

2. számú mérés

Lock-In erősítő modell vizsgálata

Laboratóriumi gyakorlat 2. éves Fizika alapszakos hallgatók számára

Összeállította: dr. Koller István

BME Híradástechnikai Tanszék

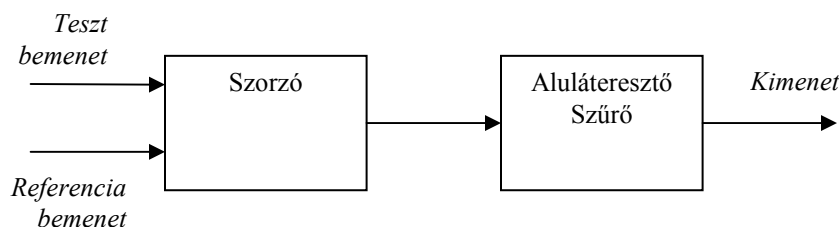
2008

1. Bevezetés

Az Lock-In erősítő széleskörűen elterjedt a fizikai kísérletek, mérések különböző területein, ahol kicsi, zajban eltemetett jelek detekciója a feladat. A mérés célkitűzése az, hogy a hallgatók megismerjék ennek a technikának az alapjait, és egy modell segítségével a gyakorlatban is lássák annak működését.

2. A fázisérzékeny voltmérő

A Lock-In erősítő működésének megértéséhez vizsgáljuk meg először az alábbi ábrán látható rendszer működését.



Az ábrán vázolt rendszer egy szorzót és egy aluláteresztő szűrőt tartalmaz. A szorzó olyan áramkör, amely a kimenetén a bemenetére kapcsolt jelek feszültségének szorzatával arányos feszültségű kimenő jelet ad. Az aluláteresztő szűrő egy frekvenciaszelektív eszköz, amely a kisfrekvenciás áteresztő tartományába eső frekvenciájú jeleket átengedi, míg a nagyfrekvenciás zárótartományába eső frekvenciájúakat pedig jelentősen – a szűrő specifikációjától függően - csillapítja.

Legyen a referencia, illetve a teszt bemenetekre jutó feszültség jelek:

$$u_r = U_r \sin(\omega t)$$

$$u_t = U_t \sin(\omega t + \varphi)$$

Az egyenletekből látható, hogy a teszt bemenet frekvenciája megegyezik a referencia bemenet frekvenciájával, annak csak amplitúdója és fázisa tér attól el.

A szorzó kimenetén lévő feszültség:

$$u_{sz} = u_r * u_t = \frac{U_r U_t}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)]$$

Látható, hogy a szorzás következtében létrejött egy DC komponens, amely arányos a teszt jel referencia jelre vett vetületével.

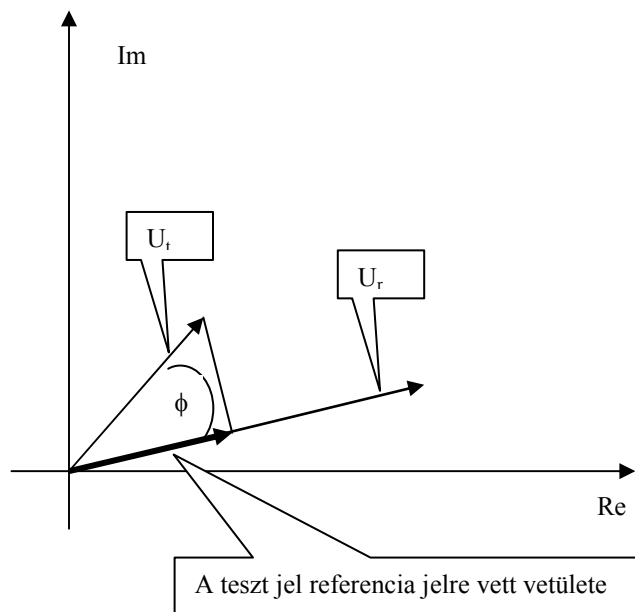
A kétszeres frekvenciájú váltókomponenst az aluláteresztő szűrő – ha az a szűrő zárótartományában van – nagymértékben lecsillapítja, kiszűri, és a kimenetre nem enged kijutni.

Tehát a kimeneten lévő feszültség időfüggvénye:

$$u_{ki} = \frac{U_r U_t}{2} [\cos \varphi]$$

Ez a függvény nem tartalmazza az idő független változót, tehát konstans az idő függvényében, ami azt jelenti, hogy egyenfeszültség mérővel meghatározható.

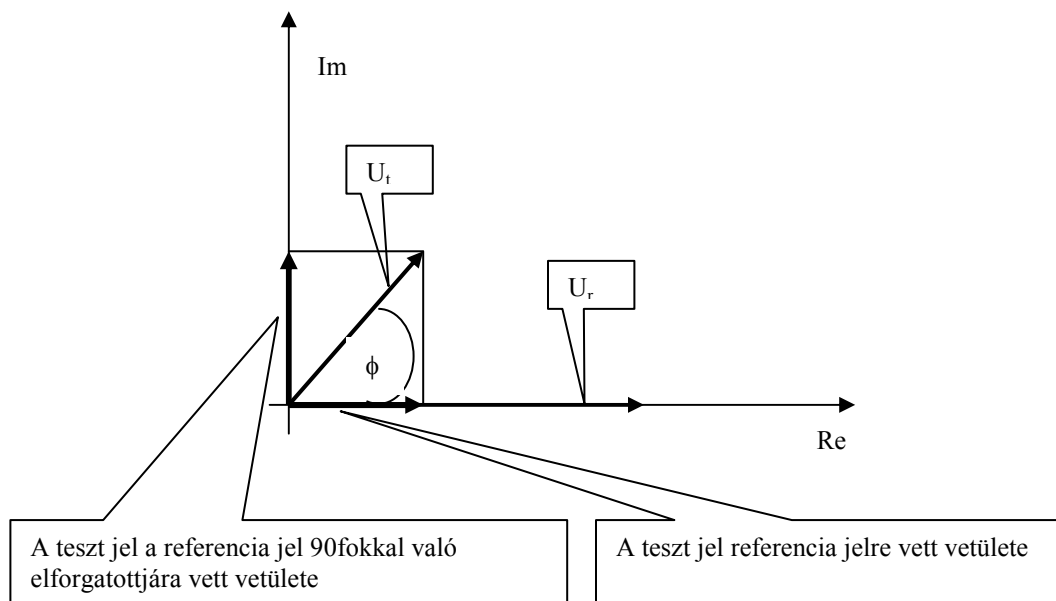
Hogy miért szokták az így létrejövő műszert vektorkomponens mérőnek is hívni, arra a forgó vektoros reprezentáció ad magyarázatot:



