

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Híradástechnika és Infokommunikáció Tanszék



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

AUTOMATIZÁLT KALIBRÁLÓ PROGRAM KÉSZÍTÉSE RÁDIÓFREKVENCIÁS MŰSZERHEZ

Szerző: **Schmiedt Balázs András**
villamosmérnök MSc. szak, II. évf.

Konzulens: **Kovács Róbert Sándor**
tanársegéd

Budapest, 2023.

TARTALOMJEGYZÉK

Bevezetés.....	3
1 Kalibrálás előfeltételei	4
1.1 Felhasznált műszerek és műszerleírások	4
1.3 Felhasznált programok	5
1.3 Műszer környezeti feltételek, stabilizálódási idő és előkészítés kalibrálásra	7
2 Frekvenciafüggés	8
2.1 Generátor frekvenciafüggésének vizsgálata	8
2.2 NRP-Z55 bizonytalanság számítása	9
2.3 A frekvenciafüggés ellenőrző program bemutatása	13
3 Linearitás.....	18
3.1 Generátor linearitásának vizsgálata	18
3.2 A E4446A relatív teljesítmény mérés standard bizonytalansága	21
3.3 A linearitás ellenőrző program bemutatása	25
4 Moduláló generátor.....	32
4.1 Moduláló generátor ellenőrzése.....	32
4.2 Agilent 34401A bizonytalanság számítás AC feszültség méréskor	33
4.3 A moduláló generátor linearitását ellenőrző program bemutatása	37
5 AM modulációs mélység	41
5.1 AM modulációs mélység frekvenciafüggésének ellenőrzése	41
5.2 A E4446A modulációs mélység mérés standard bizonytalansága	42
5.3 Az AM modulációs mélység frekvenciafüggését ellenőrző program bemutatása	43
6 Minősítés, bizonyítvány készítés és mérési eredmények.....	47
6.1 Minősítés	47
6.2 Bizonyítvány készítés	49
6.3 Mérési eredmények.....	51
6.4 Konklúzió és fejlesztési lehetőségek	56
7 Összegzés	57
8 Irodalomjegyzék	58
9 Mellékletek	60

BEVEZETÉS

Munkahelyemen, a Nemzeti Média és Hírközlési Hatóság kalibráló laborjában számos mérőműszert kalibrálunk. A kalibrálás nem keverendő össze a besabályozással, amikor a vizsgált eszközön beállításokat is elvégzünk. Kalibrálás során a vizsgált eszközt összehasonlítjuk egy pontosabb eszköz (etalon) eredményeivel figyelembe véve a mérés bizonytalanságát is. A kalibrálás során mért értékeket összehasonlítjuk a gyártói specifikációban szereplő követelményekkel és ez alapján döntünk az adott műszer megfelelőségéről. A műszerek többségét két évente kalibrálni kell. A kalibrálás az adott műszer bonyolultságától és az ellenőrizni kívánt paraméterek számától függően akár több napig is eltarthat. A hosszú, ismétlődő, monotonitást igénylő folyamatok felgyorsítására célszerű egy automatizált kalibráló szoftvert fejleszteni.

Dolgozatom keretében az NMHH kalibráló laborjában nap, mint nap használt Rohde&Schwarz SMA100B típusú RF jel és mikrohullámú generátor kalibrálását végzem el. A kalibrálás során a laborban használt eljáráson kívül a gyártó által szolgáltatott szervízkönyv utasításait követem. Négy paraméter kalibrálását végzem el, ez a frekvenciafüggés, linearitás, moduláló generátor linearitás és AM modulációs mélység frekvencia-függésének ellenőrzése. A teljesítményméréshez Rohde&Schwarz NRP-Z55 teljesítménymérőfejet és Agilent E4446A spektrumanalizátort használok, feszültségméréshez Agilent 34401A multimétert, az AM modulációs mélység méréshez az Agilent E4446A spektrumanalizátor mérővevő opcióját használom. Az etalonok műszerek specifikációját felhasználva mérési bizonytalanságokat számolok. A műszerek vezérlését GPIB interfészen keresztül valósítom meg.

A dolgozat keretében a négy paraméter automatizált kalibrálását végző programokat teljes egészükben MATLAB nyelven írtam. A programok külön-külön is futtatthatók, de lehetőség van egyszerre történő futtatásra is automatizált bizonyítványkészítéssel. Az etalon műszerek által mért értékek bizonytalanság-számításához az általam írt MATLAB függvényeket használom, amelyek a mérőprogramoktól függetlenül bármikor újra felhasználhatók.

Dolgozatomban először bemutatom a kalibrálás előfeltételeit. A négy kalibrálandó paraméterhez négy külön fejezet tartozik. A fejezeteken belül először a kalibrálás lépéseit mutatom be, amit a bizonytalanság-számítás elmélete követ, végül az általam készített programot mutatom be. Az utolsó fejezetben a minősítés elméletét, a bizonyítványkészítést és a mérési eredményeket részletezem.

1 KALIBRÁLÁS ELŐFELTÉTELEI

1.1 Felhasznált műszerek és műszerleírások

Dolgozatom keretében a Nemzeti Média és Hírközlési Hatóság kalibráló laborjában használt Rohde&Schwarz SMA100B RF jelgenerátor kalibrálását mutatom be. A kalibráláshoz rendelkezésemre áll az NMHH-ban generátorokhoz használt kalibrálási eljárás, illetve az SMA100B adatlapja [1], felhasználói útmutatója [2] és szervízkönyve [3]. Négyféle paraméter ellenőrzését végzem el a generátoron a szervízkönyve alapján. A négy paraméter a következő (zárójelben a szervízkönyvben lévő angol elnevezések):

- Frekvenciafüggés ellenőrzés (Checking the Level Data – Level Accuracy)
- Linearitás ellenőrzés (Checking the Level Data – Level Accuracy)
- Moduláló generátor ellenőrzése (Checking the Internal Modulation Generator)
- Amplitúdó moduláció ellenőrzése (Checking the Amplitude Modulation -AM depth error)

A mérésekhez az 1. táblázat felsorolt mérőműszereket használtam. Teljesítményszint méréshez Rohde & Schwarz NRP-Z55 típusú teljesítménymérőfejet használtam, melynek specifikációja a [5]-ös, felhasználói kézikönyve a [6]-os forrásban található. A -30dBm-nél alacsonyabb szintek méréséhez Agilent PSA E4446A spektrumanalizátort használtam, amelynek adatlapja és felhasználói kézikönyve a [7]-es forrásban található AC feszültség méréséhez Agilent 34401A típusú multimétert használtam, melynek a felhasználói kézikönyve a [4]-es forrásban található. Modulációs paraméterek méréséhez Agilent PSA E4446A spektrumanalizátort használtam. Az Agilent PSA E4446A-hoz tartozó mérővevő opció (Option 233) felhasználói kézikönyve a [8]-as forrásban található.

Megnevezése	Gyártó	Típus	Gyári szám
Teljesítmény mérőfej	Rohde&Schwarz	NRP-Z55	130776
Teljesítmény mérő	Rohde&Schwarz	NRP2	
Spektrumanalizátor	Agilent	E4446A	US42510241
Multiméter	Agilent	34401A	US36117006
GPS szinkronizált rubídium etalon	Pendulum	GPS-89/373	SN238674
Hő és páratartalom mérő	Lufft	OPUS20 THI	018.0112.0802.011

1. táblázat: használt etalonok és egyéb eszközök

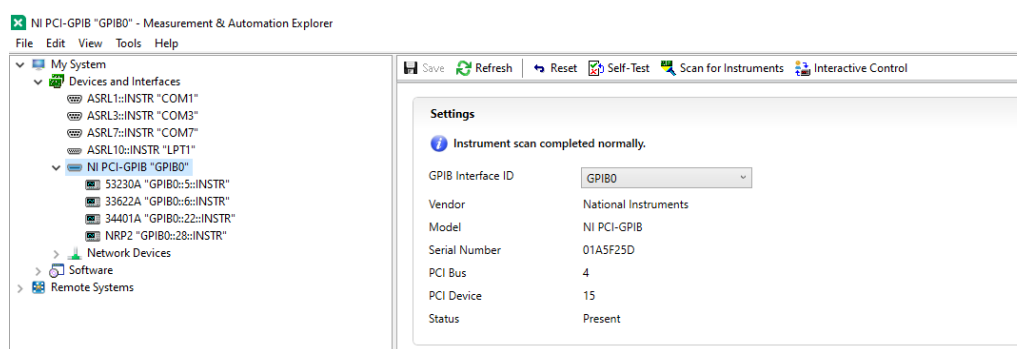
Forrás: Szerkesztette a szerző

A dolgozatban szereplő kiterjesztett bizonytalanság az EA-4/02 dokumentumnak megfelelően az eredő standard bizonytalanságnak a $k = 2$ kiterjesztési tényezővel szorzott értéke, ami normális eloszlás esetén közelítőleg 95% fedési valószínűségnek felel meg ([11]-es forrás).

1.3 Felhasznált programok

Az automatizált mérőprogramot teljes egészében MATLAB-ban írtam, így a forráskódot .m kiterjesztésű fájlokban találjuk. A műszerek vezérlését GPIB interfészen keresztül végeztem el, ezért szükséges az NI-VISA és az NI-488.2 szoftverek telepítése is. Ezen szoftverek tartalmazzák a GPIB interfészen való kommunikációhoz szükséges drivereket. A MATLAB-on belüli műszer vezérlést egy külön letölthető kiegészítővel, a MATLAB Instrument Control Toolbox-al oldottam meg.

A számítógép GPIB portjához csatlakozó műszereket könnyen le tudjuk ellenőrizni az NI-VISA programcsomaggal feltelepített NI-MAX programmal, ez látható a 1.1. ábrán.



1.1. ábra: GBIP porton lévő eszközök vizsgálata NI-MAX segítségével
Forrás: Szerkesztette a szerző

Az NRP-Z55 mérőfejekhez a R&S honlapjáról ingyenesen beszerezhető a R&S®NRP-Toolkit nevű program, amely egyebek mellett tartalmaz egy NRP-Z Uncertainty Calculator nevű programot, amellyel grafikus felületen tudunk bizonytalanságot számítani az NRP-Z55 mérőfejjel mért teljesítményszintekhez. A programhoz tartozik egy felhasználói útmutató is, amely tartalmazza a programban felhasznált számítások képleteit. A 2.2. fejezetben, ezen útmutatót használok fel a számításokhoz.

Szoftver	Verzió
MATLAB	R2022B
MATLAB Instrument Control Toolbox	4.7
MATLAB Report Generator	5.13
NI-VISA	19.0.0
NI-488.2	19.5.0
R&S®NRP-Toolkit for Windows	4.20

2. táblázat: felhasznált szoftverek
Forrás: Szerkesztette a szerző

Az újra felhasználhatóság érdekében elkészítettem hét bizonytalanságszámító MATLAB függvényt, amelyek a kalibráló programtól függetlenül is használható MATLAB függvények.

- Az uNRP_Z55_ABS függvény mérési bizonytalanságot számít a R&S NRP-Z55-tel történt abszolút teljesítményméréshez. Részletezve a 2.2. fejezetben.

- Az uE4446A_Spek_Fidelity függvény mérési bizonytalanságot számít az Agilent E4446A spektrumanalizátorral mért relatív teljesítményhez. Részletezve a 3.2. fejezetben.
- Az u34401A függvény mérési bizonytalanságot számít a Agilent 34401A-val mért AC feszültségméréshez. Részletezve a 4.2. fejezetben.
- Az uPSA_AM függvény mérési bizonytalanságot számít az Agilent E4446A spektrumanalizátorral mért AM modulációs mélység méréshez. Részletezve a 5.2. fejezetben.

Az elkészült programok és függvények forráskódjai, illetve a mérési eredmények megtalálhatók az alábbi tárhelyen:

https://drive.google.com/drive/folders/10YoiyUCRFq3FdUpCkL4pZavnkWgSozQg?usp=share_link

A megosztott mappában a következő fájlok találhatóak:

- AM_depth.m: AM modulációs mélység frekvenciafüggését ellenőrző program
- Frekvenciafugges.m: Frekvenciafüggését ellenőrző program
- Linearitas.m: Linearitást ellenőrző program
- Output_voltage_acc.: Moduláló generátor linearitását ellenőrző program
- SMA100B_kalibralo_program.m: Mind a négy paraméter ellenőrzésre alkalmas program bizonyítvány készítésével
- u34401A.m: 34401A multiméter AC feszültségmérés bizonytalanságszámító függvény
- uE4446A_Spek_Fidelity.m: E4446A spektrumanalizátor relatív teljesítmény mérés bizonytalanságszámító függvény
- uNRP_Z55_ABS.m: NRP-Z55 teljesítménymérőfej abszolút teljesítmény mérés bizonytalanságszámító függvény
- uPSA_AM.m: E4446A spektrumanalizátor AM modulációs mélység mérés bizonytalanságszámító függvény
- Minosites_ILAC_G8_09_2019.m: Minősítést elvégző függvény
- SMA100B_meresi_eredmenyek.xlsx: kalibrálás naplózott eredménye
- SMA100B_2023_April_28_11_51_15: generált kalibrálási bizonyítvány
- template_SMA100B.dotx: sablon a bizonyítvány készítéshez
- valaszt_felulet_GUI.mlapp: grafikus választófelület

A programkódok működése jelen dolgozatban csak vázlatosan kerül kifejtésre, a programok sorról sorra történő kifejtése a forráskódban megtalálható MATLAB kommentek formájában.

1.3 Műszer környezeti feltételek, stabilizálódási idő és előkészítés kalibrálásra

A kalibrálás és a mérési bizonytalanság számításának szempontjából a laboratóriumi környezet hőmérséklete a legmeghatározóbb, amelyet számítások során is figyelembe veszünk. A környezeti hőmérsékletnek a kalibrálás megkezdése előtt egy órával már, és a kalibrálás teljes időtartama alatt az etalonok specifikációjának megfelelő, de legalább $(+23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ hőmérséklettartományban kell lennie. Ezen hőmérséklettartományon kívül kalibrálást nem végzünk. Ha a kalibrálás ideje alatt a hőmérséklet kilép ebből a hőmérséklet tartományból, akkor a kalibrálást részben vagy egészben meg kell ismételni. A laboratóriumi környezet hőmérsékletét külső hőmérővel folyamatosan figyeljük. Kalibrált digitális hőmérőt használunk, amely 0/24 méri és naplózza a mért hőmérsékletet. A hőmérsékleten kívül a laboratóriumi környezet relatív légnedvességét is kalibrált mérőeszkővel mérjük és naplózzuk. Az alkalmazott etalon, illetve a kalibrálandó mérőeszköz ezen jellemzőire előírt normál működési feltételekre vonatkozó határokon belül végzünk csak kalibrálást. A laboratórium villamos hálózati feszültségét egy kalibrált hálózati feszültség adatgyűjtővel mérjük. Feszültségnek 230 V névleges érték ± 10 %-os tartománya az előírás.

A kalibrálás megkezdése előtt biztosítani kell minden műszernek, hogy átvegye a laboratórium hőmérsékletét. Az akklimatizálódás alatt érdemes szemügyre venni a műszert és ellenőrizni azt. Az átvételi lap aláírása előtt feltétlen szemrevételezni kell a műszer külsejének épségét, a tartozékokat és azok épségét, illetve a műszert a műszer beazonosítására szolgáló feliratokat, címkéket (gyártó, típus, gyári szám, tulajdonos/üzemeltető).

A bekapcsolás előtt a műszer csatlakozóit izopropil-alkoholba mártott tisztítópálcával megtisztítjuk, majd szárazkompresszor segítségével nagy nyomással szárazra fújjuk. A kompresszor használata a nedvesség mellett, az esetleges tisztítószálakat is eltávolítja. A műszerek csatlakozóit és az azokhoz csatlakozó kábeleket először kézzel húzzuk meg, majd nyomatékkulcs segítségével húzzuk készre.

A metrológiai jellemzők stabilizálódásához az etalonok és a kalibrálandó eszköz gépkönyveiben megadott bemelegedési idők közül a leghosszabbikat kell biztosítani. Minden műszer 2 órával a mérések megkezdése előtt bekapcsolásra került.

2 FREKVENCIAFÜGGÉS

2.1 Generátor frekvenciafüggésének vizsgálata

A generátor frekvenciafüggésének ellenőrzésekor azt ellenőrizzük, hogy egy adott teljesítményszintet tartva és a jel frekvenciáját változtatva mennyire tér el a visszamért teljesítményszint a generátoron beállítottól. Az ellenőrzés alapjául a [3] forrás 3.4.4.1 fejezete (Level Accuracy) szolgál, így az itt ajánlott frekvenciákon és 0 dBm teljesítményszinten végeztem el a méréseket. A teljesítményszintek mérésére a Rohde&Schwarz NRP-Z55-ös teljesítménymérő fejét használtam, amelynek a vezérlését egy Rohde&Schwarz NRP2 műszer segítségével oldottam meg. A generátor specifikáció 14. oldalán található, illetve ezen dolgozat 3. táblázata tartalmazza az adott frekvenciatartományban érvényes szintpontosságokat, vagyis a maximális megengedett eltérést.

Névleges szint (P)	Frekvencia (f)	Pontosság
-90 dBm ≤ P ≤ +25 dBm	8 kHz < f ≤ 8 MHz	< 1,0 dB
	8 MHz < f ≤ 3 GHz	< 0,5 dB
	3 GHz < f ≤ 20 GHz	< 0,9 dB
	20 GHz < f ≤ 40 GHz	< 1,0 dB
P > +25 dBm	8 MHz < f ≤ 18 GHz	< 1,0 dB
P < -90 dBm	100 kHz < f ≤ 8 MHz	< 1,2 dB
	8 MHz < f ≤ 3 GHz	< 0,8 dB
	3 GHz < f ≤ 20 GHz	< 1,2 dB
	20 GHz < f ≤ 40 GHz	< 1,5 dB

3. táblázat: az SMA100B szint specifikált pontossága
Forrás: Szerkesztette a szerző a [1] forrás 14. oldala alapján

A mérés menete, amelyet automatizálni szeretnék a következő:

1. Csatlakoztatjuk az NRP-Z55-öt az NRP2 alaplámpához
2. Az NRP-Z55-et nullázni kell. Helyezzük el az NRP-Z55-et stabil állásba, ügyelve rá, hogy ne legyen teljesítmény kapcsolva a mérőfejre és indítsuk el a nullázási folyamatot. Maga a folyamat 5-10 másodperc alatt végbemegy.
3. Beállítjuk az NRP-Z55 fejhez az átlagolások számát és a felbontást. A kalibrálás során 64-es átlagolást használunk és 0,01dBm-es felbontást.
4. A generátoron elvégezzük a kezdeti beállításokat:
 - a. Külső órajel forrást állítunk be és fizikailag is összekötjük a generátor hátlapján lévő Ext Ref In bemenetet a laborban lévő 10 MHz-es referencia frekvenciaforrással egy BNC-BNC kábellel.
 - b. Modulációkat kikapcsoljuk
 - c. ALC módot „Auto”-ba állítjuk

5. Fizikailag összekötjük a generátor RF out csatlakozóját az NRP-Z55-tel (2.1. ábra)
6. 0 dBm-es jelszintet állítunk be a generátoron
7. Beállítjuk a kívánt frekvenciát a generátoron és az NRP2-n is. A gyártói leírás az alábbi frekvenciákat ajánlja ellenőrzésre: 8 kHz; 20 kHz; 100 kHz; 200 kHz; 1 MHz; 3 MHz; 8 MHz; 10 MHz; 20 MHz; 52 MHz; 52,01 MHz illetve 12,5 MHz-től 6 GHz-ig 25 MHz-es lépésközzel és 6,025 GHz-től 40 GHz-ig 100 MHz-es lépésközzel.
8. Bekapcsoljuk az generátor RF out kimenetét
9. Az NRP-Z55-tel lemérjük a feszültségszintet dBm-ben
10. Megismételjük a 7. pontban leírtakat minden frekvenciára és elvégezzük a méréseket
11. Kikapcsoljuk az RF out kimenetet



2.1. ábra: Frekvenciafüggés és linearitás ellenőrzés mérési elrendezés. Balra a generátor, NRP-Z55 a generátor RF kimenetéhez csatlakoztatva, jobbra az NRP2

Forrás: Szerkesztette a szerző

2.2 NRP-Z55 bizonytalanság számítása

A R&S teljesítmény mérőfejekhez a gyártó honlapjáról letölthető az R&S NRP-Toolkit nevű szoftvercsomag, ami többek közt tartalmaz egy NRP-Z Uncertainty Calculator nevű alkalmazást. Ezen alkalmazás használható a különböző NPR mérőfejek mérési bizonytalanságának számolásához. Az alkalmazással együtt feltelepül annak útmutatója is, ezen útmutató szolgált segítségül az általam figyelembe vett bizonytalansági összetevők kiszámításában. Az NRP-Z mérőfejek specifikációja a [5]-ös forrásban található. A továbbiakban zárójelben jelzem a specifikációban szereplő bizonytalanságforrás angol elnevezését, ahogyan a specifikációban szerepelnek.

a) Stabilitási bizonytalanság (Uncertainty for absolute power measurements)

A gyártói specifikáció tartalmazza az abszolút teljesítménymérés kiterjesztett bizonytalanságát dB-ben, ennek $k=2$ -vel való osztásával kapjuk a stabilitás standard bizonytalanságát:

$$u_{es}[dB] = \frac{U_{es}}{2} \quad (1)$$

A mérés számításakor a gyártói specifikáció 37. oldalán lévő táblázat adatait használtam fel (ezen táblázat kivonatát tartalmazza ezen dolgozat 4. táblázata) és a $+15^{\circ}\text{C}$ és $+35^{\circ}\text{C}$ közötti hőmérsékelt értékekre megadott bizonytalanságokkal számoltam.

Az NRP-Z55 állóhullámarány értékeit a frekvencia függvényében a 4. táblázat tartalmazza.

Frekvencia (f)	Bizonytalanság a hőmérséklet függvényében			VSWR
	20°C-tól 25°C-ig	15°C-tól 35°C-ig	0°C-tól 50°C-ig	
DC =< f <= 100 MHz	0,040 dB	0,046 dB	0,067 dB	1,03
100 MHz < f <= 2,4 GHz	0,048 dB	0,053 dB	0,072 dB	1,06
2,4 GHz < f <= 8,0 GHz	0,054 dB	0,059 dB	0,079 dB	1,13
8,0 GHz < f <= 12,4 GHz	0,063 dB	0,068 dB	0,085 dB	1,13
12,4 GHz < f <= 18,0 GHz	0,082 dB	0,086 dB	0,100 dB	1,16
18,0 GHz < f <= 26,5 GHz	0,086 dB	0,086 dB	0,102 dB	1,22
26,5 GHz < f <= 33,0 GHz	0,101 dB	0,105 dB	0,121 dB	1,28
33,0 GHz < f <= 40,0 GHz	0,108 dB	0,112 dB	0,127 dB	1,28

4. táblázat: az NRP-Z55 specifikált bizonytalansága

Forrás: Szerkesztette a szerző a [5] forrás 37. oldala alapján

b) Illesztetlenségi bizonytalanság (Mismatch uncertainty)

Az illesztetlenségből adódó relatív standard bizonytalanság dB-ben kifejezett értékét a [10]-es forrás 32. oldalának Table 40-3 „A” képletét alapul véve számoljuk:

$$u_{mismatch}[dB] = \frac{10}{\ln 10} * \frac{|\Gamma_g| \cdot |\Gamma_m|}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

Ahol $|\Gamma_g|$ a forrásoldali, illetve $|\Gamma_m|$ a mérőfej-oldali specifikált maximális reflexiós tényező abszolút értéke. Ha a gyártó csak a tipikus értéket adja meg a reflexiós tényezőnek, akkor azt maximális értéknek tekintjük.

