KORDA TIBOR
BME Híradástechnikai Elektronika Intézet

Új mérési módszer kvázilineáris rendszerek nemlinearitásának vizsgálatára sztohasztikus mérőjel segítségével

ETO 621.317.353.1:621.391.832.4

A híradástechnikában igen fontos szerepet játszanak a lineáris áramkörök és az ezekből felépített lineáris rendszerek.

Valamely rendszer bemenetére adott X gerjesztés és ennek hatására a rendszer kimenetén megjelenő Y felelet között egy O_p operátor adja meg a kapcsolatot

$$Y = O_p\{X\}$$

Lineáris rendszerek esetében az O_p operátor a működési tartomány minden X-értékénél független a gerjesztéstől. A gyakorlatban a „lineárisra tervezett" rendszerek nagyrésze csak első közelítésben tekinthető lineárisnak, mert a működési szinttartománynak legalább egy részében a rendszert jellemző operátor függ a gerjesztéstől, azaz van bizonyos mértékű nemlinearitása.

Kvazilineáris rendszerek nemlinearitása mértékének meghatározására három módszer használatos: a linearitás, a dinamikacsökkenés és a torzítás mérése. Mindhárom mérési módszernél a méréshez használt gerjesztő jel — a mérőjel — determinisztikus jel, pontosabban szinuszos jel.

A linearitás és a dinamikacsökkenés mérése egyszerű eszközöket kíván ugyan, de csak relatíve nagy nemlinearitás kimutatására alkalmas. Kis nemlinearitás csak torzításméréssel határozható meg.

1. Kvázilineáris rendszerek nemlinearitásának jelenleg használt vizsgálati módszerei

A jelenleg használatos torzításmérési módszerek mindegyike azon a felismerésen alapszik, hogy a kvázilineáris rendszer nemlinearitása „eltorzítja" a mérőjel frekvenciaspektrumát. E torzulás úgy észlelhető, hogy a kimeneti jel frekvenciaspektrumában olyan összetevők is megjelennek, amelyek a bemeneti jel spektrumában nem szerepeltek, de azzal valamilyen kapcsolatban vannak.

A torzításmérésnek két főbb fajtája használatos: a harmonikus torzításmérés és az intermodulációs torzítás mérése. A harmonikus torzításméréshez egyetlen szinuszos mérőjelet használnak és a kimeneti jel spektrumában megjelenő harmonikusok amplitúdóit lemérve és az alapharmonikushoz viszonyítva, a kapott harmonikus torzítási tényező (klirr-faktor), vagy a harmonikus torzításcsillapítás jellemző a nemlinearitásra.

Intermodulációs torzításméréshez két szinuszos gerjesztőjelet alkalmaznak és a kimeneti jelben a nemlinearitás hatására megjelenő kombinációs frekvenciájú jelek amplitúdóit viszonyítják valamelyik alapfrekvenciás jel amplitúdójához.

A torzításmérés előnye, hogy kis nemlinearitás kimérésére is alkalmas. Hátránya:

a) speciális műszert (torzításmérőt, vagy szelektív feszültségmérőt) kíván,
b) a műszert a mérési frekvenciának megfelelően minden mérésnél pontosan be kell hangolni,
c) a kiértékelés általában hosszadalmas (vagy számolni kell, vagy minden mérőszintnél az alapharmonikusra kell normalizálni),
d) az előző két pontból következik, hogy a mérés nehezen automatizálható,
e) a kapott torzítási érték nem jellemzi jól a kvázilineáris rendszer nemlinearitását, ha az szinusztól eltérő jelek átvitelére használatos.

2. Kvázilineáris rendszerek vizsgálata sztohasztikus mérőjellel

2.1 *Sztohasztikus mérőjelek alkalmazásának jelentősége*

A kvázilineáris rendszerek nemlinearitásának az átvitt sztohasztikus jelekre (beszéd, zene, videojel, stb.) gyakorolt torzító hatását a szinuszos mérőjellel mért harmonikus, vagy intermodulációs torzítási tényezők nem jellemzik jól. A sztohasztikus jel ugyanis egészen más mértékű torzulást szenvedhet a nemlinearitás hatására, mint egy azonos effektív értékű szinuszos jel. Ennek oka az, hogy a rendszerek torzítása frekvencia- és szintfüggő. A szinuszos jeltől eltérően a sztohasztikus jelben a jel effektív értékénél lényegesen nagyobb (pl. 3—4-szeres) amplitúdójú pillanatértékek is előfordulnak és a jelnek relatíve igen széles lehet a frekvenciaspektruma. Ezért a sztohasztikus jeleket átvivő kvázilineáris rendszereket célszerű — szinuszos jel helyett — sztohasztikus mérőjellel mérni.

