

## Elektronika II. laboratórium

### 2. mérés: Hangolt körös analóg áramkörök

Összeállította: Mészáros András

2017.09.19.

#### 2.1 Elméleti áttekintés:

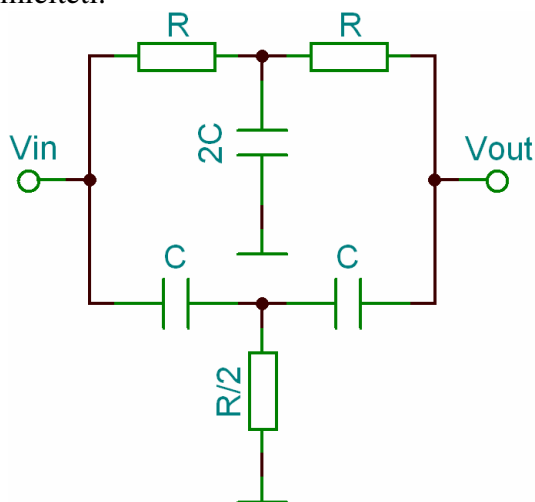
Az integrált műveleti erősítő kedvezően használható fel aktív RC áramkörök realizálására. A műveleti erősítő aktív RC hálózatok induktivitás nélkül is lehetővé teszik tetszőleges pólus-zérus elrendezésű átviteli függvények megvalósítását és olyan meredek szűrő-karakterisztikákat produkálnak, amelyek tisztán passzív változatban csak induktivitást is tartalmazó szűrőkkel közelíthetők meg. Az induktivitások kiküszöbölése elsősorban kisfrekvencián jelent előnyt, továbbá egyszerűsíti az áramkör elkészítését. Igen nagy előny, hogy a műveleti erősítő aktív szűrők sokkal kedvezőbben illeszthetők áramköri egységekhez, mint a passzív hálózatok, továbbá segítségükkel többfokozatú szűrők is megvalósíthatók.

A legegyszerűbb elrendezésekben a visszacsatolt műveleti erősítő  $R_1$  vagy  $R_2$  (esetleg mindkét) ellenállását RC tagokból álló impedanciákkal helyettesítik, ezáltal az erősítés frekvenciafüggővé válik. A frekvenciamenet követi az eredeti RC hálózat frekvenciafüggvényét, azonban az átviteli görbék meredekebbek lesznek azáltal, hogy erősítés lép fel.

Hátrány, hogy a legtöbb műveleti erősítő nyílt hurkú erősítése jelentős frekvenciafüggést mutat, ezért viszonylag szűk frekvenciatartományra korlátozódik a műveleti erősítő aktív szűrők alkalmazhatósága. Ez a hátrány csökkenthető, amennyiben speciális, erre a célra gyártott erősítőtípusokat alkalmaznak; ezek a műveleti erősítők azonban általában bonyolult frekvenciakompenzációs hálózatokat igényelnek, és jóval drágábbak.

Vizsgálatinkhoz LM741 (vagy kompatibilis) műveleti erősítőt alkalmazunk. A kettős T-kört először tisztán passzív formájában, majd előbb a visszacsatolt műveleti erősítő  $Z_1$  bemeneti impedanciájának helyére, majd  $Z_2$  visszacsatolásaként iktatjuk be. A mérés része továbbá oszcillátor kialakítása TT-vel és Wien-híddal is.

A következőkben néhány olyan kapcsolást fogunk vizsgálni, amelyek a jól bevált **kettős T-körrel**, mint passzív RC hálózattal kerültek megvalósításra. A kettős T-kör (TT-kör) kapcsolását az 1. ábra szemlélteti:

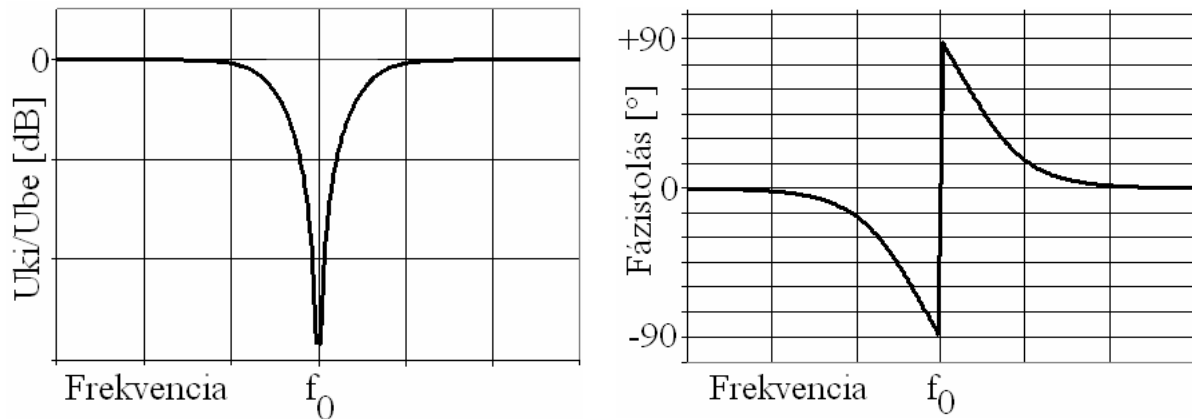


1. ábra: TT-kör

A TT-kört leegyszerűsítve úgy szokták modellezni, mint egy párhuzamosan kapcsolt alul- és felüláteresztő szűrőt. Alacsony frekvencián a kondenzátorok nagyimpedanciás tagként (akár szakadásként) viselkednek (tehát az alsó ág nem játszik szerepet), így a kimeneten megjelenik a bemeneti jel a felső ág (integráló tag) ellenállásain keresztül.

Nagyfrekvencián a kondenzátorok alacsonyimpedanciás állapotba kerülnek (átmennek akár közel rövidzárba), ezért a felső ág 2C kapacitása föld felé söntöli a két R ellenállás közötti csomópontot, míg az alsó ágon (differenciáló tag) keresztül a kimenetre jut a bemeneti jel, a két sorba kapcsolt C kondenzátoron keresztül.

A kis- és nagyfrekvencián mutatott jellegből következtethető, hogy egy köztes frekvencián csillapítás megy végbe, tehát a TT-szűrő sávelzáró szűrő:



2. ábra: TT-szűrő Bode-diagramja

A csillapítás értéke  $f_0$  frekvencián a legnagyobb, melyet az alábbi formula ad meg:

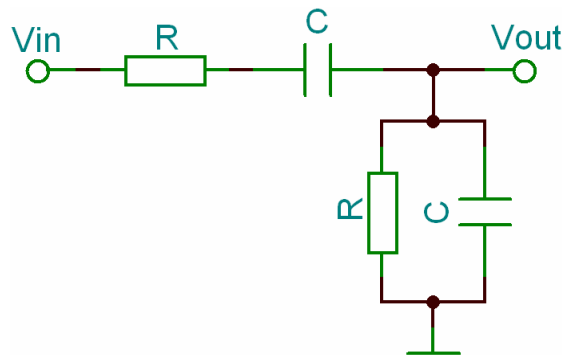
$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

A kör jósági tényezője (**Q** - **Quality factor**) legegyszerűbben a csillapítási meredekség alapján határozható meg:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \qquad \Delta f = f_f - f_a$$

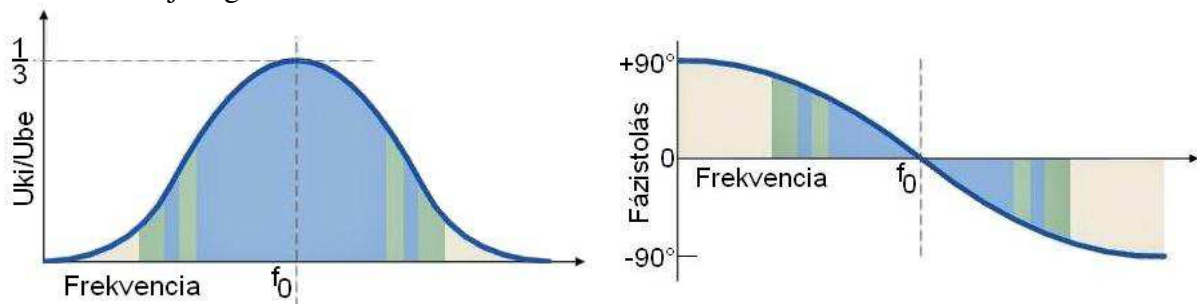
Az  $f_a$  és  $f_f$  frekvenciaértékek a 2. ábra  $f_0$ -n mérhető értékhez képesti +3dB-es pontjainak felelnek meg. A TT-kör csillapítása a zárási frekvencián annál nagyobb, minél jobb minőségűek (kicsiny tűréssel és hőmérsékleti tényezővel rendelkezők) az R- és C-tagok. Ugyanígy függ a jósági tényező nagysága az előbb említett tulajdonságoktól.