Mivel a gyakorlatban sokszor nem a reflexiós tényezőt adják meg a gyártók, ezért azt az állóhullámarányból (VSWR) tudjuk számolni:

$$\Gamma = \frac{\text{VSWR}-1}{\text{VSWR}+1} \quad (3)$$

c) Felbontási bizonytalanság (Display resolution)

$$u_{ef} = \frac{d}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (4)$$

Ahol d az osztásérték, a legkisebb kijelzett helyi érték 1 digitjének megfelelő mennyiség.

d) Kijelzés zaja (Display noise)

A kijelzés zajából eredő bizonytalanságot a következő képlettel számoljuk:

$$u_{ezaj}[dB] = \frac{10 \cdot \log \frac{X_h[W] + P_{zaj}[W] \cdot \sqrt{\frac{10,24}{N \cdot 2 \cdot t_{at}[sec]}}}{X_h[W]}}{2} \quad (5)$$

Ahol: $X_h[W]$ a mért érték wattban kifejezve; P_{zaj} a teljesítmény mérőfej specifikációjában megadott nullpont stabilitás; N a teljesítmény mérőfejen beállított átlagolások száma; t_{at} a teljesítmény mérőfejen a specifikációjában megadott alapértelmezett vagy beállított apertúra idő (aperture time)

A kalibrálás során és a bizonytalanság számításakor a P_{zaj} értékét 25nW-nak tekintjük (Measurement noise).

Az NRP-Z55 mérőfej dBm-ben adja vissza a mért értéket. dBm-ről wattra való átváltás a következő képlettel lehetséges:

$$X_h[W] = \frac{10^{\frac{X_h[dBm]}{10}}}{1000} \quad (6)$$

Ahol $X_h[dBm]$ a mérőfej által mért érték dBm-ben.

e) Nullpont hiba (Zero offset)

Az etalon nullpont hibájából eredő bizonytalanságot a következő képlettel számoljuk:

$$u_{enull}[dB] = \frac{10 \cdot \log \frac{X_h[W] + P_{null}[W]}{X_h[W]}}{2} \quad (7)$$

Ahol P_{null} a specifikációban megadott nullpont hiba.

A kalibrálás során és a bizonytalanság számításakor a P_{null} értékét 25nW-nak tekintjük.

f) Nullpont stabilitás (Zero drift)

Az etalon nullpont stabilitásából eredő bizonytalanságot a következő képlettel számoljuk:

$$u_{enulldrift}[dB] = \frac{10 \cdot \log \frac{X_h[W] + P_{nulldrift}[W]}{X_h[W]}}{2} \quad (8)$$

Ahol $P_{nulldrift}$ a specifikációban megadott nullpont stabilitás.

A kalibrálás során és a bizonytalanság számításakor a $P_{nulldrift}$ értékét 8nW-nak tekintjük.

Az etalon kijelzési zajából, nullpont hibájából és nullpont stabilitásából eredő bizonytalanságokat csak a specifikációban megadott kisebb teljesítmény mérése esetén kell figyelembe venni. A gyártói specifikáció 70. oldala alapján, ha -20dBm-nél magasabb teljesítményeket mérünk, akkor a következő egyszerűsítésekkel élhetünk:

$$u_{ezaj} = u_{enull} = u_{enulldrift} = 0 \quad (9)$$

Az eredő standard bizonytalansága a fentiek alapján:

$$u_{er} = \sqrt{u_{es}^2 + u_{mismatch}^2 + u_{ef}^2 + u_{eza}^2 + u_{enull}^2 + u_{enulldrift}^2} \quad (10)$$

A fentiekben leírtakat alapul véve készítettem el a uNRP_Z55_ABS nevű MATLAB függvényt, melynek forráskódja a uNRP_Z55_ABS.m fájlban található. A függvény dB-ben adja vissza a teljesítménymérés bizonytalanságát. A függvény hét bemenő paraméterrel rendelkezik:

- frekvencia: az NRP2-n beállított frekvencia
- X_h: a mérőfej által mért érték
- atlag: a beállított átlagolás száma
- felb: a beállított felbontás
- VSWR_generator: a mérőfejhez csatlakoztatott generátor állóhullámaránya
- T_max: mérés során elért maximális környezeti hőmérséklet
- T_min: mérés során elért minimális környezeti hőmérséklet

Az uNRP_Z55_ABS.m forráskódjának értelmezése:

1. sor: a függvény elnevezése és bemenő paraméterek megadása

2-56. sor: a 4. táblázatnak megfelelően a hőmérséklet tartomány és a frekvencia

függvényében kiszámítjuk az ues értékét. Az (1)-es egyenlet alapján a kiterjesztési tényező értéke 2, ezért 2-vel osztjuk a specifikációban szereplő értéket.

58-70. sor: a 'VSWR_NRP' változóba kerül a mérőfej állóhullámarány értéke a frekvencia függvényében. Értékek a 4. táblázatból

72-73. sor: a generátor és az NRP mérőfej állóhullámarány értékének átkonvertálása gamma értéké a (3)-as egyenlet szerint

74. sor: az illesztetlenségből származó bizonytalanság kiszámítása a (2)-es egyenlet alapján a 'u_mismatch' változóba

76. sor: felbontásból eredő bizonytalanság kiszámítása (4)-es egyenlet alapján

78. sor: a mért érték dBm-ról W-ra váltása és 'X_h_watt'-ba írása, a (6)-es egyenlet alapján
 79-93. sor: kijelzés zaja, nullponti hiba és nullponti stabilitás értékének meghatározása. Ha a mért érték -20 dBm-nél magasabb, akkor a (9)-es egyenlet szerint a 79-81. sorban nullázzuk az u_ezaj, u_enull u_enulldrift értékeket. A 84-86. sorban kijelzés zajának számítása a (6)-os egyenlet alapján. A 88-89. sorban nullponti hiba számítása a (8)-as egyenlet alapján. A 91-92. sorban nullponti stabilitás számítása a (9)-es egyenlet alapján.

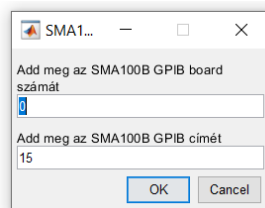
95. sor: a bizonytalansági összetevők négyzetes összegzése és gyökvonása a (10)-es egyenlet alapján

96. sor: függvény vége

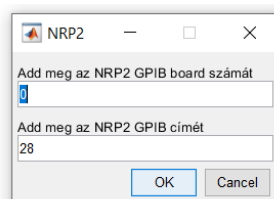
2.3 A frekvenciafüggés ellenőrző program bemutatása

A 2.1 pontban bemutatott mérés leírás alapján készítettem egy automatizált frekvenciafüggés ellenőrző programot, amely a 'Frekvenciafugges.m' fájlban található. A program működését a 2.4. ábra alapján mutatom be. A program forráskódja soronként tartalmazza az adott kódsorok jelentését, ezért ebben a fejezetben csak hivatkozok a kód adott soraira, de nem fejtem ki őket.

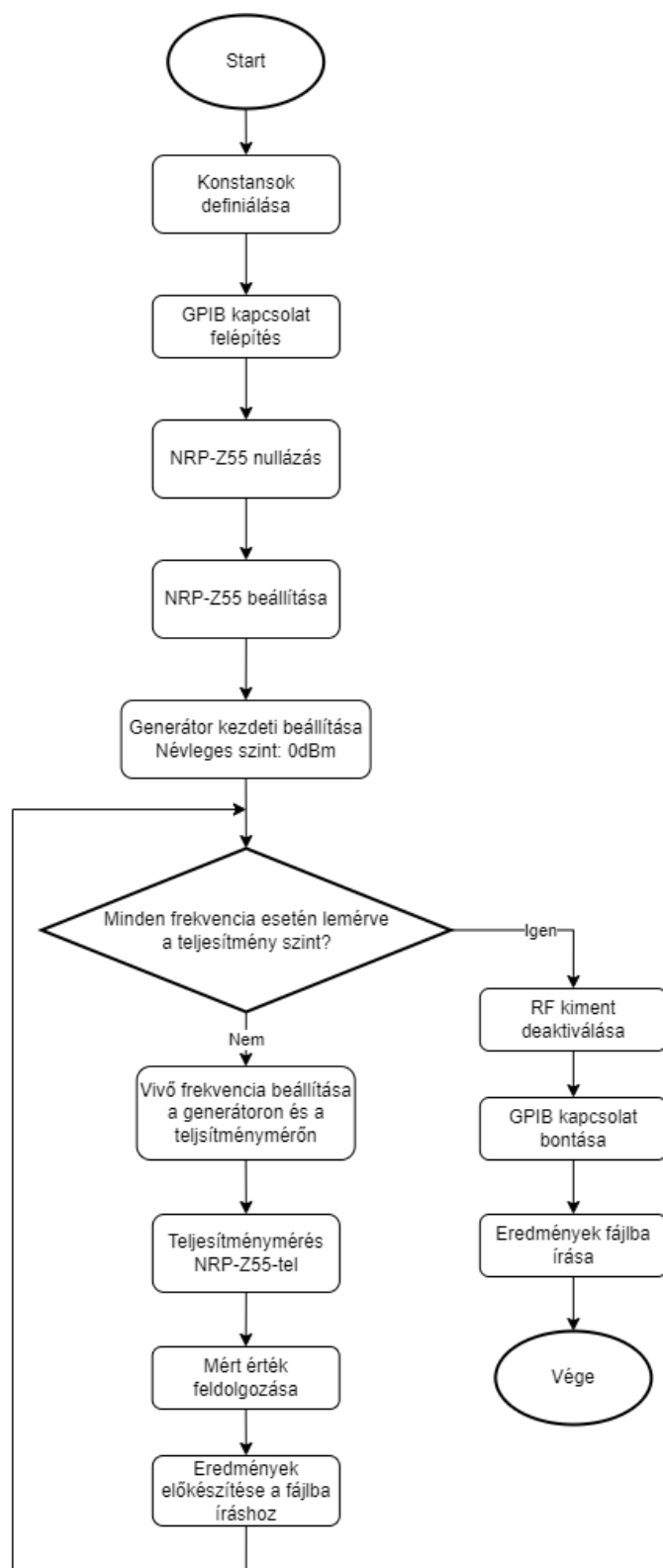
A kód néhány változó definiálásával kezdődik (1-7. sor). Az ellenőrizni kívánt frekvenciaértékeket három tömbben definiálom, majd veszem ezen tömbök unióját. Nagy előnye ezen módszernek, hogy az "A" tömb könnyen módosítható, így akár új frekvenciák is hozzáadhatók a programhoz. Természetesen a kész programot nem szokás módosítani, ez inkább a debuggolási fázisban hasznos. Ezután felépítjük a GPIB kapcsolat az SMA100B-val (9-15. sor). Először 2.2. ábra szerinti ablak jelenik meg, amelyen a felhasználó beállíthatja az SMA100B GPIB board számát és GPIB címét.



2.2. ábra: GPIB board szám és GPIB cím kérése az SMA100B generátorhoz
 Forrás: Szerkesztette a szerző



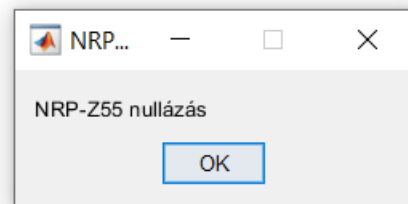
2.3. ábra: GPIB board szám és GPIB cím kérése az NRP2-höz
 Forrás: Szerkesztette a szerző



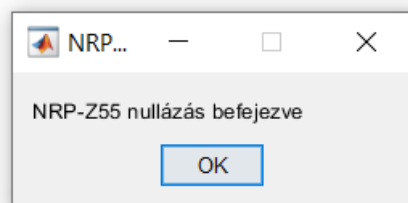
2.4. ábra: Frekvenciafüggés ellenőrző program jelfolyam diagramja
Forrás: Szerkesztette a szerző

A folytatásban a R&S NRP2-vel való kapcsolat felvétel valósul meg (17-23. sor). A GPIB board számát és GPIB címét a felhasználónak kell megadnia, ez látható a 2.3. ábrán. Alapértelmezett értékek esetén elég az OK gombra nyomni a folytatáshoz.

A kapcsolat kiépítése után nullázom az NRP-Z55-ös fejet (25-30. sor). A nullázás kezdetét és végét felugró ablakok jelzik a 2.5. és 2.6. ábra szerinti módon.



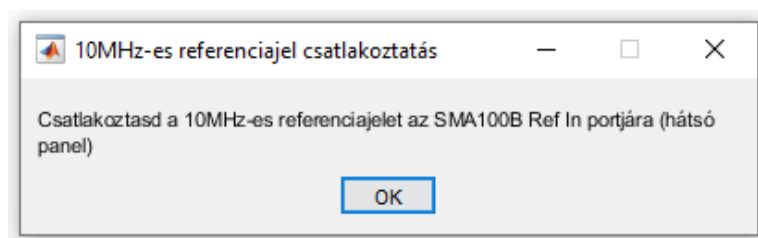
2.5. ábra: NRP-Z55 nullázás kezdete
Forrás: Szerkesztette a szerző



2.6. ábra: NRP-Z55 nullázás befejezve
Forrás: Szerkesztette a szerző

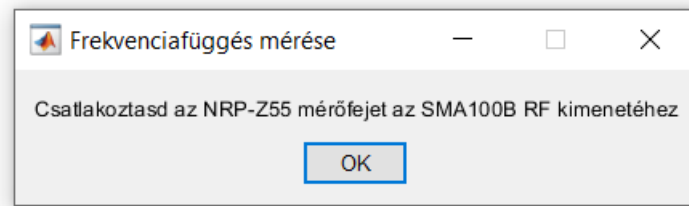
A nullázás után az NRP beállításait végzem el (32-34. sor). 64-as átlagolást és 0,01 dB-es felbontást állítok be. A folyamatos mérést kikapcsolom, a mérések ugyanis parancsra kezdődnek majd.

Az NRP2 után a generátor kezdeti beállításait végzem el (36-42. sor). Először egy felugró ablak utasít a fizikai kapcsolatok kialakítására, a 2.7. ábrán látható módon. A generátort resetelése után biztonsági okokból deaktiválom az RF kimenetet. Szervíz utasítás szerint az ALC-t (Automatic Level Control) automatikusra állítom, CW frekvenciamódot állítok be és dBm mértékegységet. Generátor teljesítményszintnek 0 dBm-et állítok be, a frekvenciafüggés ellenőrzése végig ezen szint mellett kerül végrehajtásra.



2.7. ábra: 10 MHz-es referencijel csatlakoztatása az SMA100B Ref In bemenetére
Forrás: Szerkesztette a szerző

Egy felugró ablak ad utasítást az NRP-Z55 csatlakoztatása az SMA100B RF bemenetére, a 2.8. ábrán látható módon és aktiválásra kerül azt RF kimenet (44-47. sor).



2.8. ábra: NRP-Z55 csatlakoztatása az SMA100B RF bemenetére
Forrás: Szerkesztette a szerző

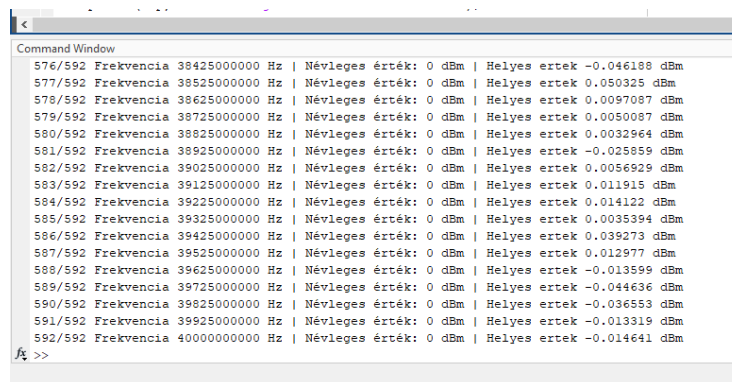
A programon belül egy for ciklus (49-79. sor) annyiszor fut le, ahány elem van a 'frekvenciak' nevű tömbbe. Ezen for cikluson belül történik maga a mérés. Az 50. sorban szöveggé alakítom az aktuális frekvenciaértéket, amely szöveget így be tudok ágyazni a 51. és 52 sorban lévő GPIB parancsba, amelyek az teljesítménymérő és a generátor frekvenciáját állítják be. A 55-57. sorban történik a teljesítménymérés elindítása, illetve az mérési eredmény lekérdezése.

A mért érték feldolgozásra kerül (57-67. sor)

- A mért értéket nevezhetjük helyes értéknek, mivel etalon státuszú teljesítménymérővel mérem meg a teljesítményt
- A névleges érték minden frekvencián 0 dBm.
- A hiba a névleges érték és a helyes érték különbsége.
- A gyártó specifikáció 14. oldala alapján a maximális megengedett eltérést az általam írt level_accuracy_delta(frek) függvény számolja ki, amely a frekvencia függvényében visszaadja a megengedett hibát. Ezen delta értéket kivonva, illetve hozzáadva a névleges értékhez adódik az alsó és felső határ.
- A teljesítménymérés mérési bizonytalanság számítása az általam írt uNRP_NRP_Z55_ABS függvénnyel valósul meg. Mivel közvetlen mérés történik, ezért ez a mérési bizonytalanság tekinthető a mérés standard mérési bizonytalanságának.
- A mérés standard mérési bizonytalansága mellett kiszámítható egy ideális standard mérési bizonytalanság is. Azért ideális, mert kiszámításakor a uNRP_NRP_Z55_ABS függvényben a generátor RF csatlakozójának állóhullámarányát 1-nek tekintjük, ezzel csökkentve az illesztetlenségből származó bizonytalanságot.
- A kiterjesztett mérési bizonytalanság a standard mérési bizonytalanság és a kiterjesztési tényező szorzata. A kiterjesztési tényező értéke $k=2$, ami normál eloszlás esetén 95%-os fedési valószínűséget jelent. A kiterjesztett mérési bizonytalanságot két valódi értékes jegyre kerekítve szokás megadni.

- A kalibrálási és mérési képesség az ideális standard mérési bizonytalanság és a kiterjesztési tényező szorzata. A kiterjesztési tényező értéke $k=2$.

A dokumentálandó értékeket a 'frekvenciafugges_tomb' nevű tömbbe gyűjtöm, megformázva, szöveggént (70-77. sor). Dokumentálásra kerül a frekvencia, a névleges érték, a helyes érték, a hiba, az alsó határ, a felső határ, a kiterjesztett mérési bizonytalanság és a minősítés. A minősítés a 6.1. fejezetben leírtak szerint történik, az általam írt Minosites_ILAC_G8_09_2019 függvényel. A program a MATLAB parancssoros ablakában futás közben kijelzi az aktuális frekvencia értéket, névleges és helyes értéket a 2.9. ábra szerint (78. sor).



```

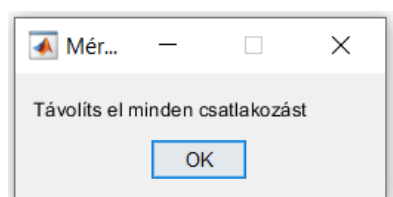
Command Window
576/592 Frekvencia 38425000000 Hz | Névleges érték: 0 dBm | Helyes érték -0.046188 dBm
577/592 Frekvencia 38525000000 Hz | Névleges érték: 0 dBm | Helyes érték 0.050325 dBm
578/592 Frekvencia 38625000000 Hz | Névleges érték: 0 dBm | Helyes érték 0.0097087 dBm
579/592 Frekvencia 38725000000 Hz | Névleges érték: 0 dBm | Helyes érték 0.0050087 dBm
580/592 Frekvencia 38825000000 Hz | Névleges érték: 0 dBm | Helyes érték 0.0032964 dBm
581/592 Frekvencia 38925000000 Hz | Névleges érték: 0 dBm | Helyes érték -0.025859 dBm
582/592 Frekvencia 39025000000 Hz | Névleges érték: 0 dBm | Helyes érték 0.0056929 dBm
583/592 Frekvencia 39125000000 Hz | Névleges érték: 0 dBm | Helyes érték 0.011915 dBm
584/592 Frekvencia 39225000000 Hz | Névleges érték: 0 dBm | Helyes érték 0.014122 dBm
585/592 Frekvencia 39325000000 Hz | Névleges érték: 0 dBm | Helyes érték 0.0035394 dBm
586/592 Frekvencia 39425000000 Hz | Névleges érték: 0 dBm | Helyes érték 0.039273 dBm
587/592 Frekvencia 39525000000 Hz | Névleges érték: 0 dBm | Helyes érték 0.012977 dBm
588/592 Frekvencia 39625000000 Hz | Névleges érték: 0 dBm | Helyes érték -0.013599 dBm
589/592 Frekvencia 39725000000 Hz | Névleges érték: 0 dBm | Helyes érték -0.044636 dBm
590/592 Frekvencia 39825000000 Hz | Névleges érték: 0 dBm | Helyes érték -0.036553 dBm
591/592 Frekvencia 39925000000 Hz | Névleges érték: 0 dBm | Helyes érték -0.013319 dBm
592/592 Frekvencia 40000000000 Hz | Névleges érték: 0 dBm | Helyes érték -0.014641 dBm
fx >>

```

2.9. ábra: Visszajelzés a felhasználónak
Forrás: Szerkesztette a szerző

A mérések elvégzése után deaktiválom az RF kimenetet és bontom a GPIB kapcsolatokat (80-82. sor). A 'frekvenciafugges_tomb' tömböt először táblázattá alakítom és fejléc címetek adok hozzá. A táblázatot egy .xlsx fájlba írom a 'Frekvenciafüggés' munkalapra (84-87. sor). A beírt értékek a 2.11. ábrán láthatóak. Végül megkérem a felhasználót a csatlakozások bontására a 2.10. ábra szerint (89. sor).

A gyártói specifikációt alapul véve az általam írt level_accuracy_delta(frek) függvény visszaadja az bemeneti paraméterként Hz-ben megadott frekvenciaérték esetén érvényes pontosságot (90-100. sor). A gyártói specifikációt alapul véve az általam írt SMA100B_VSWR(frek) függvény visszaadja az bemeneti paraméterként Hz-ben megadott frekvenciaérték esetén érvényes RF kimenet állóhullámarányát (103-109.sor).

