

3. Mérés

Áramkör építési gyakorlat III.

2018.02.03.

Összeállította: Mészáros András

Az elkövetkező mérés első fele két kapcsolás erejéig tovább taglalja a műveleti erősítővel megvalósítható egyszerű áramkörök témakörét:

- Relaxációs oszcillátor,
- Egyszerű PWM generátor,
- Háromszög-négyszögjel generátor.

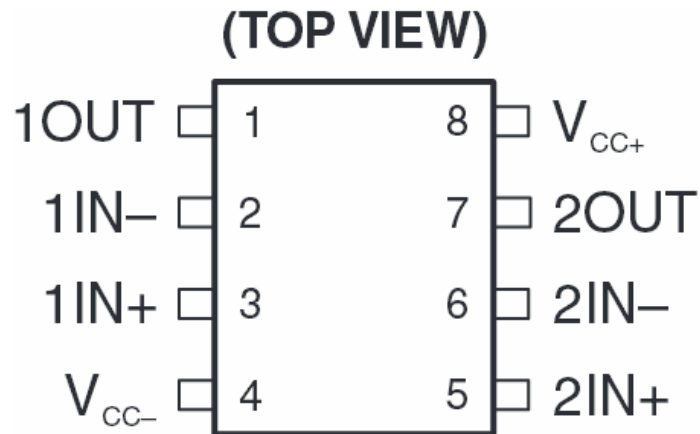
A mérés második felében a legalapvetőbb időzítő integrált áramkörrel megvalósított kapcsolások vizsgálata lesz. Az említett időzítő az NE555. AZ 555-ös IC számos módon alkalmazható, a mérés során azonban csupán a legegyszerűbb felhasználásai kerülnek bemutatásra, melyek az alábbiak:

- Astabil multivibrátor,
- Monostabil multivibrátor,
- Pulzusszélesség modulátor.

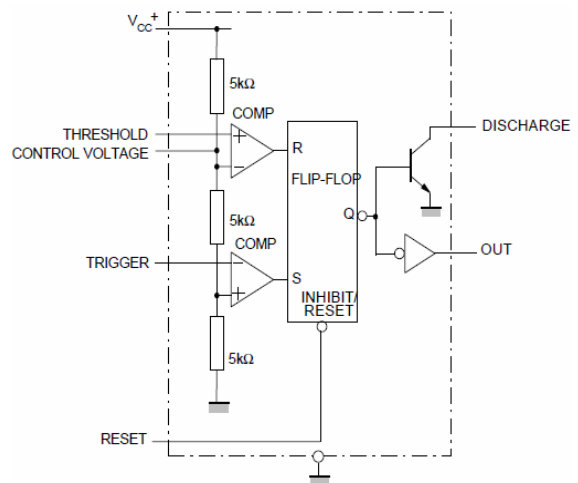
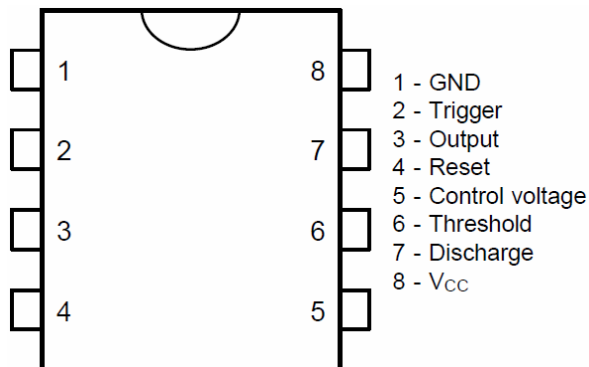
Alkatrész jegyzék:

- | | |
|----------------------|--------------------------|
| ➤ RC4558 1db, | ➤ 10k ellenállás 3db, |
| ➤ NE555 1db, | ➤ 56k ellenállás 1db, |
| ➤ 1N4007 2db, | ➤ 10k potenciométer 1db, |
| ➤ zöld LED 1db, | ➤ 15nF kondenzátor 1db, |
| ➤ 1k ellenállás 1db, | ➤ 470nF kondenzátor 2db. |

A mérőáramkörök esetleges gerjedése elkerülése végett illesszünk 470nF-os szűrőkondenzátorokat a +U_I-GND és/vagy -U_I-GND táppontok közé!



1. ábra: RC4558 lábkiosztása



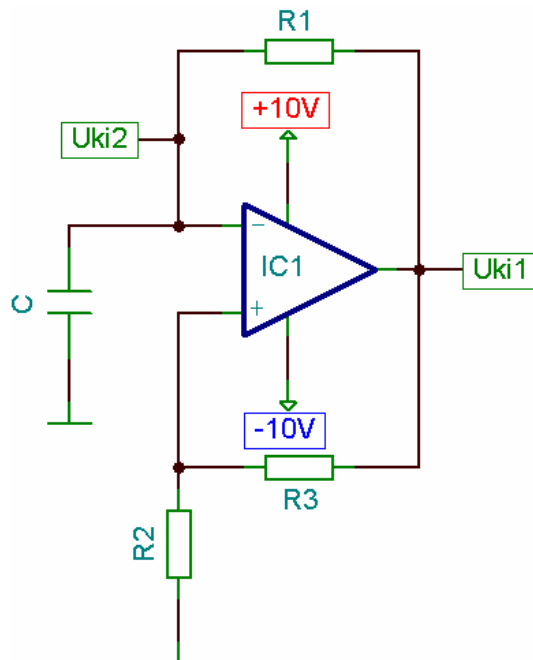
2. ábra: NE555 lábkiosztása és belső felépítése

Az első mérési útmutatóban szereplő módon ismét ellenőrizzük le a méréshez rendelkezése bocsájtott műveleti erősítő működőképességét (a mérés során használt műveleti erősítő DIP8-as tokjában mindkét erősítőt hajtjuk meg nullkomparátoros üzemmódban)!

