

Kétkapu szórás mátrixa elemeinek nagy pontosságú mérése csomópont eltolásos módszerrel

ETO 512.643:621.317.341.3:621.372.4

Homogén tápvonalakban végződő kétkapu szórás mátrixa S_{ij} elemeinek mérése csomóponteltolásos módszerrel lehetséges, ha a mérendő kétkapu passzív, reciprok és reaktáns, továbbá, ha a végződéseken az elektromágneses hullám csak alampódban terjed.

A csomóponteltolásos mérési módszer a szakirodalomból ismeretes [1, 2, 3, 4]. Az adott leírások a kétkapu saját feszültségi reflexiótényezője abszolút értékének, $|S_{11}|$ -nek a mérést tárgyalják, ennek ismerete a műszaki gyakorlatban általában elégséges is. A módszer gyakorlati alkalmazhatósága azonban erősen korlátozott, mivel a mérés elvi leírása reflexiómentes hasított vonal alkalmazását feltételezi.

A dolgozatban a csomóponteltolásos mérés egy olyan új módszerét ismertetjük, ami lehetővé teszi az S_{ij} mátrixelemek nagy pontosságú mérését nem reflexiómentes hasított vonal alkalmazása esetén is. A mérés viszonylag hosszadalmas, mivel két csomóponteltolási diagram felvétele szükséges az S_{ij} mátrixelemek meghatározásához még abban az esetben is, amikor elégséges az $|S_{11}|$ mennyiség ismerete. A mai modern, automatizált mérési módszerek ismeretében is lehet azonban létjogosultsága a csomóponteltolásos módszernek, például amikor kis reflexiótényezőt kell mérni hagyományos műszerekkel vagy hitelesítő mérések esetén.

A csomóponteltolási diagram

A csomóponteltolási diagram jellemző paraméterei és az S_{ij} mátrixelemek kapcsolatának elvi meghatározásához a kétkapu kimenetére állítható rövidzár,

bemenetére pedig generátort kapcsolunk, 1. ábra. Az (1) jelű referenciasíkot úgy vesszük fel, hogy amikor a rövidzár a (2) jelű referenciasíkban van, az (1) jelű referenciasíkban az $|U|$ feszültségi állóhullámnak minimuma (csomópont) legyen. A rövidzárát X_2 mm-rel eltolva a (2) jelű referenciasíkból, a bemeneti oldalon a csomópont X_1 mm-rel tolódik el. A csomópontok elektromos távolsága a referenciasíkoktól:

$$\Phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda_{g1}} X_1; \quad \Phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda_{g2}} X_2, \quad (1)$$

ahol: λ_{g1} , illetve λ_{g2} a tápvonalon mért hullámhossz a bemeneti, illetve a kimeneti oldalon.

A csomóponteltolási diagram a

$$\Delta\Phi(\Phi_2) = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (2)$$

egyenlettel definiált függvény ábrája, ami mérésel az ismert módon felvehető. A $\Delta\Phi(\Phi_2)$ függvény analitikusan levezethető az (1) jelű referenciasíkra vonatkoztatott Γ_1 feszültségi reflexiótényezőt leíró egyenletből:

$$\Gamma_1 = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_2}{1 - S_{22}\Gamma_2} = \frac{S_{11} - \Delta S \Gamma_2}{1 - S_{22}\Gamma_2}, \quad (3)$$

ahol:

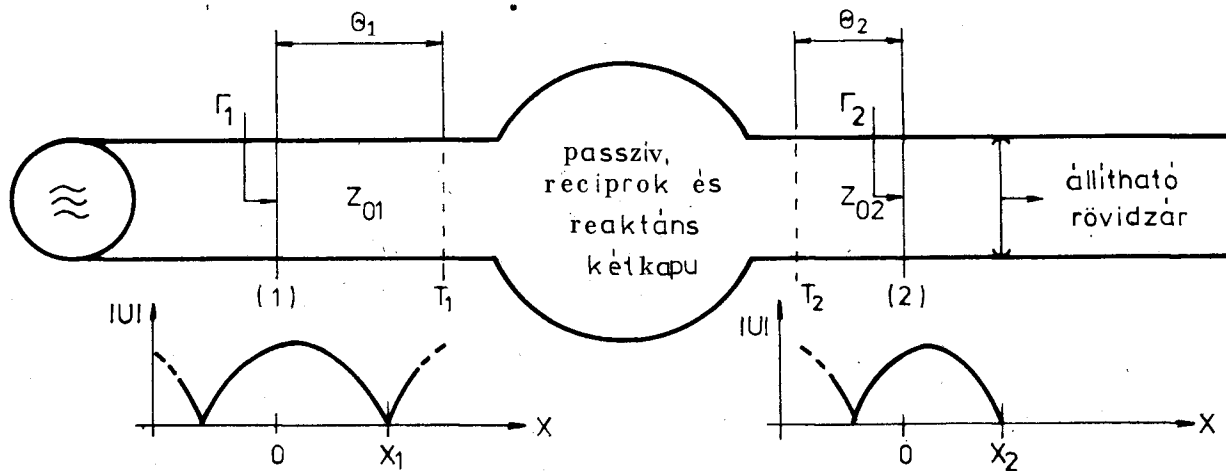
$$\Gamma_1 = e^{-j2\Phi_1}, \quad \Gamma_2 = -e^{-j2\Phi_2}, \quad (4)$$

