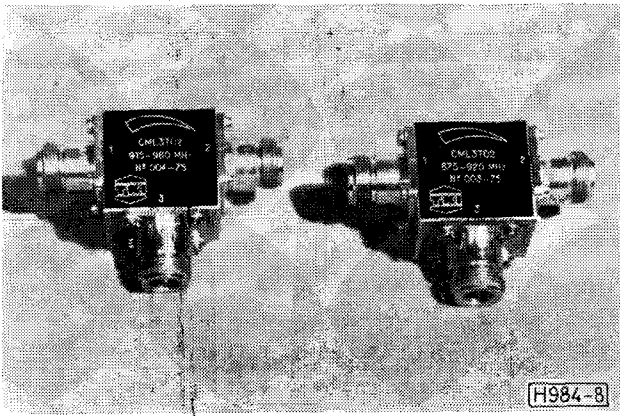
7. ábra. Mikroszalag-tápvonalas cirkulátorok

A megvalósítható, valóságos cirkulátorok esetében az ideális cirkulátor eltűnő elemei sem nullák, de sokkal kisebbek egynél, az 1-es elemek pedig kisebbek, de közel egyenlők eggyel.

(A reflexió- és zárócsillapítások nagyobbak 20...30 dB-nél, az áteresztő-csillapítások kisebbek 0,1...0,5 dB-nél.)

Kimutatható [1], hogy passzív nonreciprok eszköz létrehozásához aszimmetrikus tenzorú közegjellemzővel (permittivitás, permeabilitás vagy vezetés) rendelkező anyag szükséges. Ahhoz, hogy az eszköz veszteségmentes legyen a komplex közegjellemző tenzornak hermitikusnak is kell lennie. (A tenzornak meg kell egyeznie a transzponált konjugáltjával). Ilyen közegjellemzőt — aszimmetrikus permeabilitás tenzort — szolgáltat a ferritmágneses oxid anyagoknál (ferriteknél) polarizáló állandó mágneses tér jelenlétében fellépő giromágneses jelenség. A giromágneses közegek permeabilitás tenzora antiszimmetrikus és — a giromágneses rezonanciától távol — közel hermitikus. Így, közel veszteségmentes nonreciprok giromágneses eszközöket — így cirkulátorokat is — lehet építeni különféle működési elvek alapján és különböző (csőtápvonalas, szalag- és mikroszalagvonalas, koncentrált paraméteres) kivitelben.

A cirkulátorok közül a legelterjedtebbek a három, vagy több tápvonal-elágazásból kialakított csomó-



8. ábra. Koncentráltparaméteres cirkulátorok

ponti cirkulátorok, mert a legegyszerűbb felépítéssel általában a legjobb paramétereket tanúsítják.

Az 5., 6., 7. és 8. ábrán sorra a csótápvonalas, szalagtápvonalas, mikroszalagtápvonalas és koncentrált paraméteres csomóponti cirkulátorok fényképeit láthatjuk. Ma már az egyéb elvek (nonreciprok fázistolás, Faraday forgatásos, mezőtorzításos) alapján működő cirkulátorokat csak igen ritkán használják (pl. igen nagy teljesítmények esetében).

3. A cirkulátorok hálózatelméleti tulajdonságai

A veszteségmentes N -kapuk szórás mátrixa unitér, azaz a mátrix transzponáltjának és konjugáltjának szorzata az egység mátrixot adja:

$$\tilde{S} \cdot S^x = E, \quad (1)$$

ahol a hullámos felülvonás a transzponáltat, a csillag a konjugáltat jelenti, az E pedig az egység mátrix

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \dots 0 \\ 0 & 1 & 0 \dots 0 \\ 0 & 0 & 1 \dots 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & 0 \dots 1 \end{bmatrix}$$

Az (1) egyenlet a veszteségmentes hálózat szórás mátrixa elemeire kötések jelent, azaz az elemek nem függetlenek egymástól.

A továbbiakban csak a leggyakrabban használt háromkapus cirkulátorok esetére szorítkozunk. (1)-ből könnyen kimutatható [1], hogy minden veszteségmentes és illesztett (a reflexiós tényezők, a diagonálisban levő elemek eltűnnek) háromkapu szűképp egy ideális cirkulátor.