A mérések reprudukálhatósága végett csak ergodikus, stacioner sztohasztikus mérőjel használható. Emellett még lényeges, hogy a mérőjel könnyen előállítható legyen. Így gyakorlatilag a Gauss-amplitúdóeloszlású, sávhatárolt fehérzaj alkalmazása látszik elsősortan célszerűnek. A kereskedelemben kapható ún. véletlenzajt adó generátorok is ilyen jelet szolgáltainak.

A sztohasztikus mérőjelek előnyeinek hatására a távközléstechnikában az utóbbi években kezdenek elterjedni a sztohasztikus mérőjellel működő intermodulációs torzításmérők. Ezek azonban speciális célokra (pl. áthallási torzításméréshez) készülnek és igen költségesek.

Beérkezett: 1975. XI. 26.

A BME Híradástechnikai Elektronika Intézetben végzett vizsgálataink az első fázisban annak megállapítására irányultak, hogy a Gauss-eloszlású, sávhatárolt fehérzajnak melyek azok a jellemzői, amelyek egy kvázilineáris rendszer nemlinearitásának hatására úgy változnak meg, hogy azok egyszerűen és jól kimérhetők legyenek. Kísérleteink azt mutatták, hogy a fenti szempontokat figyelembe véve a sztohasztikus mérőjelnek az elsőrendű (egyváltozós) amplitúdó-eloszlását célszerű vizsgálni. Ez a megállapítás összhangban van azzal a közismert ténnyel, hogy a kvázilineáris rendszerek nemlinearitása a mérőjel frekvenciaspektrumának torzításán kívül — több különböző amplitúdójú összetevőt tartalmazó mérőjel esetén — az amplitúdók arányát is megváltoztatja, vagyis az amplitúdó-eloszlás torzulását okozza. A sztohasztikus jel véletlenszerűen változó, de ergodikus, stacioner mérőjelek esetén (így a Gauss-eloszlású jeleknél is) az amplitúdó-eloszlás független az időtől, ezért az eloszlásmérés eredménye bármikor jól reprodukálható.

2.2 Sztohasztikus mérőjelek amplitúdó-eloszlása

A sztohasztikus mérőjel amplitúdó-eloszlását az amplitúdó-eloszlásfüggvénnyel, annak deriváltjával az amplitúdó-sűrűségfüggvénnyel, ill. ennek momentumaival jellemezhetjük.

Az $F(x)$ amplitúdó-eloszlásfüggvény — röviden eloszlásfüggvény — megmutatja, hogy mi a valószínűsége annak, hogy a jel pillanatértéke egy adott x_k értéknél kisebb (vagy vele egyenlő)

$$F(x)=P[x(t)\leq x_k].$$

Az 1. ábra alapján a méréshez is felhasználható értelmezés

$$F(x)=\lim_{T\to\infty}\frac{\sum\limits_{i=1}^{n}\Delta t_i}{T}. \tag{1}$$

Az $f(x)$ amplitúdó-sűrűségfüggvény — röviden sűrűségfüggvény Δx-értékkel szorozva annak valószínűségét adja meg, hogy a jel pillanatértéke éppen egy adott x_k érték körüli Δx sávba esik, ha $\Delta x\to 0$. Vagyis

$$f(x)\,\Delta x=P[x_k\leq x(t)\leq x_k+\Delta x]=$$

$$=F(x+\Delta x)-F(x)=\Delta F(x).$$

Tehát

$$f(x)=\frac{dF(x)}{dx}.$$

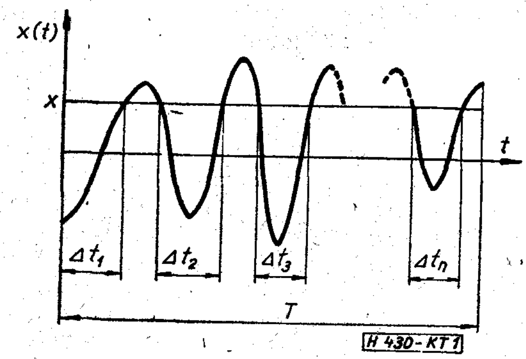
A 2. ábra alapján a méréshez is felhasználható értelmezés szerint

$$f(x)=\frac{1}{\Delta x}\lim_{T\to\infty}\frac{\sum\limits_{i=1}^{n}\Delta t_i}{T}. \tag{2}$$