3.1 Relaxációs oszcillátor

Műveleti erősítők gyakori felhasználási területe a harmonikus jelek előállítása, oszcillátorok, rezgéskeltők, függvénygenerátorok készítése. Az egyik legegyszerűbb, négyszögjel és fűrészjel előállítására alkalmas áramkör az **3. ábrán** látható relaxációs oszcillátor.

A műveleti erősítő itt hiszterézises komparátorként üzemel, melynek billenési szintjeit R_2 és R_3 ellenállások osztásaránya állítja be. Amikor a kimenet logikai „1”-be (azaz $+U_t$ -be) billen, akkor tölteni kezdi a C kondenzátort R_1 ellenálláson keresztül, annak időállandójának megfelelően ($\tau=RC$). Amikor C kondenzátoron elég nagy a feszültség ahhoz, hogy a hiszterézises komparátor billenési feltétele teljesüljön, akkor a kimenet logikai „0”-ba ($-U_t$ -be) billen át, majd kisütni kezdi a kondenzátort szintén R_1 ellenálláson keresztül addig, amíg C feszültsége el nem éri a hiszterézis másik billenési szintjét; ez a jelenség ismétlődik. Emiatt U_{ki1} értéke közel $\pm U_t$ szélsőértékű négyszögjel, míg U_{ki2} a kondenzátor jelalakja, azaz fűrészjel lesz.



3. ábra: Relaxációs oszcillátor műveleti erősítővel

A relaxációs oszcillátor működése a következő:

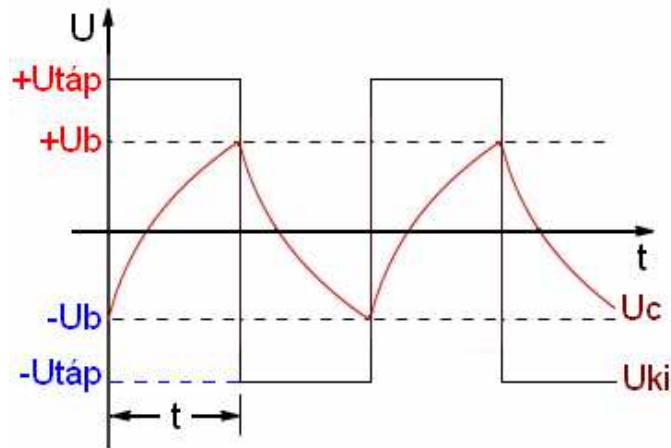
1. Legyen az invertáló bemenet potenciálja U_- , a nem invertáló bemeneté pedig U_+ .
2. Tekintsük a műveleti erősítő bemeneteinek áramát zérusnak ($I_+ = I_- = 0$).
3. Mivel a műveleti erősítő U_+ bemenetére egy ellenállásosztón keresztül visszacsatoljuk a kimeneti feszültség éppen aktuális értékét, így:

$$U_+ = \pm U_{ki} \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

Az így kapott két billenési szint a kimenettől függően lehet pozitív ($+U_b$) vagy negatív ($-U_b$), de abszolútértékük megegyezik (szimmetrikus táplálás esetén!).

4. U_- feszültség megegyezik U_{ki2} -vel, ami egyúttal a C kondenzátor feszültsége, így:

$$U_- = U_{ki2} = U_C$$



4. ábra: A relaxációs oszcillátor időfüggvényei

5. Vegyük alapul a kondenzátor töltődési görbét (**4. ábra**; állandósult állapotában); ekkor a görbe kiindulási pontja a negatív billenési/komparálási szint ($-U_b$), a görbe végértéke pedig a pozitív tápfeszültség lenne, azonban a pozitív billenési szintig ($+U_b$) töltődik csupán, aztán átbillen az áramkör.

$$U_C = (+U_{ki} + U_b) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) - U_b$$

6. Az áramkör átbillenése akkor következik be, ha $U_C = U_b$ (mivel ez periódusonként kétszer következik be, ezért a formulákban szereplő $t = T/2$).

$$(U_{ki} + U_b) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) - U_b = U_b$$

7. Az egyenletet rendezve, majd -1 -el szorozva:

$$-\frac{2U_b}{U_{ki} + U_b} = -1 + e^{-\frac{t}{\tau}}$$

8. Mindkét oldalhoz 1 -et adva, majd a bal oldalt törtté alakítva:

$$1 - \frac{2U_b}{U_{ki} + U_b} = \frac{U_{ki} + U_b - 2U_b}{U_{ki} + U_b} = \frac{U_{ki} - U_b}{U_{ki} + U_b} = e^{-\frac{t}{\tau}}$$

