

## A váltakozó feszültség mérése

ETO 621.317.322.089.6

E cikk az ipari frekvenciáktól eltérő frekvenciájú váltakozó feszültség méréseivel foglalkozik, különös tekintettel a hivatalunkban megvalósított alap mérési feladatok és eszközök ismertetésére.

Előjáróban rögzíteni szeretnénk, hogy nem kívánunk részt venni abban a vitában, ami a feszültségmérések felső frekvenciahatárával kapcsolatos és amelyben az egyik szélsőséges irányzat a feszültségméréseket indokoltnak tartja egészen 10 GHz-ig, sőt e felett is. Ezzel szemben a másik vélemény szerint a pontos feszültségméréseknek 30 MHz felett gyakorlatilag nincs jelentősége.

A villamos feszültséget a villamos térerősségből határozzuk meg az

$$U = - \int_L E \cdot dl,$$

összefüggés szerint. Mivel  $E = \frac{F}{Q}$ , ahol  $F$  az  $E$  térben a  $Q$  töltésre ható erő, ezért az  $L$  görbe két pontja közötti feszültség azzal a munkával egyenlő, amit az egységnyi töltés végez, amikor az egyik pontból a másikba halad.

A fenti összefüggésnek megfelelően, figyelembe véve, hogy a töltés dimenziója  $As$ , a feszültség dimenziójára  $Nm/As$  adódik, amit voltznak nevezünk. Ha a fenti integrál értéke az időtől független érték, akkor egyenfeszültségről beszélünk. Az egyenfeszültség egysége a „volt”. Ennek etalonját Weston-cellaiból álló csoportokkal állítják elő. Az idő függvényében nem állandó feszültségek közül kiemelkedő szerep jut a periodikusan változó, egyenfeszültségű komponens nem tartalmazó feszültségeknek, ezeket váltakozó feszültségeknek nevezzük. Ezek jellemzésére effektív értékük szolgál az

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt},$$

meghatározás szerint. Itt  $u(t)$  a periodikus feszültség időfüggvénye,  $T$  a periódusidő.

A kapcsolatot ennek megfelelően az egyen- és váltakozó feszültség effektív értéke között az azonos munkavégzés teremti meg. Így a váltakozó feszültség egysége ugyanaz a „volt”, mint az egyenfeszültségé.

A hivatalunkban kifejlesztett és alkalmazott eszközök és módszerek lehetőséget biztosítanak, hogy az országban előforduló jelentős vizsgálati igényeket ki tudjuk elégíteni. Ezek az igények az esetek nagy részében voltmérők kalibrálására vonatkoznak.

Egy szélessávú, ún. nagyfrekvenciás voltmérő mérési pontossága a frekvencia függvényében a következőképpen alakul:

1 MHz-ig	$\pm 0,5\%$ ;
10 MHz-ig	$\pm 2\%$ ;
100 MHz-ig	$\pm 10\%$ ;
1 GHz-ig	$\pm 25\%$ .

Ennek megfelelően jelenleg felső frekvenciahatárnak az 1 GHz-et tekintjük.

A bevezető gondolatsor folytatásként az alapterületi feladatok megoldásához olyan átvivő eszközök szükségesek, amelyek az egyen-—váltakozó átvitt széles frekvenciatartományban lehetővé teszik. Ehhez szinte kizárólag hőátalakító eszközöket alkalmazunk.

A váltakozófeszültség—egyenfeszültség átalakítás-hoz jelenleg kétféle hőátalakítót használunk, a termokeresztet és a bolométert. Előnyeik, hogy a váltakozó feszültség hullámalakjától függetlenül mindig az effektív értéket érzékelik, és közvetlenül egyenfeszültséggel kalibrálhatók.

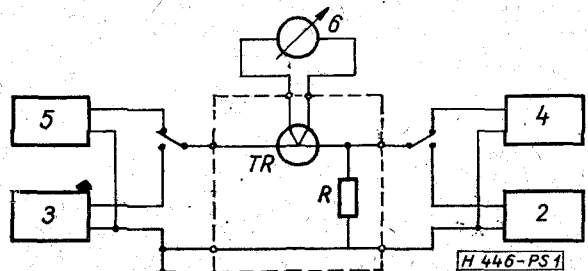
A termokeresztnél az egyen- és váltakozó feszültség teljesítményének azonosságát a hőelem kimeneti feszültségének azonossága, a bolométernél pedig a bolométer ellenállásának azonossága biztosítja.

A váltakozó feszültség nagy pontosságú mérésének eszközei.