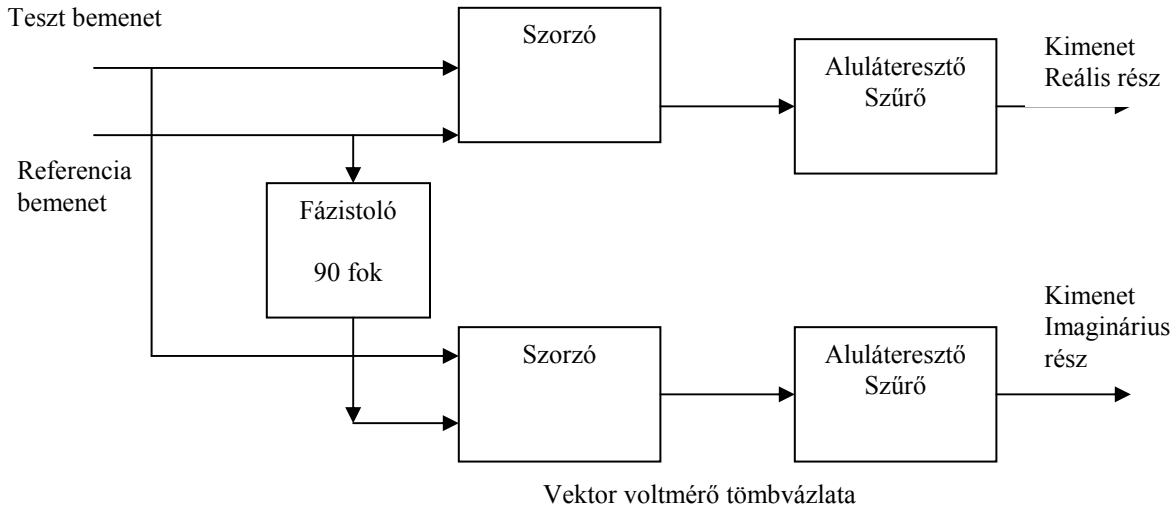
Az ábrán látható referencia és teszt vektorok ω szögsebességgel az óramutató járásával ellentétesen forognak. Az Im tengelyre vett vetületeik a teszt, illetve a referencia jelek.

3. A vektor voltmérő

Tekintsük most a referencia vektor irányát a Re tengely irányának. Ha azt acélt tűzzük ki, hogy ábrázoljuk a komplex síkon a teszt vektort ez esetben, akkor szükségünk van a 90 fokkal elforgatott Im tengely irányú komponensre is:



Ha képesek vagyunk a referencia jelre, illetve a 90 fokos elforgatottjára vett vetületeket meghatározni, akkor ebben a koordináta-rendszerben Descartes, vagy polár formában meg tudjuk adni a teszt vektor - mérendő feszültség - amplitudóját, és fázisát. Erre a mérésre a következő tömbvázlat szerint működő berendezés képes:



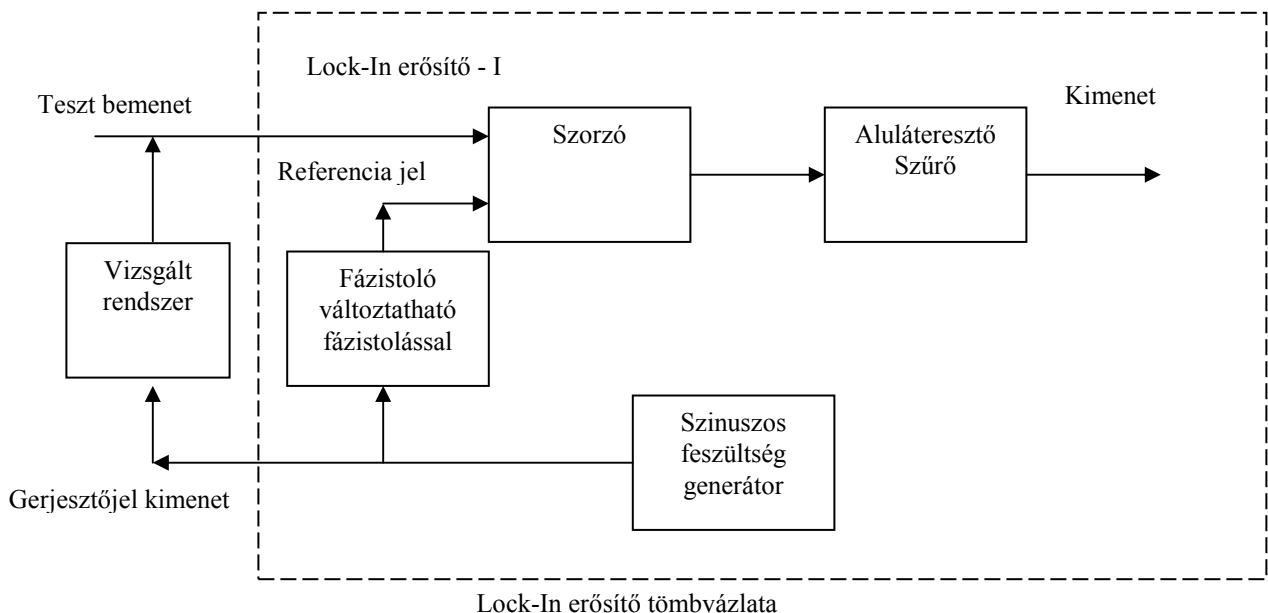
A tömbvázlat szerint működő eszközt hívjuk vektor voltmérőnek. A szorzók kimenetén létrejövő kétszeres frekvenciájú komponensek az aluláteresztő szűrők zárótartományába esnek. A vektor voltmérő alkalmas arra, hogy egy adott referencia jelhez képest megmérje a mérendő fel fázisát és amplitudóját. A mérendő jelben lévő – a referencia jeltől eltérő frekvenciájú komponensek hatását az aluláteresztő szűrő az áteresztő tartomány szélességének függvényében kiszűri.