9. Az egyenlet bal oldalán behelyettesítve U_b helyére a 3. formulát, majd rendezve:

$$\frac{U_{ki} - U_b}{U_{ki} + U_b} = \frac{U_{ki} - U_{ki} \frac{R_2}{R_2 + R_3}}{U_{ki} + U_{ki} \frac{R_2}{R_2 + R_3}} = \frac{U_{ki} \frac{R_3}{R_2 + R_3}}{U_{ki} \frac{2R_2 + R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{R_3}{2R_2 + R_3}$$

10. Visszahelyettesítve a 8. képletbe:

$$\frac{R_3}{2R_2 + R_3} = e^{-\frac{t}{\tau}}$$

11. Mindkét oldal természetes alapú logaritmusát (ln) véve:

$$\ln \frac{R_3}{2R_2 + R_3} = -\frac{t}{\tau}$$

12. Alkalmazva a $-\ln(x) = \ln(1/x)$ összefüggést:

$$\ln \frac{2R_2 + R_3}{R_3} = \frac{t}{\tau}$$

13. t-re rendezve:

$$t = \tau \cdot \ln \frac{2R_2 + R_3}{R_3}$$

14. $\tau = R_1 C$ és $T = 2t$, ezért a végképlet:

$$T = 2R_1 C \ln \left(\frac{2R_2 + R_3}{R_3} \right)$$

A kapcsolás bizonyos esetekben sajnálatos hátránya azonban az, hogy U_{ki2} pont, azaz a kondenzátoron megjelenő fűrészfeszültség csak nagy bemeneti impedanciájú fokozattal terhelhető, különben erős és nem kívánatos hatás gyakorolható a működési frekvenciára, vagy a rezonancia meg is szűnhet.

Méréshez szükséges adatok:

IC: RC4558 ($U_i = \pm 10V$)

$R_1 = R_2 = R_3 = 10k\Omega$

$C = 15nF$

*A kapcsolás jelalakjai lehetőleg mm-papíron kerüljenek rögzítésre!

Mérési feladatok:

1. Mérjük meg az oszcillátor frekvenciáját, majd számítással igazoljuk annak helyességét!

2. Oszilloszkópról olvassuk le a U_+ ponton a hiszterézises komparátor billenési szintjeit, számítással igazoljuk!

2. Ábrázoljuk a kimeneti jelalakokat fázishelyesen!

Ne szedjük szét a kapcsolást!

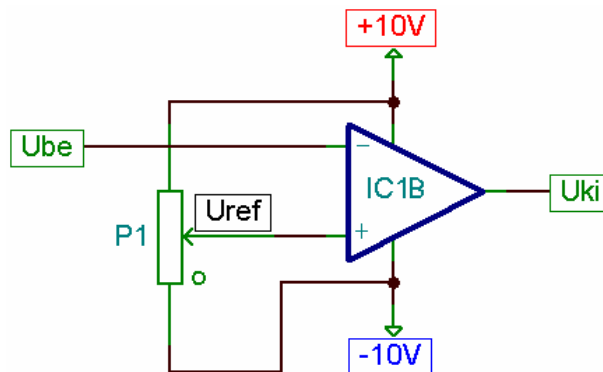
3.2 Pulzusszélesség-modulátor

A gyakorlatban számtalanszor szükség van szabályozási körökben, vagy vezérlési láncokban olyan négyszögjelre, aminek a kitöltési tényezője, más néven az impulzusszélessége információt hordoz magában, vagy vezérlési célokat valósít meg. Mind híradástechnikában, mind pedig vezérlés- és szabályozástechnikában (pl.: fényforrások fényerő szabályozása) használatos az úgynevezett pulzusszélesség-moduláció (angolul **pulse-width modulation**, azaz **PWM**), mely rendkívül egyszerűen megvalósítható, amennyiben az előző kapcsolást megtoldjuk egy komparátorral.

A **5. ábrán** látható komparátornak ideális esetben nincs hiszterézise (vagyis a műveleti erősítő SR-je kellően nagy), azaz egy billenési szintje van, amit a P_1 potencióméter állít be. Amennyiben a bemenetére kapcsoljuk a **3.1 feladat** során megépített áramkör U_{ki2} kimenetét, akkor a komparátor kimenetén a potencióméterrel beállított feszültséggel „arányos” kitöltési tényezőjű (**d, duty cycle**) PWM jel jelenik meg (szemléltetés: **6. ábra**). A beállított feszültség és a kitöltési tényező közötti linearitás a bemeneti fűrészfeszültség jelalakjától függ (lineáris vagy nem lineáris fel-, lefutó élek...).