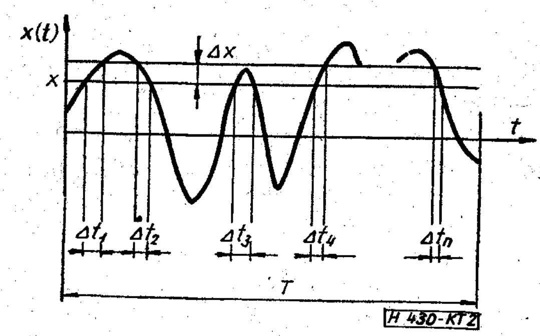
Gauss-elosztású jelek sűrűségfüggvénye

$$f(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{[x-m]^2}{2\sigma^2}\right],$$

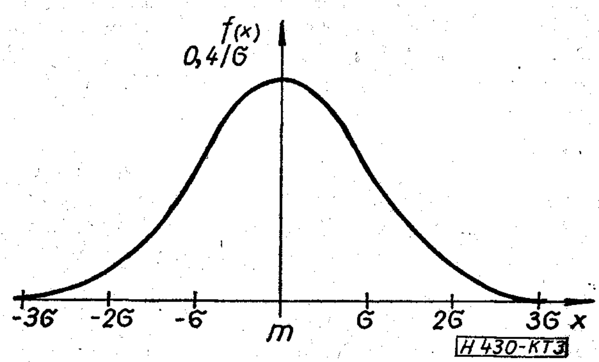
ami a közismert Gauss-görbét adja (3. ábra).



1. ábra



2. ábra



3. ábra

Ergodikus jelek esetén az eloszlás σ-szórása megegyezik a jel váltókomponensének effektív értékével az m-várható értéke a jel egyenátlagával. Így írható, hogy

$$a^2=\overline{x^2(t)}-[\overline{x(t)}]^2,$$

ahol

$$\overline{x^2(t)}=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T}x^2(t)\,dt$$

a jel négyzetátlaga (a jel egységnyi ellenállásra vonatkoztatott teljesítménye) és

$$\overline{x(t)}=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T}x(t)\,dt$$

a jel egyenátlaga (a jel egyenkomponense).

A gyakorlatban alkalmazott zajgenerátoroknál

$\overline{x(t)}=0$. A további vizsgálatainknál mindig élünk ezzel a feltételezéssel.

A Gauss-eloszlású jel eloszlásfüggvénye $\overline{x(t)}=0$ esetén

$$F(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int\limits_{-\infty}^{x}\exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right]dx=\Phi\left[\frac{x}{\sigma}\right],$$

ahol $\Phi\left[\frac{x}{\sigma}\right]$ a matematikában hibaintegrálként ismert táblázatosan megadott függvény (4. ábra). Ennek segítségével kiszámítható mekkora a valószínűsége annak, hogy a jel pillanatértéke egy adott $X_0=k\sigma$-értéknél kisebb.

A túllépési valószínűség

$$\eta(x)=1-F(x)=1-\Phi\left[\frac{x}{\sigma}\right]$$

értéke is jól számítható, és ezt a mérés során fel is használjuk.

2.3 Kvázilineáris rendszerek vizsgálata az amplitúdó-eloszlásfüggvény torzulása alapján

2.3.1 A mérési alapelv és a hozzárendelhető torzítási tényező ismertetése

Ha a Gauss-eloszlású jel lineáris rendszeren halad át, az amplitúdó-eloszlás „Gauss-jellege" változatlan marad. Ha azonban a rendszernek van nemlinearitása, az eloszlás eltorzul.

