

## Elektronika II. laboratórium

### 2. mérés: Hangolt körös analóg áramkörök

Összeállította: Mészáros András

2017.09.19.

#### 2.1 Elméleti áttekintés:

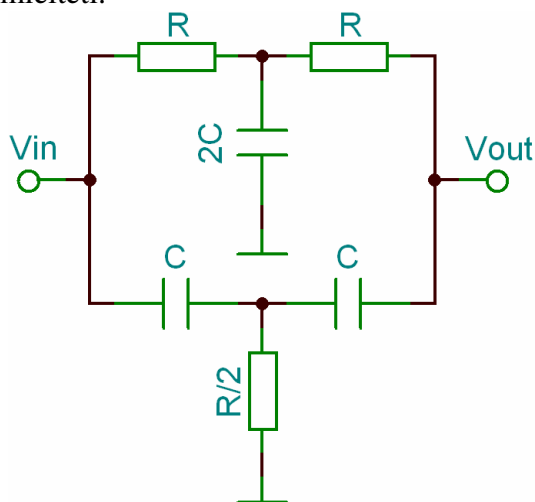
Az integrált műveleti erősítő kedvezően használható fel aktív RC áramkörök realizálására. A műveleti erősítő aktív RC hálózatok induktivitás nélkül is lehetővé teszik tetszőleges pólus-zérus elrendezésű átviteli függvények megvalósítását és olyan meredek szűrő-karakterisztikákat produkálnak, amelyek 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:

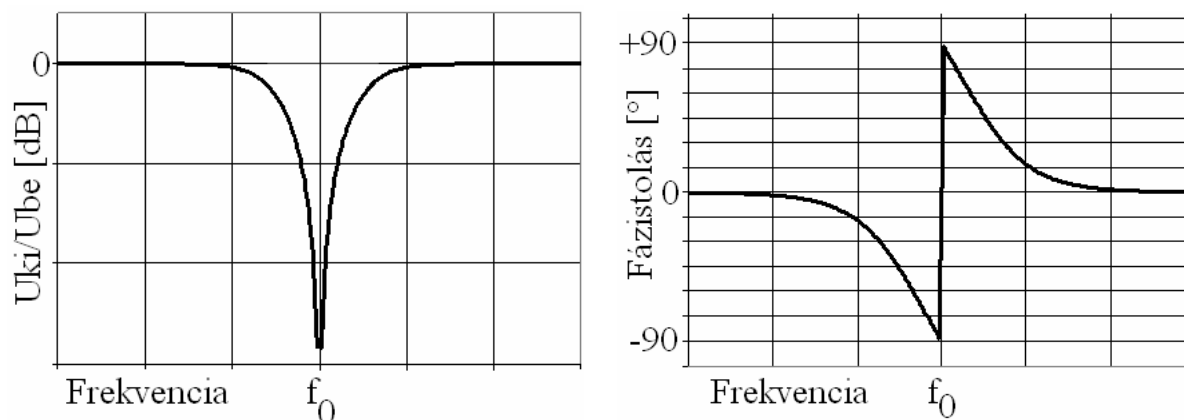


1. ábra: TT-kör

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:

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

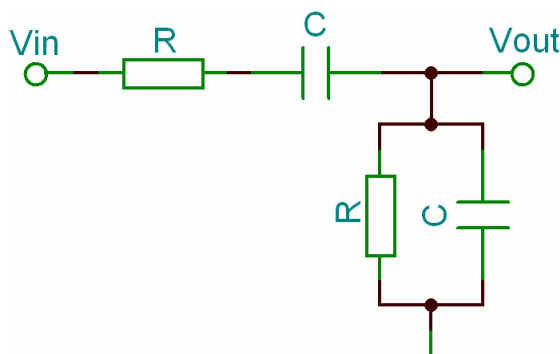
A kör jósági tényezője (**Q** – **Quality factor**) legegyszerűbben a csillapítási meredekség alapján határozható meg:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}$$