A nem ideális háromkapus cirkulátor

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

szórás mátrixa elemeire „jó” cirkulátor esetében, amikor

$$\begin{aligned} |S_{11}|, |S_{22}|, |S_{33}|, |S_{31}|, |S_{23}|, |S_{12}| &\ll 1 \\ |S_{21}|, |S_{32}|, |S_{13}| &\approx 1, \end{aligned} \quad (3)$$

(1) mátrix egyenlet utolsó három komponens-egyenlete (a másodrendű kicsi tagokat elhanyagolva):

$$\begin{aligned} S_{22}S_{21}^x + S_{32}S_{31}^x &\approx 0 \\ S_{13}S_{11}^x + S_{23}S_{21}^x &\approx 0. \\ S_{13}S_{12}^x + S_{33}S_{32}^x &\approx 0 \end{aligned} \quad (4)$$

A (3) egyenletek az abszolút értékekre a következő közel egyenlőséget adják.

$$\begin{aligned} |S_{11}| &\approx |S_{23}| \\ |S_{22}| &\approx |S_{31}|. \\ |S_{33}| &\approx |S_{12}| \end{aligned} \quad (5)$$

A (4) egyenletek mutatják, hogy a cirkulátor bármelyik kapujának reflexiós tényezőjének abszolút értéke közel egyenlő a két másik kapu záró irányú szórás mátrix elemének abszolút értékével. Tehát a háromkapus cirkulátorok kapuinak állóhullámaránya és a záró irányú csillapítások nem függetlenek egymástól, hanem egymást kölcsönösen meghatározzák.

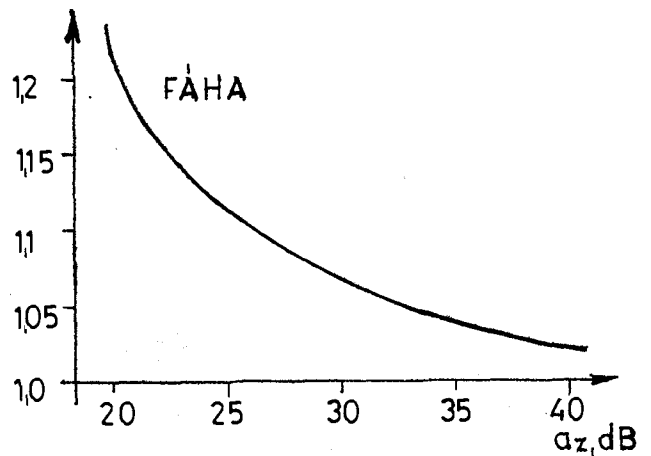
A kis veszteségű háromkapus cirkulátorok állóhullámaránya és záró irányú csillapítása közti összefüggést szemlélteti a 9. ábra.

A (3) egyenletek a fázisokra is tartalmaznak kötések. ($S_{ij} = |S_{ij}|e^{-j\varphi_{ij}}$ jelöléssel):

$$\begin{aligned} \varphi_{22} - \varphi_{21} &= \varphi_{32} - \varphi_{31} \pm \pi \\ \varphi_{13} - \varphi_{11} &= \varphi_{23} - \varphi_{21} \pm \pi. \\ \varphi_{13} - \varphi_{12} &= \varphi_{33} - \varphi_{32} \pm \pi \end{aligned} \quad (6)$$

A háromkapus cirkulátor egyik kapujának lezárása

A cirkulátorok egyik legtipikusabb és leggyakoribb felhasználása, amikor valamelyik kapuját (az 1. ábrán a 3. kaput) kis reflexiójú nyelővel zárják le, hogy fokozatok szétválasztása vagy illesztve lezárása céljából izolátort hozzanak létre. Az így nyert eredő kétkapu szórás mátrixa:



H984-9

9. ábra. A háromkapus cirkulátor záró irányú csillapítása és állóhullámaránya közti összefüggés

$$S_i = \begin{bmatrix} S_{11} + \frac{S_{13} \Gamma S_{31}}{D} & S_{12} + \frac{S_{13} \Gamma S_{32}}{D} \\ S_{21} + \frac{S_{23} \Gamma S_{31}}{D} & S_{22} + \frac{S_{23} \Gamma S_{32}}{D} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

ahol: S_{ij} elemek a cirkulátor szórásmatrix elemei,
 Γ a lezáró reflexiós tényezője,
 $D = 1 - \Gamma S_{33}$.

Ideális ciklulátor és lezáró ($\Gamma=0$) esetén

$$S_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

azaz ideális izolátort nyerünk.

