

20. Feszültség stabilizátorok, tranzisztoros áramkorlát

Írta: Vincze Viktor

Lektorálta: Szabó Ádám, Trádler Máté

A tananyagrészen megismerkedünk az eddig használt és további feszültségstabilizátorok valamint az egyszerű áramkorlátok felépítésével.

BEVEZETÉS

A feszültségstabilizátor az egyik leggyakoribb elektronikai komponens. Általánosságban elmondható, hogy az áramköreinknek változó terhelés mellett is stabil tápfeszültségre van szükségük a helyes működéshez, függetlenül attól, hogy egy mikrokontrolleres vezérlésről, vagy egy analóg erősítőről van szó. Természetesen nagyban függ az elkészítendő kapcsolástól, hogy a feszültség stabilizálásának melyik módját választjuk.

A tervezési folyamat elején kiválasztottuk azt, hogy milyen akkumulátorról, vagy fix feszültségű tápegységről szeretnénk táplálni az áramkörünket. A következő lépés az áramkör igényeinek megfelelő táplálás megtervezése. Például nézzük meg egy autó elektromos felépítését. Az autóban található akkumulátor feszültsége nagyjából 9V és 14V között változhat annak függvényében, hogy épp tele van és még a generátor is tölti, vagy egy hideg reggelen lemerült akkumulátorral próbáljuk többször is indítani az autónkat. Emiatt a gépkocsi elektromos rendszereit úgy tervezték meg, hogy azok 8V és 16V között biztosan működjenek. Senki sem örülne, ha az akkumulátor töltöttségének függvényében változna az autó HI-FI hangereje, vagy a lámpák fényereje.

Egy másik példa, hogy az előző tananyagrészekben megismert mikrokontrollert akár tönkre is tehetjük, ha nem a gyártó által megadott feszültségről tápláljuk. Egy olyan mikrokontrollert, amit 5V névleges feszültségről való működésre terveztek, általában 4.5V és 5.5V közötti bemenő feszültségről képes a specifikációnak megfelelően működni. De hogyan lesz a 14V-ból 5V?

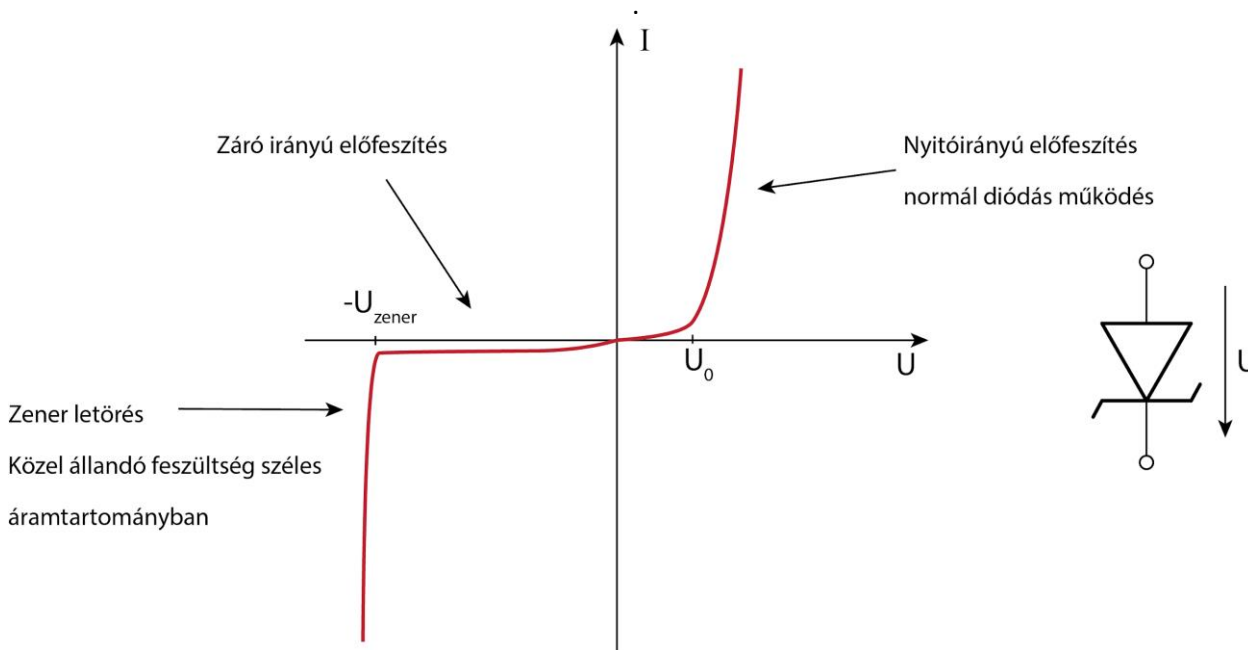
Egy ellenállásosztóval képesek vagyunk 14V-ból 5V-ot létrehozni. Az egyik nehézség, hogy abban a pillanatban, amikor erre az 5V-ra rákötünk valami terhelést és áram kezd folyni, a feszültség a terheléssel arányosan csökken. A másik szintén jelentős probléma, hogy a leosztott feszültség függ a bemenő feszültségtől, ha a 14V lecsökken 9V-ra az 5V is arányosan csökkenni fog.