4. A Lock-In erősítő

A Lock-In erősítő tulajdonképpen nem más, mint az előbbieken megismert fázisérzékeny voltmérő, illetve a vektorvoltmérő rokona, változata.

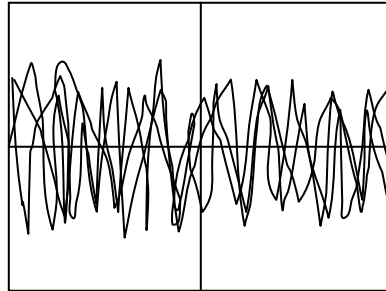
4.1. Lock-In erősítő - I

Egy lehetséges, a legegyszerűbb Lock-In erősítő tömbvázlata az alábbi ábrán látható:



Vizsgáljuk meg azt az esetet, amikor a rendszer a szinuszos gerjesztő feszültség hatására ugyanolyan frekvenciájú, de nagyon kis amplitudójú, zajjal terhelt kimenőjelet ad. A kísérlet szempontjából a kicsi, gerjesztőjellel azonos frekvenciájú jel amplitudójának mérése a fontos.

Ha a vizsgált rendszer kimenőjelét oszcilloszkópon - ami az időtartományi vizsgálat fő eszköze - figyeljük meg, akkor azt tapasztalhatjuk, hogy a determinisztikus jelet nem, csak a zaj jelet látjuk, amit úgy is szoktak mondani, hogy a jel a zajban el van temetve. Ez az eset – ami a gyakorlatban igen gyakori – akkor fordul elő, ha a zaj jel nagyobb mint a hasznos jel.



A rendszer kimenőjele oszcilloszkópon

Zajos esetben tehát könnyen előfordulhat, hogy az oszcilloszkóp segítségével nem tudjuk detektálni az általunk vizsgálni kívánt jelet. Erre szolgál a Lock-In erősítő. Tudjuk, hogy a Lock-In erősítőben lévő fázisérzékeny egyenirányító a teszt bemenet referencia jelle vett vetületével arányos egyen feszültség jelet állít elő.

Ha tehát a feladatunk a gerjesztőjellel azonos frekvenciájú, igen kicsi amplitudójú zajban eltemetett válasz jel amplitudójának mérése, akkor a fenti Lock-in erősítő kimenetére egyenfeszültség mérőt kapcsolunk, és azon a fázistoló változtatásával jelmaximumot keresünk. Felmerül a kérdés, hogyan állítsuk be az aluláteresztő szűrő áteresztő tartományának szélességét. Erre a kérdésre is választ kapunk a következő fejezetben.

4.2. Az aluláteresztő szűrő

A Lock-In erősítő szorzójának kimenetén a mérendő egyenfeszültség mellett a kétszeres frekvenciájú komponens, illetve a zavaró zaj frekvenciában áttett változata is megjelenik. A zavaró zaj várható értéke az esetek többségében zérus. A továbbiakban csak ezzel az esettel foglalkozunk. Ha a zaj várható értéke zérus, akkor a szorzó kimenőjelenek várható értékét képezve a kívánt egyenfeszültségű komponens megkapjuk. A várható értéket átlagolással, a jel idő szerinti integrálásával kapjuk meg.

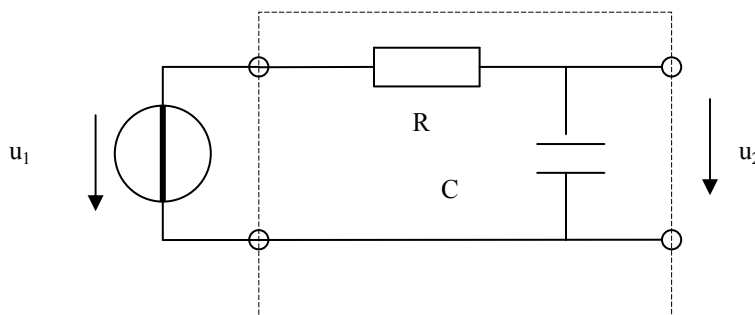
Most vizsgáljuk meg, hogyan tudunk olyan áramkört építeni ami az idő szerinti integrálást elvégzi. Tételezzük fel, hogy egy cosinus-os vizsgálójel idő szerinti integrálját kell előállítanunk. Reprezentáljuk a vizsgálójelünket egy a komplex síkon forgó vektorral, illetve annak valós tengelyre vett vetületével:

$$u(t) = U_0 e^{j\omega t}$$

A jel integrálja:

$$\int u(t) dt = \frac{U_0 e^{j\omega t}}{j\omega} = \frac{u(t)}{j\omega} = \frac{u(t)}{s}$$

A következőkben megmutatjuk, hogy az alábbi ábrán látható áramkör bizonyos feltételek mellett integrátornak tekinthető.



Az áramkört tápláló feszültség generátor ω frekvenciájú szinuszos jelet állít elő. Írjuk fel a kimeneten mérhető feszültséget a feszültségosztás összefüggését és az $s=j\omega$ helyettesítést alkalmazva:

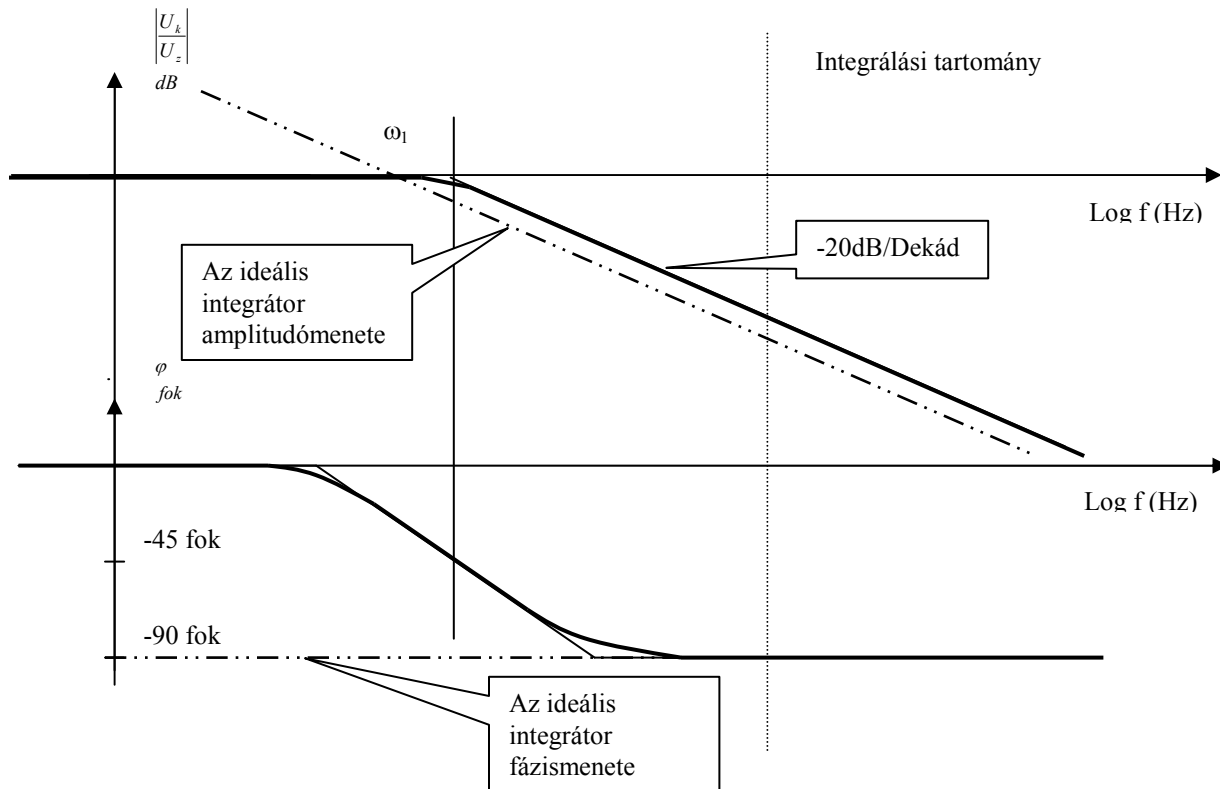
$$u_2 = u_1 \frac{\frac{1}{sC}}{\frac{1}{sC} + R}$$

Ebből az $\frac{u_2}{u_1}$ átviteli függvény:

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{1}{1 + sRC}$$

Mint az előzőekből látható az ideális integrátor $\frac{u_2}{u_1}$ átviteli függvénye az $\frac{1}{s}$ lenne, de ha az sRC szorzat lényegesen nagyobb, mint 1, akkor az RC hálózat átviteli függvénye jól megközelíti az ideális.

Ábrázoljuk az RC integrátor átviteli függvényét:

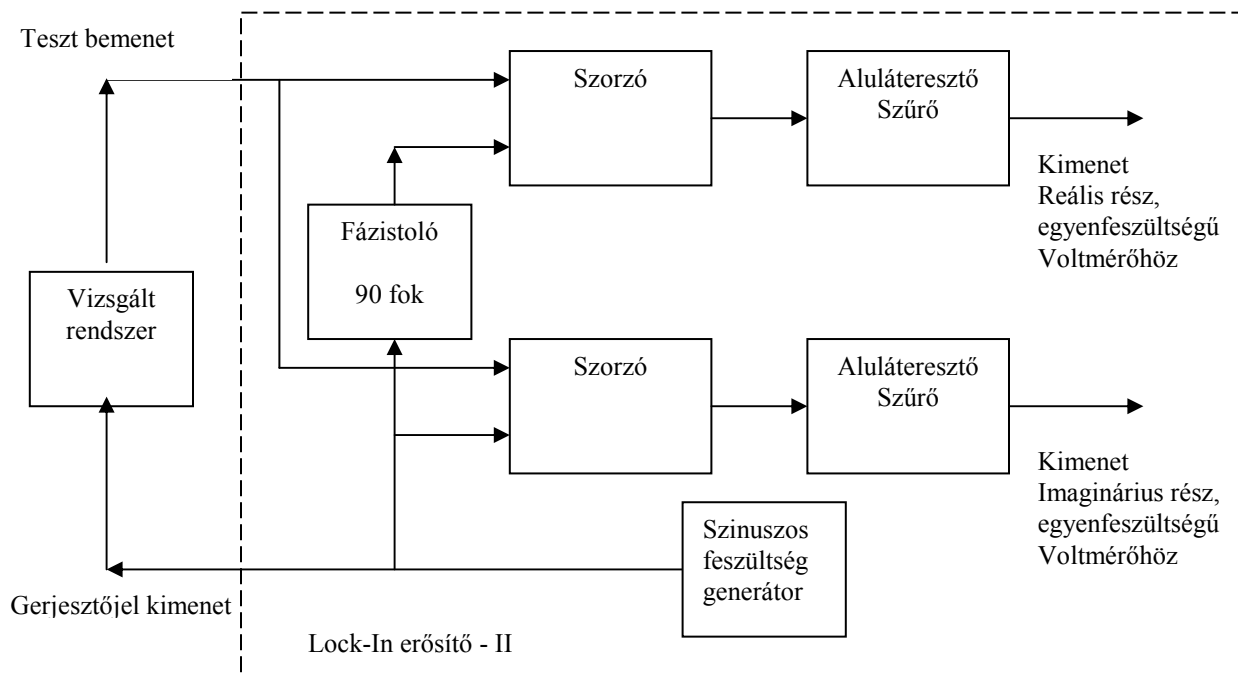


Tehát a vázolt RC tag a törésponti frekvenciánál lényegesen nagyobb frekvenciákon integrátorként viselkedik. Az időtartományi integrálás a frekvenciatartományban a frekvencia növelésével egyre kisebb kimeneti jelet eredményez. Ezért hívjuk az ilyen típusú áramköröket aluláteresztőknek.

A gyakorlatban aluláteresztő szűrőként meredekebb levágású szűrőket is alkalmaznak. Ezek a szűrők a nagyfrekvenciás komponenseket jobban csillapítják és felfoghatók többszörös integrátorként.