Jó cirkulátor és kis $|\Gamma|$ esetén a másodrendű és kisebb tagokat elhanyagolva

$$S_i = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} + S_{13} \Gamma S_{32} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Ebből láthatjuk, hogy a lezáró reflexiós tényezője az izolátor záró irányú csillapítását (az eredő S_{12} -t) ronthatja. Pesszimális esetben a záró irányú csillapítás:

$$a_{zi} \approx 20 \lg \frac{1}{|S_{12}| + |\Gamma|}, \quad (9)$$

($|S_{13}|$ és $|S_{32}| \approx 1$.)

Ebből látható, hogy nagyon fontos kis reflexiós tényezőjű lezáró alkalmazása, ha nagy záró irányú csillapítást akarunk, illetve ha a cirkulátor záró irányú csillapítását meg akarjuk közelíteni, és még fontosabb a nagyon kis reflexiós tényezőjű lezáró használata, ha a cirkulátor záró irányú csillapításait (ill. az S_{12} , S_{23} , S_{31} elemeket) akarjuk mérni:

Az abszolút mérési bizonytalanságot

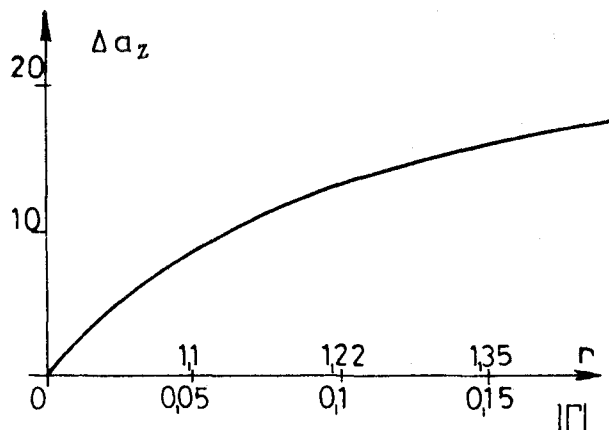
$$\begin{aligned} \Delta a_z &= a_{zc} - a_{zi} = 20 \lg \frac{1}{|S_{12}|} - 20 \lg \frac{1}{|S_{12}| + |\Gamma|} = \\ &= 20 \lg \frac{|S_{12}| + |\Gamma|}{|S_{12}|}. \end{aligned}$$

ábrázoltuk például a reflexiós tényező abszolút értéke (vagy az állóhullámaránya) függvényében, a 10. ábrán 30 dB-es záró csillapítású ($|S_{12}| = 0,0316$) cirkulátor esetén.

Két háromkapus cirkulátor egy-egy kapuja összekapcsolásával négykapus cirkulátort, ill. n cirkulátor összekapcsolásával $n+2$ kapus cirkulátort nyerünk. Az eredő cirkulátor paramétereit az összetevő cirkulátorok paramétereiből meghatározhatjuk [2].

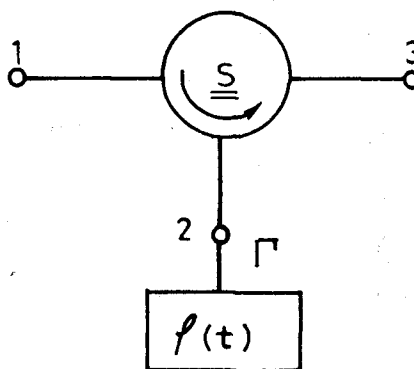
4. Cirkulátoros fázistoló (fázismodulátor) analízise

Az eddigiek gyakorlati jelentőségét a cirkulátorral kialakított fázistolók, ill. fázismodulátorok elemzésével szeretnénk illusztrálni. A 11. ábrán látható elrendezésben a cirkulátor 2. kapuja egy olyan egykapuval van lezárva, amely $\Gamma = |\Gamma|e^{-j\varphi}$ reflexiós tényezőjének abszolút értéke közel egy (közel teljes reflexió), és



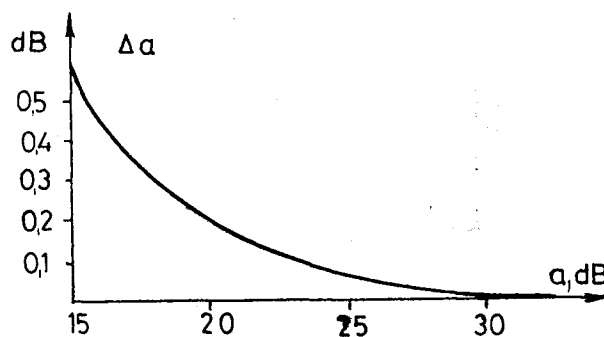
H984-10

10. ábra. A háromkapus cirkulátor zárócsillapításának abszolút mérési bizonytalansága



