

Komparátorok alkalmazása

Nagy Gergely

BME EET

2012. április 4.



1 Bevezetés

- A komparátorok definíciója és rajzjele
- Komparátorok és műveleti erősítők
- A komparátorok tulajdonságai
- A nem-ideális komparátorok tulajdonságai

2 Felépítésük

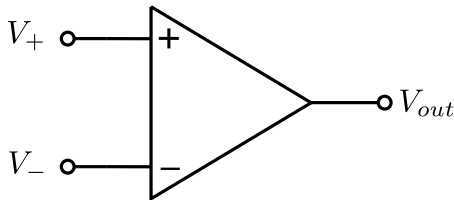
3 Hiszterézises komparátorok

4 Alkalmazásuk

5 Irodalom

A komparátorok definíciója és rajzjele

- A komparátorok **két analóg feszültséget fogadnak**, kimenetük bináris érték, amely megmondja, hogy a **pozitív bemenet magasabb potenciálon van-e, mint a negatív**.
- Tulajdonképpen **egy-bites A/D átalakítók**.



Komparátorok és műveleti erősítők

- Egy **visszacsatolatlan műveleti erősítő** is komparátorként működik.
- A korai komparátorok leegyszerűsített műveleti erősítőkhöz hasonlítottak.
- Mára azonban ez nem igaz:
 - a modern komparátorok a feladatra lettek optimalizálva,
 - egy **műveleti erősítő komparátorként használva:**
 - **lassabban működik**, mint a komparátorok,
 - **nem rendelkezik olyan speciális tulajdonságokkal**, amelyekkel a modern komparátorok (pl. beépített hiszterézis, belső referencia feszültség).

A komparátorok tulajdonságai

- Nagyon **gyors kapcsolásra** tervezik őket, így nincsen bennük frekvencia-kompenzáció.
- Általában van bennük **beépített hiszterézis** annak érdekében, hogy ha a két bemenet potenciálja nagyon közel van egymáshoz, akkor ne oszcilláljon a kimenet.
- Manapság jellemzően van bennük **lekapcsolási lehetőség** a fogyasztás minimalizálása érdekében.
- Léteznek egészen **kis tápfeszültségről** működő komparátorok (pl. MAX9100: 1,0 V)
- Fontos szempont a **kis helyfoglalás** is – tipikus tokok: SOT23 (Small Outline), SC70, UCSP (Ultra Chip Scale Package).
- Gyakori alkalmazás az, hogy egy feszültség-értéket egy referenciához hasonlíttanak, ezért **sok komparátorban van beépített feszültség-referencia.**

A nem-ideális komparátorok tulajdonságai I.

- **Komparálási feszültség:** beépített hiszterézis nélküli komparátorokban az a feszültség, amelyet el kell érni a két bemenet között, hogy a kimenet átváltson (ideálisan ez 0 V).
- Ennek az értéknek a függése a tápfeszültségtől a komparátorok egyik jósági tényezője: a **tápfeszültség-elnyomás (PSRR – Power Supply Rejection Ratio)** mérőszáma.
- A tápfeszültség ingadozása okozta hibák csökkenthetőek úgy, hogy egy kb. $0.1\text{-}1\ \mu\text{F}$ -os **kondenzátort helyezünk V_{CC} és V_{EE} közé, közel a pozitív tápfeszültség lábához.**
- Ez különösen akkor fontos, ha
 - a tápforrásnak nagy a kimeneti impedanciája,
 - hosszú a tápvezeték,
 - zavarokkal terhelt környezetben használjuk az áramkört,
 - gyors tranziensek lépnek fel.

A nem-ideális komparátorok tulajdonságai II.

- **Bemeneti ellenállás:** a komparátor bemeneteinek a földhöz viszonyított ellenállása (ideálisan végtelen):
 - miatta van bemeneti áram,
 - ez terheli a meghajtó feszültség-generátort,
 - aminek a belső ellenállásán feszültség esik,
 - ami **hiba-feszültségként (error voltage)** jelenik meg.
- **Bemeneti áram (bias current):** a bemenetek áramainak az átlaga – manapság ez akár 1 nA is lehet szobahőmérsékleten.

A nem-ideális komparátorok tulajdonságai III.