és $\Delta S = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$, az S mátrix determinánsa.

Reciprok és reaktáns passzív kétkapuk S_{ij} mátrixelemei az alábbi kötéseknek tesznek eleget:

$$S_{22} = |S_{11}| e^{j\varphi_{22}}, \quad S_{21} = S_{12}, \quad (5)$$

$$|S_{12}|^2 = 1 - |S_{11}|^2, \quad 2\varphi_{12} = \pi + \varphi_{11} + \varphi_{22}.$$



1. ábra. Elvi kapcsolás a csomópont eltolási diagram leírásához

H 611-JL 1

Az S mátrix determinánsa:

$$\Delta S = e^{j(\varphi_{11} + \varphi_{22})} = -e^{j2\varphi_{12}} \quad (6)$$

A (3), (4), (5) és (6) egyenletek egybevetéséből:

$$e^{-j2\varphi_{12}} = \frac{1 + |S_{11}| e^{-j(\varphi_{22} - 2\varphi_2)}}{1 + |S_{11}| e^{j(\varphi_{22} - 2\varphi_2)}} e^{j(2\varphi_{12} - 2\varphi_2)} \quad (7)$$

összefüggésre jutunk. A (7) egyenlet fázisszögeinek egyenlőségéből írható, hogy

$$\Delta\Phi(\varphi_2) = \varphi_1 - \varphi_2 = -\varphi_{12} + \arctg \frac{|S_{11}| \sin(\varphi_{22} - 2\varphi_2)}{1 + |S_{11}| \cos(\varphi_{22} - 2\varphi_2)} \quad (8)$$

A fenti egyenlethől közvetlenül kiolvasható, hogy a $(\Delta\Phi + \varphi_{12})$ mennyiség a

$$z = 1 - S_{22} \Gamma_2 = 1 + |S_{11}| e^{j(\varphi_{22} - 2\varphi_2)} \quad (9)$$

komplex szám fázisszöge, ami φ_2 -ben π szerint periodikusan változik, 2a ábra. Mivel φ_{12} értéke rögzített, a $\Delta\Phi(\varphi_2)$ függvény is π szerint periodikusan változik úgy, hogy a $\Delta\Phi = 0$ tengely körül az $|S_{11}|$ mennyiséggel arányos mértékben oszcillál, 3. ábra. A csomó-

ponttolási diagram szélső értékeinél az alábbi összefüggések érvényesek:

$$\Delta\Phi_+ + \varphi_{12} = \arctg \frac{|S_{11}|}{\sqrt{1 - |S_{11}|^2}} \quad (10)$$

$$\Delta\Phi_- + \varphi_{12} = -\arctg \frac{|S_{11}|}{\sqrt{1 - |S_{11}|^2}}$$

A szélső értékek különbsége:

$$D = \Delta\Phi_+ - \Delta\Phi_- = 2 \cdot \arctg \frac{|S_{11}|}{\sqrt{1 - |S_{11}|^2}} \quad (11)$$

A fenti egyenlethől pedig a szakirodalomból ismert

$$|S_{11}| = \sin\left(\frac{D}{2}\right) \quad (12)$$

összefüggésre jutunk. A 2b ábra alapján írható még, hogy

$$|S_{11}| = \cos[\pi - (\varphi_{22} - 2\varphi_{2+})] = \cos(2\varphi_{2+} - \varphi_{22}) \quad (13)$$

