

MÉRŐERŐSÍTŐ KAPCSOLÁSOK VIZSGÁLATA

MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV

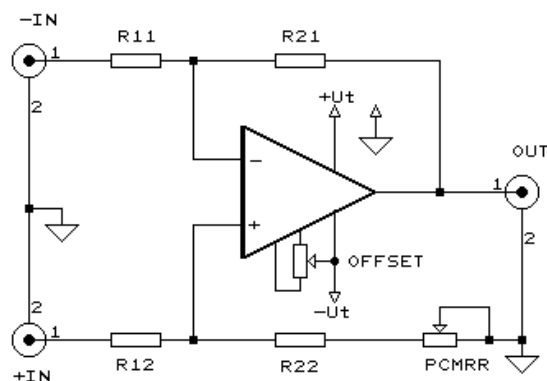
A mérés tárgya: MÉRŐERŐSÍTŐ kapcsolások vizsgálata (6. mérés)
A mérést végzik: Veszelyi Bence Balázs (V3UWB0)
Mérőcsoport: H12, 41
A mérés időpontja: 2020-03-16

Felhasznált eszközök

Oszilloszkóp (DC - 100MHz)	Agilent 54622A	< gy.sz.>
Kettős tápegység ($\pm 10\text{ V} \dots \pm 20\text{ V}$)	Agilent E3631A	< gy.sz.>
Függvénygenerátor	Agilent 33220A	< gy.sz.>
Digitális multiméter ($6\frac{1}{2}$ digit)	Agilent 33401A	< gy.sz.>

Feladatleírás

1. Egyenáramú tulajdonságok vizsgálata



1. ábra: A mérőkapcsolás

A kapcsolási rajzban szereplő ellenállások névértékei és toleranciájuk:

$$R_{21} = 1\text{ M}\Omega / 0,1\%$$

$$R_{22} = 1\text{ M}\Omega / 0,1\%$$

$$R_{11} = 10\text{ k}\Omega / 0,1\%$$

$$R_{12} = 10\text{ k}\Omega / 0,1\%$$

1.1. Bemeneti nullhibák (OFFSET) meghatározása

(VIDEÓ: Instrukciók a bemeneti áramok számításához)

(<https://web.microsoftstream.com/video/0af76885-a84a-4c88-8f00-4e4032f46b07?list=studio>)

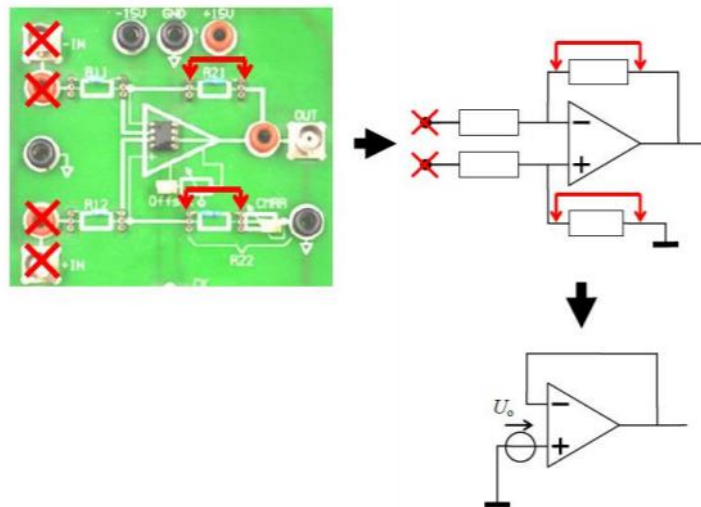
- 1.1.1. A műveleti erősítő invertáló és neminvertáló bemeneteit szabadon hagyva és rövidre zárva az R_{21} és az R_{22} ellenállásokat, mérhető DC mV-mérővel az erősítő kimeneti feszültsége. Ez a P_{OFFSET} potenciométerrel precízen kinullázható. Kérem, válassza ki az „M6_Erosito_hallgato_meresi_eredmenyek” melléklet adott pontjához tartozó mérési adatot és tüntesse itt fel azt! Értékelje a látottakat!

(A videó megtekintése után keresse meg a TL071-es IC adatlapját és nézze meg, hogyan csatlakozik a potenciométer a műveleti erősítő áramkörébe! Magyarázza meg, hogy hogyan állítható a segítségével az offsetfeszültség értéke. Segítség: a bemeneti fokozat egy differenciál erősítő, amelynek ágaiban alapesetben egyenlő értékű áramok folynak.)

(VIDEÓ: Kimeneti offset feszültség mérése)

(<https://web.microsoftstream.com/video/c44823de-a060-4740-b944-f5bd8251caf0?list=studio>)

A kapott eredmények közül ide vonatkozik: $U_{kioffset} = -2 \mu V$. A potenciométer (amely az erősítőhöz közvetlenül van kapcsolva és egy változtatható értékű kapacitás valósítja meg) segítségével a bemeneten található ellenállások rövidrezárása után próbáljuk kinullázni a kimenetet, a végeredmény a fent kapott feszültség lett.



6-9. ábra. Műveleti erősítő offsetfeszültség mérésének kialakítása (ábra és a kialakuló ekvivalens kapcsolás)

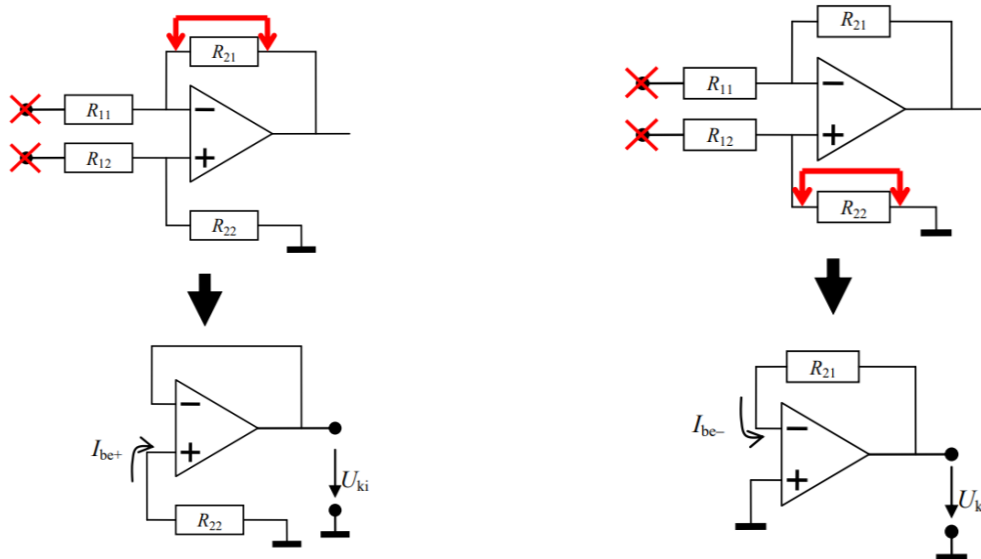
- 1.1.2. Az R_{21} majd az R_{22} ellenállások rövidzárását felváltva megbontva megmérhető az erősítő kimeneti offset feszültsége. Kérem, válassza ki az „M6_Erosito_hallgato_meresi_eredmenyek” melléklet adott pontjához tartozó mérési adatokat és tüntesse itt fel azokat! Értékelje a látottakat!