- **Bemeneti feszültség-tartomány:** az a tartomány, amelyen belül a bemenetek potenciálja változhat.
 - A kis tápfeszültségek miatt megjelentek az ún. **Beyond-the-rail** komparátorok, amelyek bemenete akár 250 mV-tal is túlmehet a tápsínek feszültségén.
- **Kimeneti feszültség-tartomány:** az a tartomány, amelyet a kimeneti potenciál képes bejárni (ideálisan a teljes táptartomány).
 - Bipoláris komparátoroknál a kimenet közös emitteres, ezért mindkét irányban van egy V_{CEsat} értékű feszültségesés.
 - MOSFET komparátorok, kis kimeneti áramok esetén közelebb tudnak menni a tápsínekhez.

A nem-ideális komparátorok tulajdonságai IV.

- **Késleltetési idő (propagation delay):** egy bemeneti változás és a hatására bekövetkező kimeneti váltás közt eltelő idő. Jele: t_{pd} .
- Két hatást fogal magában:
 - a jel áthaladása az áramkörön,
 - a kimeneti fokozat fel/lefutási késleltetése.
- A **késleltetést befolyásoló tényezők:**
 - hőmérséklet,
 - terhelő kapacitás,
 - tápfeszültség,
 - az ún. **input overdrive** – a bemeneti feszültségnek a komparálási feszültséget meghaladó része.

Az utóbbi kettő általában minél nagyobb, annál gyorsabb a válaszüdő.

- **Skew:** az invertáló illetve nem-invertáló bemenetekre vonatkoztatott késleltetés (t_{pd-} illetve t_{pd+}) közti különbség.
 - Aszimmetrikus viselkedést, jeltorzulást okoz.

1 Bevezetés

2 Felépítésük

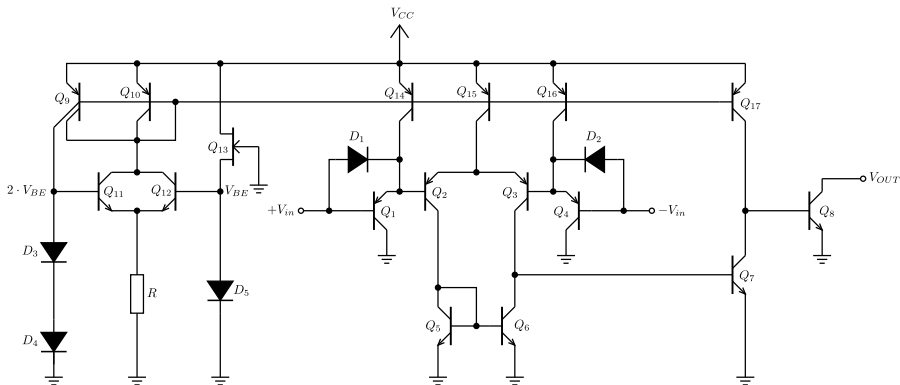
- Az LM139
- Az LM139 áramgenerátora
- A bemeneti fokozat
- A kimeneti fokozat

3 Hiszterézises komparátorok

4 Alkalmazásuk

5 Irodalom

Az LM139



- Bipoláris, open-collectoros egyszerű felépítésű komparátor.
- Kis fogyasztású, kis offszetű, széles táptartományban működő eszköz.
- Egy tokban négy komparátor található.

Az LM139 áramgenerátora I.

- A $Q_9 - Q_{13}$ tranzisztorok, $D_3 - D_5$ diódák és az R ellenállás alkotják az áramgenerátort.
- **A generátor feléléedése:**
 - 1 A tápfeszültség bekapcsolásakor az áram átfolyik a Q_{13} JFET-en és kinyitja a D_5 diódát.
 - 2 Ekkor D_5 anódján V_{BE} feszültség jelenik meg, ami kinyitja a Q_{12} tranzisztort.
 - 3 Így áramút nyílik Q_9 és Q_{10} számára a föld felé, tehát kinyitnak.
 - 4 Ennek hatására D_3 és D_4 kinyit, Q_{11} bázisa $2 \cdot V_{BE}$ potenciálra kerül, aminek hatására Q_{11} és Q_{12} közös emitterpontja V_{BE} potenciálon lesz.
 - 5 Így Q_{12} elzáródik (hiszen $V_{BE_{12}} = 0$), és innentől Q_9 -et és Q_{10} -et D_3 , D_4 és Q_{11} tartja nyitva.



Az LM139 áramgenerátora II.