A (13) egyenlethől válasz adható az S_{22} mátrixelem fázisszögeire:

$$\varphi_{22} = 2\varphi_{2+} - \arccos |S_{11}| \quad (14)$$

A (8) egyenlethől $\varphi_1, \varphi_2 = 0$ esetén az S_{12} mátrixelem fázisszöge határozható meg:

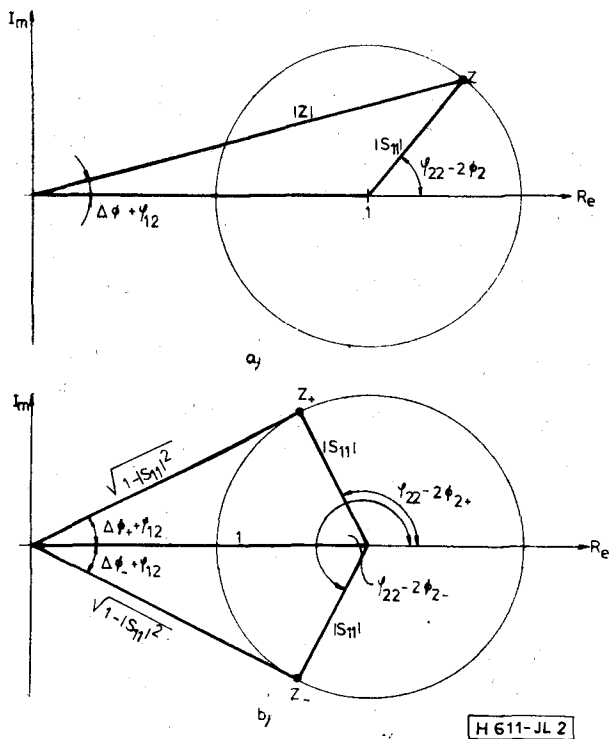
$$\varphi_{12} = \arctg \frac{|S_{11}| \sin \varphi_{22}}{1 + |S_{11}| \cos \varphi_{22}} \quad (15)$$

A fentiek alapján a csomóponttolási diagram ismeretében a kétkapú (1), (2) jelű referenciasíkokra vonatkoztatott S_{ij} szórás mátrix-elemeinek értéke meghatározható. A mérendő kétkapú T_1, T_2 jelű, tényleges végződése nem esnek egybe az (1), (2) jelű referenciasíkokkal, hanem azoktól, az 1. ábrán jelölt módon, valamely θ_1, θ_2 elektromos távolságra vannak. Ismeretes, hogy a referenciasíkok transzponálásával az S_{ij} mátrixelemeknek csak a fázisszöge változik. A kétkapú T_1, T_2 jelű referenciasíkokra vonatkoztatott szórás mátrix-elemeit S_{ijT} -vel jelölve írható, hogy

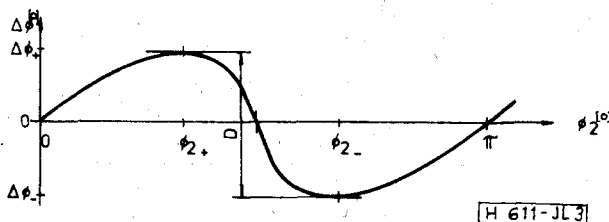
$$\begin{aligned} S_{11T} &= S_{11} e^{j2\theta_1}, & S_{22T} &= S_{22} e^{j2\theta_2}, \\ S_{12T} &= S_{12} e^{j(\theta_1 + \theta_2)}. \end{aligned} \quad (16)$$