(Gondolja át: ha van a műveleti erősítőnek bemeneti árama, akkor ebben az összeállításban az hol folyik át? Segítség: a hasznos kulcsszó itt nem az erősítés, hanem az $1 M\Omega$ és a „mérőellenállás”. Nagyjából mekkora áramokat várunk? Tipp: az erősítő FET-es bemenetű.)

(VIDEÓ: A kimeneti offset feszültség mérése a bemeneti és offset áram meghatározásához)

(<https://web.microsoftstream.com/video/756ed12c-3a63-436f-becd-7f1c1bcc49c9?list=studio>)

A kapott értékek: $U_{+kiOff} = -28 \mu V$ $U_{-kiOff} = 46 \mu V$. A videón először az R_{21} -et zárjuk rövidre, majd az R_{22} -t, így meghatározva a két kimeneti offset feszültséget:



Ha van bemeneti áram az erősítőn, akkor az FET-es jellege miatt nagy áramerősítéssel és nagy bemeneti ellenállással rendelkezik.

1.1.3. Számítsa ki az I_{be+} és az I_{be-} bemeneti áramokat és az I_O offset áramot.

(A videóban felírt képlet csak az elvet szemlélteti, az áramok irányát még meg kell határozni hozzá! Javaslat: rajzolja fel egy vázlatpapírra saját magának a kialakított kapcsolást és jelölje be, hogy a kialakult potenciálok alapján a feszültségek merről merrefelé esnek.)

A műveleti erősítő bemeneti áramai:

$$I_{be+} = \frac{U_{kioffset} - U_{ki+Off}}{R_{22}} = \frac{-2 \mu V - (-28 \mu V)}{1 \text{ MOhm}} = 26 \text{ pA}$$

$$I_{be-} = \frac{U_{kioffset} - U_{ki-Off}}{R_{21}} = \frac{-2 \mu V - (-46 \mu V)}{1 \text{ MOhm}} = -44 \text{ pA}$$

A műveleti erősítő offset árama:

$$I_O = \frac{I_{be-} - I_{be+}}{2} = -35 \text{ pA}$$

1.2. A műveleti erősítő bemeneti pontjainak leföldelése után megmérhető a műveleti erősítő **kimeneti offset** feszültsége, és a **P_{OFFSET}** potenciométerrel –nehezebben, mint korábban–, de kinullázható. Adjon magyarázatot a jelenségre!

(A bemenetre modellezett offsetfeszültség az erősítő sajátja, hiszen annak aszimmetriái miatt

alakul ki, tehát itt valami más okozza a változást. Segítség: ha távcsővel lövünk célba, akkor a hibát sokkal nagyobbbnak látjuk a távcsőben, pedig valójában a „találat” pontosabb, mint távcső nélkül; vesse össze 1.1.1 és 1.2.1 eredményeit. A drift kapcsán gondoljon a tipikus értékre: $-2 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$)

(VIDEÓ: Bemenetre redukált offset feszültség meghatározása)

(<https://web.microsoftstream.com/video/51ba62e4-551d-4293-90c0-dd9a946155ed?list=studio>)

(VIDEÓ: Kimeneti offset feszültség drift)

(<https://web.microsoftstream.com/video/739c5570-e6c5-4ad6-ba62-05d895a82b0f?list=studio>)

Az 1.1.1 feladattal ellentétben a bemeneti kapcsokat a földpotenciálra kötjük, a kimeneti feszültség nullázása itt sokkal nehezebben történt, ennek a magyarázata az erősítés megváltozása.

A hőmérséklet emelkedés hatására megnő a kimeneti offset feszültség. A hőmérsékletváltozás miatt fellép a munkapontvándorlás (drift jelenség).

- 1.2.1. Számítsa ki az **invertáló** és a **neminvertáló bemenetre redukált offset** feszültségeit. Kérem, válassza ki az „**M6_Erosito_hallgato_meresi_eredmenyek**” melléklet e pontjához tartozó mérési adatot és tüntesse itt fel azt!

A mért érték a következő: $U_{kiOffset} = 110 \mu\text{V}$

Számított eredmények:

$$U_{be+Offset} = U_{kiOffset} * \frac{R_{11}}{R_{21} + R_{11}} = 1,089 \mu\text{V}$$
$$U_{be-Offset} = -U_{kiOffset} * \frac{R_{11}}{R_{21} + R_{11}} = -1,089 \mu\text{V}$$

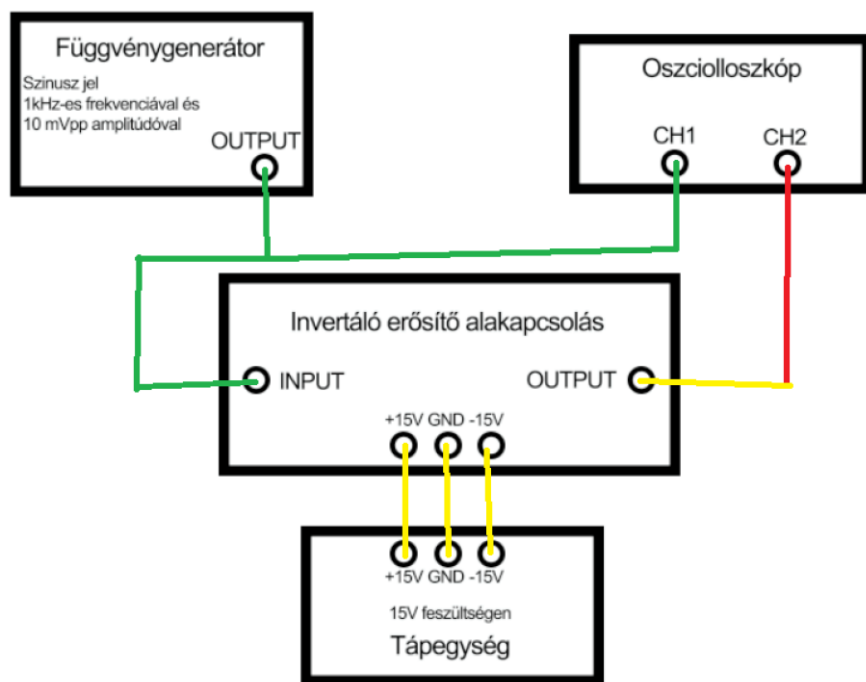
- 1.3. Invertáló erősítő alapkapsolás feszültségerősítésének meghatározása sávközépi frekvencián ($U_{be} = 10 \text{ mV}_{pp}$, $f_0 = 1 \text{ kHz}$ szinuszos jel).**