Az ellenállásosztóval előállított feszültséget csak abban az esetben lehet állandónak tekinteni, ha a bemenő feszültség már stabil és a kimenetre nem fogunk semmilyen terhelést kötni.

Ahhoz, hogy a bemenő feszültség ingadozásától függetlenül állandó kimenő feszültséget állítsunk elő, félvezető alkatrészekre lesz szükségünk.

PÁRHUZAMOS TÁPEGYSÉGEK, ZENER-DIÓDA

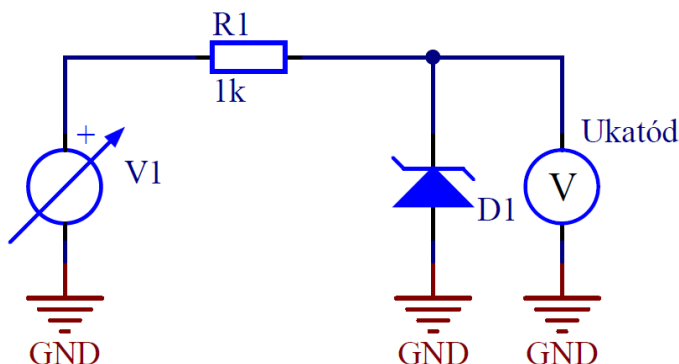
Már megismerkedtünk a diódával egy előző tananyagrészen és tudjuk azt, hogy záróirányban sem képes akármekkora feszültségnek ellenállni. Azt a záróirányú feszültséget, amittől a dióda már vezető állapotba kerül, letörési feszültségnek nevezzük. Ez a feszültség normál diódák esetében meglehetősen magas (50V vagy afeletti), azonban vannak speciális, úgy nevezett Zener-diódák, amik jól meghatározott, néhány voltos letörési feszültséggel rendelkeznek, és megbízhatóan működtethetők a letörési tartományban.



1. ábra - Zener-dióda karakterisztikája

A letörési feszültség (reverse breakdown voltage, az ábrán V_{br}) elérésekor a karakterisztika nagyon meredek lesz, jó közelítéssel itt a feszültség nem változik, csak az áram. Ezért ezt a régiót jól lehet stabilizálásra használni.

Kössük sorba a diódát egy ellenállással, ami korlátozza az áramát:

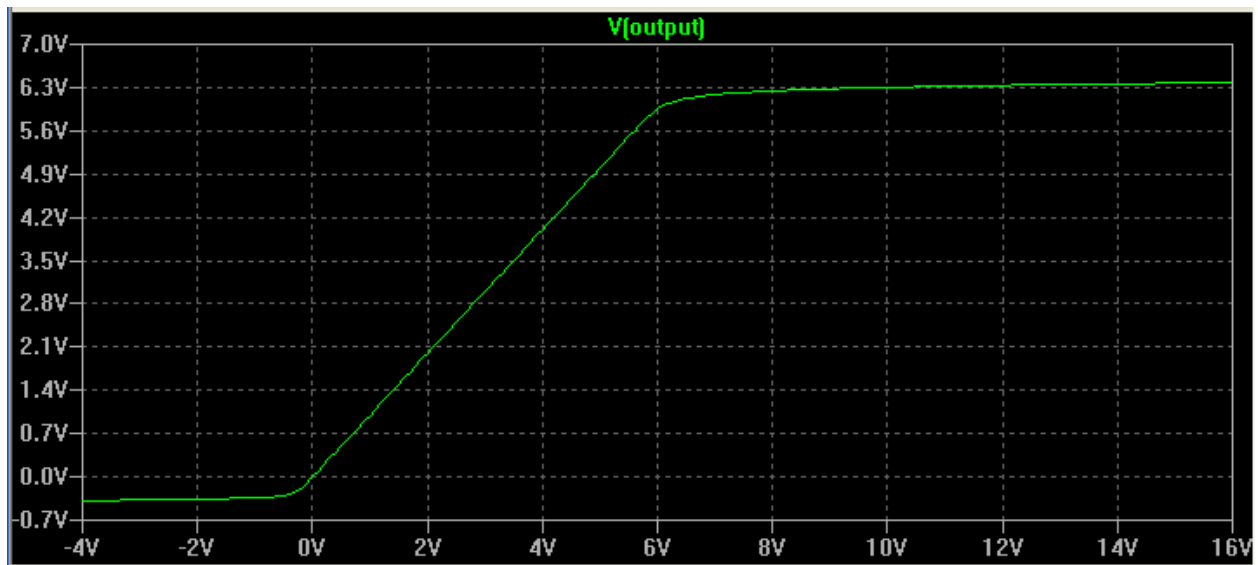


2. ábra - Dióda ellenállással sorba kötve

Ha a bemenő feszültség magasabb a dióda letörési feszültségénél, akkor a diódán mindig ezt a V_{br} letörési feszültséget tudjuk mérni, a maradék pedig az ellenálláson esik.

Ha a kimenetre terhelést kötünk, akkor rajta áram fog folyni, ennyivel csökken a diódán átfolyó áram. A dióda addig tudja betölteni a stabilizáló szerepét, amíg rajta áram tud folyni, tehát ha nem túl nagy az áramkörre kötött terhelés.

Ha a fenti egyszerű terheletlen kapcsolást berajzoljuk egy áramkör-szimulátorba, és a V1 generátor feszültségét -4 és 16V között változtatjuk, akkor az alábbi ábrán látható módon fog alakulni a feszültség az "Ukatód" (vagy U_{kimenet}, tehát U_{output}) jelölésű részen, vagyis a Zener-dióda katódján.



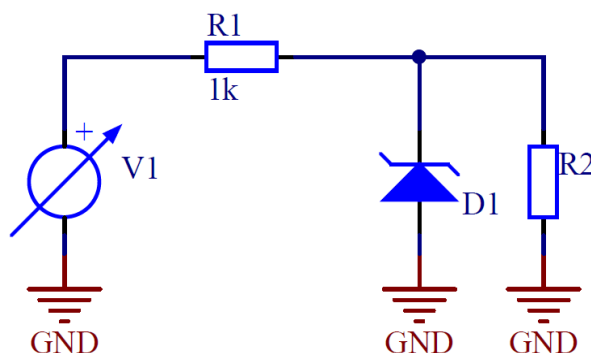
3. ábra - Zener-dióda Ukatód feszültsége

Látható, hogy 0V-alatt (ugyanaz mintha normál irányba lenne pozitív feszültség kapcsolva a diódára) a Zener-dióda is normál diódaaként üzemel. 0V-tól nagyjából 6V-ig a katódon mérhető feszültség megegyezik a ráadott feszültséggel, tehát a diódán nem folyik áram, viszont 7V felett látható, hogy a feszültség viszonylag stabilan 6.3V. Tehát ennek a diódának letörési (Zener) feszültsége 6.3V.

A zener diódákat számos különböző feszültséggel gyártják, könnyen tudunk az alkalmazásnak és az elképzeléseinknek megfelelő paraméterekkel rendelkezőt választani.

A feszültség szabályozásának az ilyen típusát, amikor a szabályozó elem a terheléssel párhuzamosan helyezkedik el, sönt szabályozásnak nevezzük.

Így néz ki a kapcsolási rajz a terheléssel:



4. ábra - Sönt szabályozás

A Zener-dióda segítségével az R2-vel jelölt terhelésre fix feszültség fog jutni. Az R1-en folyó áramon a D1 dióda és az R2 terhelés fog osztozni.

Abban a tartományban, ahol a terhelés nem befolyásolja a kimeneti feszültséget, ott az R1-en folyó áram nem függ az R2 terhelés nagyságától. Az ilyen áramkör a fogyasztó bekapcsolt és lekapcsolt állapotában is ugyanannyit fogyaszt. Ez a tulajdonság egyben előny is és hátrány is. Előny, mert a szükséges áram mindig fix. Hátrány, mert alacsony terhelés esetén a hatásfok nagyon rossz. Előny még, hogy nehéz ennél egyszerűbb kapcsolást elképzelni, mindössze két elemből áll.