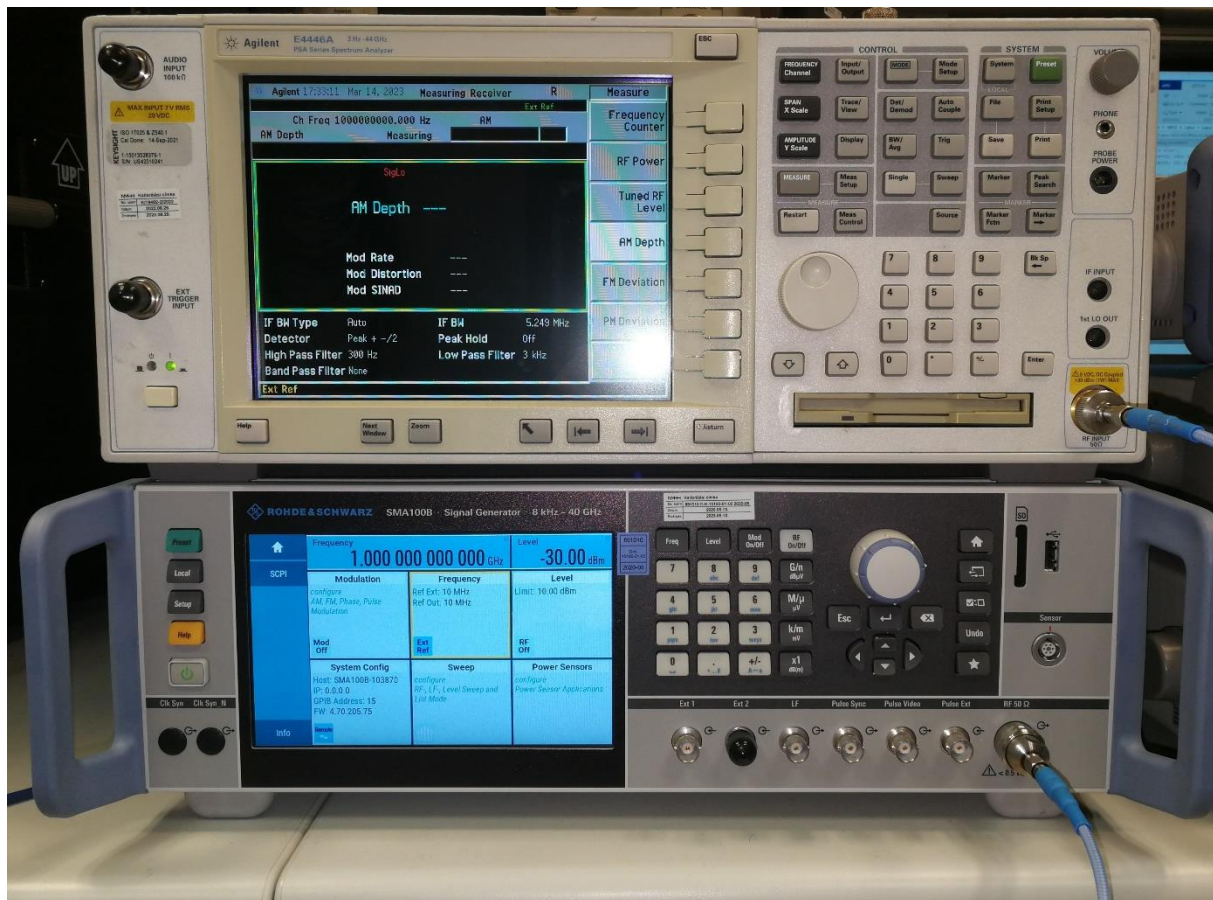


2.10. ábra: Felhasználó utasítása a csatlakozások bontására
Forrás: Szerkesztette a szerző

3 LINEARITÁS

3.1 Generátor linearitásának vizsgálata

A generátor linearitásának ellenőrzésekor egy adott frekvenciát tartva és a jel teljesítményszintjét változtatva mérjük a generátor által szolgáltatott jel teljesítményszintjét. Az ellenőrzés alapjául a [3] forrás 3.4.4.1 fejezete (Level Accuracy) szolgál, így az itt ajánlott frekvenciákon és teljesítményszinteken végeztem el a teljesítményszintek ellenőrzését. A generátor specifikáció 14. oldalán található táblázat tartalmazza az adott frekvenciatartományban érvényes szintpontosságokat, vagyis a maximális megengedett eltérést. A gyártói szervízkönyv 60. oldalának megfelelően a teljesítményszintet +20 dBm-től -100 dBm-ig csökkentjük 5 dB-es lépésközzel. A teljesítményszintek mérésére két műszert is használtam. Mivel az NRP-Z55 mérőfej a 20 dBm és -30 dBm közötti tartományban használható, ezért a -25 dBm-nél alacsonyabb szintek mérésére egy Agilent PSA E4446A spektrumanalizátort használtam. Ez a spektrumanalizátor 3 Hz-től 44 GHz-ig működik, és segítségével kiterjeszthető a dinamika tartomány további 75 dB-lel.



3.1. ábra: Linearitás mérési elrendezés E4446A-val történő mérés esetén
Forrás: Szerkesztette a szerző

A mérés menete, amelyet automatizálni szeretnék a +20 dBm és -25 dBm közötti tartományban a következő:

1. Csatlakoztatjuk az NRP-Z55-öt az NRP2 alaplámpához.
2. Az NRP-Z55-öt nullázni kell. Helyezzük el az NRP-Z55-öt stabil állásba, ügyelve rá, hogy ne legyen teljesítmény kapcsolva a mérőfejre és indítsuk el a nullázási folyamatot. Maga a folyamat 5-10 másodperc alatt végbemegy
3. Beállítjuk az NRP-Z55 fejhez az átlagolások számát és a felbontást. A kalibrálás során 16-os átlagolást használunk és 0,01dBm-es felbontást.
4. A generátoron elvégezzük a kezdeti beállításokat:
 - a. Külső órajel forrást állítunk be és fizikailag is rákötjük az eszköz hátlapján lévő Ext Ref In bemenetre a laborban lévő 10 MHz-es etalon frekvencia jelet
 - b. Modulációkat kikapcsoljuk
 - c. ALC módot „Auto”-ba állítjuk
5. Fizikailag összekötjük a generátor RF out csatlakozóját az NRP-Z55-tel. A mérési elrendezés a 2.1. ábrán látható.
6. Beállítjuk a fix frekvenciát az NRP2-n és a generátoron is. A gyártói szervízkönyv ajánlása szerint a következő frekvenciákakon érdemes elvégezni a linearitás ellenőrzését:
 - 8 kHz; 101 kHz; 8 MHz; 51 MHz; 99 MHz; 487,5 MHz
 - 987,5 MHz-től 5987,5 MHz-ig 1 GHz-es lépésközzel
 - 5987,5 MHz-től 11987,5 MHz-ig 2 GHz-es lépésközzel
 - 13987,5 MHz-től 19987,5 MHz-ig 2 GHz-es lépésközzel
 - 21987,5 MHz-től 29987,5 MHz-ig 2 GHz-es lépésközzel
 - 31800 MHz
 - 33987,5MHz-től 39987,5MHz-ig 2 GHz-es lépésközzel
7. Kezdeként +20 dBm-es jelszintet állítunk be a generátoron és bekapcsoljuk az generátor RF out kimenetét
8. Az NRP-Z55-tel lemérjük a teljesítményszintet dBm-ben.
9. Csökkentjük a generátor teljesítményszintjét 5dB-el
10. Addig ismételjük 8. és 9. pontban leírtakat, amíg -25 dBm-es szintet le nem mérjük
11. Megismételjük a 6-10. pontban leírtakat minden frekvencián (a 6. pontban részletezett frekvenciákon)
12. Kikapcsoljuk a generátor RF out kimenetet

A mérés menete, amelyet automatizálni szeretnék a -30 dBm és -100 dBm közötti tartományban a következő:

1. Az E4446A spektrumanalizátoron elvégezzük a kezdeti beállításokat:
 - a. Spektrumanalizátor üzemmódot választjuk
 - b. futtatjuk a belső beszabályozást (System→Alignments)
 - c. Resolution Bandwidth: 10 Hz
 - d. Span: 1 kHz
 - e. Belső csillapító (Attenuator): 10 dB
 - f. Az átlagolást 16-ra állítjuk
2. A generátoron elvégezzük a kezdeti beállításokat:
 - a. Külső órajel forrást állítunk be és fizikailag is rákötjük az eszköz hátlapján lévő Ext Ref In bemenetre a laborban lévő 10 MHz-es etalon frekvencia jelet
 - b. Modulációkat kikapcsoljuk
 - c. ALC módot „Auto”-ba állítjuk
3. Fizikailag összekötjük a generátor RF out csatlakozóját a spektrumanalizátor bemenetével egy SMA-SMA kábellel. A mérési elrendezés az 3.1. ábrán látható.
4. Beállítjuk a fix frekvenciát az spektrumanalizátoron és a generátoron is. A frekvenciák megegyeznek az előzőekben tárgyaltakkal:
 - 8 kHz; 101 kHz; 8 MHz; 51 MHz; 99 MHz; 487,5 MHz
 - 987,5 MHz-től 5987,5 MHz-ig 1 GHz-es lépésközzel
 - 5987,5 MHz-től 11987,5 MHz-ig 2 GHz-es lépésközzel
 - 13987,5 MHz-től 19987,5 MHz-ig 2 GHz-es lépésközzel
 - 21987,5 MHz-től 29987,5 MHz-ig 2 GHz-es lépésközzel
 - 31800 MHz-en
 - 33987,5MHz-től 39987,5MHz-ig 2 GHz-es lépésközzel
5. Kezdeként -25 dBm-es jelszintet állítunk be a generátoron és bekapcsoljuk az generátor RF out kimenetét
6. A spektrumanalizátoron a Center frekvenciát a generátorral megegyező frekvenciájúra állítjuk és a Marker segítségével megkeressük a spektrumvonal csúcsát
7. Ezt a -25 dBm-en mért abszolút teljesítményszintet feljegyezzük a bizonytalanságszámítások elvégzéséhez, majd a s spektrumanalizátoron Delta markert állítunk be. Ettől kezdve a spektrumanalizátor a -25dBm-től való eltérést fogja kijelezni a továbbiakban.

8. Összeadjuk az NRP-Z55 mérőfej által -25 dBm névleges szint esetén mért értéket és a spektrumanalizátor által kijelzett relatív értéket, ez adja a mérés egyenletét. A kábel csillapítását elhanyagolhatjuk, mivel relatív teljesítményt mérünk.
9. Csökkentjük a generátor teljesítményszintjét 5 dB-el és újra lemérjük a teljesítményszintet dB-ben.
10. A 8-9. pontot ismételjük, amíg a generátoron -100 dBm-et is beállítottuk
11. Kikapcsoljuk a Markert
12. Megismétljük a 4-11. pontban leírtakat minden frekvencián a 4. pontban bemutatott ajánlás alapján
13. Kikapcsoljuk az RF out kimenetet

3.2 A E4446A relatív teljesítmény mérés standard bizonytalansága

A spektrumanalizátor specifikációját a [7]-es forrás tartalmazza A spektrumanalizátorral végzett relatív teljesítménymérés bizonytalanságának kiszámításához a következő bizonytalanság összetevők szükségesek:

a.) Stabilitási bizonytalanság (Realtive Fidelity)

A gyártói specifikáció 70. oldalán található a linearitás kiterjesztett bizonytalanság számítási összefüggései dB-ben, ennek $k=3$ -mal (konfidencia intervallum 3σ) való osztásával kapjuk a stabilitás standard bizonytalanságát:

$$u_{espa} = \frac{U_{espa}}{3} \quad (11)$$

Ahol az U_{espa} kiszámítása 70. oldalon leírtak szerint történik. Először a bemeneten mérhető teljesítmény abszolút értékét érdemes meghatározni, ami a referenciaszint (pref) és a relatív szint (prel) összege.

$$inputlevel = pref + prel \quad (12)$$

A spektrumanalizátor RF bemenete után a jel egy belső csillapítón halad át mielőtt mintavételezésre kerülne. Ezen szintet, amely a belső csillapítóval történő csillapítás után keletkezik, mixer szintnek (Mixer level) nevezi a specifikáció. Kiszámításához a (12)-es egyenletben kiszámolt inputlevel és a referenciaszint (pref) közül kiválasztjuk a nagyobb értékűt és kivonjuk belőle a belső csillapító értékét:

$$ML = \begin{cases} inputlevel - \text{belső csillapító}, & \text{ha } inputlevel > pref \\ pref - \text{belső csillapító}, & \text{ha } inputlevel \leq pref \end{cases} \quad (13)$$

Az így keletkezett mixer szinthez három értéket határozunk meg a 5. táblázat szerint.

Mixer szint (ML)	A	B1	C1
-20 dBm < ML < -12 dBm	0,011 dB	0,007	0,08 dB
-29 dBm < ML < -20 dBm	0,011 dB	0,0015	0,04 dB
Zaj < ML < -29 dBm	0,001 dB	0,001	0,04 dB

5. táblázat: A Mixer szint (ML) által meghatározott A, B1, és C1 értékek

Forrás: Szerkesztette a szerző a [7] forrás 70. oldala alapján

A spektrumanalizátoron beállított RBW szintnek megfelelően két további érték határozandó meg a 6. táblázat szerint.

RBW	B2	C2
≥ 10 kHz	0,000	0,000 dB
≤ 2 kHz	0,0035	0,038 dB
Más RBW esetén (RBW Hz-ben megadva)	7/RBW	76 dB/RBW

6. táblázat: Az RBW által meghatározott B2, és C2 értékek

Forrás: Szerkesztette a szerző a [7] forrás 70. oldala alapján

Miután megállapítottuk az A, B1, C1, B2 és C2 értékeket, az U_{espa} kiszámítása a következőképp történik:

$$U_{espa}[dB] = \begin{cases} A + C1 + C2, & \text{ha } (B1 + B2) * |prel| > C1 + C2 \\ A + (B1 + B2) * |prel|, & \text{ha } (B1 + B2) * |prel| \leq C1 + C2 \end{cases} \quad (14)$$

b.) Illesztetlenségi bizonytalanság (Mismatch uncertainty)

Az illesztetlenségből adódó relatív standard bizonytalanság dB-ben kifejezett értékét a [10]-es forrásban található képlettel számoljuk:

$$u_{mis}[dB] = \frac{10}{\ln 10} * \frac{|\Gamma_g| \cdot |\Gamma_m|}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

Ahol $|\Gamma_g|$ a forrásoldali, illetve $|\Gamma_m|$ a mérőfej-oldali specifikált maximális reflexiós tényező abszolút értéke. Ha a gyártó csak a tipikus értéket adja meg a reflexiós tényezőnek, akkor azt maximális értéknek tekintjük.

Frekvencia (f)	VSWR
$f \leq 3$ GHz	1,13
$3 \text{ GHz} < f \leq 18 \text{ GHz}$	1,27
$18 \text{ GHz} < f \leq 26,5 \text{ GHz}$	1,37
$26,5 \text{ GHz} < f \leq 50 \text{ GHz}$	1,57

7. táblázat: A spektrumanalizátor állóhullámaránya

Forrás: Szerkesztette a szerző a [7] forrás 66. oldala alapján

c.) Felbontási bizonytalanság (Display resolution)

$$u_{ef} = \frac{d}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (16)$$

Ahol d az osztásérték, a legkisebb kijelzett helyi érték 1 digitjének megfelelő mennyiség.

d.) Kijelzés zaja (Displayed Average Noise Level)

A gyártói specifikáció 69. oldalának b. pontja szerint a 20 dB-nél nagyobb jel-zaj viszonyra vonatkozó kijelzési zajból eredő bizonytalanság a következő képlet segítségével számítható:

$$u_{epsazaj}[dB] = \frac{\log\left(1 + 10^{\left(-\frac{(S/N + 3[dB])}{20}\right)}\right)}{\sqrt{N}} \quad (17)$$

Ahol az S/N jel zaj arány a következőképp számítható:

$$S/N = (P_{ref}[dBm] + P_{rel}[dB]) - (DANL[dB] + 10 \cdot \log_{10} RBW[Hz]) \quad (18)$$

Behelyettesítve a (18)-as egyenletet a (17)-esbe:

$$u_{epsazaj}[dB] = \frac{\log\left(1 + 10^{\left(-\frac{(P_{ref}[dBm] + P_{rel}[dB]) - (DANL[dB] + 10 \cdot \log(RBW[Hz])) + 3[dB]}{20}\right)}\right)}{\sqrt{N}} \quad (19)$$

Ahol, P_{ref} a referencia teljesítmény dBm-ben; P_{rel} a mért relatív teljesítmény dB-ben; DANL a spektrumanalizátor specifikált 1 Hz-re vonatkozó zajszintje (Displayed Average Noise Level) dBm-ben; RBW a spektrumanalizátoron beállított felbontási sávszélesség Hz-ben; N a spektrumanalizátoron beállított átlagolások száma. A DANL értékét a specifikáció 50. oldala tartalmazza, ezen értékek megtalálhatók 8. táblázatban is.

Frekvencia (f)	20 to 30 °C	0 to 55 °C
$3 \text{ Hz} \leq f < 1 \text{ kHz}$	-110 dBm	-110 dBm
$1 \text{ kHz} \leq f < 10 \text{ kHz}$	-130 dBm	-130 dBm
$10 \text{ kHz} \leq f < 100 \text{ kHz}$	-137 dBm	-137 dBm
$100 \text{ kHz} \leq f < 1 \text{ MHz}$	-145 dBm	-145 dBm
$1 \text{ MHz} \leq f < 10 \text{ MHz}$	-150 dBm	-150 dBm
$10 \text{ MHz} \leq f < 1,2 \text{ GHz}$	-153 dBm	-152 dBm
$1,2 \text{ GHz} \leq f < 2,1 \text{ GHz}$	-152 dBm	-151 dBm
$2,1 \text{ GHz} \leq f < 3 \text{ GHz}$	-151 dBm	-149 dBm
$3 \text{ GHz} \leq f < 6,6 \text{ GHz}$	-151 dBm	-149 dBm
$6,6 \text{ GHz} \leq f < 13,2 \text{ GHz}$	-146 dBm	-145 dBm
$13,2 \text{ GHz} \leq f < 20 \text{ GHz}$	-144 dBm	-142 dBm
$20 \text{ GHz} \leq f < 22,5 \text{ GHz}$	-143 dBm	-141 dBm
$22,5 \text{ GHz} \leq f < 26,8 \text{ GHz}$	-140 dBm	-138 dBm
$26,8 \text{ GHz} \leq f < 31,15 \text{ GHz}$	-142 dBm	-140 dBm
$31,15 \text{ GHz} \leq f < 35 \text{ GHz}$	-134 dBm	-132 dBm
$35 \text{ GHz} \leq f < 38 \text{ GHz}$	-129 dBm	-127 dBm
$38 \text{ GHz} \leq f \leq 44 \text{ GHz}$	-131 dBm	-129 dBm

8. táblázat: A DANL értéke a frekvencia és a hőmérséklet függvényében

Forrás: Szerkesztette a szerző a [7] forrás 50. oldala alapján

20 dB-nél kisebb jel-zaj viszonynál, ezzel a módszerrel kalibrálást nem végzünk.

Az eredő standard bizonytalansága a fentiek alapján:

$$u_{er} = \sqrt{u_{espa}^2 + u_{mis}^2 + u_{ef}^2 + u_{epsazaj}^2} \quad (20)$$

A fentiekben leírtakat alapul véve készítettem el az uE4446A_Spek_Fidelity nevű MATLAB függvényt, melynek forráskódja a uE4446A_Spek_Fidelity.m fájlban található. A függvény dB-ben adja vissza a teljesítménymérés bizonytalanságát. Az uE4446A_Spek_Fidelity függvény tíz bemenő paraméterrel rendelkezik:

- frekvencia: a spektrumanalizátoron beállított vivő frekvencia
- pref: a spektrumanalizátorral mért referencia szint
- prel: a referenciaszinttől való eltérés
- felbontas: a leolvasott érték felbontása
- att: a belső csillapító értéke
- N: a beállított átlagolás száma
- RBW: a beállított RBW értéke
- VSWR_generator: a mérőfejhez csatlakoztatott generátor állóhullámaránya
- tmin: mérés során elért minimális környezeti hőmérséklet
- tmax: mérés során elért maximális környezeti hőmérséklet

Az uE4446A_Spek_Fidelity.m forráskódjának értelmezése:

1. sor: a függvény elnevezése és bemenő paraméterek megadása

2-74. sor: a 8. táblázatnak megfelelően a hőmérséklet tartomány és a frekvencia függvényében kiszámítjuk az DANL értékét.

76. sor: input_level kiszámítása a (12)-es egyenlet alapján

77. sor: ML (Mixer level) kiszámítása. Az inputlevel és a referenciaszint (pref) közül kiválasztjuk a nagyobb értékűt és kivonjuk belőle a belső csillapító értékét, a (13)-as feltételes egyenlet szerint.

78-90. sor: kiszámolt ML értékétől függően megadjuk az 'A', 'B1' és 'C1' változók értékét az 5. táblázatból

91-100. sor: az RBW ML értékétől függően megadjuk a 'B2' és a 'C2' változók értékét a 6. táblázatból

103-107. sor: a stabilitási bizonytalanság számítása a (14)-es feltételes egyenlet alapján

109-117. sor: a frekvencia függvényében a spektrumanalizátor állóhullámarány értékének 'VSWR_PSA' változóba töltése, a 7. táblázat szerinti értékek szerint

119-120. sor: a generátor és az spektrumanalizátor állóhullámarány értékének átkonvertálása gamma értéké a (3)-as egyenlet szerint

121. sor: az illesztetlenségből származó bizonytalanság kiszámítása a (15)-ös egyenlet alapján az 'u_mismatch' változóba

123. sor: felbontásból eredő bizonytalanság kiszámítása (16)-os egyenlet alapján

125. sor: jel/zaj arány számítás a (18)-as egyenlet alapján

126. sor kijelzés zajának számítása a (17)-es egyenlet alapján

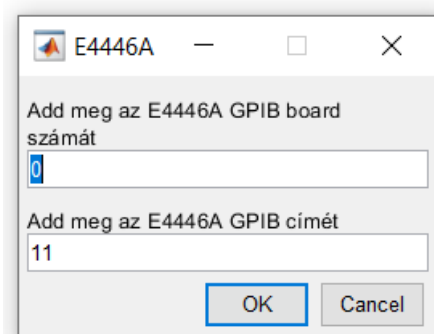
128. sor: a bizonytalansági összetevők négyzetes összegzése a (20)-as egyenlet alapján

129. sor: függvény vége

3.3 A linearitás ellenőrző program bemutatása

A 3.1 pontban bemutatott mérés leírás alapján készítettem egy automatizált frekvenciafüggés ellenőrző programot, amely a 'Linearitas.m' fájlban található. A program működését a 3.3. ábra alapján mutatom be. A program forráskódja soronként tartalmazza az adott kódsorok jelentését, ezért ebben a fejezetben csak hivatkozok a kód adott soraira, de nem fejtem ki őket.

A kód három tömb definiálásával kezdődik (1-7. sor). Az NRP-Z55-tel mérendő szintek az „nrp_szintek” tömbbe, a spektrumanalizátorral mérendő szintek a „psa_szintek” tömbbe kerülnek. Azon frekvenciákon, amelyeken a linearitás ellenőrzését elvégzem, a „linearitas_frekvenciak” tömbbe kerülnek MHz mértékegységként. A GPIB kapcsolat felépítése az előző fejezetekben bemutatott módon történik felugró ablakok segítségével (9-32. sor). Először az SMA100B-hez tartozó ablak jelenik meg (2.2. ábra), majd az NRP2-höz tartozó ablak (2.3. ábra) végül az E4446A-hoz tartozó ablak (3.2. ábra).