(VIDEÓ: Feszültségerősítés)

(<https://web.microsoftstream.com/video/077ea0c0-4b80-4497-86f8-fc42077d783b?list=studio>)

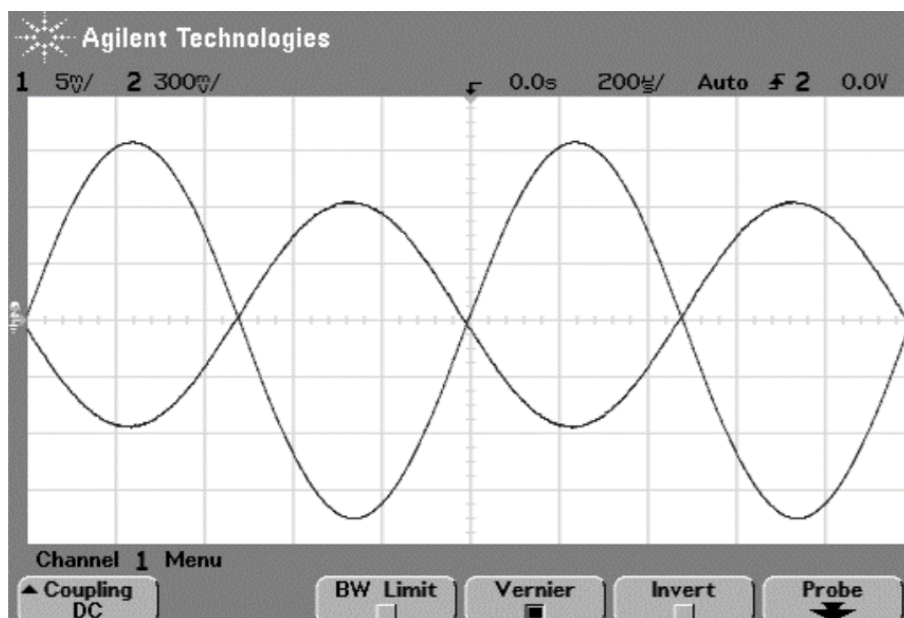
- 1.3.1. Készítsen részletes **blokkvázlatot** az elkészített kapcsolásról! Térjen ki a megfelelő műszerbeállításokra (függvénygenerátor, oszcilloszkóp) is!
(A blokkvázlat legegyszerűbben feliratozott téglalapokból és azok összekapcsolásából áll. A feliratok: az eszköz vagy műszer neve (pl. tápegység, mérőpanel, függvénygenerátor stb.), a használt bemenetek (pl. invertáló bemenet, nem invertáló bemenet, földpont stb.), és a használt kimenetek. Az összeköttetések egyenes vonalakkal és derékszögű törésekkel végzendők, igényes esetben nyilakkal jelölve a be- és kimeneti viszonyokat, illetve az összetartozó vonalakat azonos színnel jelölve. Tipp: gyorsan és praktikusán készíthet ilyen szintű blokkvázlatot pl. MS PowerPoint segítségével.)

Blokkvázlat:



Műszerbeállítások az ábráról leolvasható, az oszcilloszkópon mindkét csatornát megjelenítjük.

- 1.3.2. Kérem, válassza ki az „M6_Erosito_hallgato_meresi_eredmenyek” melléklet e pontjához tartozó ábrát és tüntesse itt fel azt!



- 1.3.3. Az ábra alapján határozza meg az erősítő feszültségerősítését (A_{us})! Értékelje ki a kapott eredményeket!

(A mért erősítés értéket vártuk? Indokolja meg, hogy miért igen, vagy miért nem! Ne felejtse el az erősítés helyes előjelét!)

A_{us} meghatározását az ábráról leolvasott peak-to-peak feszültség értékek alapján így tettem:

$$A_{us} = -\frac{U_{ki,pp}}{U_{be,pp}} = -\frac{1850 \text{ mV}}{20 \text{ mV}} = -92.5$$

A várt eredménynek megfelel a kapott erősítés.

1.4. A kivezérelhetőség és a Slew Rate meghatározása

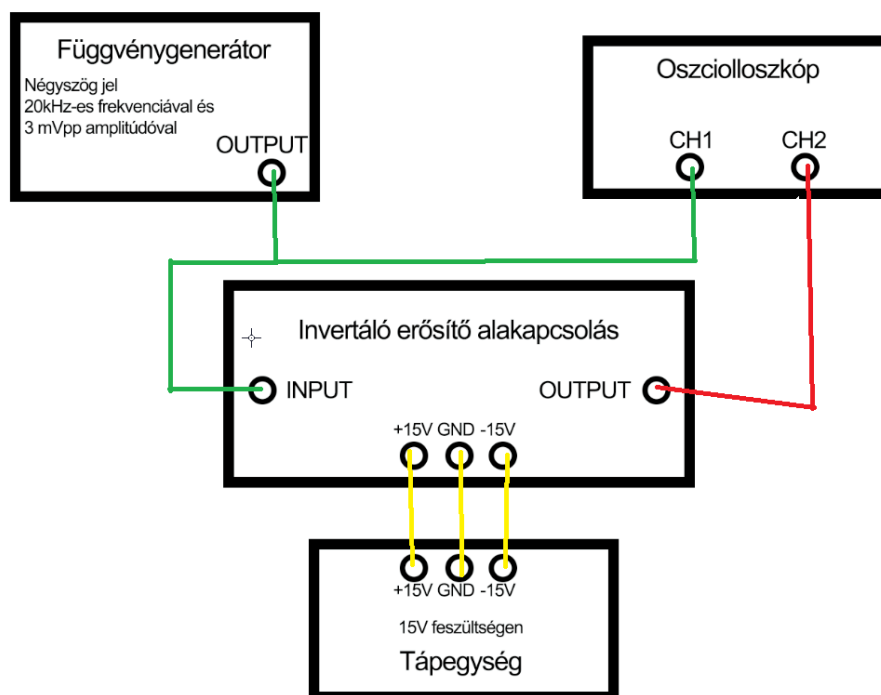
- 1.4.1. Invertáló műveleti erősítő alkapcsolás **Slew Rate** értékének (SR) meghatározása ($U_{be} = 3 \text{ V}_{pp}$, $f_0 = 20 \text{ kHz}$ négyszög jel).