- A munkapont-beállító vezeték (Q_9 , Q_{10} , Q_{14} – Q_{17} bázisai) potenciálja $V_{CC} - V_{BE}$ stabilan.
- Ennek előnye, hogy a Q_{14} – Q_{17} **tranzisztorok bázis-emitter feszültsége:**

$$V_{BE_{14-17}} = V_{CC} - (V_{CC} - V_{BE}) = V_{BE}$$

tehát egy **tápfeszültség-független** érték, így az **általuk szolgáltatott áram is nagy mértékben független a tápfeszültségtől.**



A bemeneti fokozat

- A bemenetet a $Q_1 - Q_4$ **Darlington-párokból álló differenciál-fokozat** alkotja.
- A Q_{14} és Q_{16} által megvalósított áramgenerátorok szerepe: **gyorsítják a Q_1 és Q_4 emitterein lévő parazita kapacitások feltöltődését, így növelve a bemeneti meredekséget (slew rate).**
- A D_1 és D_2 gyorsítják a potenciálváltozást a Q_1 és Q_2 emitterén, amikor nagy a feszültségváltozás a bemeneten.
- A Q_5 - Q_6 tranzisztorok által alkotott **áramtükör aszimmetrizálja a differenciálfokozatot és vezérli a kimeneti fokozat Q_7 tranzisztorát.**



A kimeneti fokozat

- A Q_7 tranzisztor vagy elvezeti a Q_{17} áramgenerátor áramát és ezzel elzárja a kimeneti Q_8 tranzisztort, vagy maga záródik el és ekkor Q_{17} árama Q_8 -on folyik át.
- A kimeneten open collector van, tehát **áramkimenetű a komparátor**.
- Ez lehetőséget ad **tápfeszültség-váltásra** (ld. később) széles tartományon:

$$V_{sout} = GND + V_{CEsat}(=\sim 100\text{ mV}) - 36\text{ V}.$$

- A Q_8 tranzisztor akár 15 mA-t is el tud nyelni.
- Kikapcsolt állapotban, 5 V-os tápfeszültségnél egy komparátor a négyből 1 mW-ot fogyaszt.



1 Bevezetés

2 Felépítésük

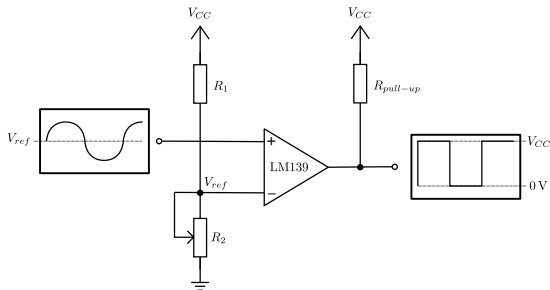
3 Hiszterézises komparátorok

- Hiszterézis nélküli komparátor
- Hiszterézis létrehozása
- Schmitt-trigger hiszterézis komparátorral

4 Alkalmazásuk

5 Irodalom

Hiszterézis nélküli komparátor



■ A probléma a fenti áramkörrel:

- A komparátor arra van optimalizálva, hogy ha a két bemenete közt a lehető legkisebb különység van, akkor a kimenete a megfelelő irányban maximálisan térjen ki (logikai érték) és tegye ezt a lehető legnagyobb sebességgel.
- Ha az egyik bemenet egy fixen rögzített érték és a másik pontosan ekörül ingadozik, akkor a kimenet a két tápsín között ugrál.

Hiszterézis létrehozása I.

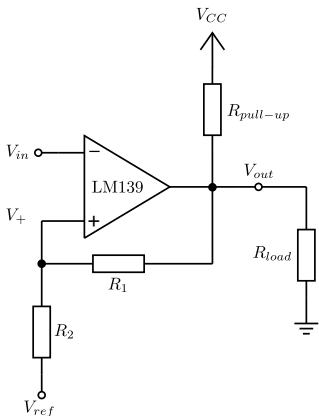
A működés:

- 1 tfh. a bemenet a referencia fölé kerül ($V_{in} > V_{ref}$),
- 2 ennek hatására V_{out} a földhöz közeledik, ami csökkenti V_+ értékét is, hiszen

$$V_+ = \frac{V_{out} \cdot R_1 + V_{ref} \cdot R_2}{R_1 + R_2},$$

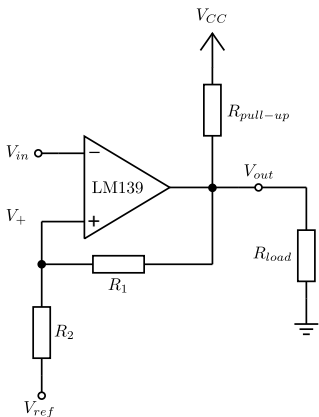
- 3 ettől még jobban nő a távolság a bemenetek közt, vagyis még gyorsabban közeledik a föld felé a potenciál.

Fordított irányú változások esetén is gyorsító hatás lép fel – ennek oka a **pozitív visszacsatolás**.