A kisebb, kb. 0,3 V alatti feszültségek mérésére, illetve az ilyen mérési tartományú feszültségmérők vizsgálatára a mikroforrásokat (az angolszász szakirodalomban mikropotencióter) használjuk (1. ábra).

A mikroforrásban  $TK$  nagyfrekvenciás termokeresztet és a koaxiális csatlakozóba beépített, különleges  $R$  tárcsaellenállás van. A csatlakozó a beépített ellenállással együtt cserélhető.

A mikroforrás működésének alapelve az, hogy a bemenetére adott és a termokeresztrel indukált áram átfolyik az  $R$  ellenálláson is, és ott meghatározott feszültségessé válik, ami egyenáramú helyettesítéssel jól megmérhető.



1. ábra. Váltakozó feszültségű voltmérő vizsgálata mikroforrással. 1. mikroforrás, 2. vizsgálandó voltmérő, 3. váltakozó feszültségű generátor, 4. egyenfeszültségű voltmérő, 5. egyenfeszültség-forrás, 6. galvanométer

A hivatalunkban használt mikroforrásokban levő termokereszték névleges árama 5, 10 és 15 mA, a tárcsaellenállások értéke 0,02 és 22 ohm között van, így a velük elvégezhető mérések feszültségtartománya 50  $\mu$ V-tól 400 mV-ig terjed. A frekvenciatartomány 10 Hz-től 500 MHz-ig terjed.

A mikroforrással végzett mérések során fellépő hibák egyik forrása az egyen- és a váltakozó feszültségű voltmérő bemeneti ellenállása közötti különbség. Ennek kiküszöbölésére az egyenfeszültségű mérés alatt a mikroforrás kimenetére egy, a váltakozó feszültség-mérő bemeneti ellenállásával megegyező értékű ellenállást kell kapcsolni, vagy a hibának megfelelő korrekciót figyelembe kell venni.

A mérési hibák másik forrása, hogy a tárcsaellenállás impedanciája nem egyezik meg egyenáramú ellenállásával. Az ebből eredő mérési bizonytalanság 5 MHz-en  $\pm 3\%$ , 500 MHz-en  $\pm 5\%$  lehet.

Nagyobb frekvenciákon nem elhanyagolható hibát okozhat a mikroforrás kimeneti és a feszültségmérő bemeneti referenciasíkja közötti távolság. A hibát a két sík közötti távolság minimálisra csökkentésével, vagy a vizsgálandó feszültségmérő bemeneti ellenállásához illesztett vonalszakasz beiktatásával lehet csökkenteni. Ha ezek a módok megvalósíthatatlanok, akkor a hibát az impedanciaviszonyok ismeretében az állóhullámarányból és a két sík távolságából lehet becsülni.

A mikroforrások feszültség mérésére csak transzfer-indikátorral együtt alkalmasak. A mikroforrás kimeneti feszültségét addig változtatjuk, amíg a transzfer-indikátoron akkora indikációt nem kapunk, mint amekkorát a mérendő feszültség adott. A mérendő feszültség ekkor azonos a mikroforrás kimenetén mérhető feszültséggel.

A kb. 0,3 V-nál nagyobb feszültségek mérésére, illetve feszültségmérők vizsgálatára a 2. ábrán bemutatott felépítésű termokeresztés átvivőket használjuk.

Az átvivőkben a termokeresztet a méréshatártól függő, megfelelő értékű előtétellenállással van sorba kapcsolva. Az átvivőbe olyan speciális RC hálózat van beépítve, amely széles frekvenciatartományban biztosítja, hogy az átvivő egyen-váltakozó átviteli hibája a megengedett érték alatt legyen. Ezt az átviteli hibát a következő módon definiáljuk:

$$d = \frac{U_{\approx} - U_{\approx}}{U_{\approx}} \cdot 100,$$

ahol  $d$  az átviteli hiba %-ban,  $U_{\approx}$  és  $U_{\approx}$  az azonos kimeneti hőelem-feszültséghez tartozó bemeneti váltakozó, illetve egyenfeszültség.