(VIDEÓ: A Slew Rate mérése)

(<https://web.microsoftstream.com/video/5c90061f-9bb6-4250-9ce5-2da4fde11c22>)

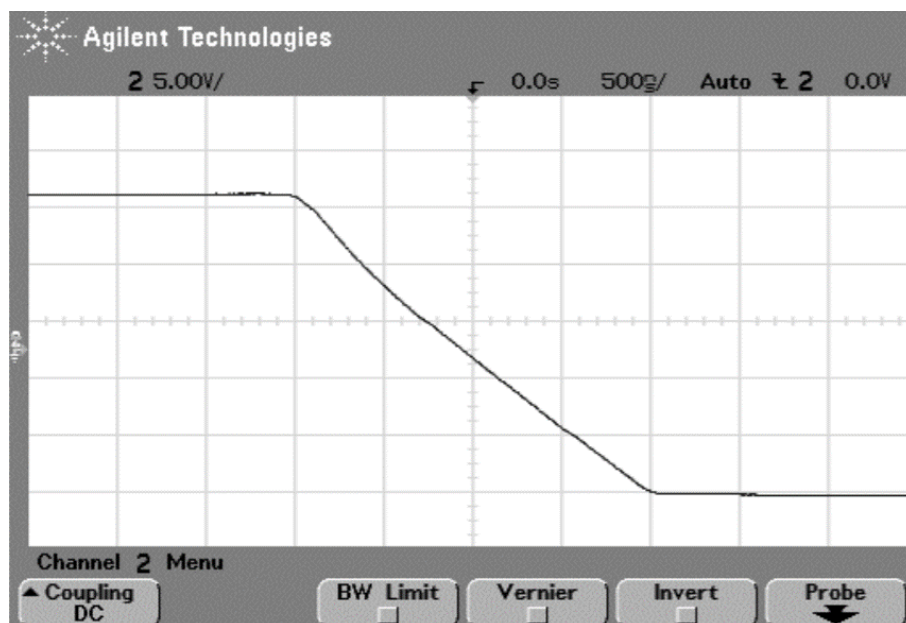
- 1.4.2. Készítsen részletes **blokkvázlatot** az elkészített kapcsolásról! Térjen ki a megfelelő műszerbeállításokra (függvénygenerátor, oszcilloszkóp) is!

Blokkvázlat:



Műszerbeállítások az ábráról leolvasható, az oszcilloszkópon csak a 2-es csatornát jelenítjük meg.

- 1.4.3. Kérem, válassza ki az „M6_Erosito_hallgato_meresi_eredmenyek” melléklet e pontjához tartozó ábrát és tüntesse itt fel azt!



1.4.4. Az ábra alapján határozza meg az erősítő SR paraméterét! Értékelje ki a kapott eredményt!

(A SR a maximális kimeneti jelváltozási sebesség: a leolvasást praktikusán a 10% és 90%-os értékek között végezzük. A kapott értéket egész számra kerekítse. A kapott SR értéket vártuk? Indokolja meg, hogy miért igen, vagy miért nem! (Tipp: adatlap.) Mi határolja a SR értékét? Plusz pontért nézze meg a sillabusz utolsó oldalát („kiegészítő anyag”) és írjon rövid magyarázatot a saját szavaival. Megjegyzés: a SR megkövetelt értéke alkalmazásfüggő, pl. RF alkalmazásokban az itt kapott érték több százszorosa is lehet.)

A Slew Rate meghatározásához leolvastam a kapott ábráról a feszültség változást és az eltelt időt, ezek alapján:

$$SR = \frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{25 \text{ V}}{2 \mu\text{s}} = 12.5 \frac{\text{V}}{\mu\text{s}} \approx 13 \frac{\text{V}}{\mu\text{s}}$$

Az adatlap alapján a tipikus értéket kaptam meg (minimum 5, tipikus érték 13), így az eredmény helytálló.

1.5. A kivezérelhetőség határfrekvenciájának meghatározása

1.5.1. Az 1.4.4. pontban meghatározott **Slew Rate** értékkel **számítsa ki** az erősítő $U_{ki}=10 \text{ V}_p$ (7.07 V_{eff}) kimenőfeszültségéhez tartozó f_{kv} határfrekvenciáját!

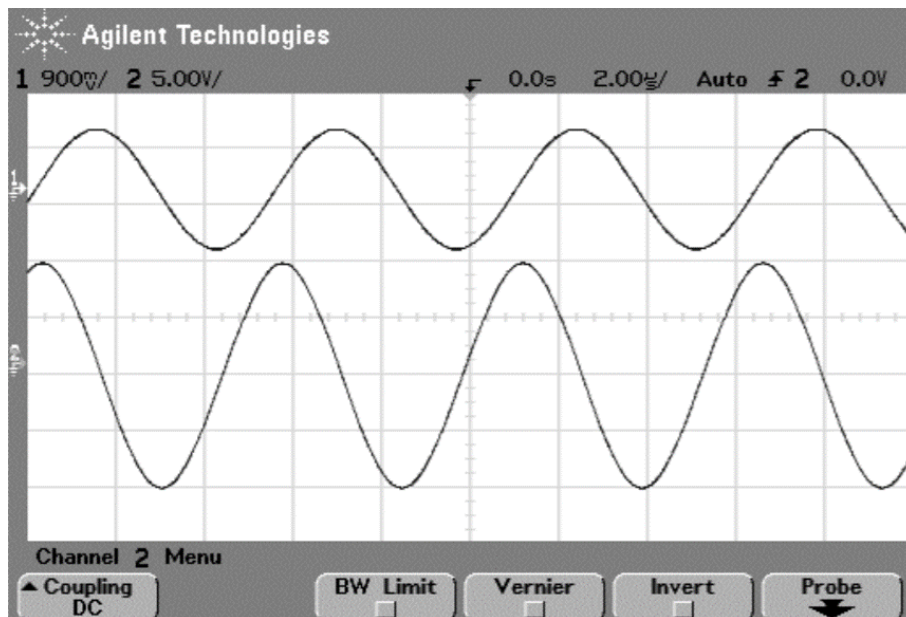
(Gondolja át alaposan, hogy a kivezérelhetőség határfrekvenciája mit jelent! Ehhez nézze meg a sillabuszban a (6-24) számú összefüggést, és olvassa el a kapcsolódó rövid leírást.)

$$f_{kv} = \frac{SR}{2\pi A} = \frac{12.5 \text{ V}/\mu\text{s}}{20\pi \text{ V}} = 198.94 \text{ kHz}$$

(VIDEÓ: A kivezérelhetőség határfrekvenciájának (f_{kv}) meghatározása)

(<https://web.microsoftstream.com/video/85dc5f1e-45b9-40ec-8ea3-2b10ee38f1df?list=studio>)

- 1.5.2. Az invertáló bemenetre adott f_{kv} frekvenciájú szinuszos jel hatására a következő kimeneti jelalak adódott, ahol a kimeneti jel amplitúdója $U_{ki} = 10 \text{ V}_p$. Kérem, válassza ki az „M6_Erosito_hallgato_meresi_eredmenyek” melléklet e pontjához tartozó ábrát és tüntesse itt fel azt!