Hiszterézis létrehozása pozitív visszacsatolással

Hiszterézis létrehozása II.



- Annak érdekében, hogy a **kimenet kellően közel tudjon kerülni** V_{CC} -hez és se a visszacsatoló áramkör, se a terhelés ne húzza le:

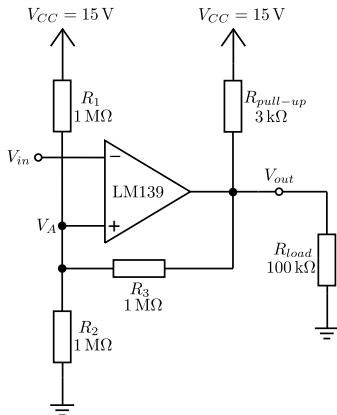
$$R_{pull-up} < R_{load}$$

$$R_{pull-up} < R_1$$

- **Ökölszabály:** a javasolt visszacsatolás: 1 % (a tápfeszültség 1 %-a) – tehát:

$$R_1 = 100 \cdot R_2$$

Schmitt-trigger hiszterézises komparátorral I.



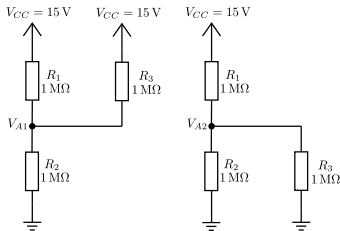
Beállítható a triggerelési szint:

- A referenciaként szolgáló V_A potenciál értékét az $R_1 - R_3$ ellenállások és a kimenet aktuális értéke határozza meg.

Schmitt-trigger hiszterézises komparátorral II.

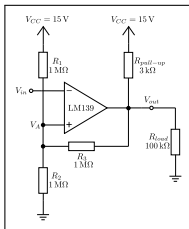
$$V_{out} = V_{CC}$$

$$V_{out} = 0 \text{ V}$$



(a)

(b)



A komparálási szintet a kimenet értéke befolyásolja:

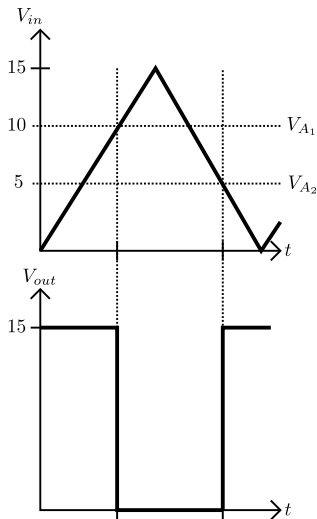
- (a) amikor a kimenet magas értékű, akkor R_3 R_1 -gyel kapcsolódik párhuzamosan, így

$$V_{A1} = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{(R_1 \times R_3) + R_2} = V_{CC} \cdot \frac{2}{3} = 10 \text{ V}$$

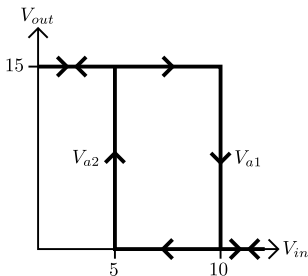
- (b) amikor $V_{out} = 0$: R_2 és R_3 párhuzamos:

$$V_{A2} = V_{CC} \cdot \frac{R_2 \times R_3}{R_1 + (R_2 \times R_3)} = V_{CC} \cdot \frac{1}{3} = 5 \text{ V}$$

Schmitt-trigger hiszterézises komparátorral III.

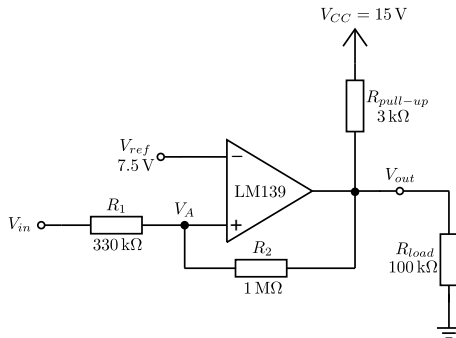


- Ha a feszültség kis értékű: a kimenet magas.
- Amikor eléri a V_{A1} szintet, átvált alacsonyba.
- Ha elkezdd csökkenni, el kell érnie a V_{A2} szintet, hogy ismét magas értékű legyen.



Schmitt-trigger hiszterézises komparátorral IV.