H984-11

11. ábra. Cirkulátoros fázistoló



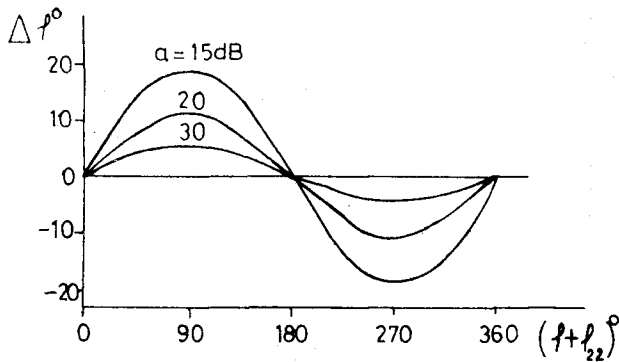
H984-12

12. ábra. A cirkulátor által okozott amplitúdóváltozás

amely fázisa, φ változik. Ezáltal a cirkulátor (1. kapuján belépő) 3. kapuján kilépő jel fázisa változik a φ függvényében.

Az eredő kétkapu átvitele $1 \rightarrow 3$ irányban:

$$S'_{31} = S_{32} + \frac{S_{32} \Gamma S_{21}}{1 - \Gamma S_{22}}. \quad (11)$$



H984-13

13. ábra. A cirkulátor által okozott fázisváltozás

Jó cirkulátor [lásd (2) egyenletnél] és reflektor ($|\Gamma| \approx 1$) esetén ($S_{ij} = |S_{ij}|e^{-j\varphi_{ij}}$ jelöléssel):

$$S_{31} = S_0 e^{-j\Phi} \left[1 + \frac{|S_{31}|}{S_0} e^{-j(\varphi_{31} - \Phi)} + |\Gamma| |S_{22}| e^{-j(\varphi + \varphi_{22})} \right], \quad (12)$$

ahol:

$$S_0 = |S_{32}| |\Gamma| |S_{21}| \approx 1; \quad \Phi = \varphi_{32} + \varphi + \varphi_{21}.$$

Figyelembe véve a cirkulátor paramétereit és (6) első egyenlete szerinti összefüggést:

$$S'_{31} \approx S_0 e^{-j\Phi} [i - j2|S_{31}| \sin(\varphi + \varphi_{22})]. \quad (13)$$

A (13) egyenlet jobb oldali második tagja φ -től függő változást okoz a kimenő jelnek mind az amplitúdójában, mind a fázisában.

A kimenő jel maximális amplitúdó változása:

$$\Delta a_{dB} \approx 20 \lg(1 + 2|S_{31}|^2) \approx 17,4|S_{31}|^2, \text{ dB} \quad (14)$$

A max. amplitúdóváltozást ábrázoltuk a 12. ábrán a cirkulátor záró irányú csillapítása függvényében. A kimenő jel fázistolása:

$$\varphi'_{31} = -\arcsin\{S'_{31}\} \approx \Phi + \arctg[2|S_{31}| \sin(\varphi + \varphi_{22})], \quad (15)$$

ahol:

$$\Phi = \varphi + \varphi_{22} + \varphi_{31} \pm \pi = \varphi + \varphi_{22} + \text{konstans}.$$

A fázistolásnak az ideális lineáristól való eltérését ábrázoltuk 15, 20 és 30 dB-es záró irányú csillapítás esetén a $\varphi + \varphi_{22}$ függvényében.

Látható, hogy még nagyon jó cirkulátor esetében is lényeges fázishiba eredményeződhet. (Részletesebb analízist lásd [3]-ban.)

I R O D A L O M

- [1] Dr. Csurgay Árpád – Markó Szilárd: Mikrohullámú passzív hálózatok. Tankönyvkiadó 1965.
- [2] Mikrohullámú Kézikönyv IV. fejezete. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973.
- [3] Dr. Szilárd Markó: Influences of Circulator Parameters on Phase-Modulators. Proceedings of the 6th International Conference on Microwave Ferrites. Várna, 1982.