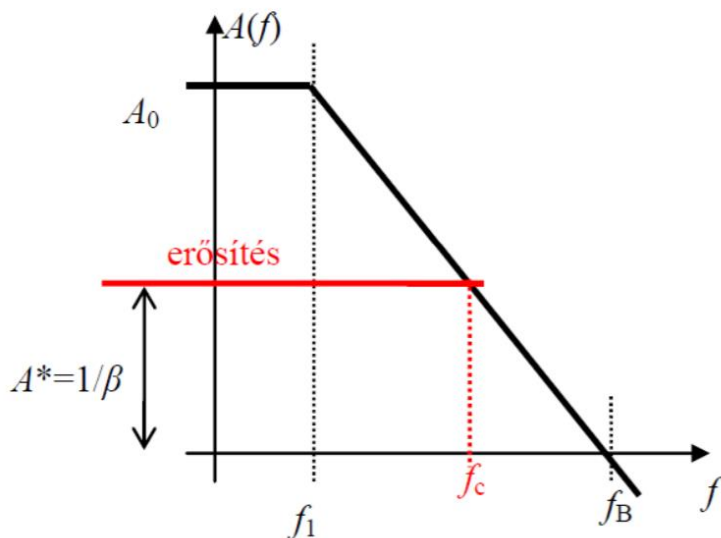
- 1.5.3. Az ábra alapján határozza meg a bemenő vezérlő jel amplitúdó értékét és az erősítő feszültségerősítését ($A_{f_{kv}}$) a kivezérelhetőség határfrekvenciáján!
(Figyelje meg az invertáló kapcsolás fázistolását is.)

Az ábráról leolvasva az amplitúdókat kiszámítható:

$$A_{f_{kv}} = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{10 \text{ V}}{900 \text{ mV}} = 11.11$$

- 1.5.4. Magyarázza meg az 1.3.3. alatt mért feszültségerősítéstől való eltérést!
(Figyelem! Ne tévessze össze a kivezérelhetőség határfrekvenciáját és a törésponti frekvenciát! Mekkora az erősítés a kivezérelhetőség határfrekvenciáján, dB értékben? Sávközépi frekvencián mekkora erősítést mértünk, dB értékben? Ezek alapján adjon közelítőleges becslést a törésponti frekvencia értékére! A becslés során az erősítés értékeket 10-es értékekre kerekítheti, pl. 10, 20, 100, 200 stb.)

Az eltérés abból adódik, hogy az erősítő nem minden frekvencián képes ugyanolyan kiementi erősítésre, a törésponti frekvenciáig azonos ($A_{us} = -97.5 = 39.78 \text{ dB}$), utána -20dB/dekád al csökken egészen a határfrekvenciáig (ahol egységnyi). A kivezérelhetőség határfrekvenciáján körülbelül 21 dB az erősítés, amely itt a sávközép frekvencia is.



2. Dinamikus tulajdonságok vizsgálata

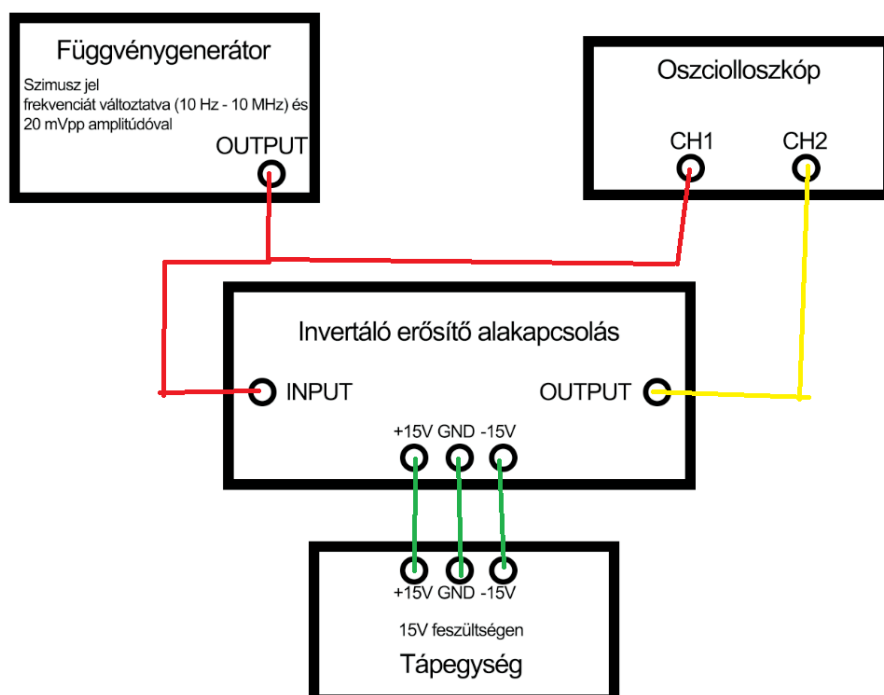
A BODE diagramok méréséhez és ábrázolásához az OSCBODE nevű programot használjuk!

(VIDEÓ: OSCBODE Front Panel bemutatása)

(URL: <https://web.microsoftstream.com/video/550df972-8f59-45c3-9edc-4e3460be26fe?list=studio>)

2.1. Invertáló erősítő Bode diagramjának meghatározása ($A_u(f)$)

2.1.1. Készítsen részletes **blokkvázlatot** az invertáló erősítő alkapcsolás Bode diagramjának meghatározásához!



A mérés menete: A szinusz generátor kimenetét a műveleti erősítő invertáló bemenetére kapcsoljuk, a neminvertáló bemenetet a kapcsolás GND pontjára kötjük. **1 kHz**-en beállítunk **20 V_{pp} (7 V_{eff} / 0dB)** nagyságú kimenő feszültséget, majd az oszcilloszkóppal a frekvencia folyamatos változtatásával 10 Hz – 10 MHz tartományban 1–2–5–10 lépésekben megmérhető az erősítő bemeneti és kimeneti jelének értéke és fázistolása.