- **Alternatív Schmitt-trigger kapcsolás** komparátorral.
- A hiszterézisért felelős **visszacsatolás a bemeneti ágban** van.
- Az **invertáló bemenetre feszültség-referencia** kell, de mivel a bemenet áram közel 0, egy ellenállásosztó is megfelel.

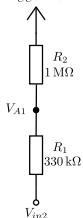


Alternatív Schmitt-trigger kapcsolás komparátorral

Schmitt-trigger hiszterézises komparátorral V.

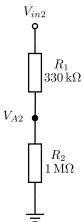
$$V_{out} = V_{CC}$$

$$V_{CC} = 15\text{ V}$$



(a)

$$V_{out} = V_{CC}$$



(b)

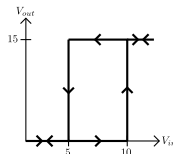
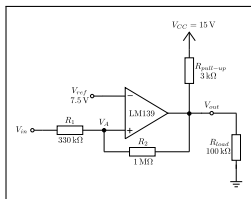
A komparálási szintet a kimenet értéke befolyásolja:

- (a) amikor V_{in} kicsi $\rightarrow V_{out} = 0\text{ V}$,
tehát a $\uparrow$ váltáshoz:

$$V_{in1} = \frac{V_{ref} \cdot (R_1 + R_2)}{R_2} \simeq 10\text{ V}$$

- (b) amikor $V_{out} = V_{CC}$ értékre vált, az
új trigger érték:

$$V_{in2} = \frac{V_{ref} \cdot (R_1 + R_2) - V_{CC} \cdot R_1}{R_2} \simeq 5\text{ V}$$



1 Bevezetés

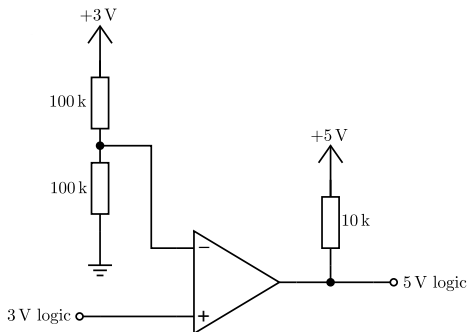
2 Felépítésük

3 Hiszterézises komparátorok

4 Alkalmazásuk

- Logikai szintváltó
- Bipoláris-unipoláris váltó
- Nullátmenet-érzékelő
- Abszolútérték komparátor
- Rezgőkörök
- Pulzusszélesség-moduláció
- Csúcsegyenirányító
- Áram-tartomány mérő
- Ablak-detektor

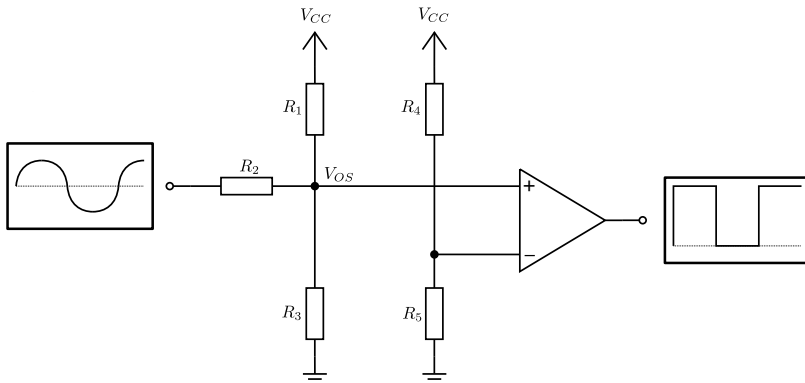
Logikai szintváltó



- Azt használjuk ki, hogy áramkimenetű az eszköz.
- Mindig ügyelni kell arra, hogy a feszültségszintek mindig a megengedett értékek alatt maradjanak.

- A felhúzó ellenállás limitálja a kimeneti áramot – itt a kimeneti tranzisztor által maximálisan elnyelhető áramértéket kell figyelembe venni.

Bipoláris-unipoláris váltó I.



- Egy bipoláris bemeneti jelből egy **unipoláris logikai jelet (négyszögjel)** állít elő.

Bipoláris-unipoláris váltó II.