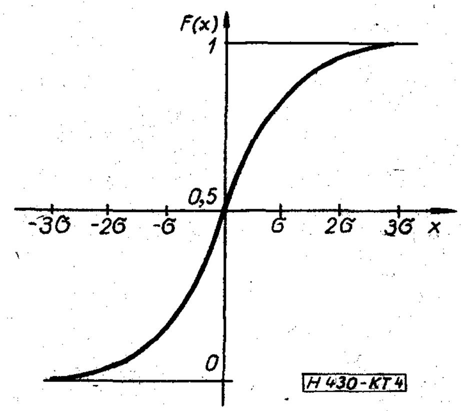
Ha a kvázilineáris rendszeren átmenő, a rendszer sávjánál keskenyebb sávra határolt Gauss-eloszlású jel eloszlásfüggényét vizsgáljuk, azt tapasztaljuk, hogy a nemlinearitás okozta amplitúdóarány-csökkenés hatására a jel effektív értéke az $F(x)$ görbén lejjebb tolódik. Ennek az lesz a következménye, hogy pl. az új, σ^* effektív értékhez tartozó η_x túllépési valószínűség megnő. Feltételezve, hogy az $F(x)$ függvény $-X$, ill. $+X$ amplitúdókhoz tartozó szakasza egyformán torzul, elegendő a függvény felét vizsgálni (5. ábra).

Ha a torzítás miatt lecsökkent effektív értékű jelet a torzítatlan jellel azonos effektív értékre hozzuk, a két jel $F(x)$ függvénye a 6. ábra szerint alakul. Látható, hogy ugyanazon effektív értékű torzítatlan, ill. torzult eloszlású jelek ugyanazon $X_0 \leq \sigma$ értéknél vizsgált túllépési valószínűsége eltérő lesz. Az eltérés

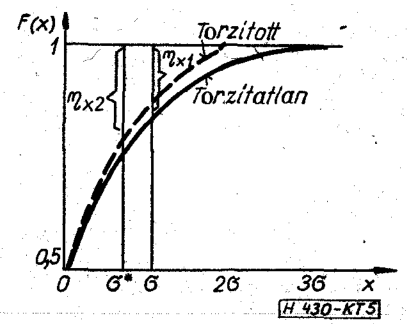
$$\Delta\eta=\eta_x-\eta_0,$$

nagysága a torzulással arányosan nő.

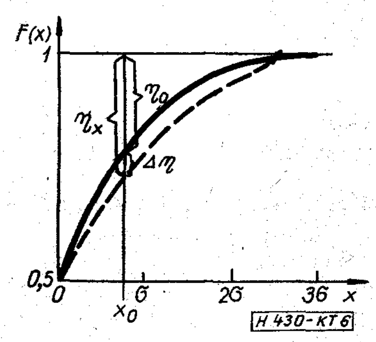
A mérés egyszerűsítéséhez célszerű az eloszlásfüggvényt és így a mért túllépési valószínűségeket a pillanatnyi kimenőjel effektív értékére normalizálni. Ez ugyanis biztosítja, hogy a torzítatlan eloszlásfüggvény esetén a mért η_0 túllépési valószínűség állandó lesz, akkor is, ha a vizsgáló szintet változtatjuk. A normalizálás egyszerűen azzal érhető el, ha az X_0 vizsgálószint értékét a kimeneti jel effektív értékével arányosan változtatjuk, azaz biztosítjuk, hogy $X_0=k\sigma_{ki}$; legyen. Így adott k-esetén η_0 értéke



4. ábra



5. ábra

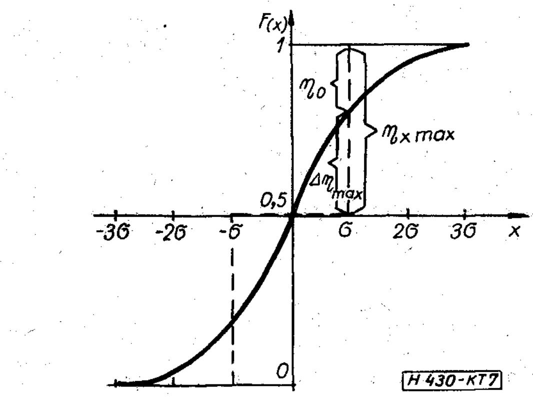


6. ábra

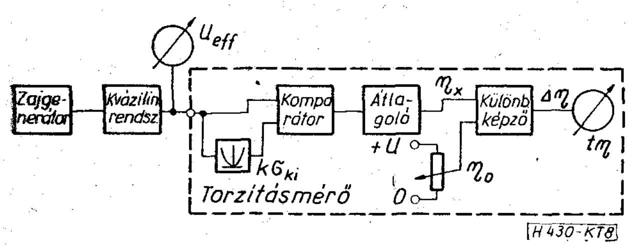
kiszámítható és egy fix U_0 feszültséggel szimulálható. Ez viszont lehetővé teszi, hogy egy különbségképző segítségével közvetlenül a $\Delta\eta$ túllépési különbséget mérjük.