$$\Delta f = f_f - f_a$$

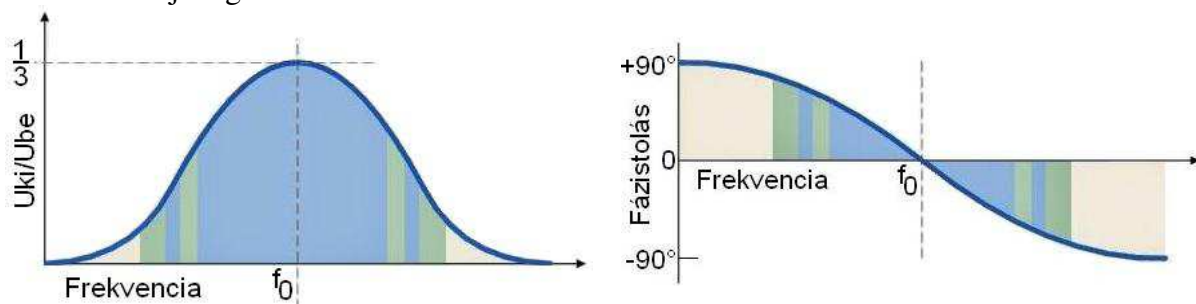
Az  $f_a$  és  $f_f$  frekvenciaértékek a 2. ábra  $f_0$ -n mérhető értékhez képesti +3dB-es pontjainak felelnek meg. A TT-kör csillapítása a zárási frekvencián annál nagyobb, minél jobb minőségűek (kicsiny tűréssel és hőmérsékleti tényezővel rendelkezők) az  $R$ - és  $C$ -tagok. Ugyanígy függ a jósági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

A TT-kört a mérőpanelon 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 mérőpanelhoz 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 mérőpanelon csak a földelést (GND), illetve a két TT elnevezésű csatlakozásokat kell használni, mint be- és kimeneteket. Egyetlen jumper se legyen még a panel tűksoraira 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 |
| $U_{be}[V]$ |    |          |     |     |     |     |     |     |     |       |     |    |
| $U_{ki}[V]$ |    |          |     |     |     |     |     |     |     |       |     |    |

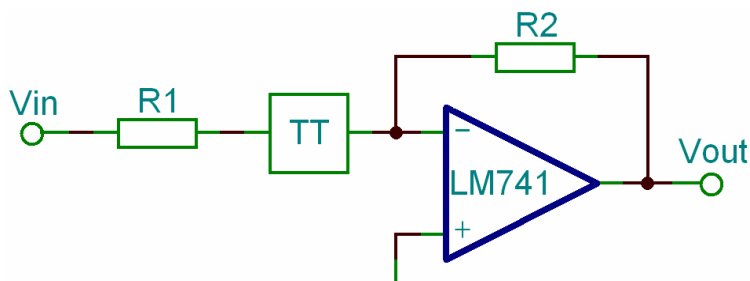
|             |      |      |      |      |      |    |    |    |    |                |    |     |
|-------------|------|------|------|------|------|----|----|----|----|----------------|----|-----|
| f[Hz]       | 1,1k | 1,2k | 1,3k | 1,4k | 1,5k | 3k | 5k | 6k | 7k | $10 \cdot f_0$ | 9k | 10k |
| $U_{be}[V]$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

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  $\pm 15\text{V}$  tápfeszültséget (előzetesen beállított 20mA áramkorláttal) a  $+U_{\text{táp}}$  ( $+V_s$ ) és  $-U_{\text{táp}}$  ( $-V_s$ ) 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 alapkapsolásban működtetett műveleti erősítő  $Z_1$  impedanciájának helyére kerül. A vele sorosan kapcsolt  $R_1$  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  $Z_1$  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  $U_{\text{be}}$  bemenetre ( $V_{\text{in}}$ ) 5kHz-es szinuszjelet, és az erősítő  $U_{\text{ki}}$  kimenetét ( $V_{\text{out}}$ ) 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.

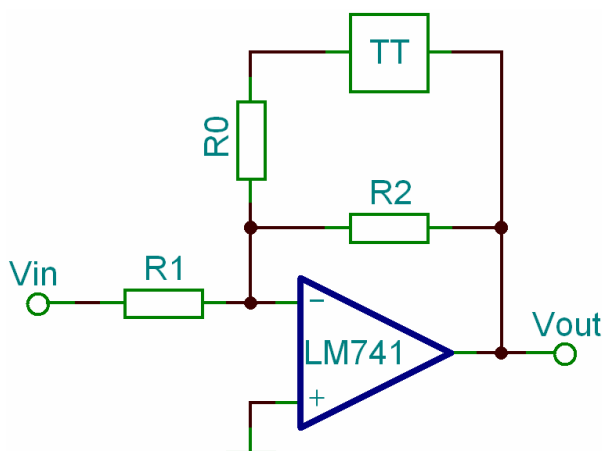
**2.2.5** Vegyük fel az átviteli jelleggörbét 50Hz-5kHz tartományban.