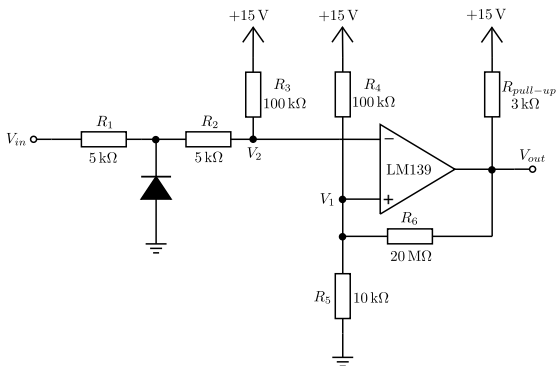
- A V_{OS} potenciál értékét a csomóponti törvény segítségével számolhatjuk ki:

$$V_{OS} = \frac{V_{CC} \cdot R_2 \cdot R_3 + V_2 \cdot R_1 \cdot R_2}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3}$$

- Az $R_1 - R_3$ értékeket úgy érdemes megválasztani, hogy a komparátor **nem-invertáló bemenetének potenciálja a gerjesztő jel legnegatívabb értékénél se legyen kisebb**, mint a megengedett legkisebb érték (pl: -0,3 V (LM139)).

Nullátmenet-érzékelő I.

- A nullátmenet-érzékelő (**zero crossing detector**) a nulla potenciálra komparál.
- Az alábbi megoldásban a komparátor a föld és egy pozitív tápfeszültség között üzemel!
- Az áramkör haszna: **egy szinuszjelet szimmetrikusan négyszögesít.**



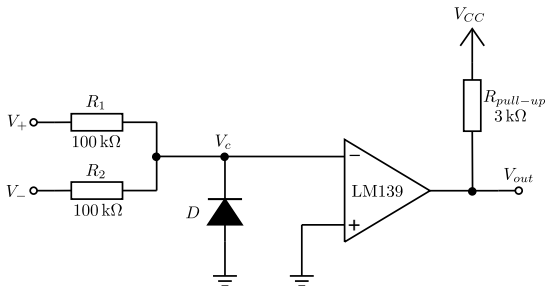
Nullátmenet-érzékelő II.

- Mivel $R_1 + R_2 = R_5$, a **két bemeneten azonos ellenállásosztó van.**
- A **visszacsatoló R_6 ellenállás értéke nagyon nagy** ($20\text{ M}\Omega$), így az általa bevitt **hiszterézis nagyon kicsi** ($\sim 10\text{ mV}$), ugyanakkor a pozitív visszacsatolás miatt **meggyorsítja az átváltást.**
- A D_1 dióda biztosítja, hogy a **komparátor invertáló bemenete ne menjen -100 mV alá.**
 - A dióda anódja kb. -700 mV -on lesz a bemenet negatív félperiódusaiban, de az $R_2 - R_3$ osztó miatt az invertáló bemenet végig pozitív marad.
 - A bemeneti maximális áramterhelhetőség D_1 paramétereitől függ.



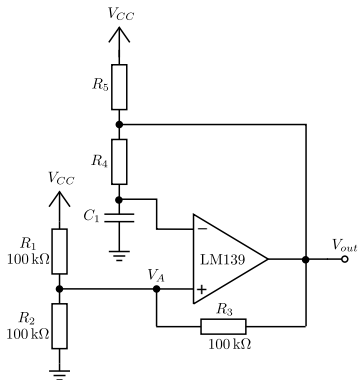
Abszolútérték komparátor

- **Különböző polaritású feszültségek abszolútértékének összehasonlítását** végzi (V_+ pozitív, V_- negatív).
- A dióda a bemenetet védi a nagy negatív feszültségtől.
- Ha V_+ abszolútértéke nagyobb, mint V_- : V_c pozitív.
- Ha V_+ abszolútértéke kisebb, mint V_- : V_c kicsivel földpotenciál alatt ($\sim 700\text{ mV}$ vagy afelett).



Rezgőkörök I.

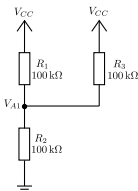
- A **nem-invertáló bemenet hiszteréziszes komparátor** üzemmódban működik (mivel $R_1 = R_2 = R_3 \rightarrow$ a két komparálási feszültség: $\frac{1}{3}V_{CC}$ és $\frac{2}{3}V_{CC}$).



- Az invertáló oldalon a **kondenzátor a kimenet értékétől függően töltődik, vagy kisül.**
- Az **invertáló bemenet miatt instabil a kapcsolás:** amikor töltjük a kondenzátort (kimenet V_{CC}), akkor közeledünk a kimenetet földre húzó érték felé.