A **Wien-híd** a TT-szűrővel ellentétben nem párhuzamosan, hanem sorosan kapcsolt alul- és felüláteresztő szűrőből áll. Kapcsolását a 3. ábra szemlélteti:



3. ábra: Wien-osztó

Alacsony frekvencián a soros RC-tag kondenzátora nagyimpedanciás állapotban (közel szakadásban) van, ezért a kimeneti jel közel zérus. Nagyfrekvencián a párhuzamos RC-tag kondenzátora kerül alacsonyimpedanciás állapotba (közel rövidzárba), ezért a kimenet értéke szintén nulla közeli. Ezekből már lehet következtetni arra, hogy sávközépi értéken, és annak környezetében jelenik meg releváns nagyságú kimeneti jel, tehát a Wien-híd sáváteresztő jellegű.



4. ábra: Wien-híd Bode-diagramja<sup>1</sup>

Mivel továbbra is RC-rezgőkörrel beszélünk, ezért a rezonancia frekvenciát leíró formula változatlan a TT-köréhez képest, azaz:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

<sup>1</sup> Forrás: [kapcsolas.blogspot.hu](http://kapcsolas.blogspot.hu) (módosítással)

## 2.2 Mérés feladatok:

A TT-kört a mérőpanelen elkészítve találjuk. Az elemértékek:  $R=20\text{k}\Omega$  és  $C=10\text{nF}$ . Az ellenállások tűrése 1% körüli, a kondenzátoroké 10% körüli érték. A többi, a mérendő kettős T-körös áramkörökben szereplő komponensek:  $R_0=10\text{k}\Omega$ ,  $R_1=4,7\text{k}\Omega$ ,  $R_2=75\text{k}\Omega$ , illetve  $D_1$ : 1N4148 (Si egyenirányító dióda),  $D_2$ : BZX4V7.

A Wien-hidas oszcillátorban szereplő áramköri elemek értékei:  $R=7,15\text{k}\Omega$ ,  $R_1=10\text{k}\Omega$ ,  $R_2=20\text{k}\Omega$ ,  $C=22\text{nF}$ .  $R_D$  ellenállás úgy nevezett dekadellenállás, melynek értéke általunk, nagy pontossággal állítható be. A mérés során  $R_D$ -t az oktatótól kell kérni, és külön kell a mérőpanelhez csatlakoztatni.

### A TT-kör vizsgálata:

**2.2.1** Számítsuk ki az  $f_0$  zárási frekvenciát.

**2.2.2** A passzív TT-szűrő vizsgálatához még nincs szükség tápfeszültségre; a mérőpanelen csak a földelést (GND), illetve a két TT elnevezésű csatlakozásokat kell használni, mint be- és kimeneteket. Egyetlen jumper se legyen még a panel tűskesoraira helyezve, a mérőkörön belül semmilyen összeköttetést ne valósítsanak meg.

Függvénygenerátorról adjunk a TT-kör bemenetére  $10V_{pp}$  nagyságú szinuszjelet, és vegyük fel az átviteli jelleggörbét 50Hz és 10kHz tartományban. Ehhez tetszés szerint használható oszcilloszkóp, vagy digitális multiméter (AC állásban); utóbbi a javasolt. Keressük meg az  $f_0$  zárási frekvenciát, illetve a hozzá tartozó +3dB-es pontokat.

f[Hz]	50	$f_0/10$	100	200	300	400	500	600	700	$f_0$	900	1k
$U_{be}$ [V]												
$U_{ki}$ [V]												