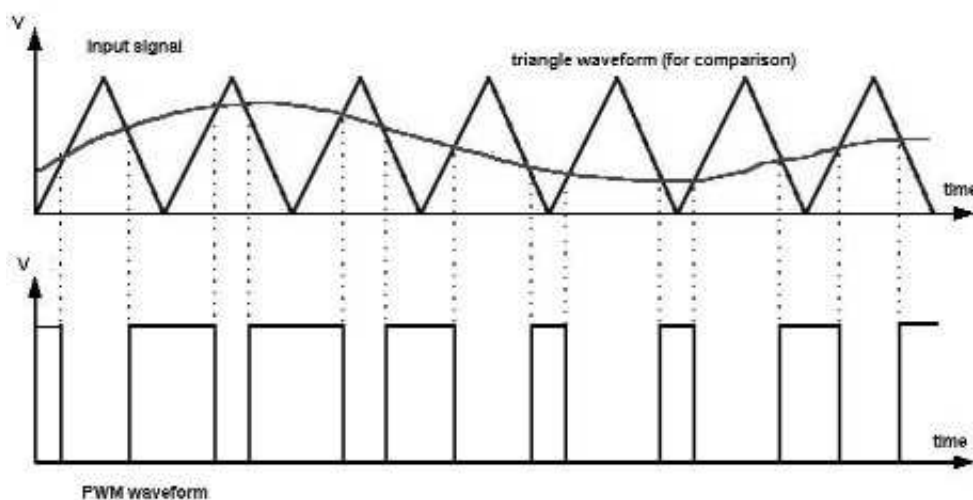
Megjegyzés: A mérés során használt műveleti erősítő felfutási meredeksége véges (RC4558: $SR=1.1V/\mu s$), ezáltal a hiszterézis-jelenség valamilyen mértékben megfigyelhető lesz.

Nagyon jó példa a felhasználására a DC motorok fordulatszám szabályozása, ahol a motor tápvonalával sorba elhelyezett kapcsoló MOSFET-et vezéreljük PWM-el, minek következtében a motor fordulatszáma arányos lesz a kitöltési tényezővel (ilyenkor a motor mechanikai tehetetlensége fogja integrálni a jelet, így olyan, mintha változtatható értékű DC jelet kapott volna). Másik példa a LED-ek fényerő szabályozása, ahol a LED villódzását maga az emberi szem integrálja (hasonlóan a katódsugárcsőes megjelenítő eszközöknél).



5. ábra: PWM generátor

A valóságban természetesen U_{ref} -et túlnyomórészt valamilyen egyéb áramkör kimeneti jele szolgáltatja (pl. fordulatszám távadó, mikrokontroller D/A konverterének integrált jele stb.).



6. ábra: A pulzusszélesség-moduláció jellemző jelalakjai

Az **6. ábra** szemlélteti egy tipikus PWM áramkör működését a gyakorlatban. A felső időfüggvényen látható háromszögjel tekinthető a bemeneti feszültségnek, a szinusz jel pedig a szabályozó feszültségnek, azaz U_{ref} -nek. Látható, hogy a kimeneti jel akkor veszi fel a „logikai 1” állapotot, amennyiben a referenciafeszültségnél nagyobb amplitúdójú a fűrészfeszültség. Ez a jelenség igény szerint megfordítható (invertálható) úgy, hogy a műveleti erősítő invertáló és nem invertáló bemenetét felcseréljük.

Méréshez szükséges adatok:

IC: RC4558 ($U_t = \pm 10V$)

$P = 10\text{ k}\Omega$

$R = 1\text{ k}\Omega$

Zöld LED

*A kapcsolás jelalakjai lehetőleg mm-papíron kerüljenek rögzítésre!

Mérési feladatok:

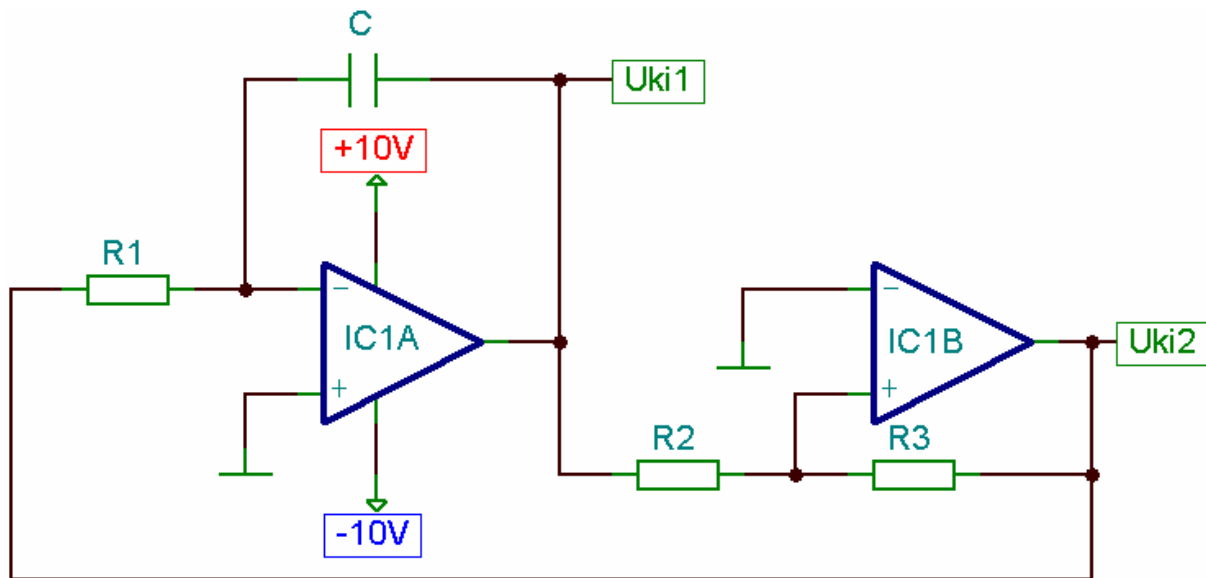
1. Vizsgáljuk meg a modulátor kimeneti jelalakját több fix értékű U_{ref} esetén úgy, hogy U_{be} és U_{ki} jelalakjait rögzítjük fázishelyesen!