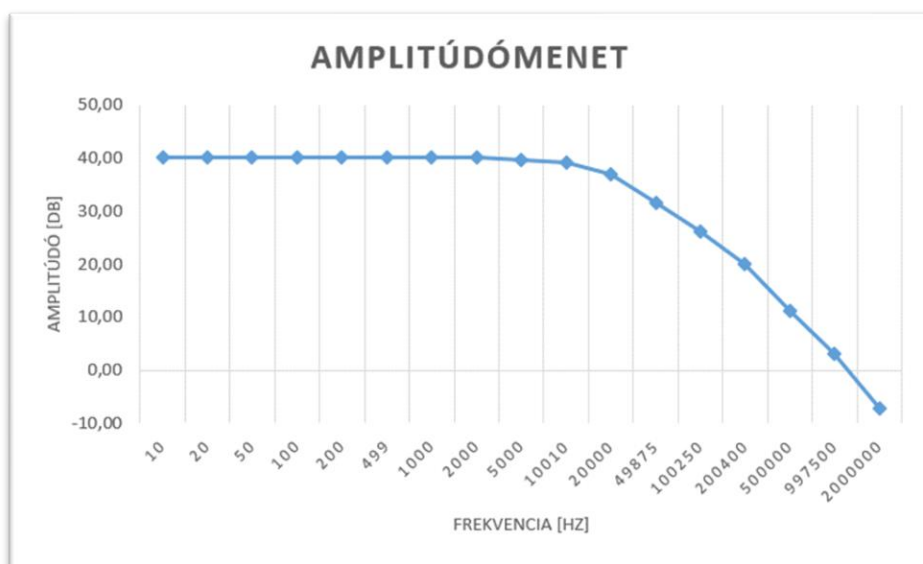
(VIDEÓ: Invertáló erősítő Bode diagramjának mérése OSCBODE programmal)

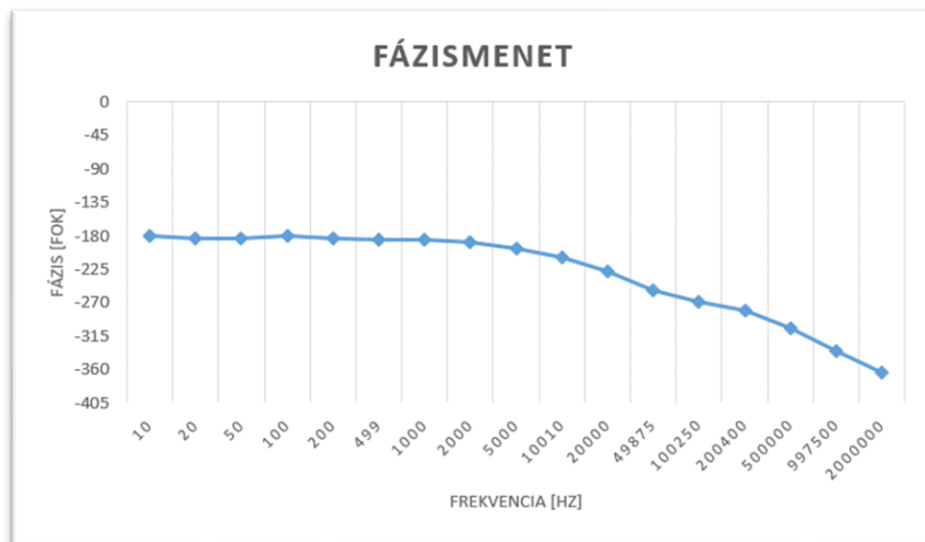
(<https://web.microsoftstream.com/video/3ca6a164-c0fa-4594-a21f-c3288add8013?list=studio>)

2.1.2. Kérem, válassza ki, töltsse le, majd nyissa meg az „M6_Erosito_hallgato_meresi_eredmenyek” melléklet e pontjához tartozó Excel fájlt! A file tartalmaz egy táblázatot azoknak a jeleknek az értékeivel, amelyeket az OSCBODE program segítségével mintavételeztünk. Az invertáló erősítőhöz tartozó adatokból (**f**, **U_{be}**, **U_{ki}**, **Fázis**) számolja ki és ábrázolja az amplitúdó– és fázismenetet két különböző loglineáris koordináta-rendszerben egymás alá. Értékelje a kapott eredményeket!

(Segítség: a Bode diagram egy dB-ben megadott amplitúdómenetből és fokban megadott fázismenetből áll. A két ábrát célszerűen egymás alá helyezze úgy, hogy a frekvencia skálák azonos vízszintes pozíciókban induljanak és végződjenek, az összehasonlíthatóságot segítve. Jelölje a függőleges fő és segédrácsokat. A fázismenet értéktengelyének fő osztását praktikusán 45°-os lépésekre állítsa. A kapott ábráról olvassa le: az első törésponti frekvenciát (tipp: -3dB) és a hozzá tartozó fázistolást, az amplitúdómenet töréspont utáni meredekségét, illetve írja le, hogy mi okozhatja a további fázistolást (tipp: 180°+90°+45°). Ellenőrizze a sávközépi és kivezérelhetőség határfrekvenciáján mért értékeket.)

A kész diagrammok:

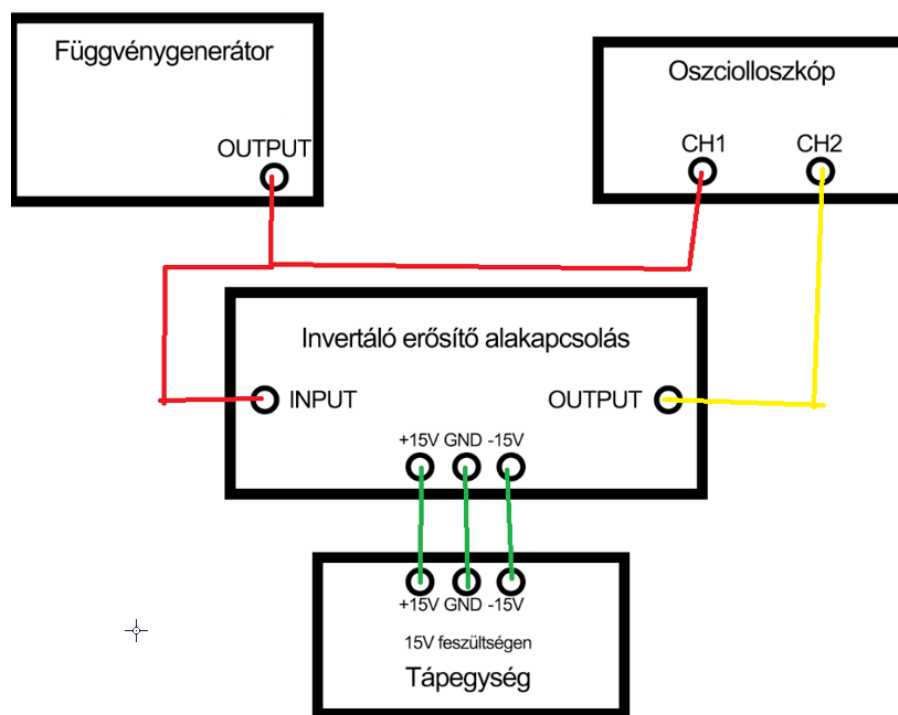




Látható, hogy körülbelül 10kHz-nél van a törésponti frekvencia. Ettől a ponttól kezdve és a következő töréspontoknál elkezd meredeken csökkenni az amplitúdó és a fázis is.