Az eloszlásfüggvény változását jelző *torzítási tényező* értelmezése attól függ, mit tekintünk maximális torzításnak. Célszerűnek látszik olyan rendszer torzítását tekinteni 100%-os torzításnak, amely a mérőjel eloszlását a legnagyobb mértékben torzítja el, vagyis amikor a kimeneti jelben csak kétféle amplitúdó-érték fordul elő (bináris véletlen jel). Ilyen jel effektív értéke az adott amplitúdóval egyenlő. Egy ilyen torzított és azonos effektív értékű torzítatlan Gauss-eloszlású jel $F(x)$ függvényei a 7. ábrán láthatók. Az így definiált 100%-os torzítás esetére a túllépési valószínűség megváltozása $\Delta\eta_{max}=0{,}5-\eta_0$ a torzítási tényező

$$t_\eta=\frac{\Delta\eta}{\Delta\eta_{max}}100=\frac{\Delta\eta}{0{,}5-\eta_0}100[\%].$$



7. ábra



8. ábra

Ha pl. a mérőjel túllépési valószínűségét $X_0=0{,}67\sigma$ értéknél mérjük, akkor

$$\eta_0=0{,}25,$$

így

$$t_\eta=4\,\Delta\eta\cdot 100[\%].$$

2.3.2 Az eloszlásfüggvény torzulásának mérésén alapuló torzításmérő elvi felépítése és jellemzői

Az eloszlásfüggvény (1)-ben adott értelmezése alapján $F(x)$ és így $\eta(x)$ is, komparátorral és azt követő átlagoló áramkör segítségével mérhető. A normalizálás úgy biztosítható, ha a komparátor referenciafeszültsége mindenkor a kimeneti feszültség effektív értékével arányos ($X_0=k\sigma_{ki}$)

Az előzőekben elmondottak alapján a mérés és a műszer blokksémája a 8. ábra szerinti lesz.

Az új elven működő torzításmérő előnyei a harmonikus, ill. intermodulációs torzításmérőkkel szemben:

a) sztohasztikus mérőjel használható,
b) a műszert nem kell hangolni, ugyanakkor igen széles frekvenciatartományra készíthető,
c) a műszer skálájáról közvetlenül a torzítási tényező olvasható le, anélkül, hogy a mérés előtt az adott mérőjel szintjével normalizálni kellene,
d) a műszer felépítése igen egyszerű és olcsó,
e) a mérés könnyen automatizálható,
f) a mérőjel pozitív, ill. negatív amplitúdóeloszlásának torzulása külön kimérhető (aszimmetrikus torzulásnál).

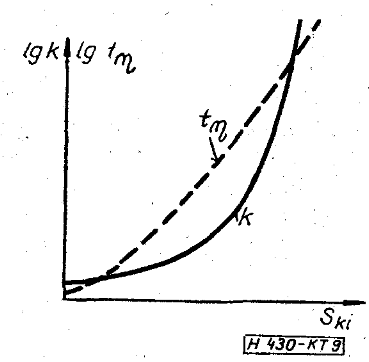
Hátránya: a sztohasztikus mérőjel miatt relatíve nagy átlagolási idő szükséges, ami a műszer beállítási idejét megnöveli (néhány sec-ra), esetenként a zajgenerátorhoz sávhatároló szükséges.