4.3. Lock-In erősítő - II

A mérésben használt Lock In erősítő egyszerűsített tömbvázlata az alábbi ábrán látható:



Analizátor típusú Lock-In erősítő tömbvázlata

Ezt a Lock-In erősítőt analizátor típusú Lock-In erősítőnek is szokás hívni. A mérésben a fenti tömbvázlat digitális realizációjával találkozunk. A Lock-in erősítőt egy jelfeldolgozó processzoron (Digital Signal Processor – DSP) futó programmal valósítottuk meg. Fenti hatásvázlaton túl a DSP még egy szélessávú zajgenerátort is megvalósít, ami lehetővé teszi a zajos esetek modellezését.

A realizált műszer a Lock-In kimenetet Descartes koordináta-rendszerben reális rész, imaginárius rész formában, illetve amplitúdó és fázis formában is kijelzi analóg műszer mutatóit emulálva – amik a növekedés csökkenés megítélésére ideálisak – és számszerűen is kijelzi.

4.4. A Lock-In erősítő, mint egy DSP applikáció

A mérés során a Lock-In erősítőt egy nagyteljesítményű DSP-n (Digital Signal Processor) futó valós idejű program realizálja. A DSP egy összetett rendszer része, amely az alábbi ipari formafaktorú - PC/104 - komponensekből áll:

- CPU kártya – x86 architektúrájú központi egység 300MHz-es processzorral, 128MB SDRAM-mal, stb.
- HD modul – kisméretű merevlemez tároló
- DSP modul – TMS320C6202 alapú jelfeldolgozó kártya
- Analóg illesztő egység, két analóg be- kimenettel, programozható sávkorlátozó szűrővel, 12 bites nagysebességű konverterekkel.

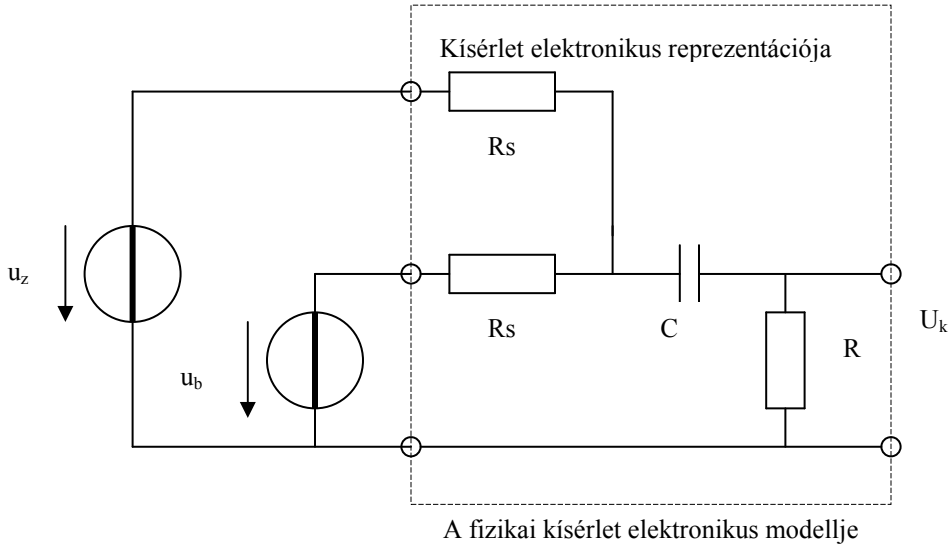
Ez a rendszer jó példa arra, hogy a hagyományosan analóg feladat megoldásának egy igen hatékony alternatívája a DSP alapú realizálás.

A mérésben alkalmazott RTD Embedded Technology, Inc. gyártmányú rendszereket a gyártó adományozta Tanszékünk számára. A mind a rendszer központi egysége, mind pedig a jelfeldolgozó egység a Híradástechnikai Tanszék és az RTD Embedded Technologies, Inc. közös fejlesztése.

A rendszer bekapcsolása után egy szokásos Win2000 képernyőt kapunk, amin a LockInDetect *new* ikonra kattintva indíthatjuk a virtuális Lock-In erősítő applikációt.

5. A vizsgálandó rendszer

A mérés során a fizikai kísérletet egy elektronikus modellel helyettesítjük. Ez a modell egy olyan áramkör, amellyel a bemenetére adott szinuszos jel fázisát és amplitudóját változtatni tudjuk, valamint a kimenetehz zajt tudunk adni.



Az u_z feszültség generátor széles spektrumú zajfeszültséget generál. Ezzel modellezzük a fizikai kísérlet zajosságát. Az u_b feszültség generátor adott frekvenciájú szinuszos mérőjelet állít elő. A két generátor kimeneti szintjének beállításával lehet a modellezett kísérlet zajviszonyait változtatni.

Írjuk fel a kimenet és a bemenet közötti átviteli függvényt. Másképpen fogalmazva számítsuk ki, ha a bemenetre adott frekvenciájú szinuszos gerjesztőjelet adunk, az a kimeneten milyen feszültséget kelt. Mivel mindkét generátor egyforma ellenállással kapcsolódik a C kondenzátorhoz, a bemenetekről értelmezhető átviteli függvények egyformák: ($s=j\omega$)

$$\frac{u_k}{u_b} = \frac{u_k}{u_z} = \frac{R_s x \left(R + \frac{1}{sC} \right)}{R_s x \left(R + \frac{1}{sC} \right) + R_s} * \frac{R}{R + \frac{1}{sC}}$$