2.2. Mérőerősítő közös modulusú feszültségerősítésének mérése ($A_{uk}(f)$)

2.2.1. Készítsen részletes **blokkvázlatot** a mérőerősítő kapcsolás közös modulusú feszültségerősítés Bode diagramjának meghatározásához!



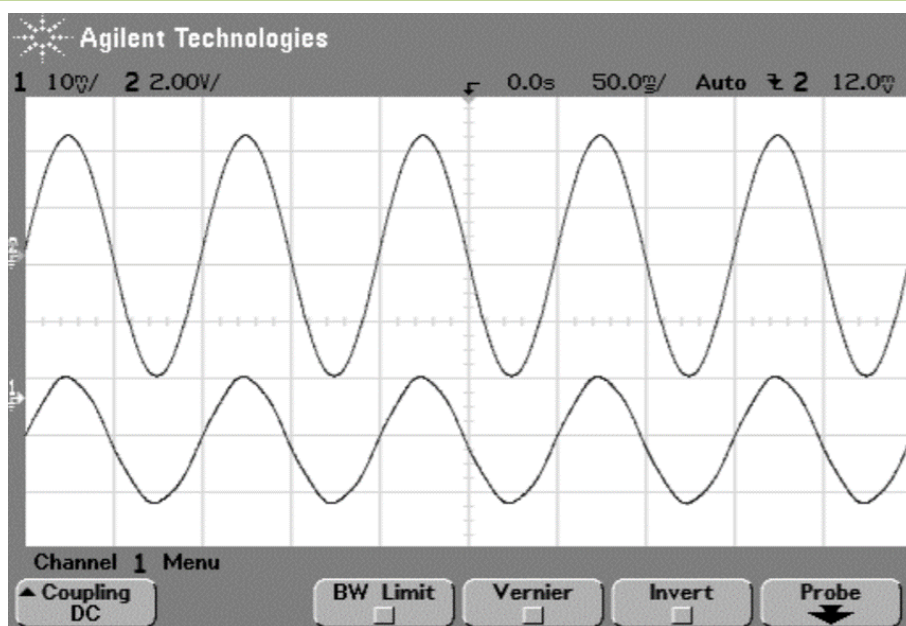
A beállított értékek lentebb olvashatóak.

A mérés menete: Összekötjük a mérőerősítő invertáló és neminvertáló bemeneteit, majd rákapcsolunk egy $3 V_{eff}$ nagyságú $f_k=10 \text{ Hz}$ -es szinusz jelet. A referencia

ágban az **R22** ellenállással sorba kötött **PCMR** potenciométerrel beállítható a minimális közös módusú feszültségerősítés. Oszcilloszkóppal mérhető az erősítő be- és kimeneti jelei és fázistolása.

- 2.2.2. Kérem, válassza ki az „**M6_Erosito_hallgato_meresi_eredmenyek**” melléklet e pontjához tartozó ábrát és tüntesse itt fel azt! Határozza meg az ábra alapján a közös módusú feszültségerősítés (A_{uk}) értékét!

(Ennél a kapcsolásnál a nagy, vagy a kis közös módusú erősítés a kívánatos? Segítség: a közös módus az, amely mindkét bemeneten megjelenik. Ilyen például egy hordozó DC komponens (pl. hordozójel, amelynek most inkább a referenciától való eltérése a kérdés), kapcsoló üzemű tápegységek zaja, a szomszéd mikrohullámú sütője, a „Kossuth rádió” stb.)



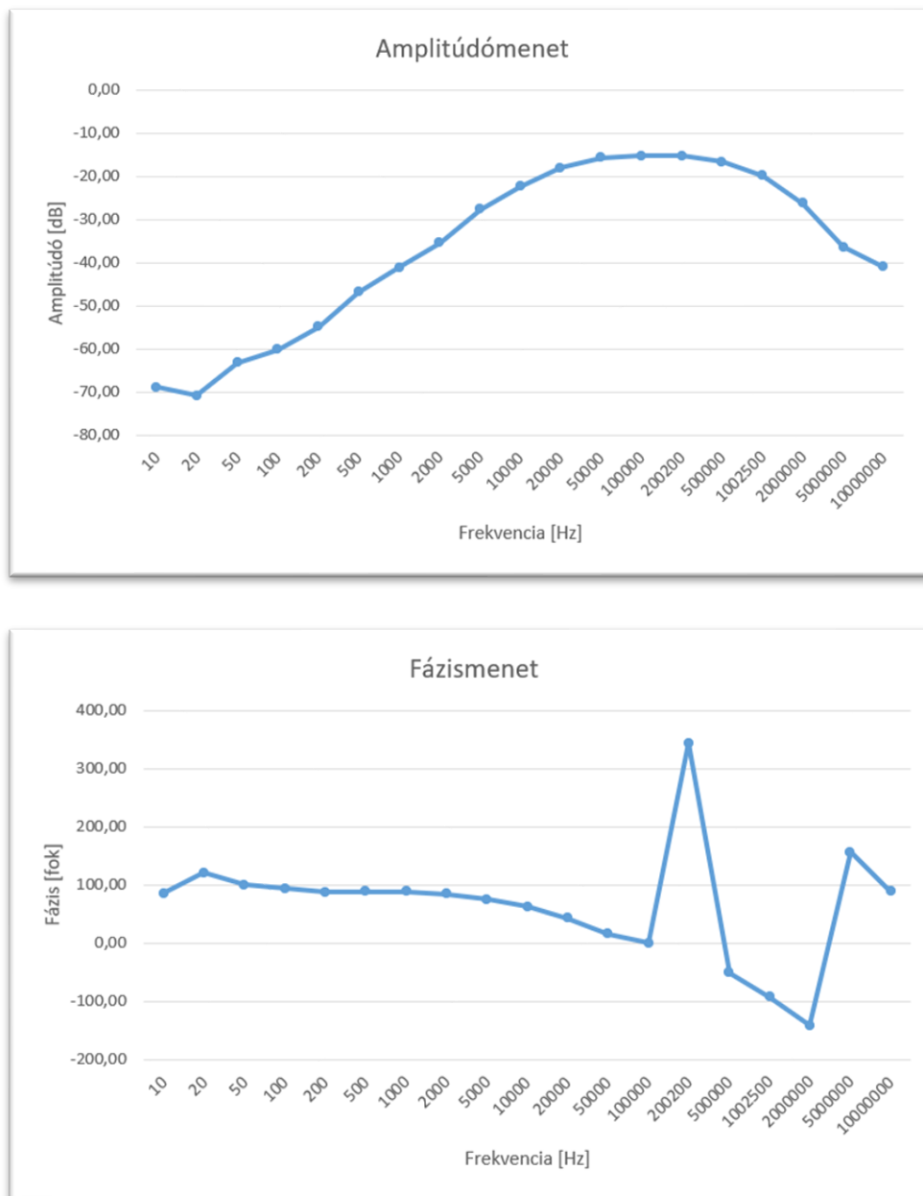
Az ábráról leolvasható U_{ki} és U_{be} peak-to-peak értéke, amelyből meghatározva A_{uk} -t:

$$A_{uk} = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{22 \text{ mV}}{8.4 \text{ V}} = 0.002619$$