2. Vegyük fel a modulátor U_{ref} -d karakterisztikáját!

3. Tegyük LED-et a kimenetre R előtétellenállással és győződjünk meg a PWM teljesítményszabályozó hatásáról!

3.3 Háromszög- négyszögjel generátor

A 3.1-ben ismertetett kapcsolás hátránya, hogy a fűrészjel linearitása rossz és terhelni sem szabad, hiszen az megváltoztatja az R_1C tag rezonanciafrekvenciáját, vagy le is állítja a rezgést. Az 7. ábrán látható kapcsolásban a hiszterézises komparátor és az integrátor különöszedésre került, ezáltal (mivel aktív integráló tag van a körben) lineárisabb háromszögjelet kapunk, ami ráadásul jobban is terhelhető.



7. ábra: Háromszög- négyszögjel generátor

A működési frekvenciát az alábbi képlet írja le:

$$T = 4R_1C \frac{R_2}{R_3}$$

Méréshez szükséges adatok:

IC: RC4558 ($U_i = \pm 10V$)

$R_2 = 1k\Omega$

$R_1 = R_3 = 10k\Omega$

$C = 100nF$

$P = 10k\Omega$

*A kapcsolás jelalakjai lehetőleg mm-papíron kerüljenek rögzítésre!

Mérési feladatok:

1. Mérjük meg az oszcillátor frekvenciáját, majd számítással igazoljuk annak helyességét!

2. Ábrázoljuk a kimeneti jelalakokat fázishelyesen!

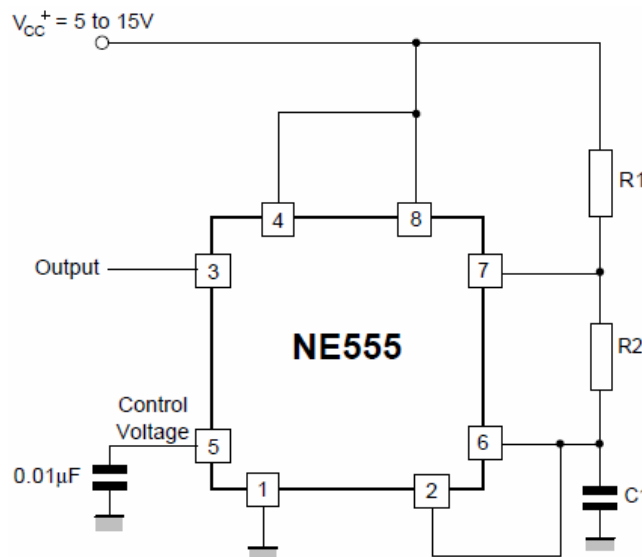
3. R_1 -et cseréljük ki potenciométerre, majd vizsgáljuk meg a működés határait!

3.4 Astabil multivibrátor 555-el

A legegyszerűbb alkalmazása az 555-ös időzítőnek az astabil multivibrátoros üzemmód. Ebben az esetben a TRIGGER (2) és a TRESHOLD (6) bemenetek összekötésre kerülnek, így biztosítva, hogy az oszcillátor szabadon futó legyen.

Bekapcsoláskor a C_1 kondenzátor R_1 és R_2 ellenállások soros eredőjén folyó árammal töltődni kezd, majd amint eléri a kondenzátor feszültsége az IC belsejében található osztó által beállított komparálási feszültséget ($2/3U_{táp}$), akkor a DISCHARGE (7) láb mögött található tranzisztor kinyit, majd C_1 kondenzátor kisül R_2 ellenálláson keresztül mindaddig, amíg a feszültsége $1/3U_{táp}$ -ra le nem esik. Ez a folyamat ismétlődik, így létrehozva az állandó rezgést. A CONTROL VOLTAGE (5) kivezetésre helyezett kondenzátor szűrési célokat valósít meg, így stabilizálva a rezgési frekvenciát.

Instabil működés vagy gerjedés esetén a tápágra elhelyezett ($470nF$) szűrőkondenzátor az 555-ös időzítő esetén is megoldást tud jelenteni.



8. ábra: 555-ös astabil multivibrátor
(Texas Instruments katalógus)

Az astabil multivibrátor működését leíró képletek:

$$t_1 = 0,693(R_1 + R_2)C_1 \quad T = t_1 + t_2 = 0,693(R_1 + 2R_2)C_1$$

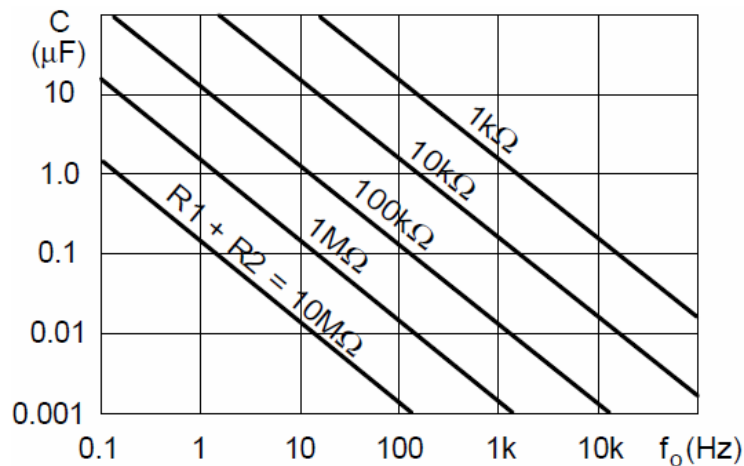
$$t_2 = 0,693R_2C_1$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1,44}{(R_1 + 2R_2)C_1}$$