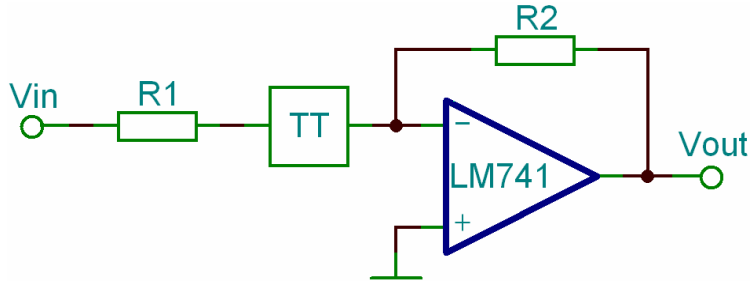
f[Hz]	1,1k	1,2k	1,3k	1,4k	1,5k	3k	5k	6k	7k	$10 \cdot f_0$	9k	10k
$U_{be}$ [V]												
$U_{ki}$ [V]												

Emlékeztetőül: mint említésre került, a TT-szűrőt alkotó passzív elemek bizonyos tűréssel rendelkeznek, ezért cserély mértékű, zajjal terhelt kimeneti jel a zárási frekvencián is mérhető. Ennek szintjét vegyük 0dB-nek, és ehhez képest mérjük ki a +3dB-es pontokat.

**2.2.3** Számítsuk ki a Q jósági tényezőt a mért értékek alapján!

**Aktív sávszűrő-kapcsolások készítése:**

Valósítsuk meg az 6. ábrán látható **sávelzáró szűrőt (lyukszűrő)**. Ehhez adjunk a mérőpanelra ±15V tápfeszültséget (előzetesen beállított 20mA áramkorláttal) a +U<sub>táp</sub> (+V<sub>s</sub>) és -U<sub>táp</sub> (-V<sub>s</sub>) csatlakozási pontok felhasználásával. A kapcsolat kialakításához zárjuk az alábbi jumpereket: 2, 4, 5, 8.



6. ábra Aktív sávelzáró szűrő

Ennél a kapcsolásnál a kettős T-kör az invertáló alapkapcsolásban működtetett műveleti erősítő Z<sub>1</sub> impedanciájának helyére kerül. A vele sorosan kapcsolt R<sub>1</sub> ellenállásra azért van szükség, hogy a szűrő a kisimpedanciás frekvenciatartományban se terhelje le az előző fokozatot (jelen esetünkben a függvénygenerátort). Mivel a visszacsatolt erősítés:

$$A_v = \frac{Z_2}{Z_1}$$

ezért Z<sub>1</sub> növekedésével a visszacsatolt erősítés csökken és a zárési frekvencián minimumot ér el, az átviteli függvény tehát a kettős T-körnek a 2. ábrán látható frekvenciafüggése szerint alakul.

**2.2.4** Adjunk az U<sub>be</sub> bemenetre (V<sub>in</sub>) 5kHz-es szinuszjelet, és az erősítő U<sub>ki</sub> kimenetét (V<sub>out</sub>) vezessük oszcilloszkópra. Állítsuk a bemeneti jel amplitúdóját úgy, hogy a kimeneten mérhető jel ne legyen torzított (más szavakkal, az erősítő ne legyen túlvezérelve). Ezt követően a teljes vizsgálati frekvenciatartományt futólag ellenőrizzük végig, hogy biztosan sehol ne lépjen fel torzítás. Az így beállított bemeneti jel nagysággal végezzük a mérést a továbbiakban.

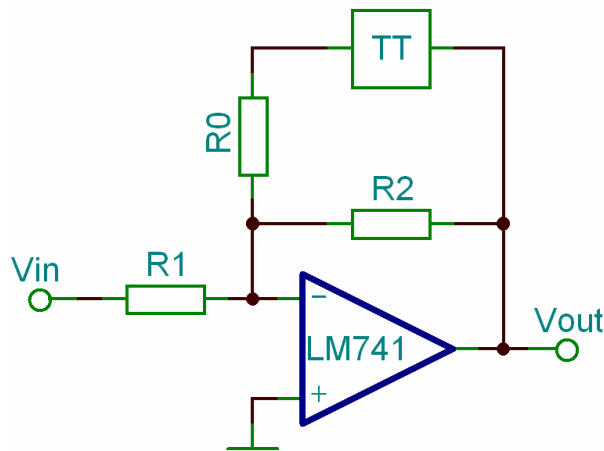
**2.2.5** Vegyük fel az átviteli jelleggörbét 50Hz-5kHz tartományban.