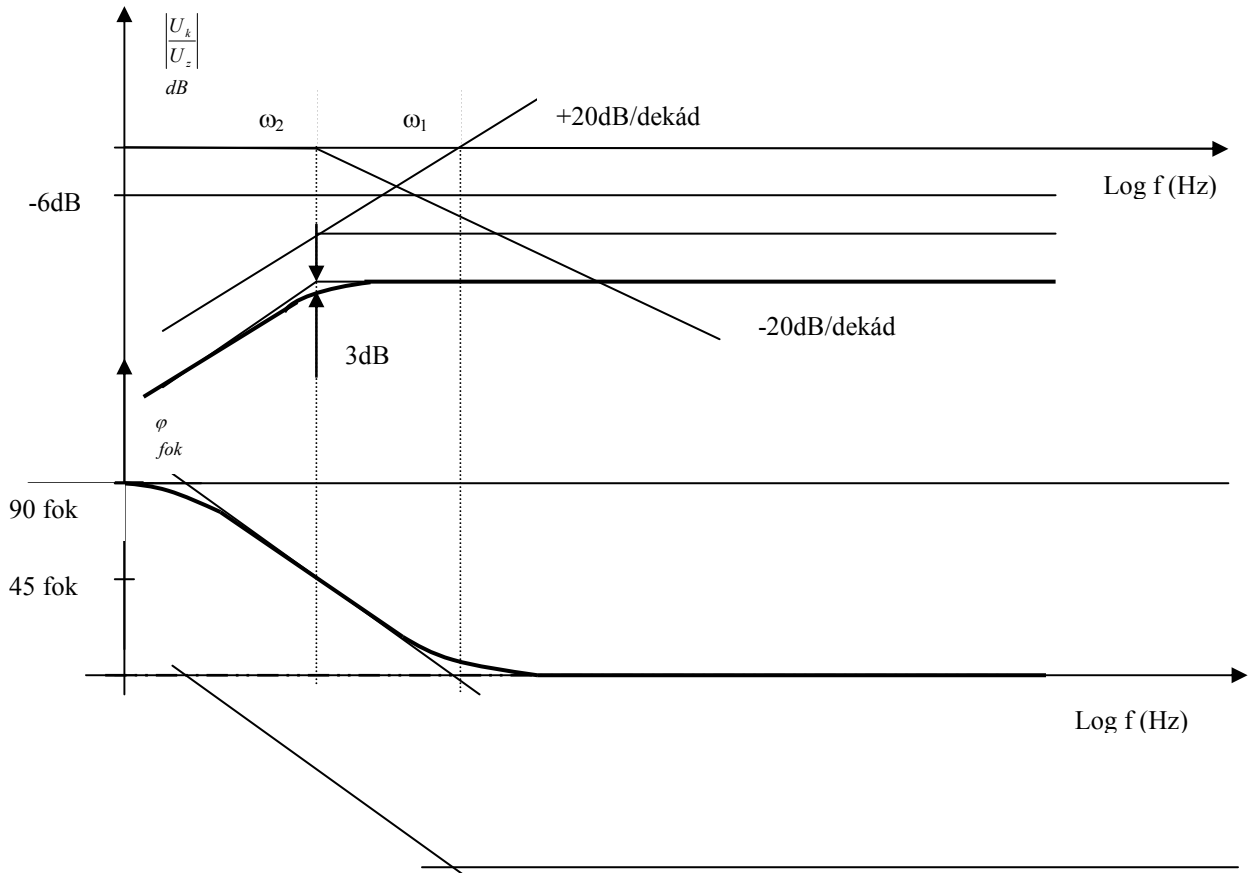
Az x jelölés a párhuzamosan kapcsolt impedanciák eredőjének meghatározására szolgáló replusz műveletet jelöli.

Átalakítások után:

$$\frac{u_k}{u_b} = \frac{u_k}{u_z} = \frac{1}{2} \frac{1 + sRC}{1 + sC \left(R + \frac{R_s}{2} \right)} \frac{sRC}{1 + sRC} = \frac{1}{2} \frac{\frac{s}{\omega_1}}{1 + \frac{s}{\omega_2}} \quad \text{ahol:} \quad \omega_1 = \frac{1}{RC}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{C \left(R + \frac{R_s}{2} \right)}$$

Ábrázoljuk ennek a komplex függvénynek az abszolút értékét dB-ben, fázisát fokban a logaritmikus frekvencia függvényében. (A dB definícióját lásd a házi feladatnál) Az ilyen típusú diagramokat Bode diagramnak hívjuk. A Bode diagram igen egyszerű – az előadáson megismerhető-szabályok alapján könnyen megrajzolható. A diagram alapján a vizsgált rendszer működése könnyen jellemzhető.

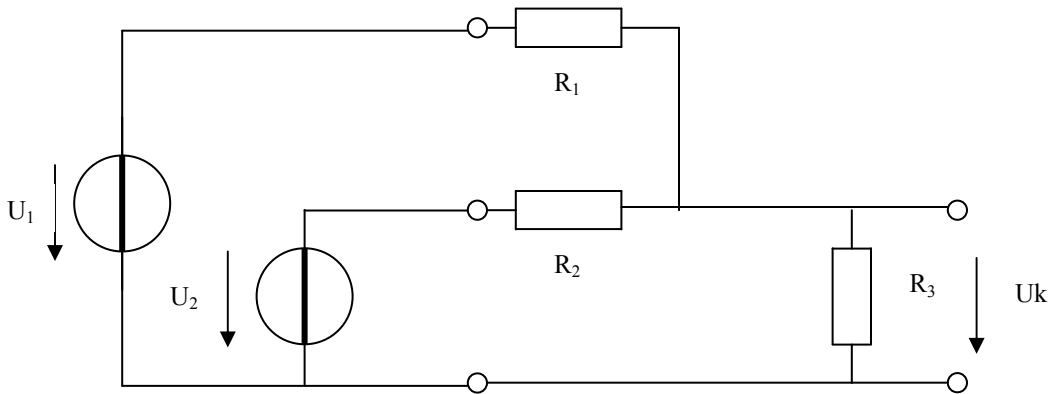


A kísérlet elektronikus modelljének Bode diagramja

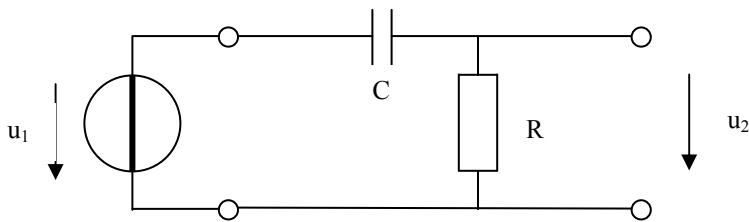
A diagram alapján megállapítható, hogy ez az áramkör felüláteresztő jellegű, a nagyobbtól a kisebb frekvenciák felé haladva a kimeneti jelet egyre jobban csillapítja. Az egyen feszültségű komponens nem engedi át.