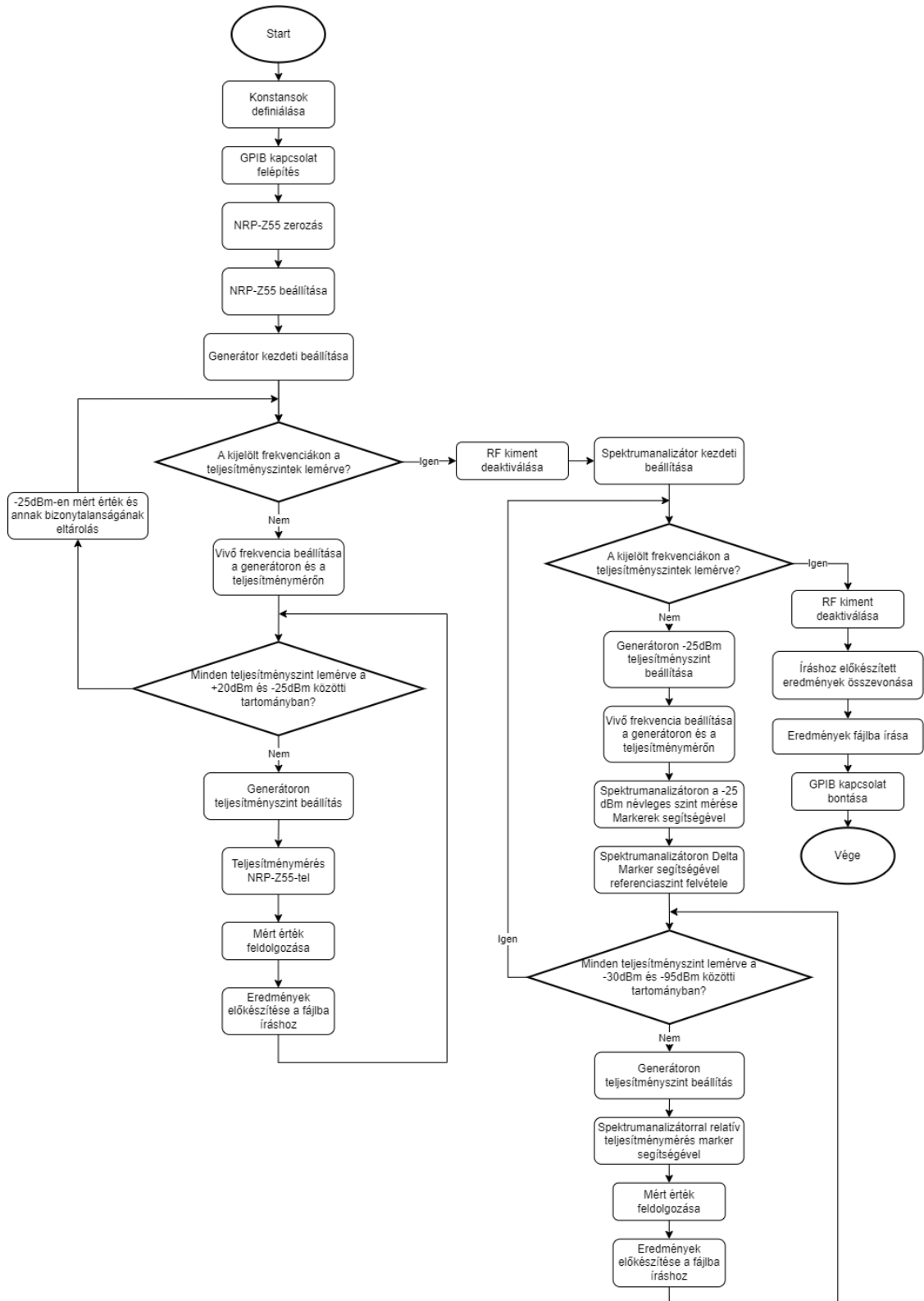


3.2. ábra: GPIB board szám és GPIB cím kérése az E4446A-hoz

Forrás: Szerkesztette a szerző

A kapcsolat felvétel után Az NRP kezdeti beállításait végzem el (34-45. sor). Először nullázom az NRP-Z55-ös fejet (25-30. sor). A nullázás kezdetét és végét felugró ablakok jelzik a 2.5. és 2.6. ábra szerinti módon. A nullázás után 64-es átlagolást és 0,01 dB-es

felbontást állítok be. A folyamatos mérést kikapcsolom, a mérések ugyanis parancsra kezdődnek majd.



3.3. ábra: Linearitás ellenőrző program jelfolyam diagramja
Forrás: Szerkesztette a szerző

Az teljesítménymérő után a generátor kezdeti beállításait végzem el (47-59. sor). Először egy felugró ablak utasít a generátor GPS referencia etalonhoz való csatlakoztatáshoz, a 2.7. ábrán látható módon. A generátort resetelése után biztonsági okokból deaktiválom az RF kimenetet. Szervíz utasítás szerint az ALC-t (Automatic Level Control) automatikusra állítom, CW frekvenciamódot állítok be és dBm mértékegységet. Generátor teljesítményszintnek -25 dBm-et állítok be.

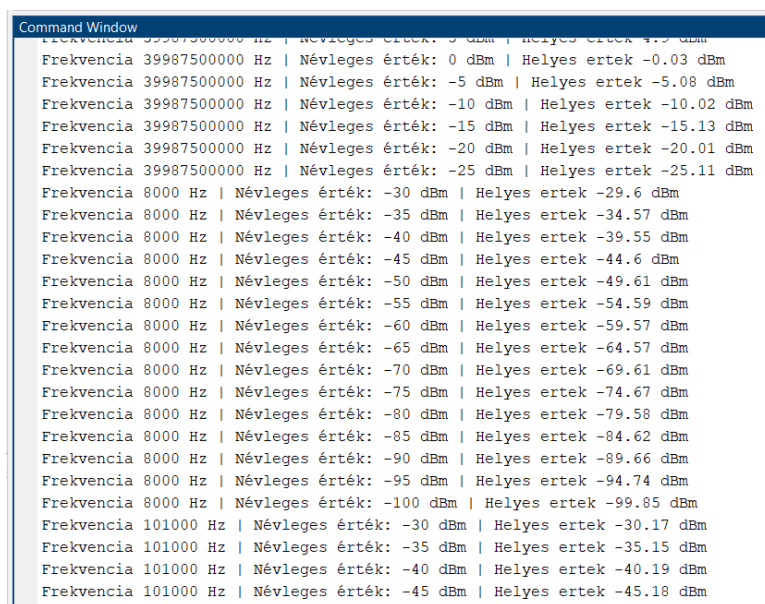
Egy felugró ablakban utasít az NRP-Z55 mérőfej SMA100B RF bemenetével való összekötésére, a 2.8. ábrán látható módon. A csatlakoztatás után aktiválásra kerül az RF kimenet.

A linearitás ellenőrző programmal először az NRP-Z55 mérőfejjel ellenőrizzük a +20 és -25 dBm között teljesítményszinteket. A 63-104. sorig tartó for ciklus annyiszor fut le, ahány elem van a „linearitas_frekvenciak” tömbbe. Ezen for cikluson belül először beállítjuk a generátoron és a mérőfejen is a vivőfrekvenciát, majd egy újabb for ciklus kezdődik. Ebben a 67-98. sorig tartó ciklusban az NRP-vel ellenőrizendő szintek kerülnek lemérésre a ciklus iterációiban. Az 69. sorba kerül beállításra a jelszint. A 72-73. sorban történik a teljesítménymérés elindítása, illetve az mérési eredmény lekérdezése.

A mért érték feldolgozásra kerül (74-85. sor)

- A mért értéket nevezhetjük helyes értéknek, mivel etalon státuszú teljesítménymérővel mérem meg a teljesítményt
- A névleges érték az „nrp_szintek” tömb aktuális eleme
- A hiba a névleges érték és a helyes érték különbsége.
- A gyártó specifikáció 14. oldala alapján a maximális megengedett eltérést az általam írt level_accuracy_delta(frek) függvény számolja ki. Ezen delta értéket kivonva, illetve hozzáadva a névleges értékhez adódik az alsó és felső határ.
- A teljesítménymérés mérési bizonytalanság számítása az általam írt uNRP_NRP_Z55_ABS függvénnyel valósul meg. Mivel közvetlen mérés történik, ezért ez a mérési bizonytalanság tekinthető a mérés standard mérési bizonytalanságának.
- A mérés standard mérési bizonytalansága mellett kiszámítható egy ideális standard mérési bizonytalanság is. Azért ideális, mert kiszámításakor a uNRP_NRP_Z55_ABS függvényben a generátor RF csatlakozójának állóhullámarányát 1-nek tekintjük, ezzel csökkentve az illesztetlenségből származó bizonytalanságot.

- A kiterjesztett mérési bizonytalanság a standard mérési bizonytalanság és a kiterjesztési tényező szorzata. A kiterjesztési tényező értéke $k=2$, ami normál eloszlás esetén 95%-os fedési valószínűséget jelent. A kiterjesztett mérési bizonytalanságot két valódi értékes jegyre kerekítve szokás megadni.
- A kalibrálási és mérési képesség az ideális standard mérési bizonytalanság és a kiterjesztési tényező szorzata. A kiterjesztési tényező értéke $k=2$.



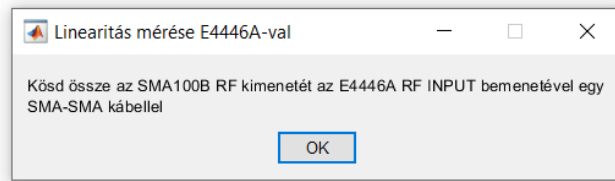
Frekvencia	Névleges érték	Helyes érték
39987500000 Hz	0 dBm	-0.03 dBm
39987500000 Hz	-5 dBm	-5.08 dBm
39987500000 Hz	-10 dBm	-10.02 dBm
39987500000 Hz	-15 dBm	-15.13 dBm
39987500000 Hz	-20 dBm	-20.01 dBm
39987500000 Hz	-25 dBm	-25.11 dBm
8000 Hz	-30 dBm	-29.6 dBm
8000 Hz	-35 dBm	-34.57 dBm
8000 Hz	-40 dBm	-39.55 dBm
8000 Hz	-45 dBm	-44.6 dBm
8000 Hz	-50 dBm	-49.61 dBm
8000 Hz	-55 dBm	-54.59 dBm
8000 Hz	-60 dBm	-59.57 dBm
8000 Hz	-65 dBm	-64.57 dBm
8000 Hz	-70 dBm	-69.61 dBm
8000 Hz	-75 dBm	-74.67 dBm
8000 Hz	-80 dBm	-79.58 dBm
8000 Hz	-85 dBm	-84.62 dBm
8000 Hz	-90 dBm	-89.66 dBm
8000 Hz	-95 dBm	-94.74 dBm
8000 Hz	-100 dBm	-99.85 dBm
101000 Hz	-30 dBm	-30.17 dBm
101000 Hz	-35 dBm	-35.15 dBm
101000 Hz	-40 dBm	-40.19 dBm
101000 Hz	-45 dBm	-45.18 dBm

3.4. ábra: Visszajelzés a felhasználónak
Forrás: Szerkesztette a szerző

A dokumentálandó értékeket a 'tomb_lin_NRP' nevű tömbbe gyűjtöm, megformázva, szöveggént (88-97. sor). Dokumentálásra kerül a frekvencia, a névleges érték, a helyes érték, a hiba, az alsó határ, a felső határ, a kiterjesztett mérési bizonytalanság és a minősítés. A minősítés a 6.1. fejezetben leírtak szerint történik, az általam írt Minosites_ILAC_G8_09_2019 függvényvel. A MATLAB parancssoros ablakában kijelzésre kerül valós időben az aktuális frekvencia, névleges és helyes érték a 3.4. ábra szerint (96. sor). Minden egyes frekvencia esetén az NRP-vel -25dBm névleges szint ellenőrzésekor mért értéket, annak bizonytalanságát, illetve az NRP-vel -25dBm névleges szint ellenőrzésekor mért szint ideális esetre vonatkozó bizonytalanságát eltárolom az 'NRP_utolso_szint' nevű tömbbe (100-102. sor).

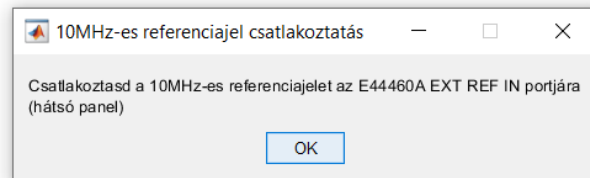
A ciklusok lefutása után deaktiválom az RF kimenetet.

A -30 és -100 dBm közötti jelszintek ellenőrzése az E4446A spektrumanalizátorral történik. A 109. sorban egy felugró ablak utasít a generátor spektrumanalizátorral való összekötésére, az 3.5. ábrán látható módon.



3.5. ábra: SMA100B és E4446A összekötésére utasító ablak
Forrás: Szerkesztette a szerző

A spektrumanalizátor kezdeti beállításakor (111-125. sor) a resetelés után spektrumanalizátor üzemmódot állítok be és futtatom a belső beszabályozást (Alignmet All). Ezután egy felugró ablakkal utasítom a felhasználót a spektrumanalizátor külső referencia frekvenciához való csatlakoztatásához, a 3.6. ábra szerint. A spektrumanalizátoron 1 GHz-es center frekvenciát és 10 dB-es belső csillapítót állítok be. A RefLevel értékét -23 dBm-re, a span értékét 1 kHz-re, a sáv szélességet 10 Hz-re állítom. Az átlagolást bekapcsolom és értékét 16-ra állítom.



3.6. ábra: E4446A összekötése a külső 10MHz-es referencia frekvenciaforrással
Forrás: Szerkesztette a szerző

Ezen kezdeti beállítások után egy for ciklus fut a 129-204. sorig. A „linearitas_frekvenciak” tömb aktuális értékét szöveggé alakítom, miután 1000000-val beszoroztam (ez szorzás a MHz-ről Hz-re való váltás miatt szükséges). A generátoron az iterációban aktuális frekvenciát és -25 dBm teljesítményt állítok be, majd aktiválom az RF kimenetet (130-142. sor).

A 144-162. sorban a spektrumanalizátorral referencia szintet veszek fel marker segítségével. A továbbiakban ezen szinthez viszonyítva mérem az egyre kisebb szinteket. Először a spektrumanalizátor frekvenciáját állítom be, majd törölöm a meglévő markereket. Újraindítom az átlagolást, melynek befejeződése után a marker segítségével megkeresem a maximális értékét a spektrumábrának. Ezen értéket lekérdezem későbbi számításokhoz és delta markert állítok be ezen ponthoz, amittől kezdve ezen pont referenciapontként fog szolgálni.

A 163-202. sorban egy újabb for ciklus fut, amely minden egyes iterációjában az adott teljesítményszint kerül ellenőrzésre. A 165. sorban beállítom a generátor teljesítményszintjét. A 164-176. sorban történik a referenciaponttól való eltérés mérése. Először újraindítom az átlagolást, majd megkeresem a spektrumábrán maximális értékét marker segítségével és lekérdezem az eredményt. A lekérdezett eredmény a korábban már tárgyalt -25 dBm névleges szinten beállított referenciaértéktől való eltérés.

A mért érték feldolgozásra kerül (177-191. sor)

- A lekérdezés során kapott delta értéket hozzá kell adnunk az NRP-Z55-tel azonos frekvencián -25 dBm szint esetén mért értékhez. Ezért is került a 100. sorban külön eltárolásra az NRP-Z55-tel mért helyese érték. Ezen összeget nevezhetjük helyes értéknek.

$$\text{Helyes érték} = X_{NRP_minusz_25dBm}[dBm] - X_{PSA_relatív}[dB] \quad (21)$$

Ahol a $X_{NRP_minusz_25dBm}$, NRP-Z55-tel azonos frekvencián -25 dBm szint esetén mért érték; $X_{PSA_relatív}$ az E4446 által mért relatív teljesítmény

- A névleges érték az „psa_szintek” tömb aktuális eleme
- A hiba a névleges érték és a helyes érték különbsége.
- A gyártó specifikáció 14. oldala alapján a maximális megengedett eltérést az általam írt `level_accuracy_delta(frek)` függvény számolja ki. Ezen delta értéket kivonva, illetve hozzáadva a névleges értékhez adódik az alsó és felső határ.
- A spektrumanalizátorral mért teljesítmény mérési bizonytalanság számítása az általam írt `uE4446A_Spek_Fidelity` függvénnyel valósul meg.
- A spektrumanalizátor mérési bizonytalansága mellett kiszámítható egy ideális standard mérési bizonytalanság is. Azért ideális, mert kiszámításakor a `uE4446A_Spek_Fidelity` függvényben a generátor RF csatlakozójának állóhullámarányát 1-nek tekintjük, ezzel csökkentve az illesztetlenségből származó bizonytalanságot.
- A mérés standard mérési bizonytalanságának kiszámításához négyzetesen összegezni kell az NRP-Z55-tel azonos frekvencián -25 dBm szint esetén mért értékhez tartozó bizonytalanságot (101. sorban kiszámolva). Az összegből gyököt vonva adódik a mérés standard mérési bizonytalansága.

$$u_{meres}[dB] = \sqrt{(u_{NRP_minusz_25dBm}[dB])^2 + (u_{PSA_relatív}[dB])^2} \quad (22)$$

Ahol a $u_{NRP_minusz_25dBm}$, NRP-Z55-tel azonos frekvencián -25 dBm szint esetén mért érték bizonytalansága; $u_{PSA_relatív}$ az E4446 által mért relatív teljesítmény bizonytalansága

- A kiterjesztett mérési bizonytalanság a standard mérési bizonytalanság és a kiterjesztési tényező szorzata. A kiterjesztési tényező értéke $k=2$, ami normál eloszlás

esetén 95%-os fedési valószínűséget jelent. A kiterjesztett mérési bizonytalanságot két valódi értékes jegyre kerekítve szokás megadni.

- A kalibrálási és mérési képesség kiszámítása is hasonlóan történik. Négyzetesen összegezzük az NRP-Z55-tel azonos frekvencián -25 dBm szint esetén mért értékhez tartozó ideális estre vonatkozó bizonytalanságot és a spektrumanalizátorral ideális esetre vonatkozó mérési bizonytalanságot. Az összegből gyököt vonva és összeszorozva a és a kiterjesztési tényezővel adódik a kalibrálási és mérési képesség.

A dokumentálandó értékeket a 'tomb_lin_PSA' nevű tömbbe gyűjtöm, megformázva, szöveggént (193-200. sor). Dokumentálásra kerül a frekvencia, a névleges érték, a helyes érték, a hiba, az alsó határ, a felső határ, a kiterjesztett mérési bizonytalanság és a minősítés. A minősítés a 6.1. fejezetben leírtak szerint történik, az általam írt Minosites_ILAC_G8_09_2019 függvénnyel. A MATLAB parancssoros ablakában kijelzésre kerül valós időben az aktuális frekvencia, névleges és helyes érték a 3.4. ábra szerint (201. sor).

A 153. és 155. illetve a 171. és 173. sorban a maximális marker értéket kereső parancsok szándékosan szerepelnek kétszer a forráskódban. A program debuggolása során gyakran volt tapasztalható, hogy a parancs egyszeri kiadásánál nem reagált rá a spektrumanalizátor.

A ciklusok lefutása után deaktiválom az RF kimenetet.

A dokumentálás céljára létrehozott 'tomb_lin_NRP' és 'tomb_lin_PSA' tömböket egy közös nagy 'linearitas_tomb' nevű tömbbe egyesítem (211-236. sor). Frekvenciánként haladva először beírom az NRP-Z55-tel való méréskor kiszámolt értékeket, majd a spektrumanalizátorral való méréskor kapott értékeket. A tömböt ezután táblázattá alakítom és fejléc címetek adok hozzá. A táblázatot egy .xlsx fájlba írom a 'Linearitás' munkalapra (238-241. sor).

A 159. sorban a PSA által felvett referencia szinteket a 'referencia' nevű tömbbe gyűjti össze a program. A 243-250. sorban az adott frekvenciát és azon frekvencia esetén felvett referenciaszint értéket egy közös 'psa_ref_tomb' nevű tömbbe gyűjtöm, majd táblázattá alakítom és beillesztem a 'Linearitás' munkalapra.

A mérés végén bontom a GPIB kapcsolatokat és megkérem a felhasználót a csatlakozások bontására a 2.10. ábra szerint (242-245. sor).

A kód végén lévő level_accuracy_delt(frek) függvény és a SMA100B_VSWR(frek) függvények működése teljesen megegyezik a 2.3 fejezetben bemutatottakkal.

4 MODULÁLÓ GENERÁTOR

4.1 Moduláló generátor ellenőrzése

Az SMA100B rendelkezik két alacsony frekvenciás jelgenerátorral (angolul LF generator), amelyek jelét moduláláshoz szokás használni. Az LF generátor képes előállítani szinuszos, impulzusszerű, háromszög és trapéz jelalakú jeleket. A kalibrálás során a szinuszos jelalakú jelek ellenőrzését kell elvégezni. Az LF generátor a generátor által szolgáltatott moduláló jelet felhasználhatjuk modulált jel előállítására a műszeren belül (pl. AM, FM, PM jel előállítására), vagy kivezethetjük a jelet az LF1 csatlakozóra, amely a műszer előlapján található BNC csatlakozóként.

Az ellenőrzés alapjául a [3]-as forrás 3.4.5.2 fejezete (Output Voltage Accuracy and Frequency Response) szolgál, így az itt ajánlott feszültség szintek ellenőrzését végeztem el. A szerviz útmutató szerint 1 kHz frekvencia mellett kell elvégezni a 3 mV, 10 mV, 30 mV, 100 mV, 300 mV, 1 V, 2 V, 3 V és 4 V amplitúdójú szinuszjelek feszültségmérését. A mérés tehát egyszerű váltakozó feszültség mérés, amelyhez egy Agilent 34401A etalon multimétert használtam. A generátor specifikáció 40. oldalán található „LF output” táblázat tartalmazza az LF generátor beállítási hibáját, vagyis a maximális hibát, ami a kalibrálás során megengedett. Ez a hiba 1 kHz frekvencia esetén a generátoron beállított érték 1%-a +1 mV lehet.



4.1. ábra: Moduláló generátor ellenőrzés mérési elrendezés
Forrás: Szerkesztette a szerző

A mérés menete, amelyet automatizálni szeretnék a következő:

1. A multiméteren elvégezzük a kezdeti beállításokat:
 - a. AC feszültségmérő üzemmódba kapcsoljuk
 - b. Kiválasztjuk a megfelelő méréshatárt
2. A generátoron elvégezzük a kezdeti beállításokat:

- a. Külső órajel forrást állítunk be és fizikailag is rákötjük az eszköz hátlapján lévő Ext Ref In bemenetre a laborban lévő 10 MHz-es etalon frekvencia jelet
- b. 1kHz frekvenciát állítunk be az LF generátornak (LF Gen Frequency)
3. Fizikailag összekötjük a generátor LF out kimenetét a multiméter feszültségmérő bemenetével. Összekötéshez BNC-BNC kábel és BNC-banán átalakítót használunk. Mérési elrendezés a 4.1. ábrán látható.
4. Beállítjuk a kívánt feszültség szintet generátoron. A gyártó a következő szintek ellenőrzését javasolja: 3 mV, 10 mV, 30 mV, 100 mV, 300 mV, 1 V, 2 V, 3 V és 4 V.
5. Bekapcsoljuk az LF out kimenetet és elvégezzük a mérést
6. A digitek számát úgy választjuk meg, hogy stabil eredményt lássunk. A gyakorlati tapasztalatok alapján így 3 mV esetén 10 μ V felbontással, 10mV és 2 V között 100 μ V felbontással, 3 V-on és felette 1 mV felbontással olvassuk le az eredményt.
7. Megismételjük a 4-6. pontot a további feszültség szintek leméréséhez
8. Deaktiváljuk az LF out kimenetet és megszüntetjük a csatlakozásokat

4.2 Agilent 34401A bizonytalanság számítás AC feszültség méréskor

A kalibrálás során az AC feszültség mérésére a Keysigth 34410A etalon multimétert használtam. A multiméter használati útmutatója a [4] forrásban található. A használati útmatató 8. fejezete tartalmazza a multiméter specifikációját is, ami alapján a feszültség mérés bizonytalanságszámítását elvégezhető. A 8. fejezet váltakozó feszültség mérésére vonatkozó része a 218-219. oldalon található.