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

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

$$Q_t = \frac{A_Q + 1}{4} \qquad A_Q = \frac{R_2}{R_0 + \frac{R_1}{\sqrt{2}}}$$

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 |
|-------------|----|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|----|
| $U_{be}[V]$ |    |          |     |     |     |     |     |     |     |       |     |    |
| $U_{ki}[V]$ |    |          |     |     |     |     |     |     |     |       |     |    |

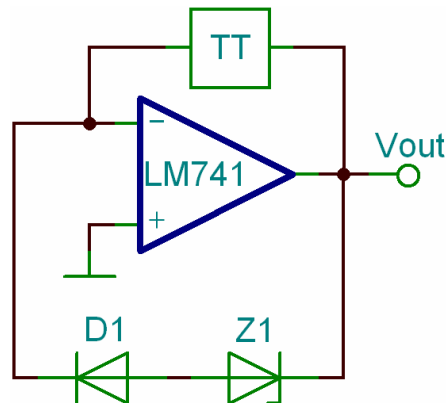
| f[Hz]       | 1,1k | 1,2k | 1,3k | 1,4k | 1,5k | 1,6k | 1,8k | 2k | 2,5k | 3k | 5k | $10 \cdot f_0$ |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|----|------|----|----|----------------|
| $U_{be}[V]$ |      |      |      |      |      |      |      |    |      |    |    |      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

**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 sáveltartó szűrő) mért  $f_0$ ,  $Q$ , illetve a 20Hz-en és 5kHz-en adott csillapítások mérésével 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 ismételt, így megfelel a  $\varphi=0^\circ+k\cdot360^\circ$  ( $k=0,1,2,3,\dots$ ) 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 csúcsértékét 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.

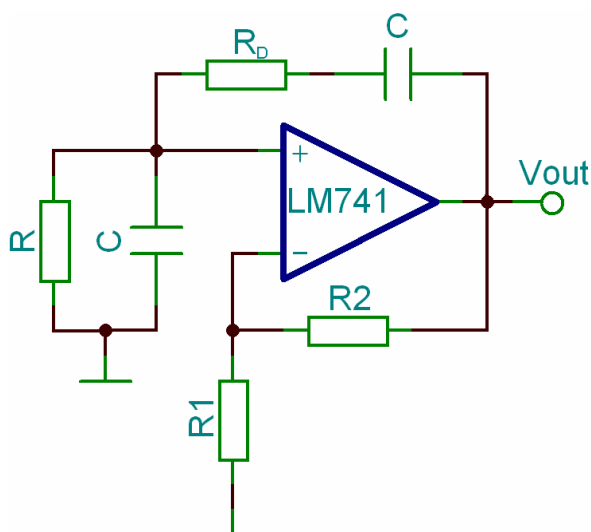
**2.2.10** Mérjük meg az oszcillátor rezgési frekvenciáját, majd hasonlítsuk össze a számított  $f_0$  értékkel.

**2.2.11** Mérjük meg a kimeneti jel csúcsértékét. Ellenőrizzük, hogy a csúcsértéke 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  $R_D$  dekádellenállás helyét zárjuk rövidre! Rögzítsük és magyarázzuk a kimeneti jelalakot!

**2.2.14** Az előbbi rövidzárat eltávolítva, kössük  $R_D$  csatlakozási pontok közé a TEL-MES Omega dekádellenállást, majd állítsunk be rajta R-el azonos értéket (7,15k $\Omega$ ). *Megjegyzés: a dekádálláson a bekapcsolt ellenállások összege adja a fehér csatlakozások közötti ellenállás értéket. A harmadik csatlakozási pont földelésül szolgál, a mérésben nem használjuk.* A dekádellenállás egyes elemeinek bekapcsolgatásával keressük meg a lehető legpontosabban azt az értéket, amelynél a kimeneti szinuszjel a leghatározottabb! 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!