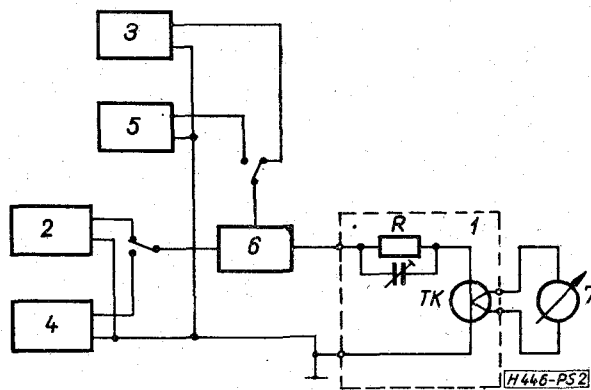
Az átalakítót ezekben a mérésekben, a mikroforrástól eltérően, párhuzamosan kapcsoljuk a vizsgálandó feszültségmérővel és a generátorral. Az összekapcsoláshoz  $T$ -elágazást célszerű használni, az átvivő referenciasíkja ugyanis a szabványos  $T$ -elágazás közepontjára illeszkedik.

Hivatalunknak két ilyen elven működő műszere van. Az egyikkel 0,3 és 1000 V között tudunk mérni a 10 Hz...1 MHz frekvenciatartományban, a feszültségtől és a frekvenciától függően  $\pm 0,02$  és  $\pm 0,1\%$  közötti bizonytalansággal. A másik műszerünk öt, egyenként 9 darabból álló mérőfejcsoporthoz, amelyet csoportos etalonként használunk. Ezek a

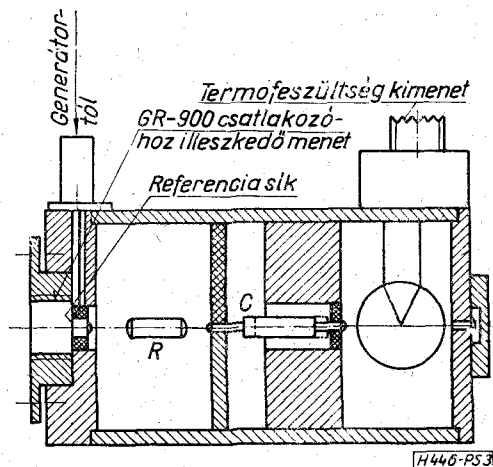
mérőfejek a 0,3...50 V feszültségtartományban 10 Hz-től 50 MHz-ig alkalmazhatók  $\pm 0,05$  és  $\pm 0,5\%$  közötti bizonytalansággal.

Nagyobb, 1 GHz-ig terjedő frekvenciájú feszültségek mérésére, ill. összehasonlítására kifejlesztettünk egy négy darabból álló termokeresztés mérőfejcsoporthoz (3. ábra), amelyet alap-mérőeszközként használunk. A termokereszt-fűtőszál az előtétellenállás és a hozzávezetések impedanciájában azonban ezeken a frekvenciákon a reaktív összetevők is jelentősek lehetnek, amit már nem lehet széles frekvenciatartományban kompenzálni, ezért ezek csak korlátozott frekvenciasávban adnak konstans átviteli tényezőket. Megfelelő korrekciót alkalmazva azonban jól felhasználhatók a feszültségmérők kalibrálására, összehasonlítására. Jellemzőjük, hogy az előzőekben említett  $T$ -elágazás a mérőfejbe úgy van beépítve, hogy a  $T$  vízszintes szára igen rövid, így a mérőfej és a vizsgálandó feszültségmérő referenciasíkja majdnem teljesen egybeesik.

A bolométeres átvivő eszközök érzékelője hőfokfüggő ellenállás, például mikrohullámú gyöngytermisztor, amelyet a rajta disszipált villamos teljesítmény melegít, és ennek függvényében ellenállása változik.



2. ábra. Váltakozó feszültségű voltmérő vizsgálata termokeresztés átvivővel. 1. termokeresztés átvivő, 2. vizsgálandó voltmérő, 3. váltakozó feszültségű generátor, 4. egyenfeszültségű voltmérő, 5. egyenfeszültség-forrás, 6. I-elágazás, 7. galvanométer



3. ábra. Nagyfrekvenciás egyen-váltakozó átvivő

A termisztorra egyenfeszültséget kapcsolva mérjük ellenállását. Ezután a termisztorra az egyenfeszültség mellé váltakozó feszültséget is kapcsolva, a teljesítményviszonyok megváltoznak, amit az egyenfeszültség, ill. teljesítmény csökkentésével ellensúlyozunk. A két teljesítmény összege akkor lesz azonos az előzővel, amikor a termisztor ellenállása megegyezik az előbbi értékkel. A váltakozó feszültség értékét tehát a teljesítményekből visszszámolva, a két egyenfeszültség négyzetének különbségéből vont négyzetgyök adja.

Az egyenáramú teljesítmény szabályozását és az ellenállás mérését egyszerre úgy lehet megoldani, hogy a termisztor egy olyan hídba kapcsoljuk, amelyben a hidágak ellenállása megegyezik a termisztor beállítandó ellenállásával, a hidat a tápfeszültség változtatásával egyenlítőjük ki.