A csomóponttolási diagram felvétele méréssel

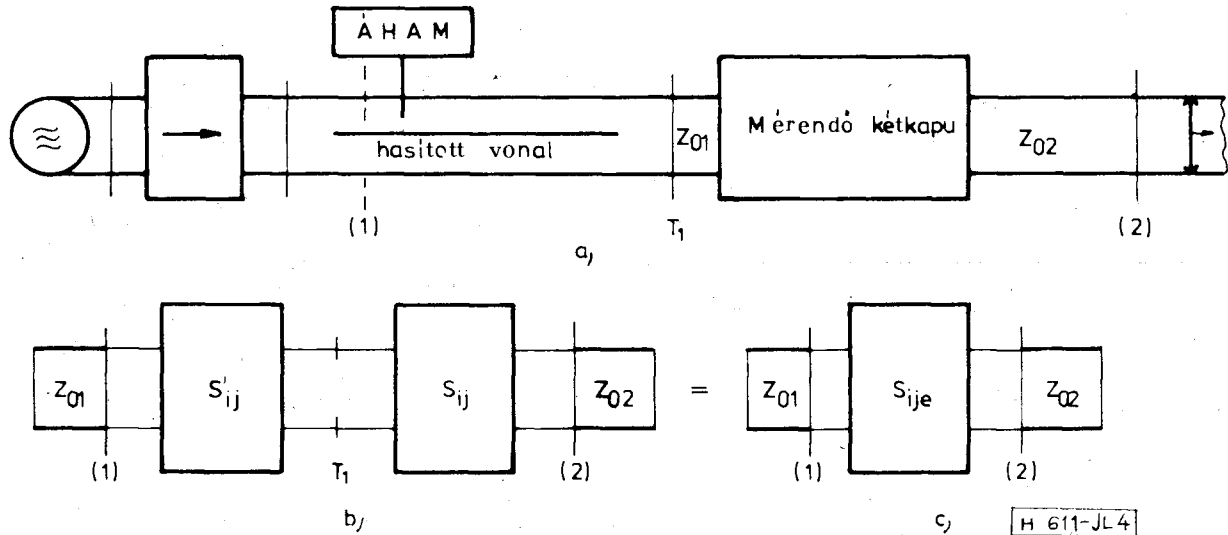
A csomóponttolási diagram mérés útján történő meghatározásához a mérendő kétkapú bemenetére hasított tápvonalon és izolátoron keresztül kapcsoljuk a generátort, 4a ábra. Az alkalmazott hasított vonal saját reflexióinak hatását egyszerűen úgy írhatjuk le, hogy a vonal nem reflexiómentes tartományát kétkapuként kezeljük [5]. A leírás egyszerűsítése céljából a nem reflexiómentes tartományhoz hozzákapsoljuk még az X_1 mennyiség méréséhez szükséges reflexiómentes hasított vonalszakaszt is. Jelöljük az így definiált kétkapú szórás mátrix-elemeit az (1)– T_1 jelű referenciasíkokra vonatkoztatva S'_{ij} -vel, a mérendő kétkapú esetén pedig a T_1 –(2) jelű referenciasíkokra vonatkoztatva S_{ij} -vel, 4b ábra. A csomóponttolási diagramból a két láncba kapcsolt kétkapú eredő kétkapujának, 4c ábra, S_{ijc}



2. ábra. A fázisszögek kapcsolata: a) φ_2 tetszőleges értéke esetén és b) a csomóponttolási diagram szélső értékeinél



3. ábra. Csomóponttolási diagram



4. ábra. a) Mérési összeállítás a csomóponteltolási diagram felvételéhez, b), c) a mért kétkapu

mátrixelemeire következtethetünk. Az S_{ije} mátrixelemeket az S'_{ij} , S_{ij} mátrixelemek függvényében az alábbi egyenletek írják le:

$$S_{11e} = S'_{11} + \frac{S_{12}^2 S_{11}}{1 - S_{11} S'_{22}}, \quad (17)$$

$$S_{22e} = S_{22} + \frac{S_{12}^2 S'_{22}}{1 - S_{11} S'_{22}}, \quad (18)$$

$$S_{12e} = \frac{S'_{12} S_{12}}{1 - S_{11} S'_{22}}. \quad (19)$$

A másodrendűen kis mennyiségek hatásának elhanyagolása esetén, más szóval az

$$1 - S_{11} S'_{22} = 1, \quad |S'_{12}|^2, \quad |S_{12}|^2 = 1 \quad (20)$$

közelítésekkel élve, nagyon jó közelítéssel írható, hogy

$$S_{11e} = S'_{11} + S_{11} e^{j2\varphi_{12}}, \quad (21)$$

$$S_{22e} = S_{22} + S'_{22} e^{j2\varphi_{12}}, \quad (22)$$

$$S_{12e} = S'_{12} S_{12}. \quad (23)$$

A fentiek alapján a mérendő kétkapu szórás mátrixa S_{ij} elemeire az alábbi, jó közelítéssel érvényes összefüggések írhatók fel:

$$S_{11} = (S_{11e} - S'_{11}) e^{-j2\varphi_{12}}, \quad (24)$$

$$S_{12} = \left| \frac{S_{12e}}{S_{12}} \right| e^{j(\varphi_{12e} - \varphi_{12})}, \quad (25)$$