6. Házi feladatok

1. Írja fel az alábbi hálózat esetén az u_k kimeneti jel időfüggvényét, ha az u_1 és u_2 jelek szinuszos, illetve koszoszos jelek 0 kezdőfázissal



2. Miért, és milyen feltételekkel nevezhető differenciátornak az alábbi kapcsolás? Válaszát részletesen indokolja.



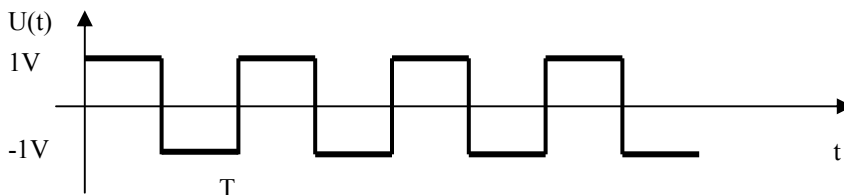
3. Négypólusok, erősítők és más mennyiségek jellemzésére is gyakran alkalmazzák a dB-t. Négypólusok átviteli jellemzésére a kimeneti feszültség / bemeneti feszültség átviteli függvényt gyakran fejezzük ki dB-ben:

$$L_{\frac{u_{ki}}{u_{be}}[dB]} = 20 \lg \frac{u_{ki}}{u_{be}}$$

Milyen viszonzszámot fejez ki -3, -6, 10, 20, 30, 40 dB. Ezeket az értékeket a mérés-technikai gyakorlatban érdemes fejből is ismerni.

4. Határozza meg a “reprezentáció”-hoz tartozó ω_1 , illetve az ω_2 frekvenciák értékét, ha $R_s=1k\Omega$, $R=1k\Omega$, $C=1\mu F$.

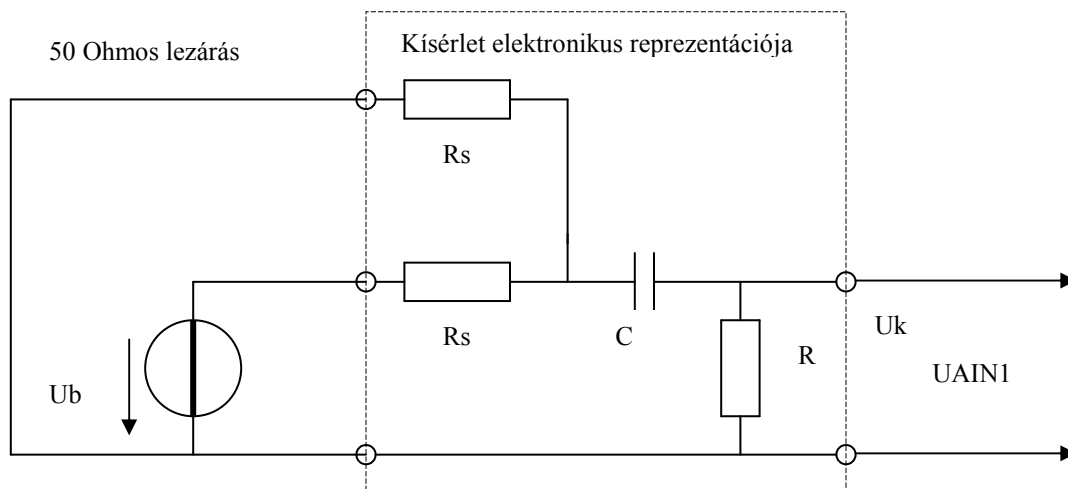
5. Írja fel a szimmetrikus négyszögjel Fourier sorát.



7. Mérési feladatok

1. Ismerkedjen meg a PC/104 alapú hardverrel, majd indítsa el LockInDetect *new* applikációt.

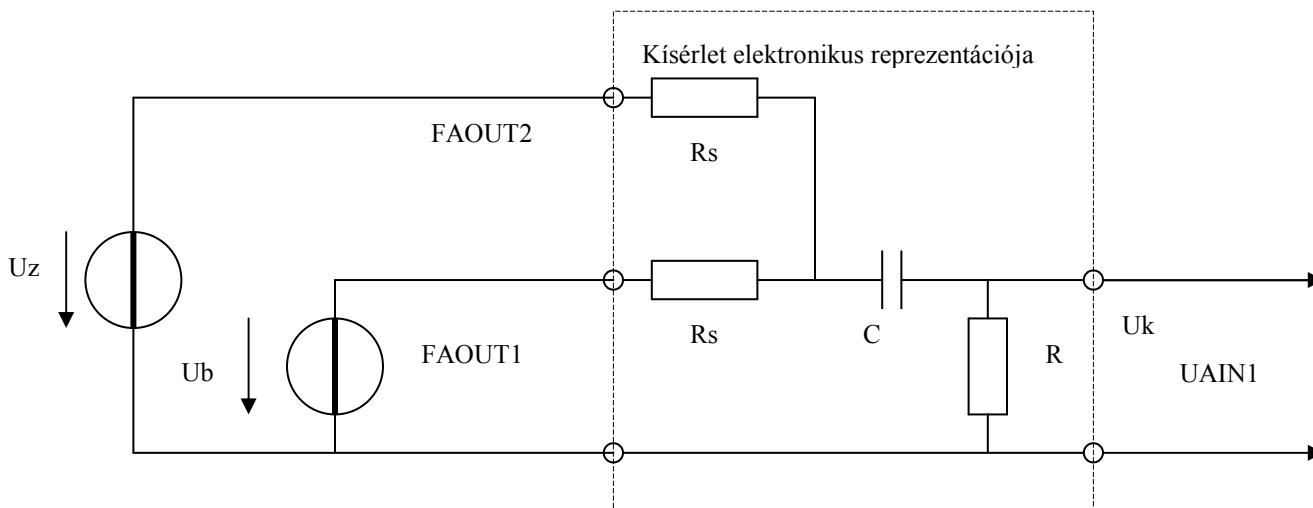
2. Kösse össze a szinuszos generátor FAOUT1 kimenetét az elektronikus reprezentáció egyik bemenetével. A másik bemenetet egy 50 Ohmos lezáróellenállással elimináljuk. (Az 50 Ohmos lezáróellenállás jól reprezentálja az amúgy ezen a helyen lévő generátor belső ellenállását.) A reprezentáció kimenetét – amit a Lock-In erősítő tesztbemeneteket használunk- kössük az UAIN1 bemenetre:



T dugók alkalmazásával csatlakoztassa a bemeneti illetve a kimeneti jeleket a kétsugaras oszcilloszkóp két bemenetére. Az oszcilloszkópon kétsugaras üzemmódban egymás alatt jelenítse meg a rendszer be-, illetve kimenőjeleit.