Most számoljuk ki, hogy milyen terhelés mellett képes a D1-el jelölt Zener-dióda stabil tápfeszültséget biztosítani. (A terhelést az R2 ellenállás szimbolizálja.) A Kirchhoff-féle csomóponti törvény miatt, a D1-en és az R2-őn átfolyó áramok összege fog az R1-en átfolytá tehát,

$$I_{R1} = I_{D1} + I_{R2}$$

Ha a V1-el jelölt generátor feszültsége 12V, és a D1 zener feszültsége 6.3V, akkor az R1 ellenálláson eső feszültség 5.7V lesz, ebből az R1 árama

$$\frac{5.7 [V]}{1000 [\Omega]} = 5.7 [mA]$$

Ha a példaáramkörben R2 értékét úgy választjuk meg, hogy a rajta átfolyó áram értéke közel legyen az 5.7mA-hez, akkor a szabályozás megszűnik, és az R2 tápfeszültsége 6.2V alá fog esni, mert ahhoz, hogy a feszültség stabil maradjon, a diódán is kell áramnak folynia. Általában az adatlapokban ez az érték nem minimális áramként, hanem ajánlott áramként van megadva. Ha megnézzük a diódánk adatlapját, akkor a zener feszültségeket három áramérték mellett tartalmazza, ezek az áramok 1 mA, 5mA és 20mA. Tehát ahhoz, hogy a zener feszültség az adatlapban szereplő tartományban maradjon, legalább 1 mA áramnak kell folyjon a diódán.

Vizsgáljuk meg azt is, hogy mekkora maximális áram folyhat át a diódán, anélkül, hogy tönkremenne. Ennek kiszámításához az adatlap Maximum Ratings (1.oldal) fejezetét kell átolvasnunk.

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Max	Unit
Total Power Dissipation on FR-5 Board, (Note 1) @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derated above 25°C	P_D	225 1.8	mW mW/ $^\circ\text{C}$
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	556	$^\circ\text{C/W}$
Total Power Dissipation on Alumina Substrate, (Note 2) @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derated above 25°C	P_D	300 2.4	mW mW/ $^\circ\text{C}$
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	417	$^\circ\text{C/W}$
Junction and Storage Temperature Range	T_J, T_{stg}	-65 to +150	$^\circ\text{C}$

Maximum ratings are those values beyond which device damage can occur. Maximum ratings applied to the device are individual stress limit values (not normal operating conditions) and are not valid simultaneously. If these limits are exceeded, device functional operation is not implied, damage may occur and reliability may be affected.

1. FR-5 = 1.0 X 0.75 X 0.62 in.
2. Alumina = 0.4 X 0.3 X 0.024 in, 99.5% alumina.

Forrás: ON Semiconductor, MMBZ5221BLT1 adatlap

5. ábra - Dióda Maximum Ratings táblázata

Mivel az adatlap az egész diódacsaládhoz tartozik, ezért nem fogjuk benne megtalálni a maximum áramot, csak a maximum teljesítményt, de ebből a Zener-feszültség segítségével könnyen meghatározhatjuk az áramot. A maximális teljesítményhez két érték van felírva. Az egyik, ami ránk vonatkozik, normál anyagú áramkörre szerelve 225mW, a másik pedig alumínium hűtőborda esetén.

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{U_{Zener}} = \frac{0.225 [W]}{6.2 [V]} = 0.036 [A]$$

Az adatlap alapján ezek az értékek 25°C környezeti hőmérséklet esetén érvényesek. Természetesen van módja az adatlap alapján meghatározni, hogy magasabb hőmérséklet esetén hogyan alakul a maximális megengedett teljesítmény a megadott hővezetési tényező alapján. Egy jól bevált módszer, hogy csak a maximális áram 50%-át engedjük meg, ami jelen esetben 18mA.

Tehát, ha V1 feszültsége 12V, akkor az 5,8mA I_{R1} árammal bőven a 18mA-es határon belül vagyunk, és az 1mA minimális I_{D1} áram esetén még 4.8 mA-t fogyszthat az R2 terhelés.