Az AC feszültség mérő üzemmód bizonytalanságát a következő képlet alapján számíthatjuk:

$$u_{er} = \sqrt{u_{es}^2 + u_{ef}^2 + u_{et}^2 + u_{efilter}^2} \quad (23)$$

Ahol u_{es} az etalon multiméter stabilitása annak két kalibrálása között; u_{es} a felbontásból eredő standard bizonytalanság; u_{et} a hőmérsékletből eredő standard bizonytalanság; $u_{efilter}$ a multiméteren beállított szűrőből eredő standard bizonytalanság

- a) Az etalon multiméter stabilitása annak két kalibrálása között

Ez a bizonytalansági összetevő a gyártói specifikáció 218. oldalán található adatok alapján számítható, a számításkor az 1 évre megadott adatokkal dolgozok. Ezen adatok találhatóak a 9. táblázatban. A stabilitásból adódó bizonytalanság számításához használandó képlet:

$$u_{es} = \frac{\frac{AccOfReading * X_{helyes}}{100} + \frac{AccOfRange * X_{hrange}}{100}}{3} \quad (24)$$

Ahol: X_{helyes} : az etalonnal mért helyes érték; X_{hrange} : a multiméter mérés határa a helyes érték mérésekor; AccOfReading : a multiméter mért értékre vonatkozó specifikációja százalékban; AccOfRange : a multiméter mérés határa vonatkozó specifikációja százalékban

Mérés határ	Frekvencia	Pontossági specifikáció $\pm(\% \text{ of reading} + \% \text{ of range})$
100,0000 mV	3 Hz - 5Hz	1,00 + 0,04
	5 Hz – 10 Hz	0,35 + 0,04
	10 Hz – 20 kHz	0,06 + 0,04
	20 kHz – 50 kHz	0,12 + 0,05
	50 kHz – 100 kHz	0,60 + 0,08
	100 kHz – 300 kHz	4,00 + 0,50
1,000000 V-tól 750,000 V-ig	3 Hz- 5Hz	1,00 + 0,03
	5 Hz – 10 Hz	0,35 + 0,03
	10 Hz – 20 kHz	0,06 + 0,03
	20 kHz – 50 kHz	0,12 + 0,05
	50 kHz – 100 kHz	0,60 + 0,08
	100 kHz – 300 kHz	4,00 + 0,50

9. táblázat: AC feszültségmérés pontosság specifikáció
Forrás: Szerkesztette a szerző a [4] forrás 218. oldala alapján

További megjegyzés vonatkozik a 750 V-os mérés határon végzett mérésekre a specifikáció 219. oldalán. Eszerint a 9. táblázatban lévő értékek 750 V mérés határ esetén csak akkor érvényes a specifikáció ha a frekvencia maximum 100 kHz, a feszültség és a frekvencia szorzata maximum $8 \cdot 10^7$ VHz.

b) A felbontásból eredő standard bizonytalanság

$$u_{ef} = \frac{d}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (25)$$

Ahol d az osztásérték, a legkisebb kijelzett helyi érték 1 digitjének megfelelő mennyiség.

c) A hőmérsékletből eredő standard bizonytalanság

A hőmérsékletből eredő standard bizonytalanságot akkor vesszük figyelembe, ha a környezeti hőmérséklet kisebb, mint 18 °C vagy nagyobb, mint 28 °C. Ekkor a hőmérsékletből eredő standard bizonytalanság számításához használandó képlet:

$$u_{et_Temperature} = \frac{\frac{t_{maxdelta} * AccOfReadingTemperature * X_{helyes}}{100} + \frac{t_{maxdelta} * AccOfRangeTemperature * X_{hrange}}{100}}{3} \quad (26)$$

Ahol $t_{maxdelta}$: a 18 °C-tól vagy a 28 °C-tól való eltérés közül a nagyobb; X_{helyes} : az etalonnal mért helyes érték; X_{hrange} : a multiméter méréshatára a helyes érték mérésekor; $AccOfReadingTemperature$: a multiméter mért értékre vonatkozó specifikációja százalékban; $AccOfRangeTemperature$: a multiméter méréshatára vonatkozó specifikációja százalékban. Az $AccOfReadingTemperature$ és $AccOfRangeTemperature$ értékek a [4]-as forrás 218. oldalán láthatóak, illetve a 10. táblázatban.

Méréshatár	Frekvencia	Hőmérsékleti együttható $\pm(\% \text{ of reading} + \% \text{ of range})$
100,0000 mV	3 Hz - 5Hz	0,100 + 0,004
	5 Hz – 10 Hz	0,035 + 0,004
	10 Hz – 20 kHz	0,005 + 0,004
	20 kHz – 50 kHz	0,011 + 0,005
	50 kHz – 100 kHz	0,060 + 0,008
	100 kHz – 300 kHz	0,20 + 0,02
1,000000 V-tól 750,000 V-ig	3 Hz- 5Hz	0,100 + 0,003
	5 Hz – 10 Hz	0,035 + 0,003
	10 Hz – 20 kHz	0,005 + 0,003
	20 kHz – 50 kHz	0,011 + 0,005
	50 kHz – 100 kHz	0,060 + 0,008
	100 kHz – 300 kHz	0,20 + 0,02

10. táblázat: AC feszültségmérés pontosságát befolyásoló hőmérsékleti együtthatók

Forrás: Szerkesztette a szerző a [4] forrás 218. oldala alapján

Mivel a laborhőmérsékletnek nem szabad ezen két határon kívülre esnie (csak 18 °C és 28 °C között végezhető kalibrálás), ezért ezt a bizonytalansági összetevőt elhanyagolhatjuk.

$$u_{et_Temperature} = 0 \quad (27)$$

d) A multiméteren beállított szűrőből eredő standard bizonytalanság

$$u_{efilter} = \frac{\frac{AccAcFilter * X_h}{100}}{3} \quad (28)$$

Ahol X_h : az etalonnal mért helyes érték; $AccAcFilter$: a multiméter mért értékre vonatkozó AC filter specifikációja %-ban. A 11. táblázat tartalmazza a lehetséges értékeket.

A kalibrálás során a multimétert Slow módban használjuk ezért ezt a bizonytalansági összetevőt elhanyagolhatjuk.

$$u_{\text{filter}} = 0 \quad (29)$$

Frekvencia	AC szűrő ±(% of reading)		
	Slow	Medium	Fast
10 Hz – 20 Hz	0	0,74	—
20 Hz – 40 Hz	0	0,22	—
40 Hz – 100 Hz	0	0,06	0,73
100 Hz – 200 Hz	0	0,01	0,22
200 Hz – 1 kHz	0	0	0,18
> 1 kHz	0	0	0

11. táblázat: AC feszültségmérés AC filter specifikációja %-ban

Forrás: Szerkesztette a szerző a [4] forrás 218. oldala alapján

A fentiekben leírtakat alapul véve készítettem el az u34401A nevű MATLAB függvényt, melynek forráskódja a u34401A.m fájlban található. A függvény V-ban adja vissza a feszültségmérés bizonytalanságát. A függvény négy bemenő paraméterrel rendelkezik:

- frekvencia: a mért AC feszültség frekvenciája, Hz-ben kifejezve
- X_h: a mért feszültség értéke, V-ban kifejezve
- felbontás: a leolvasott érték felbontása
- Tmin: mérés során elért minimális környezeti hőmérséklet
- Tmax: mérés során elért maximális környezeti hőmérséklet
- ACFilter: a multiméteren beállított szűrő

Az u34401A.m forráskódjának értelmezése:

1. sor: a függvény elnevezése és bemenő paraméterek megadása

3-12. sor: a mért érték függvényében a méréshatár meghatározása. A 100 mV; 1 V; 10 V és 100 V helyett a 120 mV; 1,2 V; 12 V és 120 V méréshatárokat feltételezünk, így automatikus méréshatásváltáskor 20% túllövésünk lehet.

14-82. sor: a 9. és 10. táblázatnak feltételeinek megfelelően, a mért érték és a frekvencia függvényében értéket adunk az 'Accofreading', 'Accofrange', változóknak, illetve az ezen változókat a hőmérséklet függvényében befolyásoló 'Accofreading_Temp' és 'Accofrange_Temp' értékeknek.

84-91. sor: a 0 és 18 valamint a 28 és 55 Celsius fok közötti hőmérsékletek esetén a hőmérsékletből eredő standard bizonytalanság kiszámítása a (26)-os egyenlet alapján

93-118. sor: az 'ACFilter' bemeneti paraméter függvényében változik a

'AdditionalLowFrequencyError' változó értéke. Slow esetén értéke 0. Medium és a Fast

esetén az 11. táblázat szerinti értékeket veszi fel a frekvencia függvényében.

120. sor: multiméteren beállított szűrőből eredő standard bizonytalanság (uefilter) számítása (28)-as egyenlet alapján

123. sor: stabilitásból származó bizonytalanság (ues) számítása a (24)-es egyenlet szerint

124-126. sor: 750 V méréshatár esetén a frekvencia maximum 100 kHz, a feszültség és a frekvencia szorzata maximum $8 \cdot 10^7$ VHz lehet.

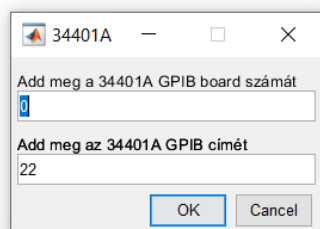
128. sor: felbontásból eredő bizonytalanság (ufelb) kiszámítása (25)-ös egyenlet alapján

130. sor: az ues, uet_temperature, uefilter és ufelb bizonytalansági összetevők négyzetes összegzése és gyökvonása

135. sor: függvény vége

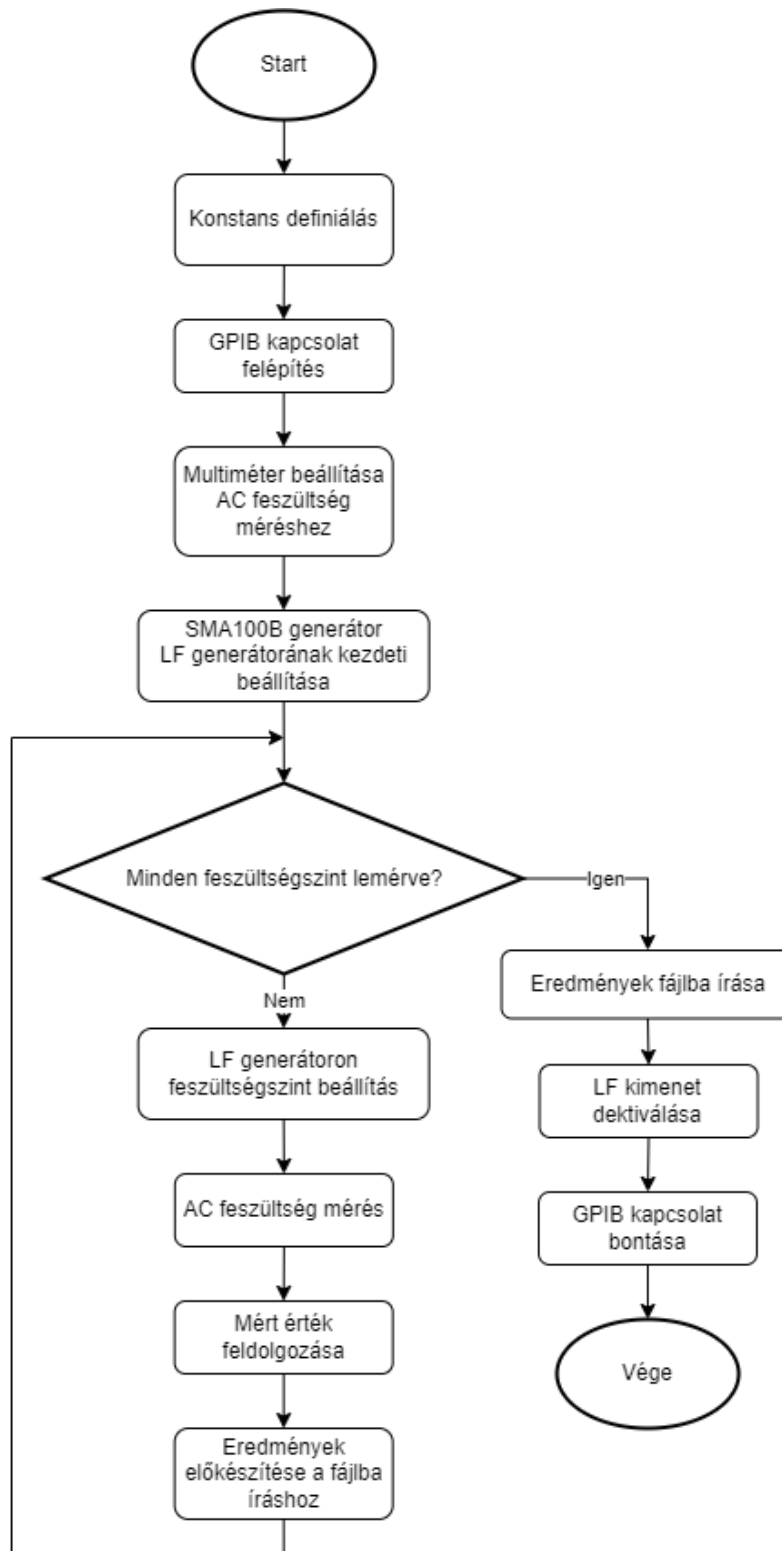
4.3 A moduláló generátor linearitását ellenőrző program bemutatása

A 4.1 pontban bemutatott mérés leírás alapján készítettem egy automatizált moduláló generátor ellenőrző programot, amely a 'Output_voltage_acc.m' fájlban található. A program működését a 4.3. ábra alapján mutatom be. A program forráskódja soronként tartalmazza az adott kódsorok jelentését, ezért ebben a fejezetben csak hivatkozok a kód adott soraira, de nem fejtem ki őket.



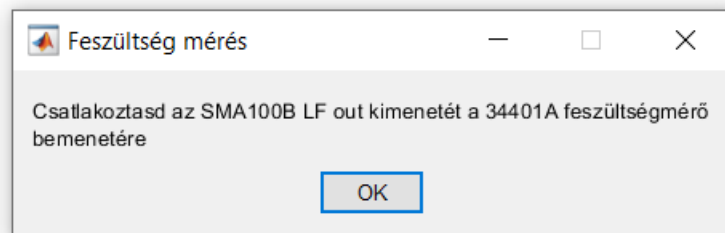
4.2. ábra: GPIB board szám és GPIB cím kérése az NRP2-höz
Forrás: Szerkesztette a szerző

A kód a 'feszultseg_szintek' tömb definiálásával kezdődik (1. sor). A tömb az ellenőrizni kívánt feszültség szinteket tartalmazza Vpp-ként. Ezután felépítem a GPIB kapcsolatot az SMA100B-val (3-9. sor). A 2.2. ábra szerinti ablak jelenik meg, amelyen a felhasználó beállíthatja az SMA100B GPIB board számát és GPIB címét. Alapértelmezett értékek (0-as board szám, 15-ös cím) esetén elég csak az OK gombra nyomni a folytatáshoz. A folytatásban a Agilent 34401A-val való kapcsolat felvétel valósul meg (11-17. sor). A GPIB board számát és GPIB címét a felhasználónak kell megadnia, ez látható a 4.2. ábrán. Alapértelmezett értékek esetén elég az OK gombra nyomni a folytatáshoz.



4.3. ábra: Moduláló generátor ellenőrző program jelfolyam diagramja
 Forrás: Szerkesztette a szerző

A kapcsolatfelvétel után a multiméter beállítása történik (19-22. sor). Resztelés után AC feszültségmérő üzemmódra váltok és az AC filtert értékét „slow”-ra állítom. A fizikai csatlakozások elvégzésére egy felugró ablak figyelmeztet, a 4.4. ábra szerint.



4.4. ábra: Felhasználó utasítása a SMA100B LF out kimenetének és a 34401A feszültségmérő bemenetének összekötésére

Forrás: Szerkesztette a szerző

Ezt követően a generátor beállítása történik (24-33. sor). Ebben a fejezetben a generátornak az LF generátorát állítjuk be és az LF csatlakozón végzünk méréseket. A generátor reszettelése után deaktiválom az LF kimenetet biztonsági okokból. Az LF1 generátoron 1 kHz frekvenciájú szinuszjelet állítok be. A frekvencia mód CW. Az LF kimenet forrásaként az LF1 generátort állítom be.

A programon belül egy for ciklus (35-81. sor) annyiszor fut le, ahány elem van a „feszultseg_szintek” tömbbe. Ezen for cikluson belül történik maga a mérés. Minden egyes iterációjában a ciklusnak a „feszultseg_szintek” tömb aktuális elemét állítom be a generátoron (37. sor). Az LF kimenet aktiválása (38. sor) után történik a feszültségmérés elindítása és a mérési eredmény lekérdezése (41-42. sor). A leolvasás felbontása 4.1. fejezetben bemutatott módon történik (44-59. sor). A mért érték feldolgozásra kerül (42-70. sor):

- A mért értéket nevezhetjük helyes értéknek, mivel etalon státuszú multiméterrel mérem meg a feszültség szintet. Mivel a multiméter a váltakozó feszültséget effektív értéként adja meg, ezért gyök 2-vel meg kell szoroznunk, hogy megkapjuk a csúcserőértékét.

$$\text{Helyes érték } [V_p] = \sqrt{2} * X_{34401A_mért_érték}[V_{RMS}] \quad (30)$$

Ahol $X_{34401A_mért_érték}$ a HP 34401A multiméter által mutatott RMS AC feszültség

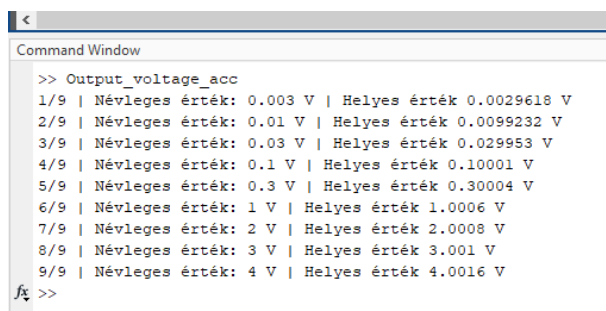
- A névleges érték „feszultseg_szintek” tömb aktuális eleme
- A hiba a névleges érték és a helyes érték különbsége.
- A gyártó specifikáció 40. oldala alapján a pontosság, vagyis a maximális megengedett eltérés a névleges értéktől 1 kHz frekvencia esetén a generátoron beállított érték 1%-a +1 mV lehet. Ezen delta értéket kivonva, illetve hozzáadva a névleges értékhez adódik az alsó és felső határ.

- A feszültségmérés mérési bizonytalanság számítása az általam írt u34401A függvénnyel valósul meg. A függvény bemenő paraméterei közül a mért értéknek multiméter által mutatott effektív feszültségértéket adjuk meg.
- Ezt a bizonytalansági összetevőt meg kell szorozni gyök 2-ve, mivel a mért értéket is beszoroztuk a csúcsertékre történő átszámolásakor. A szorzat a mérés standard mérési bizonytalansága.

$$u_{\text{mérés}} [V] = \sqrt{2} * u_{34401A_mért_érték} [V] \quad (31)$$

Ahol $u_{34401a_mért_érték}$ a HP 34401A multiméter által mutatott RMS AC feszültség bizonytalansága

- A kiterjesztett mérési bizonytalanság a standard mérési bizonytalanság és a kiterjesztési tényező szorzata. A kiterjesztési tényező értéke $k=2$, ami normál eloszlás esetén 95%-os fedési valószínűséget jelent. A kiterjesztett mérési bizonytalanságot két valódi értékes jegyre kerekítve szokás megadni.
- A kalibrálási és mérési képesség megegyezik a kiterjesztett mérési bizonytalansággal



```

>> Output_voltage_acc
1/9 | Névleges érték: 0.003 V | Helyes érték 0.0029618 V
2/9 | Névleges érték: 0.01 V | Helyes érték 0.0099232 V
3/9 | Névleges érték: 0.03 V | Helyes érték 0.029953 V
4/9 | Névleges érték: 0.1 V | Helyes érték 0.10001 V
5/9 | Névleges érték: 0.3 V | Helyes érték 0.30004 V
6/9 | Névleges érték: 1 V | Helyes érték 1.0006 V
7/9 | Névleges érték: 2 V | Helyes érték 2.0008 V
8/9 | Névleges érték: 3 V | Helyes érték 3.001 V
9/9 | Névleges érték: 4 V | Helyes érték 4.0016 V
fx >>

```

4.5. ábra: Visszajelzés a felhasználónak

Forrás: Szerkesztette a szerző

A dokumentálandó értékeket a 'modulalo_gen_tomb' nevű tömbbe gyűjtöm, megformázva, szöveggént (73-79. sor). Dokumentálásra kerül a névleges érték, a helyes érték, a hiba, az alsó határ, a felső határ, a kiterjesztett mérési bizonytalanság és a minősítés. A minősítés a 6.1. fejezetben leírtak szerint történik, az általam írt Minosites_ILAC_G8_09_2019 függvénnyel. A névleges és helyes értéket a parancssoron is megjelenítem a 4.5. ábra szerint. A 'modulalo_gen_tomb' tömböt ezután táblázattá alakítom és fejléc címeket adok hozzá. A táblázatot egy .xlsx fájlba írom a „Moduláló generátor linearitás” munkalapra (83-86. sor).

Végül deaktiválom az LF kimenetet, bontom a GPIB kapcsolatokat és megkérem a felhasználót a csatlakozások bontására a 2.10. ábra szerint (79-82. sor).

5 AM MODULÁCIÓS MÉLYSÉG

5.1 AM modulációs mélység frekvenciafüggésének ellenőrzése

Az SMA100B rendelkezik R&S®SMAB-K720 nevű opcióval, amely alkalmassá teszi analóg amplitúdó modulált jelek előállítására. Az amplitúdó moduláció ellenőrzése során az SMA100B által előállított analóg AM jel modulációs mélységét ellenőrizzük. Moduláló jelforrásként a belső LF generátorokat használhatjuk. Az ellenőrzést a [3] szerviz utasítás 3.4.6.1. pontját alapul véve végeztem el. Az ajánlás szerint a 5 MHz, 150 MHz, 1 GHz, 6 GHz, 10 GHz, 26 GHz és 40 GHz vivőfrekvenciák esetén kell az AM mélység ellenőrzést elvégezni. A kijelölt mélység szintek: 5%, 10%-tól 90%-ig 10%-os lépésközzel és 96%.

A generátor specifikációjának 32. oldalán találhatóak az amplitúdó modulációra vonatkozó követelmények. A maximális hiba 1 kHz moduláló frekvencia esetén a generátoron beállított érték 3%-a +1AM% lehet.

Az AM modulációs mélység méréshez az Agilent E4446A spektrumanalizátort használtam mérővevő üzemmódban. Ebben az üzemmódban az analizátor alkalmas a 5 % és 99 % közötti (az 5 %-ot és 99 %-os is beleértve) modulációs mélység mérésére, 100 kHz-től 40 GHz-ig terjedő vivőfrekvenciák esetén.