$$d = \frac{R_2}{R_1 + 2R_2} \cdot 100\%$$

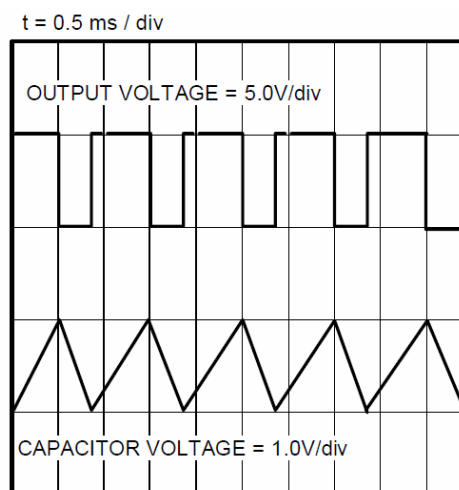
Ahol t_1 a kimenet magas (HIGH) szintű, t_2 az alacsony (LOW) szintű ideje periódusonként, d pedig a kitöltési tényező (közelítő képlet).

A szabadon futó astabil multivibrátor rezgési frekvenciája, valamint a rezgőkört alkotó R_1 , R_2 és C_1 kondenzátorok közötti összefüggést a **9. ábra** szemlélteti – ez a grafikon természetesen a gyors számítást, vagy akár annak mellőzését is lehetővé teszi.



9. ábra: Az astabil multivibrátor „frekvencia - rezgőköri elemek” grafikonja (Texas Instruments katalógus)

Az NE555-el megvalósított astabil multivibrátor jellemző jelalakjait a **10. ábra** mutatja be (katalógus adat, a hozzátartozó R és C értékek esetében):



$$R_1 = R_2 = 4.8k\Omega, C_1 = 0.1\mu F, R_L = 1k\Omega$$

10. ábra: Az astabil multivibrátor tipikus jelalakjai (Texas Instruments katalógus)

Méréshez szükséges adatok:

IC: NE555 ($U_1 = +9V$)

a, eset:	b, eset:	c, eset:
$R_1 = 10k\Omega$	$R_1 = 10k\Omega$	$R_1 = 56k\Omega$
$R_2 = 10k\Omega$	$R_2 = 56k\Omega$	$R_2 = 10k\Omega$
$C_1 = 15nF$	$C_1 = 15nF$	$C_1 = 15nF$

$C = 470nF$ (az IC 5-ös lábán)

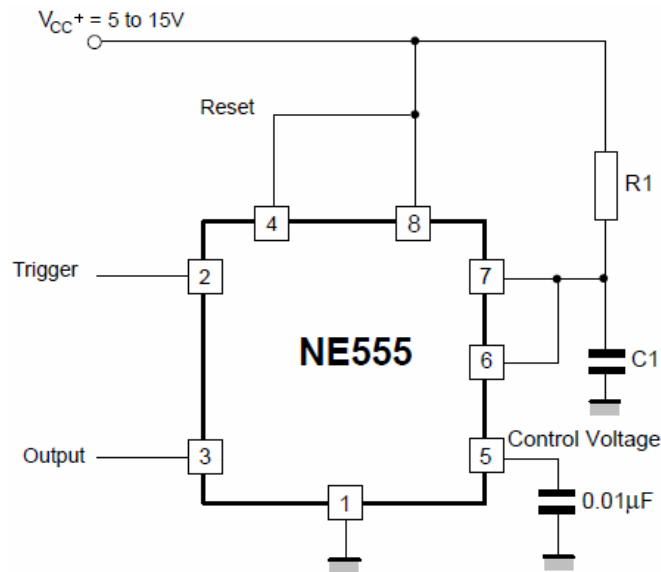
Mérési feladatok:

1. Valósítsuk meg a kapcsolást az „a” eset szerint és vizsgáljuk meg a 3-as és 6-os lábak jelalakjait fázishelyesen! A kimeneti jel frekvenciáját és kitöltési tényezőjét is igazoljuk számítással; az esetleges eltérést magyarázzuk meg!

2. Ismételjük meg az 1. pontban foglaltakat a „b” és „c” eset adatai szerint is!

3.5 Monostabil multivibrátor 555-ös időzítővel

A monostabil multivibrátor egy olyan áramkör, aminek csak egy stabil állapota van, innen származik az elnevezése. Abban az esetben, ha ebből a stabil állapotból kibillentjük egy külső jellel, azaz trigger impulzussal, akkor a multivibrátor kimenete átbillen ellentétes előjelűvé az áramkörben található rezgőkör időállandójának megfelelő ideig. Ebből adódóan a gyakorlatban történő felhasználása az, hogy igény szerint szélesíteni lehet keskeny impulzusokat (ez a gyakrabban előforduló eset), vagy keskenyíteni szélesekét.