f[Hz]	50	f <sub>0</sub> /10	100	200	300	400	500	600	700	f <sub>0</sub>	900	1k
U <sub>be</sub> [V]												
U <sub>ki</sub> [V]												

f[Hz]	1,1k	1,2k	1,3k	1,4k	1,5k	1,6k	1,8k	2k	2,5k	3k	5k	10·f <sub>0</sub>
U <sub>be</sub> [V]												
U <sub>ki</sub> [V]												

**2.2.6** Határozzuk meg a jósági tényezőt!

A következő pontokban **aktív sáváteresztő szűrőt (szelektív erősítőt)** fogunk vizsgálni. Ehhez kapcsoljuk a TT-kört az  $R_2$  visszacsatoló ellenállással a 7. ábrán látható módon. A megvalósításhoz zárjuk az alábbi jumpereket: 1, 3, 5, 8.



7. ábra: Szelektív erősítő

Mivel a visszacsatolt erősítés  $Z_2$ -vel egyenes arányban változik, ezért az erősítés frekvenciamenete a 2. ábrán látható jelleggörbe tükörképe lesz. Az  $R_2$  ellenállásra azért van szükség, mert különben a zárási frekvencián és annak környezetében az erősítő túlvezéreltté válna. A szelektív erősítő teljes körjósága:

$$Q_t = \frac{A_Q + 1}{4} \qquad A_Q = \frac{R_2}{R_0 + \frac{R}{\sqrt{2}}}$$

A képletben szereplő ellenállások:  $R_0=10\text{k}\Omega$ ,  $R_1=4,7\text{k}\Omega$ ,  $R_2=75\text{k}\Omega$ .

**2.2.7** Adjunk a bemenetre  $0,5V_{pp}$  nagyságú szinuszjelet. Vegyük fel a frekvenciaátviteli jelleggörbét 50Hz és 5kHz között.

f[Hz]	50	$f_0/10$	100	200	300	400	500	600	700	$f_0$	900	1k
$U_{be}$ [V]												
$U_{ki}$ [V]												

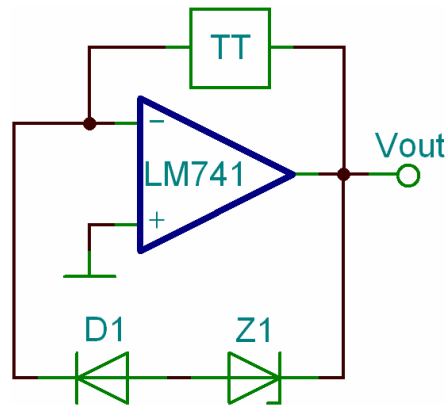
f[Hz]	1,1k	1,2k	1,3k	1,4k	1,5k	1,6k	1,8k	2k	2,5k	3k	5k	$10 \cdot f_0$
$U_{be}$ [V]												
$U_{ki}$ [V]												

**2.2.8** Határozzuk meg az  $f_0$  zárási, illetve az  $f_a$  és  $f_f$  határfrekvenciákat. Számítsuk ki a  $Q$  jósági tényezőt és a  $Q_t$  körjóságot, majd hasonlítsuk össze a mért értékekkel.

**2.2.9** Foglaljuk táblázatba a háromféle esetben (passzív TT-kör, aktív sáváteresztő- és sávelzáró szűrő) mért  $f_0$ ,  $Q$ , illetve a 20Hz-en és 5kHz-en adott csillapítások méréssel kapott eredményeit. Értékeljük a kapott eredményeket és magyarázzuk az eltérések okát.