A mérés menete, amelyet automatizálni szeretnék a következő:

- 1) A generátoron elvégezzük a kezdeti beállításokat:
 - a) Külső órajel forrást állítunk be és fizikailag is rákötjük az eszköz hátlapján lévő Ext Ref. In bemenetre a laborban lévő 10 MHz-es etalon frekvencia jelet
 - b) Teljesítményszintnek 0 dBm-et állítunk be
 - c) AM Path 1 State On
 - d) AM Path 1 Source LF Generator 1
 - e) Moduláció forrása az LF generátor
 - f) Moduláló frekvencia: 1 kHz
- 2) Az E4446A spektrumanalizátoron elvégezzük a kezdeti beállításokat:
 - a) AM modulációs mélység mérő üzemmódot választjuk
 - b) futtatjuk a belső beszabályozást (System→Alignments)
 - c) High Pass filter: 300 Hz
 - d) Low Pass filter: 3000 Hz
 - e) Detektor: $\pm\text{Peak}/2$

- 3) Fizikailag összekötjük a generátor RF out csatlakozóját a spektrumanalizátor bemenetével egy SMA-SMA kábellel. A mérési elrendezés a 3.1. ábrán láthatóval megegyező.
- 4) A generátoron beállítjuk a modulációs mélységet. A gyártó a következő pontok ellenőrzését ajánlja: 5%, 10%-tól 90%-ig 10%-os lépésközzel és 96%
- 5) A generátoron és a spektrumanalizátoron is beállítjuk a vivőfrekvenciát, ami a gyártói ajánlás alapján: 5 MHz, 150 MHz, 1 GHz, 6 GHz, 10 GHz, 26 GHz, 40 GHz
- 6) Lemérjük a modulációs mélységet a spektrumanalizátorral
- 7) Megismételjük a 4-6.pontokat az ajánlott modulációs mélység és vivő frekvenciák esetén
- 8) Kikapcsoljuk az RF out kimenetet és bontjuk a csatlakozásokat

5.2 A E4446A modulációs mélység mérés standard bizonytalansága

A spektrumanalizátor specifikációját a [7] forrás tartalmazza. Az amplitúdó modulációs mélység mérés pontosságára vonatkozó adatok a 382. oldalon találhatóak. A figyelembe veendő bizonytalanság-források a következők:

a.) Stabilitási bizonytalanság (AM Depth Accuracy)

A gyártói specifikáció 382. oldalán kezdődik a modulációs mélység kiterjesztett bizonytalanságának megadása %-ban a mért értékre vonatkoztatva, ennek $k=3$ -mal (konfidencia intervallum 3σ) való osztásával kapjuk a stabilitási standard bizonytalanságot:

$$u_{es} = \frac{U_{es}}{3} \quad (32)$$

Ahol U_{es} értékét megkapjuk, ha a 12. táblázat segítségével kiszámoljuk a pontosság értékét.

Vivő frekvencia (f)	Moduláló jel frekvencia	AM modulációs mélység	Specifikált pontosság (A leolvasott érték X %-a)
100 kHz $\geq f \leq 10$ MHz	50 Hz-től 10 kHz-ig	5%-tól 99%-ig	$\pm 0,75\%$
10 MHz $> f \leq 3$ GHz	50 Hz-től 100 kHz-ig	20%-tól 99%-ig	$\pm 0,5\%$
		5%-tól 20%-ig	$\pm 2,5\%$
3 GHz $> f \leq 26,5$ GHz	50 Hz-től 100 kHz-ig	20%-tól 99%-ig	$\pm 1,5\%$
		5%-tól 20%-ig	$\pm 4,5\%$
26,5 GHz $> f \leq 31,15$ GHz	50 Hz-től 100 kHz-ig	20%-tól 99%-ig	$\pm 1,9\%$
		5%-tól 20%-ig	$\pm 6,8\%$
31,15 GHz $> f \leq 44$ GHz	50 Hz-től 100 kHz-ig	20%-tól 99%-ig	$\pm 6\%$
		5%-tól 20%-ig	$\pm 26\%$

12. táblázat: E4446A AM modulációs mérés pontossága
Forrás: Szerkesztette a szerző a [7] forrás 382. oldala alapján

b.) Felbontási bizonytalanság (Display resolution)

Az u_{ef} felbontásból eredő standard bizonytalanság összetevőt (16)-os képlettel számoljuk.

Az eredő standard bizonytalansága a fentiek alapján:

$$u_{mer} = \sqrt{u_{es}^2 + u_{ef}^2} \quad (33)$$

A fentiekben leírtakat alapul véve készítettem el az uPSA_AM nevű MATLAB függvényt, melynek forráskódja a uPSA_AM.m fájlban található. A függvény V-ban adja vissza a feszültségmérés bizonytalanságát. A függvény AM%-ban adja vissza az AM modulációs mélység mérés bizonytalanságát. Az uPSA_AM függvény négy bemenő paraméterrel rendelkezik:

- X_h: a spektrumanalizátor által mért érték
- f_vivo: a vivőfrekvencia értéke Hz-ben
- f_mod: a moduláló frekvencia értéke Hz-ben
- felbontas: a leolvasott érték felbontás

Az uPSA_AM.m forráskódjának értelmezése:

1. sor: a függvény elnevezése és bemenő paraméterek megadása

3-23. sor: a 11. táblázatnak megfelelően a vivőfrekvencia, a moduláló frekvencia és a mért érték függvényében kiszámítjuk a stabilitási bizonytalanság (u_{es}) értékét. A (32)-es egyenlet alapján a kiterjesztési tényező értéke 3, ezért 3-mal osztjuk a specifikációban szereplő értéket.

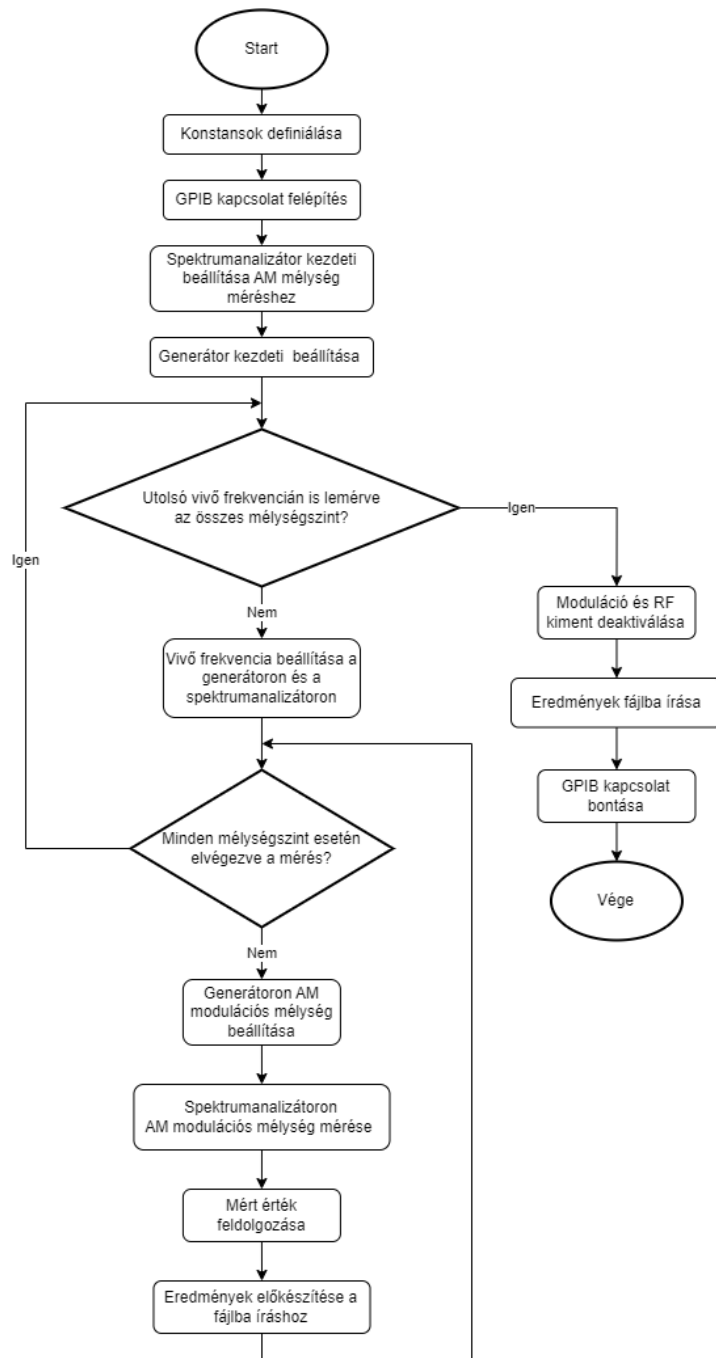
25. sor: felbontásból eredő bizonytalanság (u_{felb}) kiszámítása (16)-os egyenlet alapján

27-31. sor: amennyiben stabilitási bizonytalanság (u_{es}) értéke értelmezhető a 2-20. sorban lévő feltételek szerint, akkor a (33)-es egyenlet alapján kiszámítjuk az eredő bizonytalanságot

32. sor: függvény vége

5.3 Az AM modulációs mélység frekvenciafüggését ellenőrző program bemutatása

A 5.1. pontban bemutatott mérés leírás alapján készítettem egy automatizált AM modulációs mélység ellenőrző programot, amely a 'AM_depth.m' fájlban található. A program működését a 5.1. ábra alapján mutatom be. A program forráskódja soronként tartalmazza az adott kódsorok jelentését, ezért ebben a fejezetben csak hivatkozok a kód adott soraira, de nem fejtem ki őket.



5.1. ábra: AM modulációs mélység ellenőrző program jelfolyam diagramja

Forrás: Szerkesztette a szerző

A kód két tömb definiálásával kezdődik (1-2. sor). A "vivo_frekvenciak_mhz" tömb a vizsgálni kívánt vivőfrekvencia értékeket tartalmazza. A GPIB kapcsolat felépítése a szokásos módon a 2.2. és 3.2. ábrán bemutatott módon történik (4-19. sor).

A spektrumanalizátor kezdeti beállítása során (21-43. sor) a resetelés után a program kéri az E4446A csatlakoztatását a külső 10MHz-es referencia órajelhez a hátlati EXT REF IN porton keresztül, a 3.6. ábrán látható ablakban. A spektrumanalizátort külső időalapról való működésre állítom. Mérővevő üzemmódba állítom és analóg AM modulációs mélység mérő

funkciót választom. Elindítom a belső beszabályozási folyamatot (Alignments). A mérések felgyorsításához csak AM mélység mérését kérem. Mértékegységként a százalékos formát választom. Detektornak a $\pm\text{Peak}/2$, felüláteresztő szűrőnek a 300 Hz-est, aluláteresztő szűrőnek a 3 kHz-est választom.

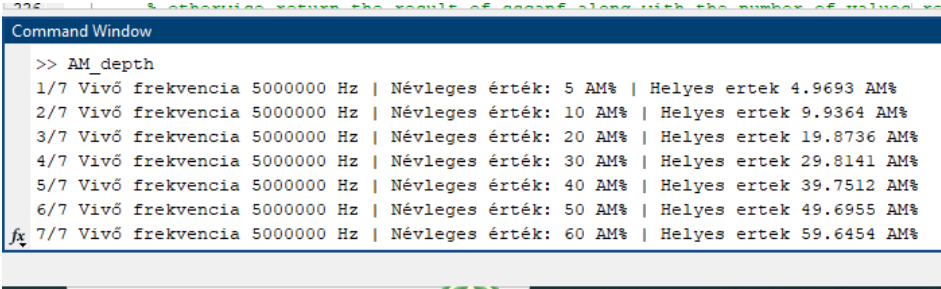
A generátor kezdeti beállítása során (45-68. sor). A resetelés után a program kéri az SMA100B hátlapi referencia órajel bementét a külső 10 MHz-es GPS etalon órajelhez való csatlakozáshoz, a 2.7. ábra szerint. A generátoron dBm mértékegységet, CW frekvencia módot és 0 dBm teljesítményszintet állítok be. A belső LF1 generátoron 1 kHz-es szinuszos jelet állítok be, ez a jel fog szolgálni moduláló jelként. Az AM moduláció forrásaként így értelemszerűen az LF1 generátort állítom be. Kezdetben 30 AM%-ra állítom a generátort és aktiválom a modulációt. Felugró ablak formájában kérem a felhasználót, hogy kösse össze az SMA100B RF kimenetét az E4446A RF INPUT bemenetével egy SMA-SMA kábellel, a 3.2. ábra szerint. Az összekötés után aktiválom az RF kimenetet.

Az 70-103. sorig tartó for ciklus annyiszor fut le, ahány elem van a „vivo_frekvenciak_mhz” tömbbe. Ezen for cikluson belül először beállítjuk a generátoron és a mérővevőn is a vivőfrekvenciát, majd egy újabb for ciklus kezdődik. Ebben a 74-102. sorig tartó ciklusban a mérővevővel ellenőrizzük a különböző AM modulációs mélységeket a ciklus iterációiban. Az 76. sorba kerül beállításra a mélység. A 79-81. sorban történik a mérés elindítása, illetve az mérési eredmény lekérdezése.

A mért érték feldolgozásra kerül (82-89. sor):

- A mért értéket nevezhetjük helyes értéknek, mivel etalon státuszú mérővevővel mérem meg az AM modulációs mélység szintet
- A névleges érték mindig az aktuálisan vizsgált és beállított mélységszint
- A hiba a névleges érték és a helyes érték különbsége.
- A generátor specifikációjának 32. oldalán találhatóak az amplitúdó modulációra vonatkozó követelmények. A maximális hiba 1 kHz moduláló frekvencia esetén a generátoron beállított érték 3%-a +1 AM% lehet. Ezen delta értéket kivonva, illetve hozzáadva a névleges értékhez adódik az alsó és felső határ.
- Az AM modulációs mélység mérés mérési bizonytalanságszámítása az általam írt uPSA_AM függvénnyel valósul meg. Mivel közvetlen mérés történik, ezért ez a mérési bizonytalanság tekinthető a mérés standard mérési bizonytalanságának.

- A kiterjesztett mérési bizonytalanság a standard mérési bizonytalanság és a kiterjesztési tényező szorzata. A kiterjesztési tényező értéke $k=2$, ami normál eloszlás esetén 95%-os fedési valószínűséget jelent. A kiterjesztett mérési bizonytalanságot két valódi értékes jegyre kerekítve szokás megadni.
- A kalibrálási és mérési képesség megegyezik a kiterjesztett mérési bizonytalansággal



```

>> AM_depth
1/7 Vivő frekvencia 5000000 Hz | Névleges érték: 5 AM% | Helyes erte 4.9693 AM%
2/7 Vivő frekvencia 5000000 Hz | Névleges érték: 10 AM% | Helyes erte 9.9364 AM%
3/7 Vivő frekvencia 5000000 Hz | Névleges érték: 20 AM% | Helyes erte 19.8736 AM%
4/7 Vivő frekvencia 5000000 Hz | Névleges érték: 30 AM% | Helyes erte 29.8141 AM%
5/7 Vivő frekvencia 5000000 Hz | Névleges érték: 40 AM% | Helyes erte 39.7512 AM%
6/7 Vivő frekvencia 5000000 Hz | Névleges érték: 50 AM% | Helyes erte 49.6955 AM%
7/7 Vivő frekvencia 5000000 Hz | Névleges érték: 60 AM% | Helyes erte 59.6454 AM%

```

5.2. ábra: Visszajelzés a felhasználónak
Forrás: Szerkesztette a szerző

A dokumentálandó értékeket az 'am_melyseg_tomb' nevű tömbbe gyűjtöm, megformázva, szöveggént (92-99. sor). Dokumentálásra kerül a vivő frekvencia, a névleges érték, a helyes érték, a hiba, az alsó határ, a felső határ, a kiterjesztett mérési bizonytalanság és a minősítés. A minősítés a 6.1. fejezetben leírtak szerint történik, az általam írt Minosites_ILAC_G8_09_2019 függvényvel. A parancssoros ablakban megjelenik az aktuális vivő frekvencia, névleges és helyes érték.

Az LF kimenetet és a modulációt deaktiválom (105-106. sor)

Az 'am_melyseg_tomb' tömböt először táblázattá alakítom és fejléc címeket adok hozzá. A táblázatot egy .xlsx fájlba írom a „Moduláló generátor linearitás” munkalapra (110-113. sor).

Végül bontom a GPIB kapcsolatokat (115-117. sor) és megkérem a felhasználót a csatlakozások bontására a 2.10. ábra szerint (113. sor).

6 MINŐSÍTÉS, BIZONYÍTVÁNY KÉSZÍTÉS ÉS MÉRÉSI EREDMÉNYEK

6.1 Minősítés

A minősítés elvégzésekor összevetjük az általunk mért értékeket és a specifikációban lévő értékeket, a kalibrálás bizonytalanságát is figyelembe véve.

Egy műszer csak egy nála pontosabb műszerrel kalibrálható, ezért a megfelelés/nemmegfelelés csak akkor tanúsítható, ha a kalibrálás bizonytalansága elég kicsi a D_m pontossági specifikációhoz viszonyítva. A továbbiakban a D_m -et a következőképp jelölöm:

$$D_m = \Delta_m \quad (34)$$

Ha a Δ_m értéke kisebb a kalibrálási képesség kétszeresénél, akkor az adott mérési pontot nem kalibrálhatónak tekintjük. Nem kalibrálhatónak tekintendő a mérési pont, ha a (31)-es reláció igaz.

$$\Delta_m < 2 * U_{kmk} \quad (35)$$

Ahol U_{kmk} a kalibrálási és mérési képesség.

Ha az (35)-ös reláció teljesül érdemes újra tervezni az adott mérést, esetleg pontosabb etalont választani. Ha viszont nem teljesül az (35)-ös reláció, akkor az adott mérési pont kalibrálhatónak tekinthető és minősíteni is tudjuk.

A minősítés megadásánál a [10] forrás ILAC-G8:09/2019 útmutató 4.2.3 pont szerinti Non-bináris döntési szabályt alkalmazom, azzal hogy a "w" biztonsági sáv $w = U_{kal}$. A döntési szabály az 6.1 ábrát értelmezve:

- a) a generátor megfelelt az előírásnak, ha az adott üzemmódra vonatkozó minden egyes ellenőrzési ponton teljesül az alábbi egyenlőtlenség:

$$|h| + U_{kal} < \Delta_m \quad (36)$$

- b) sem a megfelelés, sem a nemmegfelelés nem igazolható, ha az adott jellemzőre vonatkozó mérések közül legalább egy ellenőrzési ponton

$$|h| + U_{kal} \geq \Delta_m \text{ és } |h| - U_{kal} \leq \Delta_m \quad (37)$$

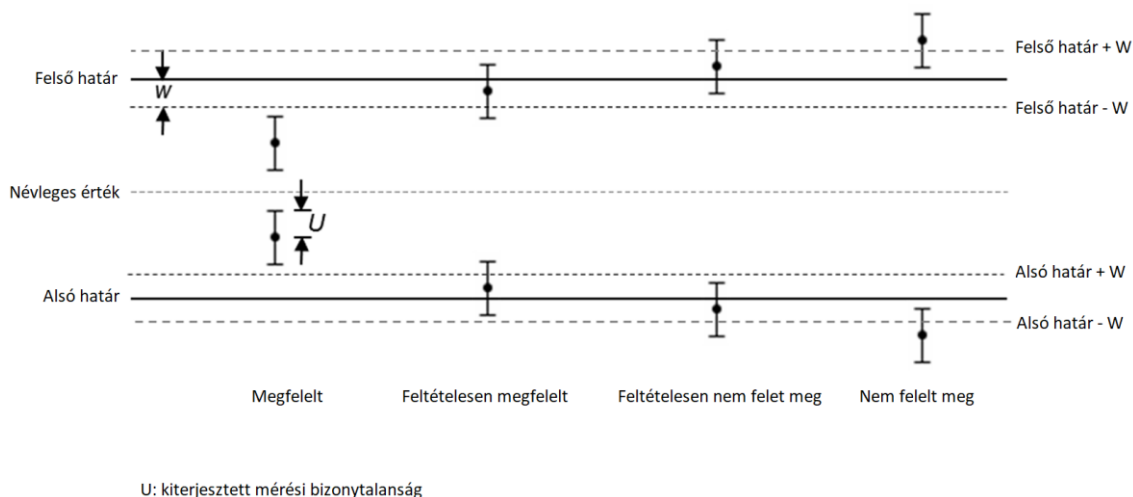
Feltételeken megfelelt, abban az esetben, ha $|h| < \Delta_m$, úgy a mérőeszköz megfelelése valószínűbb.

Feltételesen nem felelt meg, abban az esetben, ha $|h| \geq \Delta_m$, úgy a mérőeszköz nemmegfelelősége valószínűbb.

c) A mérőeszköz nem felelt meg az előírásnak, ha legalább egy ellenőrzési ponton

$$|h| - U_{kal} > \Delta_m \quad (38)$$

Ahol: $h = X_n - X_h$, ahol X_n a névleges és X_h a helyes érték. U_{kal} az X_h -hoz tartozó eredő kiterjesztett kalibrálási bizonytalanság



6.1. ábra: Nem bináris állítás biztonsági sávval grafikus ábrázolása ($w = U$ esetén)

Forrás: Szerkesztette a szerző az [10] forrás 4.2.3. fejezete alapján

A minősítés automatikus elvégzéshez készítettem MATLAB függvényt, amit Minosites_ILAC_G8_09_2019-nak neveztem el. Forráskódja megtalálható a Minosites_ILAC_G8_09_2019.m fájlban és a [] mellékletben. A függvény „NK”, „MF”, „FM”, „FNF” és „NF” szövegek valamelyikét adja vissza.

A Minosites_ILAC_G8_09_2019 függvény öt bemenő paraméterrel rendelkezik, amelyeknek mind azonos mértékegységűnek kell lennie:

- $X_m X_h$: A mért érték
- U_{kal} : a kiterjesztett mérési bizonytalanság
- FelsoHatar: a felső határ értéke
- AlsoHatar: alsó határ értéke
- U_{kmk} : kalibrálási és mérési képesség

Az uPSA_PM.m forráskódjának értelmezése:

1. sor: a függvény elnevezése és bemenő paraméterek megadása
2. sor: a delta érték a felső határ és alsó határ különbségének a fele

3-4. sor: a kalibrálhatóság vizsgálata a (35)-ös egyenlet szerint.

5-6. sor: a mért érték a megfelelt sávba esik

7-8. sor: a mért érték a nem felet meg sávba esik

9-10. sor: a mért érték a feltételesen megfelelt sávba esik

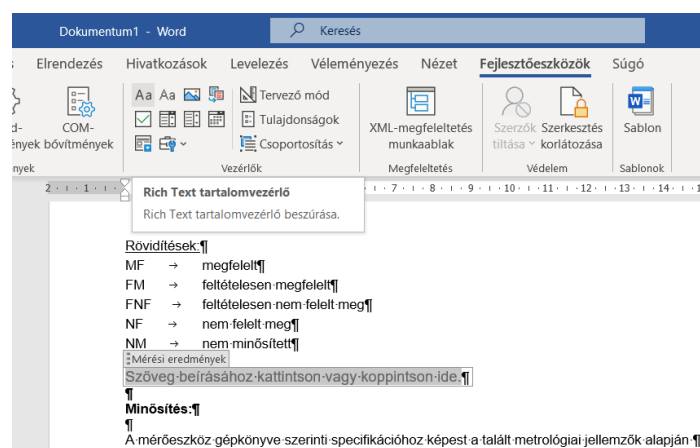
11-12. sor: a mért érték a feltételesen nem felet meg sávba esik

13. sor: függvény vége

6.2 Bizonyítvány készítés

A kalibrálás végterméke egy kalibrálási bizonyítvány, amelyben többek között feltüntetésre kerülnek azt adott mérési ponthoz tartozó névleges és a helyes értékek, a hibák, a mérési bizonytalanságok, valamint a környezeti feltételek (hőmérséklet, páratartalom).