Ebben az egyszerű kapcsolásban megfelelő szűrőkörökkel gondoskodni kell az egyen- és váltakozó áramú körök szétválasztásáról (4. ábra).

A két kör szétválasztását nagyban leegyszerűsíti a 5. ábrán látható két termisztoros elrendezés, a szűrőket itt a két kondenzátor helyettesíti.

Az ábrából láthatóan a két termisztor egyenáramú szempontból sorosan, váltakozó áramú szempontból pedig párhuzamosan kapcsolódik, amit a váltakozó feszültség számításánál figyelembe kell venni, mivel az egyenfeszültséget négyszer akkora ellenálláson mérjük, mint a váltakozó feszültséget. Külön figyelembe vesszük még azt is, hogy a két termisztor jelleggörbéje sohasem lehet teljesen egyforma, ezért ellenállásuk is különböző. Az egyenfeszültségeket ezért mindig külön-külön mérjük az egyes termisztorokon a váltakozó feszültség rákapcsolása előtt és után. A váltakozó feszültség  $U$  értékét a fentiek figyelembevételével, a levezetést mellőzve, az alábbi egyenlettel számolhatjuk:

$$U = \frac{\sqrt{\frac{E_1'}{E_2'}}}{1 + \frac{E_1'}{E_2'}} \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (E_1' + E_2')^2},$$

ahol  $E_1$  és  $E_2$  a két termisztoron mért feszültség a váltakozó feszültség rákapcsolása előtt,  $E_1'$  és  $E_2'$  a két termisztoron mért feszültség a váltakozó feszültség rákapcsolása után.

A bolométeres mérés tulajdonképpen teljesítménymérés, de a termisztoros mérőfej kialakítása olyan, hogy a vizsgálandó feszültségmérőt a bolométer síkjához lehet csatlakoztatni, ahol a feszültséget a fentiek szerint pontosan ismerjük. A méréseknél fontos, hogy a termisztorok egyen- és váltakozó áramú ellenállása megegyezzen, különben a váltakozó feszültség nem a számított értékű.

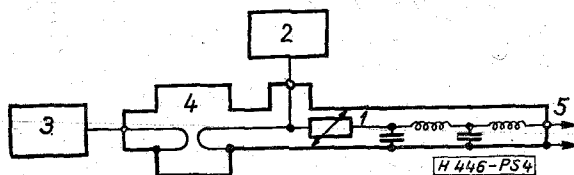
Különösen precíz méréseknél a váltakozó feszültség csatlakozási pontjára hangoló elemeket kapcsolva, az egyenáramú ellenállást megváltoztatva, a bolométeres eszköz hullámellenállását illeszteni lehet a mérendő körhöz.

A méréseket nagyban leegyszerűsíti, ha a híd ki-egyenlítését automatizáljuk, azaz a tápfeszültséget az  $N$  nullindikátor szabályozza a  $V$  vezérlő egységen keresztül.

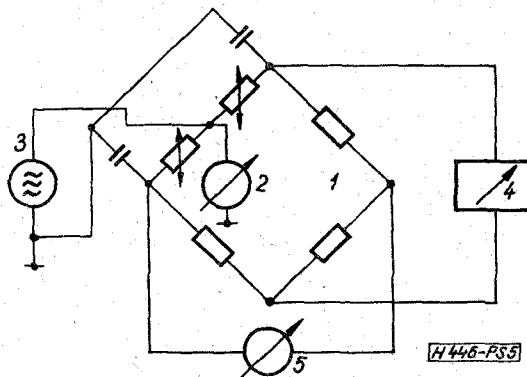
Hivatalunkban saját fejlesztésű, két termisztoros bolométeres feszültségátalont használunk, amely 0,5 ... 1 V feszültséghatárok között alkalmazható az 50 kHz ... 1 GHz frekvenciatartományban. A mérések bizonytalansága a vizsgálandó feszültségmérőtől, a feszültség és a frekvencia nagyságától függően 1 ... 5% között mozog.

A váltakozó feszültségek mérésére használatosak még a diódás, kompenzációs feszültségmérők. Ilyen rendszerű feszültségmérőket használunk a KGST-államok közötti megegyezés alapján a KGST keretében végzett összehasonlító méréseknél alap-mérőeszközként.