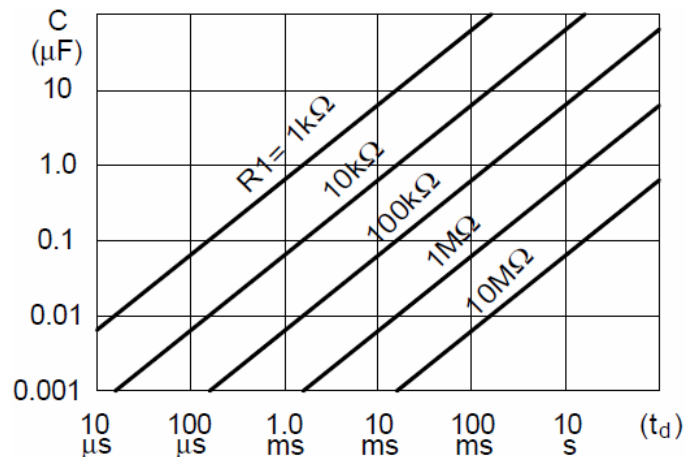
11. ábra: 555-ös időzítővel megvalósított monostabil multivibrátor (Texas Instruments katalógus)

A **11. ábrán** látható multivibrátor bemenete $1/3U_{\text{táp}}$ amplitúdójú lefutó élre reagál. Amint a triggerelés bekövetkezik, úgy a kimenet magas szintbe (HIGH) kerül mindaddig, amíg az R_1C_1 rezonáns tag kondenzátora el nem éri a $2/3U_{\text{táp}}$ feszültséget. Amint ez bekövetkezik, a kimenet ismét alacsony szintbe (LOW) kerül és ott is marad mindaddig, amíg nem érkezik újabb trigger impulzus.

Megjegyzendő azonban, hogy mivel a kondenzátor töltődésének mértéke és a komparátor TRESHOLD értéke is közvetlenül és együttesen függ a tápfeszültségtől, így végeredményül az időzítés ideje tápfeszültség független lesz. Ebből az egyszerűsödésből következik, hogy a kimenet magas állapotban töltött ideje:

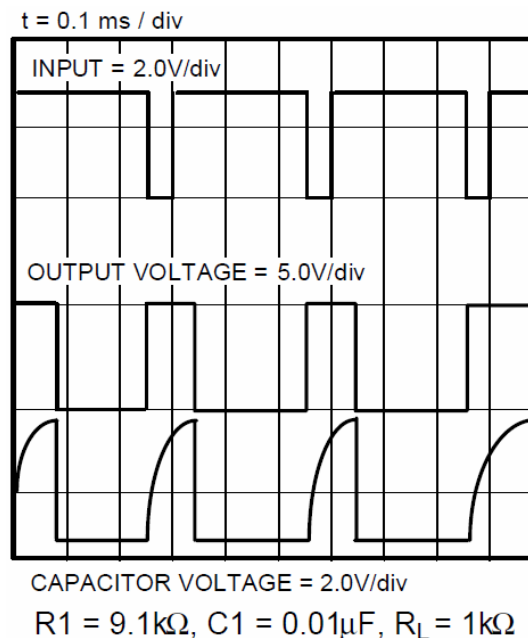
$$t_1 = R_1C_1$$

A monostabil multivibrátor rezgőköri elemeinek és a kimeneti jel magas szintje közötti összefüggést grafikusán szemlélteti a **12. ábra**.



12. ábra: Monostabil multivibrátor „impulzusszélesség – rezgőkör” gráfja (Texas Instruments katalógus)

Az NE555-el megvalósított monostabil multivibrátor jellemző jelalakjait a **13. ábra** mutatja be (katalógus adat, a hozzátartozó R és C értékek esetében):



13. ábra: Monostabil multivibrátor jellemző jelalakjai (Texas Instruments katalógus)

Méréshez szükséges adatok:

IC: NE555 ($U_t = +9V$)

a, eset:	b, eset:	c, eset:
$R_1 = 10k\Omega$	$R_1 = 1k\Omega$	$R_1 = 56k\Omega$
$C_1 = 15nF$	$C_1 = 15nF$	$C_1 = 15nF$

$C = 470nF$ (az IC 5-ös lábán)

* A trigger bemenet meghajtáskor érdemes a függvénygenerátor TTL kimenetét alkalmazni

Mérési feladatok:

1. Valósítsuk meg a kapcsolást az „a” eset szerint és vizsgáljuk meg a 3-as és 6-os lábak jelalakjait fázishelyesen! A kimeneti jel kitöltési tényezőjét igazoljuk számítással! Végezzük el ezen vizsgálatot legalább 4 egymástól jelentősen eltérő frekvencián!