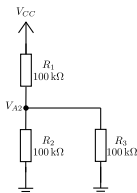
Rezgőkörök II.

$$V_{out} = V_{CC}$$

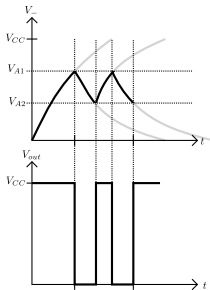
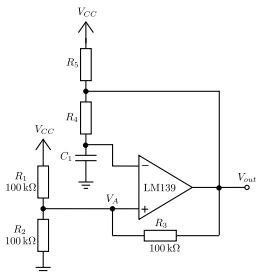


$$V_{A1} = \frac{2}{3} V_{CC}$$

$$V_{out} = 0 \text{ V}$$



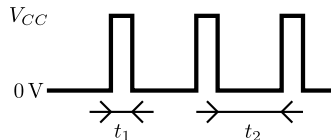
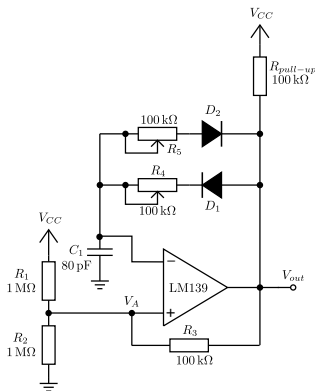
$$V_{A2} = \frac{1}{3} V_{CC}$$



- Tfh. V_{out} magas, tehát $V_- < V_+$,
- ekkor $V_{out} = V_{CC}$, tehát R_4 -en keresztül C töltődik (R_5 -ön nem esik, feszültség $\rightarrow$ nem folyik áram) és $V_A = V_{A1} = \frac{2}{3} V_{CC}$,
- amikor $V_C = V_{A1} \rightarrow V_{out}$ átvált GND-re és $V_A = V_{A2} = \frac{1}{3} V_{CC}$,
- ekkor R_4 -en át kisül a kondenzátor, amíg el nem éri V_{A2} -t, amikor a kimenet újból magas lesz.

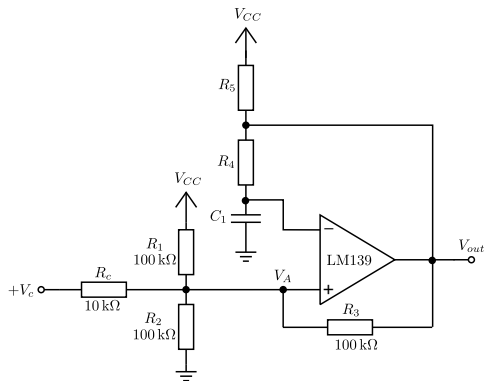
Rezgőkörök III.

- A rezgőkör **kitöltési tényezője beállítható**, ha különböző ellenállásokon keresztül töltjük, illetve sűtjük ki a kondenzátort.
- Töltés: $R_4 - D_1$ -en keresztül (meghatározza: t_1 -et).
- Kisütés: $R_5 - D_2$ -n keresztül (meghatározza: t_2 -t).



Pulzusszélesség-moduláció I.

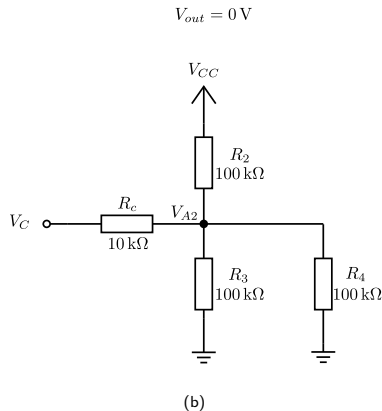
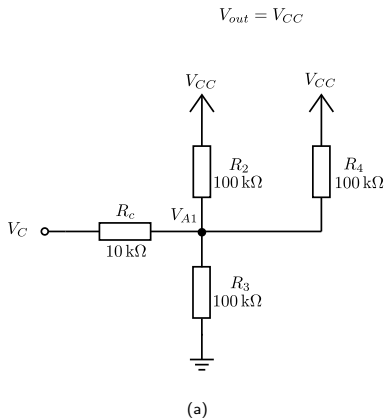
- A **négyszögjel-generátorból** PWM-generátor alakítható ki úgy, hogy egy bemeneti jel segítségével **eltoljuk a komparálási szinteket**.
- R_C -t csökkentve nő a bemeneti jelre (V_C) való érzékenység.
- R_1 és C_1 a középfrekvenciát állítják be.



Pulzusszélesség-moduláció II.