A bizonyítvány készítés felgyorsításához készítettem egy programot, amelyben a 2.3, 3.3, 4.3 és 5.3 fejezetben bemutatott programok által naplózott értéket egy .docx kiterjesztésű fájlba is elmentésre kerülnek. A program működéséhez szükség van a MATLAB Report Generator kiegészítőre. Ezen kiegészítővel be tudunk illeszteni különböző tartalmi elemeket egy előre elkészített .dotx kiterjesztésű Microsoft-Word sablon fájlba. Ez gyakorlati szempontból azért előnyös, mert ha bizonyítvány sablonon bármilyen formai vagy tartalmi változás történik a kalibráló programon belül nincs szükség változtatásra.



6.2. ábra: Tartalomvezérlő elem hozzáadása a sablon fájlhoz

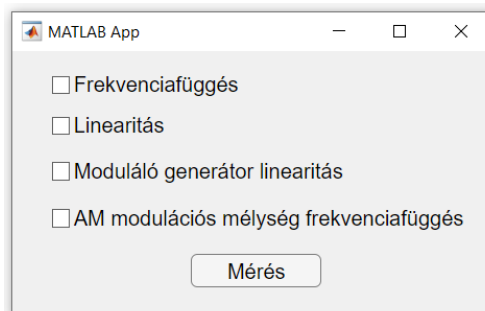
Forrás: Szerkesztette a szerző

Ha már rendelkezünk kész bizonyítvány minta dokumentummal akkor azt könnyen át tudjuk alakítani .docx kiterjesztésűből .dotx-é. Én az átalakítást Microsoft Word segítségével végeztem el. Ezután „Fejlesztőeszközök” fülön található „Rich Text tartalomvezérlő”-ből érdemes beszúrni egyet a 6.2. ábra szerinti módon.

Több ilyen tartalomvezérlő üres szövegrész is elhelyezhető a sablon dokumentumban, de jelen dolgozat keretében csak egyetlen egyet helyeztem el a 6.2. ábrán látható módon. A

naplózott értékek ide fognak kerülni a „Rövidítések” és a „Minősítés” bekezdések közé. Az elkészült fájl .docx kiterjesztésűként kerül elmentésre, így az a továbbiakban tovább módosítható.

A bizonyítványkészítésre is alkalmas SMA100B_kalibralo_program.m program futtatásának elindítása után egy Checkbox-os választóablak fogadja a felhasználót a 6.3. ábra szerinti módon. Itt bepipálhatóak az ellenőrizni kívánt paraméterek. A program ezután egymás után lefuttatja a paraméterek ellenőrzéséhez írt programokat és a naplózandó értékeket beilleszti a sablonfájlba egy külön dokumentumként.



6.3. ábra: Checkbox-os választófelület
Forrás: Szerkesztette a szerző

A SMA100B_kalibralo_program.m forráskódjának értelmezése:

1-2. sor: a MATLAB Report Generator kiegészítő importálása

3. sor: fájlnev kialakítása. 'SMA100B' és az aktuális időbélyeg

4-5. sor: új dokumentum létrehozása a sablon alapján és annak megnyitása

6-7. sor: ugrás a dokumentumon belül a megfelelő helyre

10-11. sor: a 'valasztas' nevű globális tömb változó létrehozása. A tömb logikai 0 vagy 1 értéket tárol.

11. sor: valaszto_felulet_GUI.mlapp futtatása. Részletezve a továbbiakban. A 'valasztas' tömb értékeit változtatja meg

13-17. sor: a beillesztendő táblázatok formázásának beállítása. 8-as méret, dupla keret, egyszeres rácsvonalak, 100%-os oldalszélesség.

19-29. sor: a frekvenciafüggés ellenőrzését végzi el. A naplózott 'frekvenciafugges_tablazat' normál táblát MATLAB táblává alakítom, erre a Report Generator használata miatt van szükség. A táblázatot megformázom a 13-17 sor szerint, illetve középre igazítást állatok be félkövér fejléct

26-28. sor: beszúrom a dokumentumba egy szövegsort ami az adott paramétert azonosítja, a mérési eredményeket tartalmazó formázott táblázatot és egy oldaltörést.

A 31-41. sor: hasonló logika szerint működik, itt a 'linearitas_tablazat'-ból készíték

MATLAB táblát és illeszttem be a bizonyítványba

43-53. sor: hasonló logika szerint működik, itt a 'modulalo_gen_tablázat'-ból készíték

MATLAB táblát és illeszttem be a bizonyítványba

55-65. sor: hasonló logika szerint működik, itt az 'am_melyseg_tablázat'-ból készíték

MATLAB táblát és illeszttem be a bizonyítványba

134. sor: bezárom a dokumentumot

A 11. sorban használt valaszto_felulet_GUI.m-lapp egy grafikus felhasználói felület, amelyet a MATLAB beépített grafikus alkalmazás szerkesztőjét felhasználva készítettem el. Az ablakon négy Checkbox elem és egy nyomógomb található (6.3. ábra). Forráskódjához csak a 18-24. sor írtam hozzá. Ezen sorok a 'Mérés' nyomógomb lenyomásakor hajtnak végre. A 'valasztas' tömb logikai értékeit állítja be a Checkbox-ok értékeinek megfelelően, majd bezárja az ablakot.

6.3 Mérési eredmények

A frekvenciafüggés kalibrálásakor naplózott értékek megtalálhatók az 'SMA100B_meresi_eredmenyek.xlsx' fájl 'Frekvenciafüggés' munkalapján. Ezen naplózott értékek egy szűrt változata látható a 13. táblázatban. A névleges érték 0dBm. A 13. táblázat első hét oszlopa a munkalapról kerültek átmásolásra, a további oszlopokban a bizonytalanság számítását „kézzel” is végig számoltam a (1)-(10)-es egyenleteknek megfelelően.

Frekvencia [MHz]	Helyes érték [dBm]	Hiba [dB]	Alsó határ [dB]	Felső határ [dB]	Bizonytalanság [dB]	Megfelelőség	U_{es}	VSWR_NRP	VSWR_SMA10 0B	$U_{mismatch}$	U_{felb}	U_{kal}	U_{kal}
0,008	0,03	-0,03	-1	1	0,05	MF	0,023	1,03	1,9	0,014084	0,002887	0,027124	0,05
0,02	-0,23	0,23	-1	1	0,05	MF	0,023	1,03	1,9	0,014084	0,002887	0,027124	0,05
0,1	-0,29	0,29	-1	1	0,05	MF	0,023	1,03	1,9	0,014084	0,002887	0,027124	0,05
0,2	-0,13	0,13	-1	1	0,05	MF	0,023	1,03	1,9	0,014084	0,002887	0,027124	0,05
1	0,00	0,00	-1	1	0,05	MF	0,023	1,03	1,9	0,014084	0,002887	0,027124	0,05
3	0,02	-0,02	-1	1	0,05	MF	0,023	1,03	1,9	0,014084	0,002887	0,027124	0,05
8	-0,05	0,05	-1	1	0,05	MF	0,023	1,03	1,9	0,014084	0,002887	0,027124	0,05
10	-0,01	0,01	-0,5	0,5	0,05	MF	0,023	1,03	1,9	0,014084	0,002887	0,027124	0,05
12,5	-0,01	0,01	-0,5	0,5	0,05	MF	0,023	1,03	1,9	0,014084	0,002887	0,027124	0,05
20	-0,01	0,01	-0,5	0,5	0,05	MF	0,023	1,03	1,9	0,014084	0,002887	0,027124	0,05
37,5	-0,02	0,02	-0,5	0,5	0,05	MF	0,023	1,03	1,9	0,014084	0,002887	0,027124	0,05
52	-0,01	0,01	-0,5	0,5	0,05	MF	0,023	1,03	1,9	0,014084	0,002887	0,027124	0,05
52,01	-0,02	0,02	-0,5	0,5	0,05	MF	0,023	1,03	1,9	0,014084	0,002887	0,027124	0,05
62,5	-0,01	0,01	-0,5	0,5	0,05	MF	0,023	1,03	1,9	0,014084	0,002887	0,027124	0,05
87,5	-0,01	0,01	-0,5	0,5	0,05	MF	0,023	1,03	1,9	0,014084	0,002887	0,027124	0,05
112,5	-0,01	0,01	-0,5	0,5	0,08	MF	0,0265	1,06	1,9	0,027759	0,002887	0,038485	0,08
212,5	-0,04	0,04	-0,5	0,5	0,08	MF	0,0265	1,06	1,9	0,027759	0,002887	0,038485	0,08
312,5	-0,03	0,03	-0,5	0,5	0,08	MF	0,0265	1,06	1,9	0,027759	0,002887	0,038485	0,08
412,5	-0,03	0,03	-0,5	0,5	0,08	MF	0,0265	1,06	1,9	0,027759	0,002887	0,038485	0,08

512,5	-0,03	0,03	-0,5	0,5	0,08	MF	0,0265	1,06	1,9	0,027759	0,002887	0,038485	0,08
612,5	-0,03	0,03	-0,5	0,5	0,08	MF	0,0265	1,06	1,9	0,027759	0,002887	0,038485	0,08
712,5	-0,04	0,04	-0,5	0,5	0,08	MF	0,0265	1,06	1,9	0,027759	0,002887	0,038485	0,08
812,5	-0,04	0,04	-0,5	0,5	0,08	MF	0,0265	1,06	1,9	0,027759	0,002887	0,038485	0,08
912,5	-0,04	0,04	-0,5	0,5	0,08	MF	0,0265	1,06	1,9	0,027759	0,002887	0,038485	0,08
1012,5	-0,01	0,01	-0,5	0,5	0,08	MF	0,0265	1,06	1,9	0,027759	0,002887	0,038485	0,08
2012,5	-0,03	0,03	-0,5	0,5	0,08	MF	0,0265	1,06	1,9	0,027759	0,002887	0,038485	0,08
3012,5	-0,01	0,01	-0,9	0,9	0,14	MF	0,0295	1,13	2	0,062476	0,002887	0,069151	0,14
4012,5	-0,05	0,05	-0,9	0,9	0,14	MF	0,0295	1,13	2	0,062476	0,002887	0,069151	0,14
5012,5	-0,10	0,10	-0,9	0,9	0,14	MF	0,0295	1,13	2	0,062476	0,002887	0,069151	0,14
6000	-0,03	0,03	-0,9	0,9	0,14	MF	0,0295	1,13	2	0,062476	0,002887	0,069151	0,14
6025	-0,06	0,06	-0,9	0,9	0,14	MF	0,0295	1,13	2	0,062476	0,002887	0,069151	0,14
7025	-0,07	0,07	-0,9	0,9	0,14	MF	0,0295	1,13	2	0,062476	0,002887	0,069151	0,14
8025	-0,06	0,06	-0,9	0,9	0,14	MF	0,034	1,13	2	0,062476	0,002887	0,071187	0,14
9025	-0,05	0,05	-0,9	0,9	0,14	MF	0,034	1,13	2	0,062476	0,002887	0,071187	0,14
10025	-0,05	0,05	-0,9	0,9	0,14	MF	0,034	1,13	2	0,062476	0,002887	0,071187	0,14
11025	-0,03	0,03	-0,9	0,9	0,14	MF	0,034	1,13	2	0,062476	0,002887	0,071187	0,14
12025	-0,08	0,08	-0,9	0,9	0,14	MF	0,034	1,13	2	0,062476	0,002887	0,071187	0,14
13025	-0,08	0,08	-0,9	0,9	0,17	MF	0,043	1,16	2	0,075825	0,002887	0,087217	0,17
14025	-0,10	0,10	-0,9	0,9	0,17	MF	0,043	1,16	2	0,075825	0,002887	0,087217	0,17
15025	-0,05	0,05	-0,9	0,9	0,17	MF	0,043	1,16	2	0,075825	0,002887	0,087217	0,17
16025	0,00	0,00	-0,9	0,9	0,17	MF	0,043	1,16	2	0,075825	0,002887	0,087217	0,17
17025	-0,08	0,08	-0,9	0,9	0,17	MF	0,043	1,16	2	0,075825	0,002887	0,087217	0,17
18025	-0,04	0,04	-0,9	0,9	0,22	MF	0,043	1,22	2	0,101442	0,002887	0,110217	0,22
19025	-0,01	0,01	-0,9	0,9	0,22	MF	0,043	1,22	2	0,101442	0,002887	0,110217	0,22
20025	-0,06	0,06	-1	1	0,22	MF	0,043	1,22	2	0,101442	0,002887	0,110217	0,22
21025	-0,04	0,04	-1	1	0,22	MF	0,043	1,22	2	0,101442	0,002887	0,110217	0,22
22025	-0,04	0,04	-1	1	0,22	MF	0,043	1,22	2	0,101442	0,002887	0,110217	0,22
23025	-0,05	0,05	-1	1	0,22	MF	0,043	1,22	2	0,101442	0,002887	0,110217	0,22
24025	-0,04	0,04	-1	1	0,22	MF	0,043	1,22	2	0,101442	0,002887	0,110217	0,22
25025	-0,11	0,11	-1	1	0,22	MF	0,043	1,22	2	0,101442	0,002887	0,110217	0,22
26025	-0,04	0,04	-1	1	0,22	MF	0,043	1,22	2	0,101442	0,002887	0,110217	0,22
27025	-0,05	0,05	-1	1	0,27	MF	0,0525	1,28	2	0,125710	0,002887	0,136263	0,27
28025	-0,06	0,06	-1	1	0,27	MF	0,0525	1,28	2	0,125710	0,002887	0,136263	0,27
29025	0,00	0,00	-1	1	0,27	MF	0,0525	1,28	2	0,125710	0,002887	0,136263	0,27
30025	0,03	-0,03	-1	1	0,27	MF	0,0525	1,28	2	0,125710	0,002887	0,136263	0,27
31025	0,00	0,00	-1	1	0,27	MF	0,0525	1,28	2	0,125710	0,002887	0,136263	0,27
32025	-0,06	0,06	-1	1	0,27	MF	0,0525	1,28	2	0,125710	0,002887	0,136263	0,27
33025	-0,03	0,03	-1	1	0,27	MF	0,056	1,28	2	0,125710	0,002887	0,137650	0,28
34025	-0,02	0,02	-1	1	0,27	MF	0,056	1,28	2	0,125710	0,002887	0,137650	0,28
35025	0,01	-0,01	-1	1	0,27	MF	0,056	1,28	2	0,125710	0,002887	0,137650	0,28
36025	-0,02	0,02	-1	1	0,27	MF	0,056	1,28	2	0,125710	0,002887	0,137650	0,28
37025	-0,03	0,03	-1	1	0,27	MF	0,056	1,28	2	0,125710	0,002887	0,137650	0,28
38025	-0,04	0,04	-1	1	0,27	MF	0,056	1,28	2	0,125710	0,002887	0,137650	0,28
39025	-0,01	0,01	-1	1	0,27	MF	0,056	1,28	2	0,125710	0,002887	0,137650	0,28
40000	-0,01	0,01	-1	1	0,27	MF	0,056	1,28	2	0,125710	0,002887	0,137650	0,28

13. táblázat: Frekvenciafüggés ellenőrzésének részeredményei

Forrás: Szerkesztette a szerző

A linearitás kalibrálásakor naplózott értékek megtalálhatók az 'SMA100B_meresi_eredmenyek.xlsx' fájl 'Linearitás' munkalapján. Ezen naplózott értékek közül a 23,9875 GHz vivőfrekvenciához tartozók láthatók a 14. táblázatban. A 14. táblázatban látható bizonytalanságokat "kézzel" is kiszámoltam a 15. táblázatban, illetve az 1. Mellékletben található táblázatban látható módon, a (1)-(20) egyenleteknek megfelelően.

Frekvencia [MHz]	Névleges érték [dBm]	Helyes érték [dBm]	Hiba [dB]	Alsó határ [dB]	Felső határ [dB]	Bizonytalanság [dB]	Megfelelőség
23987,5	15	14,98	0,02	14	16	0,22	MF
23987,5	10	9,99	0,01	9	11	0,22	MF
23987,5	5	4,97	0,03	4	6	0,22	MF
23987,5	0	-0,06	0,06	-1	1	0,22	MF
23987,5	-5	-5,03	0,03	-6	-4	0,22	MF
23987,5	-10	-10,06	0,06	-11	-9	0,22	MF
23987,5	-15	-15,05	0,05	-16	-14	0,22	MF
23987,5	-20	-20,07	0,07	-21	-19	0,23	MF
23987,5	-25	-25,06	0,06	-26	-24	0,26	MF
23987,5	-30	-30,08	0,08	-31	-29	0,41	MF
23987,5	-35	-35,08	0,08	-36	-34	0,41	MF
23987,5	-40	-40,05	0,05	-41	-39	0,42	MF
23987,5	-45	-45,04	0,04	-46	-44	0,42	MF
23987,5	-50	-50,05	0,05	-51	-49	0,42	MF
23987,5	-55	-55,04	0,04	-56	-54	0,42	MF
23987,5	-60	-60,02	0,02	-61	-59	0,42	MF
23987,5	-65	-65,05	0,05	-66	-64	0,42	MF
23987,5	-70	-70,07	0,07	-71	-69	0,42	MF
23987,5	-75	-75,10	0,10	-76	-74	0,42	MF
23987,5	-80	-80,01	0,01	-81	-79	0,42	MF
23987,5	-85	-84,98	-0,02	-86	-84	0,42	MF
23987,5	-90	-90,09	0,09	-91	-89	0,42	MF
23987,5	-95	-94,89	-0,11	-96,5	-93,5	0,42	MF
23987,5	-100	-100,00	0,00	-101,5	-98,5	0,42	MF

14. táblázat: Linearitás ellenőrzésének részeredményei

Forrás: Szerkesztette a szerző

A 15. táblázatban az u_{mismatch} kiszámításhoz az NRP-Z55 mérőfej állóhullámaránya $V_{\text{SWR_NRP}}=1,22$; a generátor állóhullámaránya $V_{\text{SWR_SMA100B}}=2$.

Helyes érték [dBm]	Bizonytalanság [dB]	Helyes érték [W]	U_{es}	U_{mismatch}	$U_{\text{felbontas}}$	U_{ezaj}	U_{enui}	$U_{\text{enuidrift}}$	U_{kai}	U_{kai}
14,98	0,22	0,031477	0,043	0,101442	0,002887	0,000000	0,000000	0,000000	0,110217	0,22
9,99	0,22	0,009977	0,043	0,101442	0,002887	0,000000	0,000000	0,000000	0,110217	0,22
4,97	0,22	0,003141	0,043	0,101442	0,002887	0,000000	0,000000	0,000000	0,110217	0,22
-0,06	0,22	0,000986	0,043	0,101442	0,002887	0,000000	0,000000	0,000000	0,110217	0,22
-5,03	0,22	0,000314	0,043	0,101442	0,002887	0,000000	0,000000	0,000000	0,110217	0,22
-10,06	0,22	0,000099	0,043	0,101442	0,002887	0,000000	0,000000	0,000000	0,110217	0,22
-15,05	0,22	0,000031	0,043	0,101442	0,002887	0,000000	0,000000	0,000000	0,110217	0,22
-20,07	0,23	0,000010	0,043	0,101442	0,002887	0,021956	0,005510	0,001765	0,112532	0,23
-25,06	0,26	0,000003	0,043	0,101442	0,002887	0,068530	0,017336	0,005563	0,131056	0,26

15. táblázat: Linearitás ellenőrzés bizonytalanságszámítás 23987,5 MHz-en NRP-Z55-tel

Forrás: Szerkesztette a szerző

Az 1. Mellékletben látható táblázatban az u_{mis} kiszámításhoz az E4446A spektrumanalizátor állóhullámaránya $V_{\text{SWR_E4446A}}=1,37$; a generátor állóhullámaránya $V_{\text{SWR_SMA100B}}=2$.

Az „S/N” oszlopban a $\text{DANL}=-138$.

A moduláló generátor linearitás kalibrálásakor naplózott értékek megtalálhatók az 'SMA100B_meresi_eredmenyek.xlsx' fájl 'Moduláló generátor linearitás' munkalapján, illetve teljes egészükben a 16. táblázatban.

Névleges érték [Vp]	Helyes érték [Vp]	Hiba [Vp]	Alsó határ [Vp]	Felső határ [Vp]	Bizonytalanság [Vp]	Megfelelőség
0,003	0,00297	0,00003	0,00197	0,00403	0,00004	MF
0,01	0,0099	0,0001	0,0089	0,0111	0,0001	MF
0,03	0,0300	0,0000	0,0287	0,0313	0,0001	MF
0,1	0,1000	0,0000	0,098	0,102	0,0001	MF
0,3	0,3000	0,0000	0,296	0,304	0,0004	MF
1	1,0006	-0,0006	0,989	1,011	0,0007	MF
2	2,0008	-0,0008	1,979	2,021	0,0036	MF
3	3,001	-0,001	2,969	3,031	0,004	MF
4	4,001	-0,001	3,959	4,041	0,005	MF

16. táblázat: Moduláló generátor linearitás ellenőrzésének eredményei

Forrás: Szerkesztette a szerző

A 16. táblázatban látható értékekhez a bizonytalanságszámítást „kézzel” is végiszámoltam a 17. táblázatban, a (23)-(29). egyenleteket felhasználva.

Helyes érték [Vp]	Bizonytalanság [Vp]	Helyes érték [V _{RMS}]	mérés-határ [V]	accfreading	accofrange	U _{es}	U _{felb}	U _{kal}	U _{kal}
0,00297	0,00004	0,0021	0,1	0,06	0,04	1,38E-05	2,89E-06	1,41E-05	0,00004
0,0099	0,0001	0,007	0,1	0,06	0,04	1,47E-05	2,89E-05	3,24E-05	0,0001
0,0300	0,0001	0,021213	0,1	0,06	0,04	1,76E-05	2,89E-05	3,38E-05	0,0001
0,1000	0,0001	0,070711	0,1	0,06	0,04	2,75E-05	2,89E-05	3,99E-05	0,0001
0,3000	0,0004	0,212132	1	0,06	0,03	0,000142	2,89E-05	0,000145	0,0004
1,0006	0,0007	0,707531	1	0,06	0,03	0,000242	2,89E-05	0,000243	0,0007
2,0008	0,0036	1,414779	10	0,06	0,03	0,001283	2,89E-05	0,001283	0,0036
3,001	0,004	2,122027	10	0,06	0,03	0,001424	0,000289	0,001453	0,004
4,001	0,005	2,829134	10	0,06	0,03	0,001566	0,000289	0,001592	0,005

17. táblázat: Moduláló generátor linearitás ellenőrzésének bizonytalanságszámítása

Forrás: Szerkesztette a szerző

Az AM modulációs mélység ellenőrzésekor naplózott értékek megtalálhatók az 'SMA100B_meresi_eredmenyek.xlsx' fájl 'AM modulációs mélység' munkalapján, a 18. táblázat első 8 oszlopa is tartalmazza ezen értékeket. A 18. táblázat további oszlopaiban a bizonytalanság számítását „kézzel” is végig számoltam a (32)-(33)-es egyenleteknek megfelelően.