$$S_{22} = S_{22e} - S'_{22} e^{j2\varphi_{12}}. \quad (26)$$

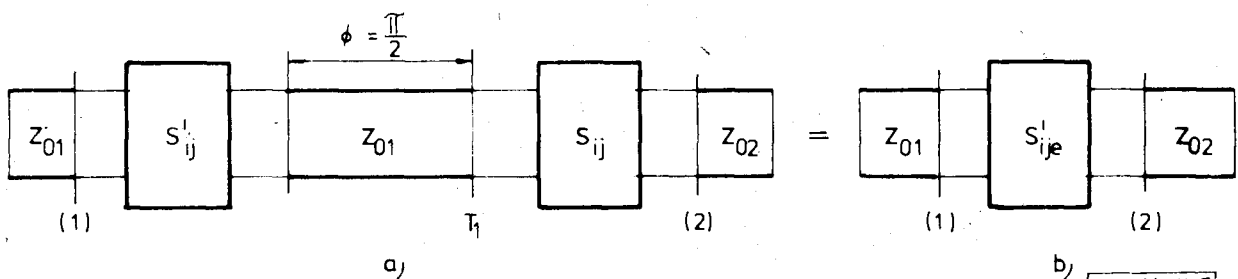
$$S'_{11e} = S'_{11} - S_{11} e^{j2\varphi_{12}}. \quad (27)$$

Az S_{11e}, S'_{11e} mennyiségeket ábrázolva a komplex számsíkon megállapítható, hogy $|S_{11e}|$, $|S'_{11e}|$ és $|S'_{11}|$

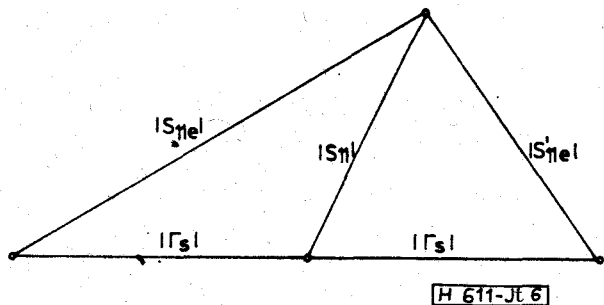
Nem reflexiómentes hasított vonal alkalmazása esetén tehát két csomóponteltolási diagram felvételével a mérendő kétkapu S_{ij} mátrixelemeinek értéke meghatározható.

A negyedhullámú technika alkalmazása

Azokban az esetekben, amikor ismert az alkalmazott hasított vonal Γ_s saját feszültségi reflexiótényezőjének abszolút értéke, és a feladat csupán az $|S_{11}|$ mennyiség mérése, a negyedhullámú technika előnyösen alkalmazható. Bár a negyedhullámú technika alkalmazása esetén is két csomóponteltolási diagram felvétele szükséges $|S_{11}|$ értékének meghatározásához, de a mérés kiértékelése egyszerűsödik, mivel nem szükséges a leírásban szereplő mátrixelemek fáziszögének meghatározása. Az első csomóponteltolási diagramot a 4a ábra szerinti mérési összeállításban vesszük fel és választ kapunk az $|S_{11e}|$ értékére. A második csomóponteltolási diagram felvételéhez a mérendő kétkaput egy $\Phi = \pi/2$ elektromos hosszúságú tápvonalszakasz közbeiktatásával kapcsoljuk a hasított vonalhoz. Adott esetben a csomóponteltolási diagram az 5a ábrán feltüntetett, három láncba kapcsolt kétkapu eredő kétkapujának, 5b ábra, S'_{ije} szórás mátrix-elemeire ad választ, ahol