2.3.3 Az eloszláson értelmezett t_η torzítási tényező és a k harmonikus torzítási tényező kapcsolata

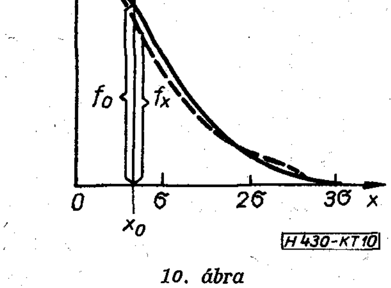
Egy adott kvázilineáris rendszeren, adott effektív értékű, Gauss-eloszlású mérőjellel mért t_η ill. ugyanakkora effektív értékű szinuszos mérőjellel mért k-torzítási tényező között nem adható meg egyértelmű, közvetlen kapcsolat. E kapcsolat ugyanis függ a vizsgált rendszer harmonikus torzításának frekvencia- és szintfüggésétől. Ha különböző frekvenciákon felvesszük a rendszer harmonikus torzítási tényezőjét a szint függvényében, majd e karakterisztikákat átlagoljuk, akkor ezen átlagkarakterisztikának a mérőjel effektív értéke környezetében (kb. 3σ-szinttartományban) a Gauss-eloszlásnak megfelelően súlyozott átlaga egyértelmű kapcsolatba hozható t_η-val. Tehát t_η a frekvenciában lineárisan átlagolt, szintben pedig a Gauss-eloszlásnak megfelelő súlyozással átlagolt harmonikus torzítási tényezőnek felel meg. Ennek alapján a két torzítási tényező szintfüggése a 9. ábrán láthatóan alakul. E görbék viszonyát a mérési eredmények igazolták. A két karakterisztika eltérése különösen akkor jelentős, ha a rendszer transzferkarakterisztikája élesen törik le.

2.4 *Kvázilineáris rendszerek vizsgálatának elve a sűrűségfüggvény torzulása alapján*

A kvázilineáris rendszerek nemlinearitása a Gauss-eloszlású mérőjel sűrűségfüggvényét is eltorzítja (10. ábra). A sűrűségfüggvény torzulásának mértéke ugyancsak jellemző a rendszer nemlinearitására.



9. ábra



10. ábra

A sűrűségfüggvény torzulásának vizsgálatára két módszer látszik alkalmasnak:

a) $f(x)$ értékének mérése valamely adott X_0 értéknél,
b) a sűrűségfüggvénynek relatíve nagy amplitúdókhoz ($2 \sim 3\sigma$) tartozó részén 2. rendű momentum mérése.

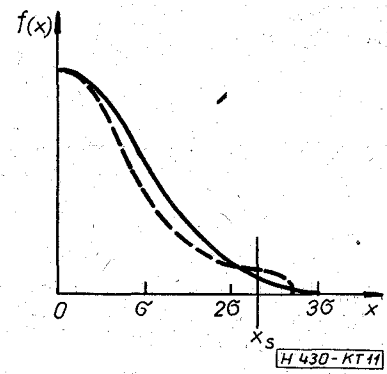
2.4.1 A sűrűségfüggvény torzulásának mérése $f(x)$ értékének mérésével

A sűrűségfüggvény a (2) definíció alapján ablakkomparátorral és azt követő átlagolóval mérhető, valamely adott X_0 érték környezetében.

A sűrűségfüggvény vizsgálatának hátránya az eloszlásfüggvény vizsgálatával szemben az, hogy nehezebben normalizálható. Torzítatlan sűrűségfüggvény esetén a jel effektív értékével arányosan növelt X_0 értéknél $f_0\sigma$ értéke állandó, így a szinttől független érték σ-való szorzás, vagy a komparátor ablakszélességének arányos változtatásával érhető csak el.

2.4.2 A sűrűségfüggvény torzulásának mérése a függvény szélső része momentumának mérésével

A sűrűségfüggvény szélső része relatíve nagy értékű amplitúdókhoz tartozik, így ez a rész torzul el legjobban. E torzulás jól kimutatható, ha a sűrűségfüggvényen az X_S szint feletti rész 2. rendű momentumát, azaz U_S effektív értékét (esetleg abszolút átlagértékét) mérjük (11. ábra).



11. ábra

Torzítatlan sűrűségfüggvény esetén $X_S = s\sigma$ biztosításával az U_S/σ tartható csak állandó értéken. Így a σ-ra való normalizáláshoz σ-val arányos értékkel U_S értékét osztani kell.

A sűrűségfüggvény X_S-feletti részének effektív értéke $X_S = s\sigma_{ki}$ feszültséggel előfeszített egyutas egyenirányítóval mérhető.

Hátránya a körülményes normalizálás és az, hogy nehezen realizálhatók a kis szinten és nagy frekvenciákon működő egyenirányítók.

Megjegyzés:

Az amplitúdó-eloszlás mérésének további előnye, hogy determinisztikus jelek vizsgálatára is használható, pl. fűrészjelek linearitásának, négyszögjelek felfutási meredekségének, stb. mérésére.