### Kettős T-körös oszcillátor készítése:

Ha a műveleti erősítőt az  $R_2$  visszacsatoló ellenállás elhagyásával kizárólag a kettős T-körrel csatoljuk vissza, úgy a zárási frekvencián és annak közvetlen környezetében  $180^\circ$ -os lesz a fázistolás, és az eredetileg negatív visszacsatolás pozitívvá válik. A fázisfeltétel tehát úgy teljesül, hogy a kettős T-kör egyszeresen fázist fordít, az erősítő pedig ismételen, így megfelel a  $\varphi=0^\circ+k\cdot 360^\circ$  ( $k=0,1,2,3\dots$ ) feltételnek. Ekkor a fokozat begerjed, és szabadon oszcillál. Mivel a körjóság kb. a nyílt hurkú erősítés negyede, ezért ez az igen nagy érték lehetővé teszi, hogy az oszcillátor amplitúdó-stabilitását egyszerűbb hálózattal biztosítani tudjuk. Oszcillátoroknál tehát fontos a stabil rezgési amplitúdó. Ennek feltétele, azaz az amplitúdófeltétel alatt azt értjük, hogy a visszacsatolásban szereplő rezgőkör csillapítását az erősítő fokozatnak kompenzálni kell; tehát amennyit csillapít rezonancia frekvencián a rezgőkör, pontosan annyit kell az erősítőnek ellensúlyozni. Röviden szólva a hurokerősítésnek egységnyinek kell lennie. Ez úgy teljesül, hogy a visszacsatolásba valamilyen amplitúdófüggő viselkedést mutató hálózati elemet, azaz nemlineárisat illesztünk; jelen esetünkben ez dióda. Amplitúdó-korlátozás nélkül a kimeneti jel nagysága csaknem eléri a tápfeszültséget. Korlátozás a legegyszerűbben diódás csatolásokkal valósítható meg. A mérés során ilyen, amplitúdó-korlátozott TT-körös oszcillátort mutatja a 8. ábra. A megvalósításhoz zárjuk a 3, 5, 7 számozású jumpereket.



8. ábra: Amplitúdó-korlátozott TT-körös oszcillátor

A kimeneti feszültség csúcserőértékét a két diódán együttesen eső feszültség (tehát az  $U_z$  Zener-feszültség és a Si dióda kb.  $0,6V$ -os nyitófeszültségének összege) határozza meg.

Az oszcilláció feltételeinek elméleti számítása azt mutatja, hogy az ideális TT-kört az oszcilláció létrejötte érdekében elillesztik. A valóságban az R és C elemek véges tűrése már önmagában biztosítja ezt a feltételt. Az oszcilláció rezonancia frekvenciája a TT-kör  $f_0$  zárási frekvenciájával egyezik meg.

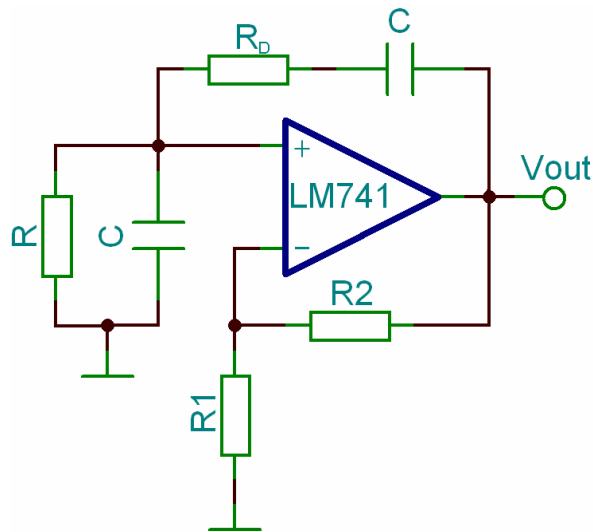
**2.2.10** Mérjük meg az oszcillátor rezgési frekvenciáját, majd hasonlítsuk össze a számított  $f_0$  értékkel.

**2.2.11** Mérjük meg a kimeneti jel csúcserőértékét. Ellenőrizzük, hogy a csúcserőértéke megfelel-e az áramkör működésének ismertetésekor leírtaknak.

**2.2.12** Szüntessük meg az amplitúdó-korlátozást a 7-es számú jumper eltávolításával. Vizsgáljuk meg a kimeneti jelalakot, magyarázzuk a látottakat.