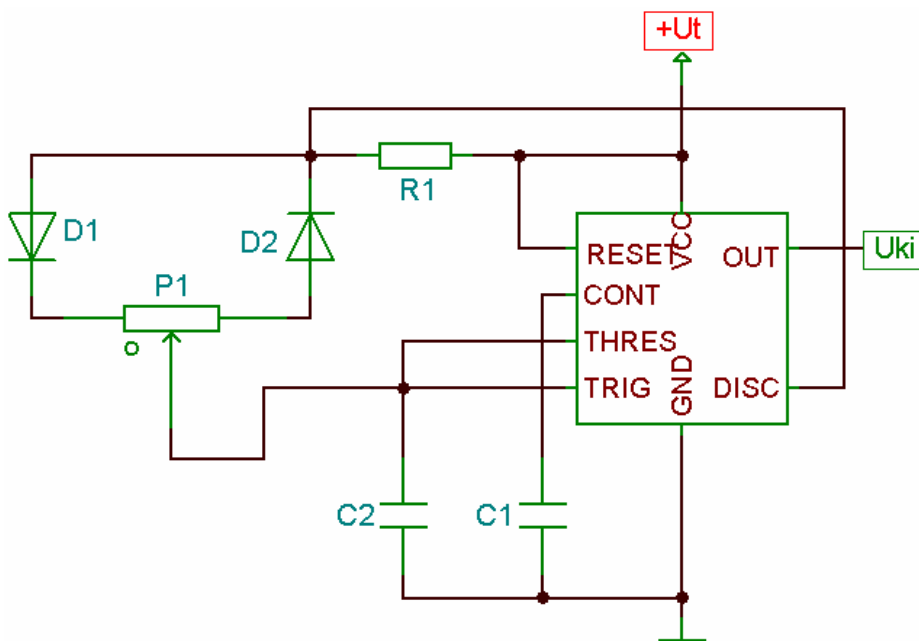
2. Ismételjük meg az 1. pontban foglaltakat a „b” és „c” eset adatai szerint is!

3.6 Pulzusszélesség modulátor

Egyszerű igények kielégítésére kiválóan alkalmas a **14. ábrán** látható PWM áramkör. Az áramkör alapját itt is az astabil multivibrátoros bekötés adja, de a két dióda és a potenciométer alkotta szabályozóegységnek köszönhetően a periodikus kimeneti jel t_1 (HIGH) és t_2 (LOW) részeinek aránya állítható lesz.

A működési frekvencia, illetve t_1 és t_2 idők meghatározásához a formulák már ismertetésre kerültek a 3.4 mérési pontban, azonban némi változtatást igényelnek. $R_1' = R_1 + P_1'$ és $R_2' = R_1 + P_1''$; ahol P_1' a potenciométer kapcsolási rajz szerinti bal oldali kivezetése –vagyis a D_1 dióda felőli - és a csúszka közötti ellenállás értéke, P_1'' pedig a csúszka és a D_2 dióda felőli kivezetés ellenállás értéke. Az így kapott képletek jól használhatóak, amennyiben a diódák dinamikus ellenállása hanyagolható R_1 és P_1 értékéhez képest (ez jellemzően teljesül).

Bár az 555-ös időzítő típustól függően akár 200mA-t is képes az OUT pontján szolgáltatni, a gyakorlatban mégsem szokás közvetlen meghajtásra alkalmazni (maximum néhány LED, vagy egy PC ventilátor erejéig). A kimenetre rend szerint valamilyen kapcsolóeszközt teszünk (N-csatornás MOSFET-et leggyakrabban), majd a vezérelni kívánt eszközt a FET munkaellenállásaként kötjük be.



14. ábra: PWM generátor

Méréshez szükséges adatok:

IC: NE555 ($U_{táp} = +9V$)

D_1 és D_2 1N4007 normál Si dióda

$R_1 = 1k\Omega$

$P_1 = 10k\Omega$

$C_1 = 470nF$

$C_2 = 15nF$

Mérési feladatok:

1. Vegyük fel a potenciométer szögelfordulása és a kitöltési tényező közötti összefüggést karakterisztika formájában! (A potenciométer teljes kitérése 270° , szemmel is megbecsülhetők a 45° -os léptékek.)

2. Vizsgáljuk meg a modulátor U_{ki} és U_{C2} , azaz a C_2 kondenzátoron eső feszültségének, valamint a DISCHARGE láb jelalakjait fázishelyesen!

3.6 Ellenőrző kérdések:

1. Rajzolja fel a relaxációs oszcillátor kapcsolási rajzát! Adja meg a rezonancia frekvenciát leíró formulát!
2. Ismertesse röviden a relaxációs oszcillátor működését! Ábrázolja a jellemző jelalakokat!
3. Hogyan használható a relaxációs oszcillátor PWM-re?
4. Mi a PWM? Mutasson be egy lehetséges elállítási módot!
5. Soroljon fel minél több példát a PWM lehetséges felhasználására!
6. Rajzolja fel a háromszög-négyszögjel generátor kapcsolási rajzát! Adja meg a rezonancia frekvencia képletét!
7. Mutassa be a háromszög-négyszögjel generátor működését, előnyét a relaxációs oszcillátorral szemben!
8. Rajzolja le az 555-ös időzítő belső felépítését!
9. Rajzolja le és mutassa be az 555-el megvalósított astabil multivibrátort és ismertesse működését!
10. Rajzolja le az 555-el megvalósított astabil multivibrátort, valamint a jellemző jelalakokat!
11. Adja meg az 555-el megvalósított astabil multivibrátor rezonanciára, és magas-alacsony szintidőkre vonatkozó képleteit!
12. Ismertesse a monostabil multivibrátor működését (+kapcsolási rajz, jellemző jelalakok)!
13. Mutassa be az 555-el megvalósítható, egyszerű PWM modulátor működését (kapcsolási rajzzal)!