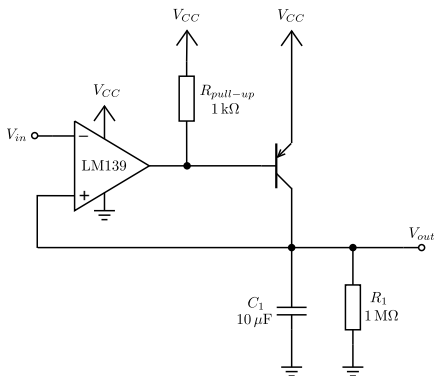
$$V_{A1} = \frac{2 \cdot V_{CC} + 10 \cdot V_C}{13}$$

$$V_{A2} = \frac{V_{CC} + 10 \cdot V_C}{13}$$



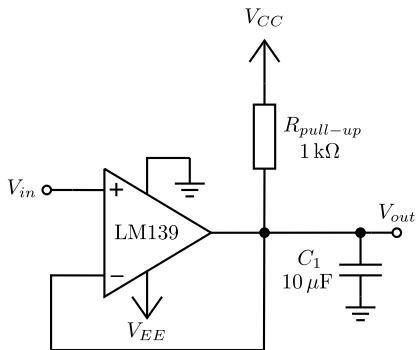
Csúcsegyenirányító I.

- A diódás csúcsegyenirányító kapcsolás javított változata.
- Eltűnik a nyitófeszültség okozta hiba.
- A kimenet maximális értéke: $V_{CC} - V_{CE_{sat}}$

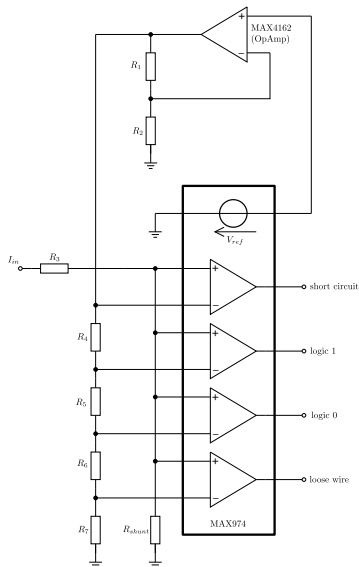


Csúcsegyenirányító II.

- A negatív csúcsirányítónál kihasználjuk, hogy az LM139-nek open collectoros a kimenete, így **nincs szükség külső tranzisztorra**.



Áram-tartomány mérő



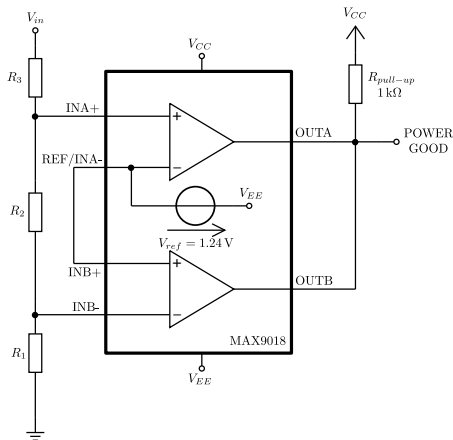
- Hőmérő-elvű a kimenet.
- A beépített referenciát egy nem-invertáló alkapcsolás erősíti:

$$V = V_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$

így R_1 és R_2 segítségével állítható be a komparálási tartomány felső határa.

- Az R_{shunt} ellenálláson lesz a mérendő áramból feszültség, az $R_4 - R_7$ ellenállások állítják be a komparálási szinteket.

Ablak-detektor I.



■ Azt figyeli, hogy a **bemenet egy adott feszültség-tartományban** van-e.

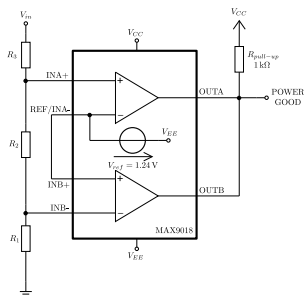
■ Például Li-ion elemeknél:

- 2,9 V alatt: lemerült
- 3,6 V: nominális érték
- 4,2 V: csúcs töltés

tehát a $[2,9 - 4,2]$ tartományban megfelelő a telepfeszültség értéke.

Ablak-detektor II.

- **Ha a feszültség túl nagy,** akkor $INB-$ a feszültség-referencia értéke fölé megy, és az alsó komparátor lehúzza a kimenetet.
- **Ha a feszültség túl alacsony,** akkor $INA+$ a referencia alá kerül, és a felső komparátor húzza le a kimenetet.
- A kapcsolás kihasználja, hogy a komparátorok open collectoros kimenettel rendelkeznek, így **összeköthető a két kimenet.**



Felhasznált irodalom

- "LM139/LM239/LM339—A Quad of Independently Functioning Comparators", Application Note 74, National Semiconductor
- "Selecting the Right Comparator", Application Note 886, MAXIM