A példafeladatunkban V1 egy autó akkumulátora, ezért a feszültség csak optimális esetben 12V. Számoljuk ki azt is, mi történik a szélsőértékeken, 9V és 14V esetében.

Ha $V_1 = 14V$ akkor azt kell kiszámolnunk, hogy az R_1 -en folyó áram kisebb-e mint $18mA$. Az előző számítások alapján:

$$I_{R1} = \frac{14 [V] - 6.2 [V]}{1000 [\Omega]} = 7.8 [mA]$$

tehát bőven a határértéken belül vagyunk.

Most azt is számoljuk ki, hogy mennyi áram jut a terhelésre ha a $V_1 = 9V$, és a D_1 diódán legalább $1mA$ -t folytatunk keresztül!

$$I_{R1} = \frac{9 [V] - 6.2 [V]}{1000 [\Omega]} = 2.8 [mA]$$

ezt beírva az $I_{R1} = I_{D1} + I_{R2}$ képletbe $1mA$ I_{D1} áram esetén:

$$I_{R2} = 1.8 [mA]$$

Mi következik ebből? Az, hogy ha azt szeretnénk, hogy az áramkörünk $9V$ - $14V$ -ig tartó tartományban működjön, maximum $1.8mA$ -t fogyaszthat a terhelés. Természetesen kisebb R_1 értékkel javíthatunk ezen a számon, ekkor azonban nagyobb teljesítményű Zener-t is kell választanunk.

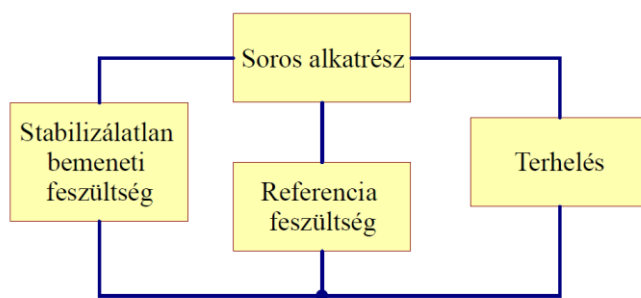
Vegyük észre, hogy ez a feszültség-stabilizáló megoldás rengeteg teljesítményt elpocsékol, hiszen komoly rész az R_1 -en, és a D_1 -en disszipálódik el. Olyan áramkörre lenne szükségünk, amivel a maximális elérhető áram nem változik ilyen mértékben a bemenő feszültség függvényében. Ezt a problémát oldják meg a soros tápegységek.

Ilyen áramkörök például a lineáris üzemű tápegységek, amik a Zener-diódát kiegészítik tranzisztorokkal.

SOROS TÁPEGYSÉGEK

A soros tápegységek lényege az, hogy egy változó ellenállású áramkört kapcsolunk a terheléssel sorba. Ennek a soros résznek az ellenállását megváltoztatva változik a rajta eső feszültség is, ezzel tudjuk biztosítani, hogy a terhelésen mindig állandó feszültség legyen.

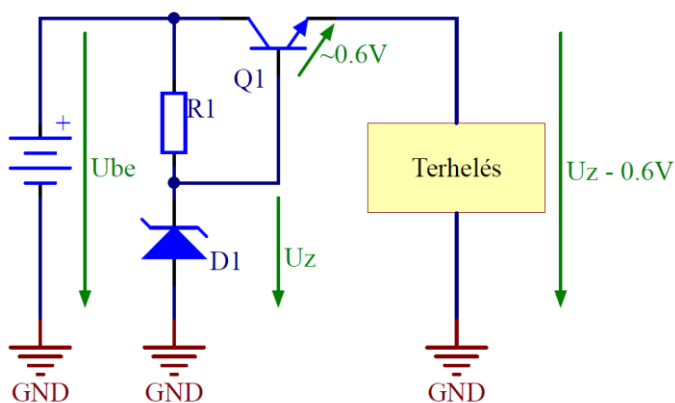
A soros tápegység előnye, hogy az egész áramkör által fogyasztott áram megegyezik a terhelés áramával, ellenben az előző részben bemutatott sönt tápegységgel, ami mindig a rendelkezésre álló maximális áramot használta fel, a terheléstől függetlenül. Ennek az lesz az eredménye, hogy a soros tápegységek hatásfoka jelentősen magasabb. A mellékelt ábrán látható a legegyszerűbb ilyen áramkör sematikus felépítése.