### Wien-hidas oszcillátor készítése:

Műveleti erősítők felhasználásával egyéb RC-oszcillátorok is megvalósíthatók. Egyik legismertebb változata az úgynevezett Wien-hidas kapcsolás, melyet a 9. ábra szemléltet:



9. ábra: Wien-hidas oszcillátor

A Wien-hidas RC oszcillátorokban a műveleti erősítőt az azonos RC elemekből felépített fél Wien-hídon keresztül pozitív, míg az ellenállásokból (vagy más, a rezonancia frekvencián frekvencia függetlennek tekinthető hálózattal) álló osztón át negatív visszacsatolással látják el. Rezonancia frekvencián a Wien-híd nem fordít fázist, és mivel a műveleti erősítő nem-invertáló ágában helyezkedik el, így a műveleti erősítő sem; tehát a fázistolás  $\varphi=0^\circ$ . Mivel a Wien-híd átvitele  $U_{ki}=1/3 \cdot U_{be}$  értéket mutat  $f_0$ -n, ezért a műveleti erősítőnek pontosan 3-nak kell lennie az amplitúdófeltétel teljesítéséhez, vagyis kellően nagy nyílt hurkú erősítésű műveleti erősítő esetén:

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{3}$$

A 9. ábrán látható alapkapsolás nem tartalmaz amplitúdó-határolót, így az oszcilláció során csaknem a két tápfeszültség összege lesz a kimeneti jel csúcstól-csúcsig vett értéke.

**2.2.13** Valósítsuk meg a 8. ábrán látható kapcsolást! Zárjuk a **6, 9** jelölésű jumpereket, és  $R_D$  dekadellenállás helyét zárjuk rövidre! Rögzítsük és magyarázzuk a kimeneti jelalakot!

**2.2.14** Az előbbi rövidzárát eltávolítva, kössük  $R_D$  csatlakozási pontok közé a TEL-MES Omega dekadellenállást, majd állítsunk be rajta R-el azonos értéket (7,15k $\Omega$ ). *Megjegyzés: a dekadálláson a bekapcsolt ellenállások összege adja a fehér csatlakozások közötti ellenállás értéket. A harmadik csatlakozási pont földelésül szolgál, a mérésben nem használjuk.* A dekadellenállás egyes elemeinek bekapcsolgatásával keressük meg a lehető legpontosabban azt az értéket, amelynél a kimeneti szinuszjel a leghabzósebb! Ebben az esetben az R·C megegyezik az  $R_D \cdot C$  szorzattal.

**2.2.15** Mérjük meg az  $f_0$  rezonancia frekvenciát! Az összefüggésben az R értéket az előzőleg beállított  $R_D$  értékkel helyettesítve számítással is határozzuk meg  $f_0$  értékét, majd hasonlítsuk össze a mért és számított értékeket! Határozzuk meg a kimeneti jel csúcstól-csúcsig vett jel nagyságát is.



### **2.3 Ellenőrző kérdések:**

1. Rajzoljon le egy TT-szűrő kapcsolást! Adja meg a rezonancia frekvencia képletét!
2. Rajolja le egy ideális TT-szűrő Bode-diagramját! Jelölje a nevezetes pontokat!
3. Adja meg a jósági tényező képletét, megnevezve a formulában szereplő tagokat!
4. Rajzoljon le egy aktív szelektív erősítő kapcsolást (TT-kört elég szimbolikusan)!
5. Rajzoljon le egy aktív lyukszűrő kapcsolást (TT-kör elegendő szimbolikusan)!
6. Rajzoljon fel egy Wien-osztót! Adja meg a rezonancia frekvencia képletét!
7. Rajolja le a Wien-híd Bode-diagramját, jelölve a nevezetes pontokat!
8. Rajzoljon egy amplitúdóstabilizált kettős T-körös oszcillátort!
9. Mi az oszcillátor? Hogyan biztosítható stabil rezgési amplitúdó?
10. Mit értünk az oszcillátorok amplitúdófeltételén?
11. Mi az oszcillátorok fázisfeltétele?
12. Wien-hidas oszcillátor esetén mekkorára kell megválasztani az aktív tag erősítését és miért?

### **2.4 Megjegyzés:**

Mivel a mérés során a szűrőkapcsolások átviteli függvényeit vesszük fel, azaz a (Bode-diagramok) amplitúdómeneteit, ezért a jegyzőkönyvben a mért értékek alapján számított dB értékekkel történjen ezek ábrázolása!