- 2.2.3. Kérem, válassza ki, töltse le, majd nyissa meg az „**M6_Erosito_hallgato_meresi_eredmenyek**” melléklet e pontjához tartozó Excel fájlt! A file tartalmaz egy táblázatot azoknak a jeleknek az értékeivel, amelyeket az OSCBODE program segítségével mintavételeztünk. A közös módusú feszültségerősítéshez tartozó adatokból (**f**, **U_{be}** , **U_{ki}** , **Fázis**) számolja ki és ábrázolja az amplitúdó-menetet egy loglineáris koordináta-rendszerben 10 Hz - 10 MHz frekvencia tartományban. Értékelje a kapott eredményeket!

(Itt elsősorban az amplitúdómenet érdekes. Vesse össze az invertáló kapcsolás amplitúdómenetével. Ha a közös módusú jel valamilyen zaj, akkor (egy rövid mondatban értékelve) hogyan alakul a jel/zaj viszony, és e tekintetben mik lehetnek a kritikus frekvencia értékek?)

A kész diagrammok:



Látható, ahogy az amplitúdó körülbelül 100kHz-ig növekszik, majd lecsökken. Az amplitúdómenet a törésponti frekvenciáig növekszik, majd onnantól kezdve csökken. Az invertáló kapcsolás amplitúdó menetével ellentétben itt nincs 10 kHz környékén letörés.

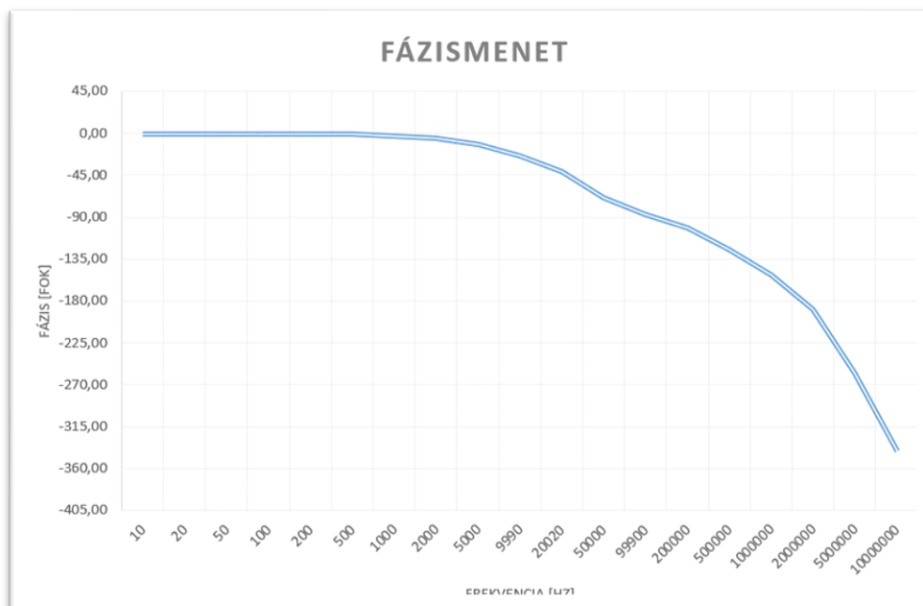
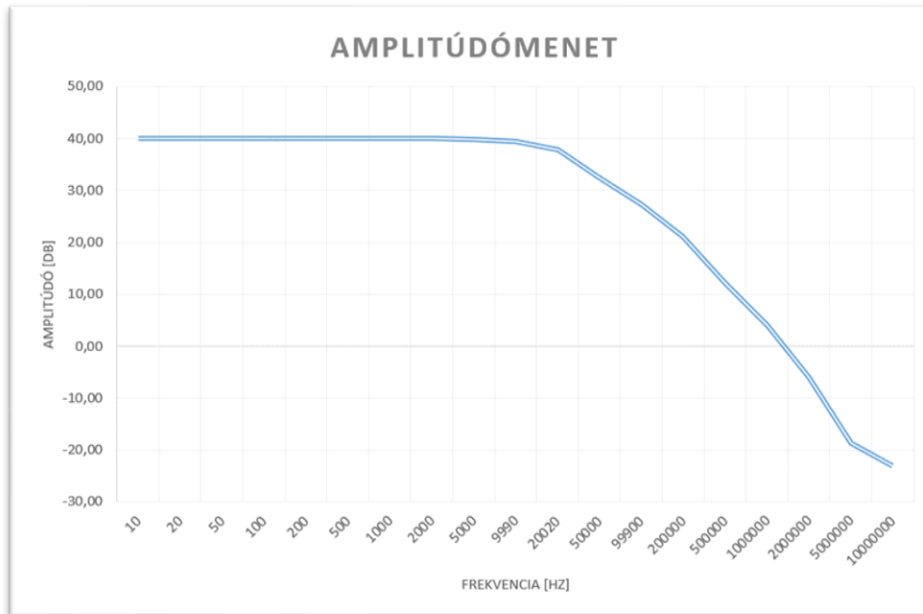
2.3. Neminvertáló mérőerősítő BODE diagramjának mérése ($A_u(f)$)

A mérés menete: A szinusz generátor kimenetét a műveleti erősítő neminvertáló bemenetére kapcsoljuk, az invertáló bemenetet a kapcsolás GND pontjára kötjük. A továbbiakat lásd 2.1. pontban.

2.3.1. Kérem, válassza ki, töltsse le, majd nyissa meg az „M6_Erosito_hallgato_meresi_eredmenyek” melléklet e pontjához tartozó Excel fájlt! A file tartalmaz egy táblázatot azoknak a jeleknek az értékeivel, amelyeket az OSCBODE program segítségével mintavételeztünk. A neminvertáló erősítőhöz tartozó adatokból (f ,

U_{be} , U_{ki} , Fázis) számolja ki és ábrázolja az amplitúdó– és fázismenetet két különböző loglineáris koordináta-rendszerben egymás alá. Értékelje a kapott eredményeket!

A kész diagrammok:



Az amplitúdó a törésponti frekvenciáig (10kHz) állandó értéken van, a törésponttól kezdve meredeken elkezd csökkenni. A fázis hasonlóan viselkedik. Magasabb frekvencián alacsonyabb a fázis és az amplitúdó.