6. ábra - Soros tápegység sematikus felépítése

MEGVALÓSÍTÁS DISZKRÉT ELEMKBŐL

Ennek a koncepciónak az egyik legegyszerűbb implementációja az emitterkövető soros tápegység:



7. ábra - Emitterkövető soros tápegység

Ebben az áramkörben a változó ellenállást az emitterkövető kapcsolásban használt tranzisztor valósítja meg.

Ebben az áramkörben a terhelésen a tranzisztor bázis-emitter feszültségével csökkentett Zener-feszültség fog megjelenni.

Egy ilyen kapcsoláshoz a megfelelő tranzisztor kiválasztása sem bonyolult. Ha ismerjük a terhelésnek szükséges maximális áramot, ki tudjuk számolni a szükséges bázisáramot. Ehhez a terhelés áramát el kell osztani a tranzisztor áramerősítésével (h_{FE} néven lehet megtalálni a tranzisztor adatlapjában). Tehát:

$$I_b = \frac{I_{terhelés}}{h_{FE}}$$

A következő lépés annak az ellenállásnak a megválasztása, ami a Zeneren folyó áramot és a tranzisztor bázisáramát is beállítja. Ennek a kiszámításának a módja:

$$R = \frac{U_{be} - U_z}{I_z + K \cdot I_b}$$

Ahol U_{be} a bemenő feszültség, U_z a Zener feszültsége, I_z a Zener árama, I_b a tranzisztor bázisárama, K pedig egy olyan szám, ami biztosítja, hogy legyen tartalék a rendszerben, jelen esetben válasszuk az értékét 1.5-nek.

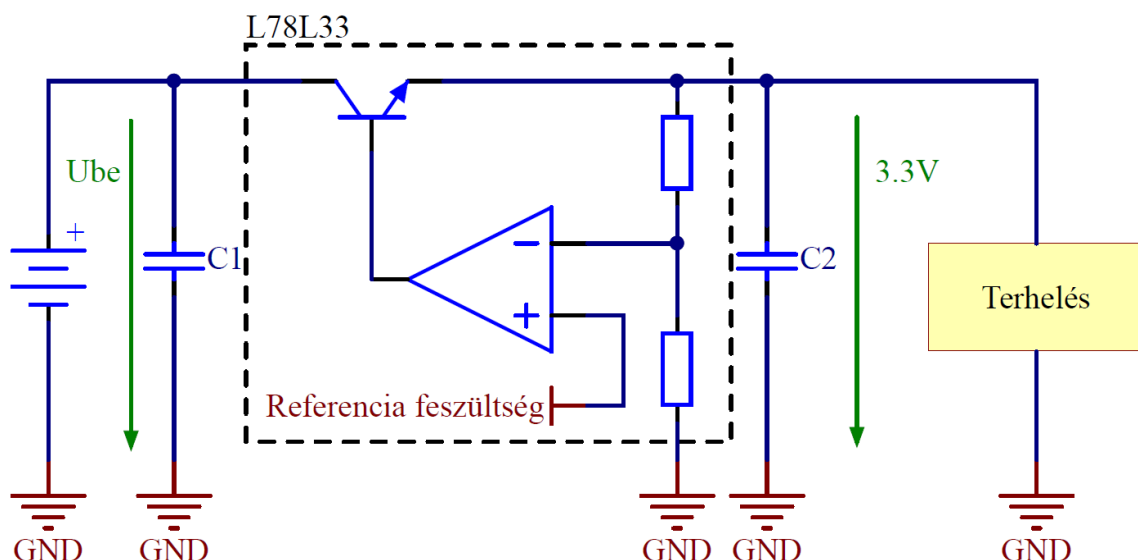
A terhelésen a Zener feszültsége a tranzisztor nyitófeszültségével csökkentve jelenik meg.

Ezek a soros tápegységek az előzőekben tárgyalt megoldásokhoz képest jelentősen jobb hatásfokkal rendelkeznek, ha a bemenő és a kimenő feszültség különbsége nem sokkal nagyobb, mint a tranzisztor nyitófeszültsége.

Legtöbbször nem diszkrét elemekből építjük fel a tápegységünket, hanem valamilyen egyetlen alkatrészbe integrált gyári megoldást választunk.