5. ábra. A mért kétkapu negyedhullámú hosszúságú vonalnyújtó alkalmazása esetén

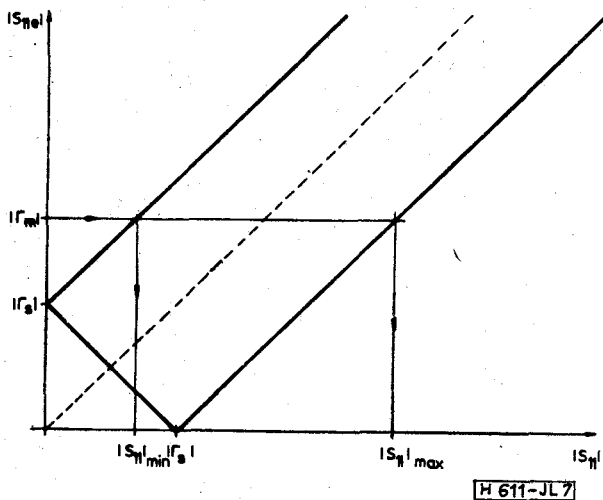


6. ábra. A mért és a mérendő reflexiótényezők abszolút értékének kapcsolata

ismeretében $|S_{11}|$ értéke grafikusán meghatározható. A megoldást a 6. ábrán tüntettük fel, ahol bevezettük az $|S'_{11}| = |\Gamma_s|$ szokásos jelölést.

$|S_{11}|$ mérésének mérési bizonytalansága egyetlen csomóponteltolási diagram felvétele esetén

Az előző pontok ismeretében választ adhatunk arra a kérdésre is, hogy a mérendő $|S_{11}|$ mennyiség értéke mekkora bizonytalansággal adható meg egyetlen csomóponteltolási diagram ismeretében, ha az alkalmazott hasított vonal nem reflexiómentes. $\Gamma_s \neq 0$



7. ábra. Diagram $|S_{11}|$ elvileg lehetséges értékének meghatározásához

esetén a mért $|S_{11e}|$ mennyiség elvileg lehetséges értékeivel kell számolni. $S'_{11} = \Gamma_s$ szokásos jelölés bevezetésével a (21) egyenletből

$$||S_{11}| - |\Gamma_s|| \leq |S_{11s}| \leq |S_{11}| + |\Gamma_s| \quad (28)$$

következik. $|\Gamma_s|$ ismeretében $|S_{11e}|$ korlátai ábrázolhatók $|S_{11}|$ függvényében, 7. ábra. Legyen valamely konkrét esetben $|S_{11e}|$ mért értéke $|\Gamma_m|$. A 7. ábrából visszametszéssel meghatározható a mérendő reflexiótényező elvileg lehetséges értéke:

$$|S_{11}|_{\min} \leq |S_{11}| \leq |S_{11}|_{\max} \quad (29)$$

Definíciószerűen $|S_{11}|$ mérésének mérési bizonytalansága:

$$\Delta |S_{11}| = |S_{11}|_{\max} - |S_{11}|_{\min} \quad (30)$$

A 7. ábrából közvetlenül kiolvasható, hogy

$$|S_{11}| \leq 2|\Gamma_s| \quad \text{esetén} \quad \Delta |S_{11}| = 2|\Gamma_s|,$$

míg

$$|S_{11}| \leq 2|\Gamma_s| \quad \text{esetén} \quad 0 \leq \Delta |S_{11}| \leq 2|\Gamma_s|.$$

A műszaki gyakorlatban alkalmazott hasított vonalak esetén általában $|\Gamma_s| = 0,01 - 0,05$, s így $\Delta |S_{11}| = 0,02 \sim 0,1$ értékekkel kell számolni. Egyetlen csomóponteltolási diagram alapján tehát a mérendő $|S_{11}|$ mennyiség jó közelítéssel vett értéke csak viszonylag nagy reflexiótényezők mérése esetén adható meg. Kis reflexiótényezők csomóponteltolási módszerrel történő mérésénél a feladat megoldásához két csomóponteltolási diagram felvétele szükséges.

IRODALOM

- [1] A. Weissloch: Ein Transformationsatz verlustose Vierpole und sein Anwendung auf die experimentelle Untersuchung von Dezimeter- und Zentimeterwellen-Schaltung. Hochfrequenz und Elektroakustik, Vol. 60, No. 3. pp. 67-73, September, 1942.
- [2] E. L. Ginzton: Microwave Measurements. McGRAW-HILL, 1957, pp. 275-285.
- [3] Dr. Almássy Gy.: Mikrohullámú mérőműszerek és mérések. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1961. pp. 163-172.
- [4] Dr. Almássy Gy.: Mikrohullámú kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973. pp. 590-591.
- [5] Dr. Jachimovits L.: Az állóhullámarány-mérő saját reflexióinak hatása a feszültségi reflexiótényező mérésére. Híradástechnika, XXII. évf. 4. sz. pp. 115-120.

Lapunk példányonként megvásárolható

V., Váci utca 10.

V., Bajcsy-Zsilinszky út 76. szám alatti

hírlapboltokban