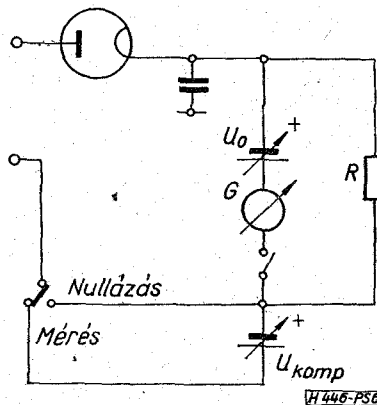
A műszerek alapkapcsolása a 6. ábrán látható. A működési elv a dióda indulóáram tartományának exponenciális jellegét használja ki, lényege az, hogy a bemenetre kapcsolt váltakozó feszültséget akkora  $U_{komp}$  egyenfeszültséggel kompenzálja, hogy a diódán ugyanaz a kezdeti áram folyjék át, mint amekkora a váltakozó feszültség bekapcsolása előtt, rövidrezárt



4. ábra. Egytermisztoros, bolométeres feszültségátalont kapcsolási vázlat. 1. termisztor, 2. vizsgálandó feszültségmérő, 3. generátor, 4. csatoló hurok, 5. ellenállásmérő hídhoz



5. ábra. Kéttermisztoros, bolométeres feszültségátalont. 1. bolométer-híd, 2. vizsgálandó voltmérő, 4. változtatható egyenfeszültség-forrás, 5. nullindikátor



6. ábra. A diódás-kompenzációs feszültségmérő elvi kapcsolási rajza



da (NRC), a National Physical Laboratory, United Kingdom (NPL), az Electrical Quality Assurance Directorate, United Kingdom (EQD) és az Országos Mérésügyi Hivatal.

Az összehasonlító mérések során két termokeresztes váltakozó-egyen átvivőt kellett minősíteni, meghatározva azok váltakozó-egyen átviteli hibáját. Az

összehasonlítások 1 GHz frekvencián az egyik átvivőnél 0,2 V, a másiknál 0,8 V-os szinten történtek. A vezető laboratórium a mérések ideje alatt négy alkalommal végezte el a minősítést, így az eszközök időbeli változására is adódott eredmény. Az összehasonlító mérések végén közzétett eredményeket az alábbi táblázat mutatja.

Váltakozó-egyen eltérés, %. Laboratórium

Átvivő	NBS <sub>1</sub>	NRO	NBS <sub>2</sub>	OMH	NBS <sub>3</sub>	NPL	EQD	NBS <sub>4</sub>	Átlag
0,8 V-os	-0,48	-0,40	-0,48	+0,3	-0,22	+0,21	+0,39	-0,28	+0,03
0,2 V-os	+2,37	+2,52	+2,40	+1,9	+2,28	+2,46	+2,22	+2,60	+2,3

A különböző összehasonlítások során kapott eredményekből látható, hogy a nagyfrekvenciás feszültségmérések pontossága az Országos Mérésügyi Hivatalban megfelel a jelenlegi országos igényeknek és a nemzetközi színvonalnak.

#### I R O D A L O M

- [1] Uiga, E.—White, W.F.: Techniques and Errors in High Frequency Voltage Calibration. IRE Transaction on Instrumentation, Vol. 1—9, No. 2. September 1960.
- [2] Selby, M. C.: Voltage Measurement at High and Microwave Frequencies in Coaxial Systems. Proc IEEE Vol. 55. No. 6. June 1967.
- [3] Szokol H.—Perényi B.—Sass J.—dr. Pákay P.—Fjodorov,

- A. M.: Szosmesznie raboti VNR, i SzSzSzR v oblaszti elektriceszkih izmerenij na viszokih csasztotah. Izmerityelnaja Tehnika, No. 6. 1973.
- [4] Mladenov, I.—Sass J.—Jon, D.—Kornacki, L.—Vojnuju, O.—Fjodorov, A. M.—Bubliak, P.: Rezultati szlicsenij sztran-cslenov SzEV pri viszokih csasztotah. Izmerityelnaja Tehnika, No. 6. 1973.
- [5] Williams, E. S.: Practical Aspects of the Use of AC—DC Transfer Instruments. NBS Technical Note, 257
- [6] Wilkins, F. J.: Multijunction Thermal Converter. Proc. IEEE, Vol. 112. No. 4. April 1965.
- [7] Ries, F. X.: Report on the International Intercomparison of Voltage Standards at 1 GHz in Coaxial Transmission Line. CIPM Consultativ Committee on Electricity, High Frequency Working Group (külön kiadvány)
- [8] Perényi B.: Váltakozó feszültség effektív értékének mérése. Mérésügyi Közlemények, VII. évf. 3. sz. 1966. aug.