Ebben a mérési összeállításban – zajmentes esetben, vegyük fel a reprezentáció amplitudó és fázismenetét 1Hz.. 1kHz frekvenciatartományon logaritmus lépésközzel, elegendő sűrűséggel. Foglalja az eredményeket táblázatba, majd ábrázolja azokat logaritmus frekvenciatengelyű diagramban az amplitudómenet dB-ben, a fázismenet pedig fokban. Néhány jellegzetes oszcilloszkóp képernyőt is dokumentáljon.

3. Csatlakoztassa most a véletlen zaj generátor jelét – FAOUT2 az 50 Ohmos lezárás helyére:



A kísérlet elektronikus reprezentációja a két R_s ellenállás segítségével összeadja a szinuszos mérőjelet, illetve a fizikai kísérlet zajának reprezentálására, modellezésére előállított véletlen zaj jelet.

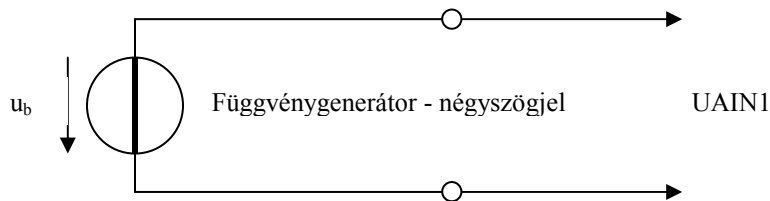
Állítsa be úgy a jelek amplitudóját, hogy a zaj jel 1.5V, a szinuszos mérőjel pedig 0.5V amplitudójú legyen. Vizsgálja meg időtartományban a kísérlet kimeneti jelét, és dokumentálja a mérési jegyzőkönyvben. Dokumentálja a mérőjel, illetve a zajjel paramétereit, időfüggvényét.

Végezze el az előző pontban leírt mérést, most a zajos esetben.

Vesse össze a kapott eredményeket az előző pontbelivel.

4. Ebben a pontban azt az esetet vizsgáljuk meg, amikor a fizikai kísérlet nem igényel szinuszos vezérlőjelet, hanem maga állítja elő – valamilyen szabályszerűség szerint – a kimeneti jelét. Most a zajtalan esetet, a következő pontban egy zajjal terheltet vizsgáljuk.

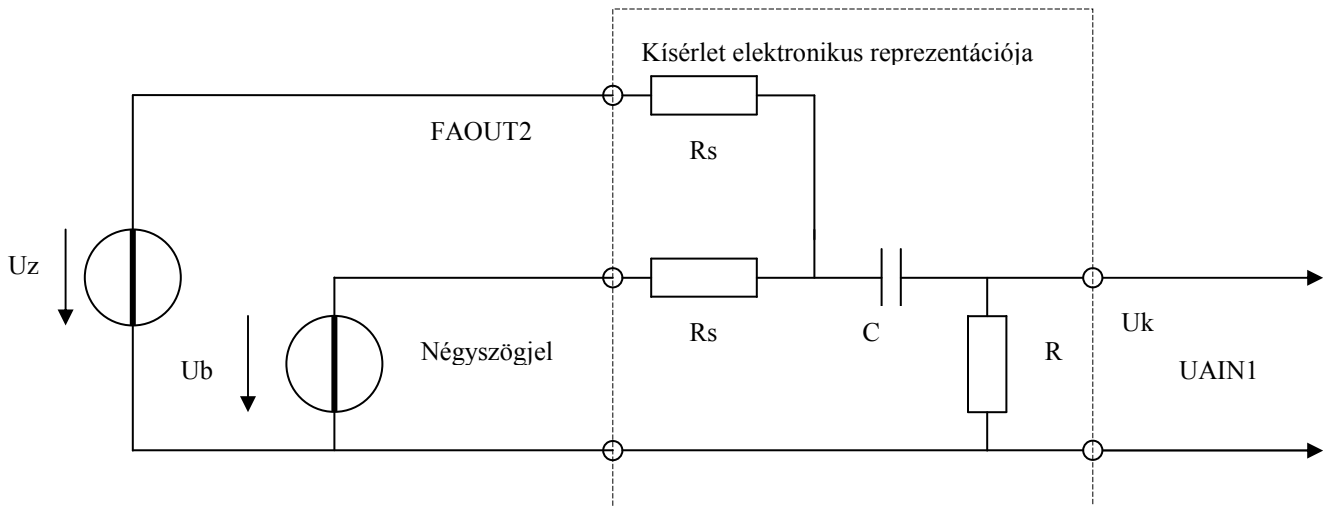
Kapcsoljuk a Lock-in erősítő bemenetére közvetlenül a függvénygenerátor jelet. Állítsuk a jelalakot AC csatolt szimmetrikus négyszögjelre, frekvenciáját 500Hz-re, amplitudóját 1V-ra:



Az FAOUT1 szinuszos jelet - referencia jel – kapcsoljuk a kétsugaras oszcilloszkóp egyik, a négyszögjelet pedig a másik bemenetére.

A házi feladatban meghatároztuk a négyszögjel Fourier sorát, tehát fel tudjuk vázolni a négyszögjel abszolútérték spektrumát. Ellenőrizzük ezt a gyakorlatban a Lock-In erősítő segítségével. Állapítsuk meg az alapharmonikus, majd a felharmonikusok frekvenciáját, amplitudóját. Mi jellemzi az oszcilloszkóp képet a felharmonikusok frekvenciáján. A mérést részletesen dokumentáljuk.

5. Ebben a pontban az alábbi mérési összeállítást vizsgáljuk:



A rendszer bemenőjele most a négyszögjel, amelynek frekvenciája a referenciajel frekvenciájától független. A másik bemenet a zajjel.

Állítsuk a négyszögjel generátort 500Hz 1V-os állásba. Detektáljuk a rendszer kimenetén lévő komponensek nagyságát és frekvenciáját 0V amplitudójú, majd 1.5V maximális amplitudójú zaj esetén. A mérést részletesen dokumentáljuk.