Frekvencia [MHz]	Névleges érték [AM%]	Helyes érték [AM%]	Hiba [AM%]	Alsó határ [AM%]	Felső határ [AM%]	Bizonytalanság [AM%]	Megfelelőség	Leolvasott érték százaléka	U _{es}	U _{es}	U _{felb}	U _{kal}	U _{kal}
5	5	4,94	0,06	3,85	6,15	-	NM	-	-	-	-	-	-
5	10	9,89	0,11	8,7	11,3	0,05	MF	0,75	0,07418	0,024725	0,002887	0,024893	0,05
5	20	19,80	0,20	18,4	21,6	0,10	MF	0,75	0,14850	0,049500	0,002887	0,049584	0,1
5	30	29,73	0,27	28,1	31,9	0,15	MF	0,75	0,22298	0,074325	0,002887	0,074381	0,15
5	40	39,72	0,28	37,8	42,2	0,20	MF	0,75	0,29790	0,099300	0,002887	0,099342	0,2
5	50	49,64	0,36	47,5	52,5	0,25	MF	0,75	0,37230	0,124100	0,002887	0,124134	0,25
5	60	59,70	0,30	57,2	62,8	0,30	MF	0,75	0,44775	0,149250	0,002887	0,149278	0,3
5	70	69,58	0,42	66,9	73,1	0,35	MF	0,75	0,52185	0,173950	0,002887	0,173974	0,35
5	80	79,53	0,47	76,6	83,4	0,40	MF	0,75	0,59648	0,198825	0,002887	0,198846	0,4
5	90	89,45	0,55	86,3	93,7	0,45	MF	0,75	0,67088	0,223625	0,002887	0,223644	0,45
5	96	95,42	0,58	92,12	99,88	0,48	MF	0,75	0,71565	0,238550	0,002887	0,238567	0,48
150	5	4,98	0,02	3,85	6,15	0,00	MF	2,5	0,12450	0,041500	0,002887	0,041600	0,08
150	10	9,96	0,04	8,7	11,3	0,17	MF	2,5	0,24900	0,083000	0,002887	0,083050	0,17
150	20	19,98	0,02	18,4	21,6	0,33	MF	0,5	0,09990	0,033300	0,002887	0,033425	0,07
150	30	29,99	0,01	28,1	31,9	0,10	MF	0,5	0,14995	0,049983	0,002887	0,050067	0,1

150	40	39,98	0,02	37,8	42,2	0,13	MF	0,5	0,19990	0,066633	0,002887	0,066696	0,13
150	50	50,03	-0,03	47,5	52,5	0,17	MF	0,5	0,25015	0,083383	0,002887	0,083433	0,17
150	60	60,03	-0,03	57,2	62,8	0,20	MF	0,5	0,30015	0,100050	0,002887	0,100092	0,2
150	70	70,02	-0,02	66,9	73,1	0,23	MF	0,5	0,35010	0,116700	0,002887	0,116736	0,23
150	80	80,01	-0,01	76,6	83,4	0,27	MF	0,5	0,40005	0,133350	0,002887	0,133381	0,27
150	90	90,15	-0,15	86,3	93,7	0,30	MF	0,5	0,45075	0,150250	0,002887	0,150278	0,3
150	96	96,10	-0,10	92,12	99,88	0,32	MF	0,5	0,48050	0,160167	0,002887	0,160193	0,32
1000	5	5,00	0,00	3,85	6,15	0,08	MF	2,5	0,12500	0,041667	0,002887	0,041767	0,08
1000	10	10,01	-0,01	8,7	11,3	0,17	MF	2,5	0,25025	0,083417	0,002887	0,083467	0,17
1000	20	20,01	-0,01	18,4	21,6	0,07	MF	0,5	0,10005	0,033350	0,002887	0,033475	0,07
1000	30	30,03	-0,03	28,1	31,9	0,10	MF	0,5	0,15015	0,050050	0,002887	0,050133	0,1
1000	40	40,09	-0,09	37,8	42,2	0,13	MF	0,5	0,20045	0,066817	0,002887	0,066879	0,13
1000	50	50,12	-0,12	47,5	52,5	0,17	MF	0,5	0,25060	0,083533	0,002887	0,083583	0,17
1000	60	60,10	-0,10	57,2	62,8	0,20	MF	0,5	0,30050	0,100167	0,002887	0,100208	0,2
1000	70	70,15	-0,15	66,9	73,1	0,23	MF	0,5	0,35075	0,116917	0,002887	0,116952	0,23
1000	80	80,15	-0,15	76,6	83,4	0,27	MF	0,5	0,40075	0,133583	0,002887	0,133615	0,27
1000	90	90,19	-0,19	86,3	93,7	0,30	MF	0,5	0,45095	0,150317	0,002887	0,150344	0,3
1000	96	96,16	-0,16	92,12	99,88	0,32	MF	0,5	0,48080	0,160267	0,002887	0,160293	0,32
6000	5	4,96	0,04	3,85	6,15	0,00	MF	4,5	0,22320	0,074400	0,002887	0,074456	0,15
6000	10	9,95	0,05	8,7	11,3	0,30	MF	4,5	0,44775	0,149250	0,002887	0,149278	0,3
6000	20	20,00	0,00	18,4	21,6	0,20	MF	1,5	0,30000	0,100000	0,002887	0,100042	0,2
6000	30	30,02	-0,02	28,1	31,9	0,30	MF	1,5	0,45030	0,150100	0,002887	0,150128	0,3
6000	40	40,03	-0,03	37,8	42,2	0,40	MF	1,5	0,60045	0,200150	0,002887	0,200171	0,4
6000	50	50,05	-0,05	47,5	52,5	0,50	MF	1,5	0,75075	0,250250	0,002887	0,250267	0,5
6000	60	60,06	-0,06	57,2	62,8	0,60	MF	1,5	0,90090	0,300300	0,002887	0,300314	0,6
6000	70	70,05	-0,05	66,9	73,1	0,70	MF	1,5	1,05075	0,350250	0,002887	0,350262	0,7
6000	80	80,07	-0,07	76,6	83,4	0,80	MF	1,5	1,20105	0,400350	0,002887	0,400360	0,8
6000	90	90,19	-0,19	86,3	93,7	0,90	MF	1,5	1,35285	0,450950	0,002887	0,450959	0,9
6000	96	96,12	-0,12	92,12	99,88	0,96	MF	1,5	1,44180	0,480600	0,002887	0,480609	0,96
10000	5	5,00	0,00	3,85	6,15	0,15	MF	4,5	0,22500	0,075000	0,002887	0,075056	0,15
10000	10	9,99	0,01	8,7	11,3	0,30	MF	4,5	0,44955	0,149850	0,002887	0,149878	0,3
10000	20	19,97	0,03	18,4	21,6	0,60	MF	1,5	0,29955	0,099850	0,002887	0,099892	0,2
10000	30	30,05	-0,05	28,1	31,9	0,30	MF	1,5	0,45075	0,150250	0,002887	0,150278	0,3
10000	40	40,07	-0,07	37,8	42,2	0,40	MF	1,5	0,60105	0,200350	0,002887	0,200371	0,4
10000	50	50,04	-0,04	47,5	52,5	0,50	MF	1,5	0,75060	0,250200	0,002887	0,250217	0,5
10000	60	60,11	-0,11	57,2	62,8	0,60	MF	1,5	0,90165	0,300550	0,002887	0,300564	0,6
10000	70	70,15	-0,15	66,9	73,1	0,70	MF	1,5	1,05225	0,350750	0,002887	0,350762	0,7
10000	80	80,15	-0,15	76,6	83,4	0,80	MF	1,5	1,20225	0,400750	0,002887	0,400760	0,8
10000	90	90,13	-0,13	86,3	93,7	0,90	MF	1,5	1,35195	0,450650	0,002887	0,450659	0,9
10000	96	96,11	-0,11	92,12	99,88	0,96	MF	1,5	1,44165	0,480550	0,002887	0,480559	0,96
20000	5	4,95	0,05	3,85	6,15	0,00	MF	4,5	0,22275	0,074250	0,002887	0,074306	0,15
20000	10	9,89	0,11	8,7	11,3	0,30	MF	4,5	0,44505	0,148350	0,002887	0,148378	0,3
20000	20	19,94	0,06	18,4	21,6	0,60	MF	4,5	0,89730	0,299100	0,002887	0,299114	0,6
20000	30	30,01	-0,01	28,1	31,9	0,30	MF	1,5	0,45015	0,150050	0,002887	0,150078	0,3
20000	40	40,04	-0,04	37,8	42,2	0,40	MF	1,5	0,60060	0,200200	0,002887	0,200221	0,4
20000	50	50,00	0,00	47,5	52,5	0,50	MF	1,5	0,75000	0,250000	0,002887	0,250017	0,5
20000	60	59,97	0,03	57,2	62,8	0,60	MF	1,5	0,89955	0,299850	0,002887	0,299864	0,6
20000	70	69,95	0,05	66,9	73,1	0,70	MF	1,5	1,04925	0,349750	0,002887	0,349762	0,7
20000	80	79,96	0,04	76,6	83,4	0,80	MF	1,5	1,19940	0,399800	0,002887	0,399810	0,8
20000	90	90,07	-0,07	86,3	93,7	0,90	MF	1,5	1,35105	0,450350	0,002887	0,450359	0,9
20000	96	96,06	-0,06	92,12	99,88	0,96	MF	1,5	1,44090	0,480300	0,002887	0,480309	0,96
26000	5	4,98	0,02	3,85	6,15	0,00	MF	4,5	0,22410	0,074700	0,002887	0,074756	0,15
26000	10	9,96	0,04	8,7	11,3	0,30	MF	4,5	0,44820	0,149400	0,002887	0,149428	0,3
26000	20	20,04	-0,04	18,4	21,6	0,20	MF	1,5	0,30060	0,100200	0,002887	0,100242	0,2
26000	30	30,05	-0,05	28,1	31,9	0,30	MF	1,5	0,45075	0,150250	0,002887	0,150278	0,3
26000	40	40,06	-0,06	37,8	42,2	0,40	MF	1,5	0,60090	0,200300	0,002887	0,200321	0,4
26000	50	50,06	-0,06	47,5	52,5	0,50	MF	1,5	0,75090	0,250300	0,002887	0,250317	0,5
26000	60	60,04	-0,04	57,2	62,8	0,60	MF	1,5	0,90060	0,300200	0,002887	0,300214	0,6
26000	70	70,17	-0,17	66,9	73,1	0,70	MF	1,5	1,05255	0,350850	0,002887	0,350862	0,7

26000	80	80,15	-0,15	76,6	83,4	0,80	MF	1,5	1,20225	0,400750	0,002887	0,400760	0,8
26000	90	90,18	-0,18	86,3	93,7	0,90	MF	1,5	1,35270	0,450900	0,002887	0,450909	0,9
26000	96	96,08	-0,08	92,12	99,88	0,96	MF	1,5	1,44120	0,480400	0,002887	0,480409	0,96
40000	5	5,01	-0,01	3,85	6,15	0,87	NK	26	1,30260	0,434200	0,002887	0,434210	0,87
40000	10	10,03	-0,03	8,7	11,3	1,70	NK	26	2,60780	0,869267	0,002887	0,869271	1,74
40000	20	20,03	-0,03	18,4	21,6	0,80	MF	6	1,20180	0,400600	0,002887	0,400610	0,8
40000	30	30,01	-0,01	28,1	31,9	1,20	NK	6	1,80060	0,600200	0,002887	0,600207	1,2
40000	40	40,08	-0,08	37,8	42,2	1,60	NK	6	2,40480	0,801600	0,002887	0,801605	1,6
40000	50	50,10	-0,10	47,5	52,5	2,00	NK	6	3,00600	1,002000	0,002887	1,002004	2
40000	60	60,06	-0,06	57,2	62,8	2,40	NK	6	3,60360	1,201200	0,002887	1,201203	2,4
40000	70	70,21	-0,21	66,9	73,1	2,80	NK	6	4,21260	1,404200	0,002887	1,404203	2,81
40000	80	80,22	-0,22	76,6	83,4	3,20	NK	6	4,81320	1,604400	0,002887	1,604403	3,21
40000	90	90,18	-0,18	86,3	93,7	3,60	NK	6	5,41080	1,803600	0,002887	1,803602	3,61
40000	96	96,17	-0,17	92,12	99,88	3,80	NK	6	5,77020	1,923400	0,002887	1,923402	3,85

18. táblázat: AM modulációs mélység ellenőrzésének eredményei és bizonytalanságszámítása

Forrás: Szerkesztette a szerző

A 18. táblázat első sorát utólag kézzel módosítottam ugyanis a 4,97 AM%-hoz nem számolható bizonytalanság.

6.4 Konklúzió és fejlesztési lehetőségek

A frekvenciafüggés, linearitás és moduláló generátor linearitás ellenőrzését elvégezve az SMA100B generátor minden mérési pontban megfeleltek, így a használt mérési módszer és az etalonok megválasztása sikeresnek mondható. Az AM modulációs mélység frekvenciafüggésének vizsgálatnál viszont 40 GHz esetén hiába mérjük közvetlenül a modulációs mélységet, az E4446A mérési képessége összemérhető a generátor specifikált pontosságával, ezért 40 GHz-en nem tekintjük kalibrálhatónak a műszert ezen paraméter esetén. Megoldást egy pontosabb etalon használata jelentheti.

A programot további paraméterek mérésére alkalmas részprogramokkal lehetne bővíteni jövőben. Többek közt ellenőrizendő paraméter például a generátor belső időalapjának a pontossága, illetve az FM frekvencialöket frekvenciafüggése és PM fázis frekvenciafüggése.

A mérési eredmények naplózása és bizonyítványba írása a laborgyakorlatban használt formát követi. A bizonyítványkészítéshez egy jó fejlesztési lehetőség lehet a mért értékeken túl más szövegmezők automatizált beillesztése, például kalibrálás dátuma, hőmérsékelt, páratartalom.

Egyes paraméterek vizsgálatánál célszerű lehet egy-egy mérést többször is elvégezni, ezzel figyelembe venni a szórásból származó bizonytalanságot is. A többszöri mérések elvégzéséhez jobb esetben elég az átlagolás számát megváltoztatni például az NRP-Z55 vagy az E4446A-val történő teljesítménymérés esetén és így a szórásból eredő bizonytalanságot is elhanyagolhatjuk, rosszabb esetben az egész programot módosítani kell a többszöri mérés futtatásához. A mérési idő természetesen mindkét esetben nőni fog.

7 ÖSSZEGZÉS

Az Nemzeti Média és Hírközlési Hatóság által használt mérőműszerek közül soknak házon belül történik meg a kalibrálása. Ez egyrészt pénzügyi szempontból is előnyös, hiszen a jellemzően külföldi gyártók magas költségeket számolnak fel. Másrészt a műszert nem szükséges külföldi kalibrálásra elszállítani, amivel hetekkel is megrövidíthetjük az adott mérőeszköz kiesési idejét. Ha egy adott típusú műszerből több is a hatóság tulajdonát képezi, akkor annál inkább érdemes egy automatizált kalibráló program készítése, a munka felgyorsítása érdekében.

Dolgozatomban a MATLAB-ot és annak kiegészítőt felhasználva készítettem egy automatizált kalibráló programot, amellyel a Rohde&Schwarz SMA100B RF és mikrohullámú jelgenerátor négy paramétere ellenőrizhető. A gyártói szervíz utasítás alapján ellenőrzésre került a frekvenciafüggés, linearitás, moduláló generátor linearitás és az AM modulációs mélység frekvenciafüggése.

Az ellenőrzéshez használt etalon műszerek gyári specifikációját felhasználva bizonytalanságszámító MATLAB függvényeket készítettem. Függvényt írtam a Rohde&Schwarz NRP-Z55-tel történő abszolút teljesítmény méréshez, az Agilent E4446A spektrumanalizátorral történő relatív teljesítmény méréshez, az Agilent 34401A multiméterrel történő AC feszültségméréshez, illetve az Agilent E4446A spektrumanalizátor mérővevő üzemmódjában történő AM moduláció mélységszint méréshez. Ezen MATLAB függvények a kalibráló programon kívül is bármikor újra felhasználhatók.

Az SMA100B generátor négy ellenőrizendő paraméteréhez készült programok külön-külön is futtathatók. A mért értékek minden esetben naplózásra kerülnek egy .xlsx fájlban. Egy külön erre a célra készített összefoglaló programban lehetőség van a négy paraméter egyszerre történő ellenőrzéséhez, amely végén a mérési eredményekkel feltöltött kalibrálási bizonyítvány is keletkezik.

A program további fejlesztési lehetőségeknek is lehetőséget ad, mint a belső referencia frekvencia ellenőrzése, FM frekvencia és PM fázis moduláció ellenőrzése. Az automatizált bizonyítvány készítő program is tovább fejleszthető, cél a nyomtatásra kész bizonyítvány generálása.

8 IRODALOMJEGYZÉK

- [1] R&S SMA100B RF and Microwave Signal Generator Specification, 5215.1018.22, Version 07.01, August 2022, Rohde&Schwarz GmbH&Co. KG
Forrás: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/SMA100B_dat-sw_en_5215-1018-22_v0701.pdf (Letöltve: 2023.04.29)
- [2] R&S®SMA100B RF Signal Generator User Manual, 1178.3834.02, Version 09, Rohde&Schwarz GmbH&Co. KG
Forrás: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_manuals/user_manual/1178_3834_01/SMA100B_UserManual_en_09.pdf (Letöltve: 2023.04.29)
- [3] R&S®SMA100B RF and Microwave Analog Signal Generator Service Manual, 1178.3828.02, Version 06, Rohde&Schwarz GmbH&Co. KG
- [4] HP 34401A Multimeter User's Guide, 34401-90004, February 1996, Hewlett-Packard Company
Forrás: <https://engineering.purdue.edu/~aae520/hp34401manual.pdf> (Letöltve: 2023.04.29)
- [5] R&S®NRP Power Meter Family Specifications, 5213.5539.22, Version 10.00, May 2014, Rohde&Schwarz GmbH&Co. KG
Forrás: https://web.archive.org/web/20150426113828/https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/data-sheets/rohde-schwarz-nrp_series_datasheet.pdf (Letöltve: 2023.04.29)
- [6] R&S®NRP2 Power Meter User Manual, 1173.9140.02 , Version 04, 2013, Rohde&Schwarz GmbH&Co. KG
Forrás: <https://manualzz.com/doc/4131310/rands-nrp2-user-manual> (Letöltve: 2023.04.29)
- [7] Agilent Technologies PSA Series Spectrum Analyzers Specifications Guide, E4440-90647, December 2012, Agilent Technologies, Inc.
Forrás: <https://www.keysight.com/us/en/assets/9018-03522/technical-specifications/9018-03522.pdf> (Letöltve: 2023.04.29)
- [8] PSA Series Spectrum Analyzers Measuring Receiver Guide, N5531-90004, April 2010, Agilent Technologies, Inc.
Forrás:

<https://hibp.ecse.rpi.edu/~connor/RF/Tomography/Agilent%20Spectrum%20Analyzer%20files/N5531004.pdf> (Letöltve: 2023.04.29)

- [9] Keysight Technologies Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements (Part 3) Application Note, 5988-9215EN, Keysight Technologies

Forrás: <https://www.amt.pl/pl/faq/podstawy-pomiarow-w-cz-i-mocy-czesc-3/dnl/file> (Letöltve: 2023.04.29)

- [10] Útmutató a döntési szabályokhoz és a megfelelőségi nyilatkozatokhoz, ILAC_G8_09_2019-HUN (2022_v02), ILAC

[https://nah.gov.hu/admin/staticmedia/Oldalakhoz_csatolt_dokumentumok/NAR_NAD/KL/ILAC_G8_09_2019-HUN-ENG%20\(v02\).pdf](https://nah.gov.hu/admin/staticmedia/Oldalakhoz_csatolt_dokumentumok/NAR_NAD/KL/ILAC_G8_09_2019-HUN-ENG%20(v02).pdf) (Letöltve: 2023.04.29)

- [11] Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration, EA-4/02 M: 2022

Forrás: <https://european-accreditation.org/wp-content/uploads/2018/10/EA-4-02.pdf> (Letöltve: 2023.04.29)

- [12] PSA Series Spectrum Analyzers User's and Programmer's Reference Volume 1, E4440-90285, May 2006, Agilent Technologies, Inc.

Forrás:

https://xdevs.com/doc/HP_Agilent_Keysight/HP%20PSA%20Series%20User%20Vol.%201.pdf (Letöltve: 2023.04.29)

9 MELLÉKLETEK

1. Melléklet: Linearitás ellenőrzés bizonytalanságszámítás 23987,5 MHz-en E4446A-val

Frekvencia [MHz]	Helyes érték [dBm]	Bizonytalanság [dB]	pref	prel	input level	ML	A	B1	C1	B2	C2	U _{espa}	U _{mis}	U _{ef}	S/N	U _{epszaj}	U _{kal}	U _{kal}
23987,5	-30,08	0,41	-27,5	-2,58	-30,08	-37,5	0,001	0,001	0,04	0,0035	0,038	0,004203	0,159809	0,002887	99,92	5,17E-07	0,15989	0,41
23987,5	-35,08	0,41	-27,5	-7,58	-35,08	-37,5	0,001	0,001	0,04	0,0035	0,038	0,011703	0,159809	0,002887	94,92	9,2E-07	0,160263	0,41
23987,5	-40,05	0,42	-27,5	-12,55	-40,05	-37,5	0,001	0,001	0,04	0,0035	0,038	0,019158	0,159809	0,002887	89,95	1,63E-06	0,160979	0,42
23987,5	-45,04	0,42	-27,5	-17,54	-45,04	-37,5	0,001	0,001	0,04	0,0035	0,038	0,026333	0,159809	0,002887	84,96	2,89E-06	0,16199	0,42
23987,5	-50,05	0,42	-27,5	-22,55	-50,05	-37,5	0,001	0,001	0,04	0,0035	0,038	0,026333	0,159809	0,002887	79,95	5,15E-06	0,16199	0,42
23987,5	-55,04	0,42	-27,5	-27,54	-55,04	-37,5	0,001	0,001	0,04	0,0035	0,038	0,026333	0,159809	0,002887	74,96	9,15E-06	0,16199	0,42
23987,5	-60,02	0,42	-27,5	-32,52	-60,02	-37,5	0,001	0,001	0,04	0,0035	0,038	0,026333	0,159809	0,002887	69,98	1,62E-05	0,16199	0,42
23987,5	-65,05	0,42	-27,5	-37,55	-65,05	-37,5	0,001	0,001	0,04	0,0035	0,038	0,026333	0,159809	0,002887	64,95	2,9E-05	0,16199	0,42
23987,5	-70,07	0,42	-27,5	-42,57	-70,07	-37,5	0,001	0,001	0,04	0,0035	0,038	0,026333	0,159809	0,002887	59,93	5,16E-05	0,16199	0,42
23987,5	-75,10	0,42	-27,5	-47,6	-75,1	-37,5	0,001	0,001	0,04	0,0035	0,038	0,026333	0,159809	0,002887	54,9	9,21E-05	0,16199	0,42
23987,5	-80,01	0,42	-27,5	-52,51	-80,01	-37,5	0,001	0,001	0,04	0,0035	0,038	0,026333	0,159809	0,002887	49,99	0,000162	0,16199	0,42
23987,5	-84,98	0,42	-27,5	-57,48	-84,98	-37,5	0,001	0,001	0,04	0,0035	0,038	0,026333	0,159809	0,002887	45,02	0,000287	0,16199	0,42
23987,5	-90,09	0,42	-27,5	-62,59	-90,09	-37,5	0,001	0,001	0,04	0,0035	0,038	0,026333	0,159809	0,002887	39,91	0,000516	0,161991	0,42
23987,5	-94,89	0,42	-27,5	-67,39	-94,89	-37,5	0,001	0,001	0,04	0,0035	0,038	0,026333	0,159809	0,002887	35,11	0,000894	0,161992	0,42
23987,5	-100,00	0,42	-27,5	-72,5	-100	-37,5	0,001	0,001	0,04	0,0035	0,038	0,026333	0,159809	0,002887	30	0,001603	0,161998	0,42