MEGVALÓSÍTÁS INTEGRÁLT ELEMKBŐL

Általános célokra az egyik legkézenfekvőbb választás a 78xx család valamelyik tagja. Ezekről már korábbi tananyagrészekben is esett szó. Például a fix kimenettel rendelkező L78L33 két kondenzátoron kívül semmilyen más külső komponens nem igényel a kimenő 3.3V előállításához. Ezen áramkörök sematikus belső felépítése látható a következő ábrán:



8. ábra - Tápegység megvalósítása integrált elemekből

A szaggatott vonalon belüli rész mutatja az IC belsejét. A háromszög egy műveleti erősítő, aminek a részletes bemutatása, most nem fér bele, elég ha annyit tudunk róla, hogy úgy állítja a kimenetét ha nincs visszacsatolás, hogy a kimeneti feszültség $V_{ki} = A \cdot ((V_+) - (V_-))$ legyen, ahol A a nyílthurkú erősítés (tipikus értéke 1000). Ezek alapján az L78L33-ban komparátorként működik, mert az IC kimenő feszültségét (egy ellenállás osztóval leosztva) hasonlítja egy referencia feszültséghez. Ez a komparátor vezérli a változtatható ellenállásként funkcionáló tranzisztort.

Az LDO REGULÁTOROK

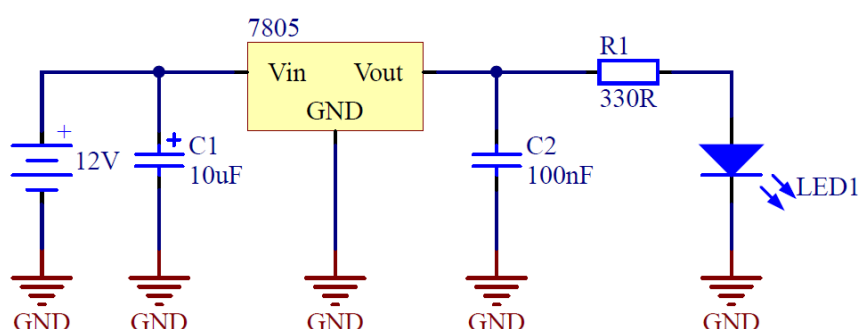
Tipikus esetben a 78xx családnak szüksége van legalább 1.5V-ra a kimenő és a bemenő feszültség között. Mit tehetünk, akkor ha 3.3V-al szeretnénk táplálni egy áramkört, de a bemenő feszültségünk mondjuk 5.0V és 3.5V között változhat? Ilyenkor a L78L33 már nem fog tudni 3.3V-t előállítani áramkörünk számára.

Erre a problémára jelentenek megoldást a Low Dropout Voltage (alacsony maradékfeszültségű) stabilizátorok röviden LDO-k. Az LDO-k olyan soros tápegységek, amik képesek akár 100mV bemenő kimenő feszültség különbség mellett is szabályozott kimenetet biztosítani.

Az LDO-k mind felépítésben, mind használatban azonosak a közös soros tápegységekkel. A különbség abból adódik, hogy a bipoláris tranzisztort használó kapcsolás helyett, a kimeneten FET található. Ennek köszönhetően kisebb lesz a feszültségesés és nincs szükség akkora feszültségkülönbségre a bemenet és a kimenet között. Ezek a tápegységek valamivel drágábbak, mint a nagyobb maradékfeszültséggel rendelkező társaik, ezért akkor érdemes őket használni, ha tényleg szükség van az általuk nyújtott előnyökre.

Feladat A:

Építs meg az alábbi példakapcsolást! Mérd meg a kimeneti feszültséget, majd csatlakoztass a kimeneti 5V és a föld közé egy LED-et egy 330Ω-os ellenállással sorosan! Nézzük meg mennyit változott a kimeneti feszültség! Azt fogjuk tapasztalni, hogy a kimeneti feszültség 5V-+0,2V-on belül fog maradni.



9. ábra - A megvalósítandó kapcsolás

ÁRAMKORLÁT ÉS ÁRAMGENERÁTOR

Az áramkorlát és az áramgenerátor működése nagyon hasonló, mindkét esetben olyan áramkorról van szó, mely korlátozza egy fix értéken az áramot.

Különböző felhasználási területeken más-más cél lebeg a felhasználó szeme előtt, innen ered a kétféle elnevezés. Az áramkorlát üzemszerűen egy feszültséggenerátor túlterhelése ellen véd, míg az áramgenerátor megnevezés fix áramot igénylő fogyasztó esetén használatos. (Például LED meghajtása ideális így.)

Kitekintés

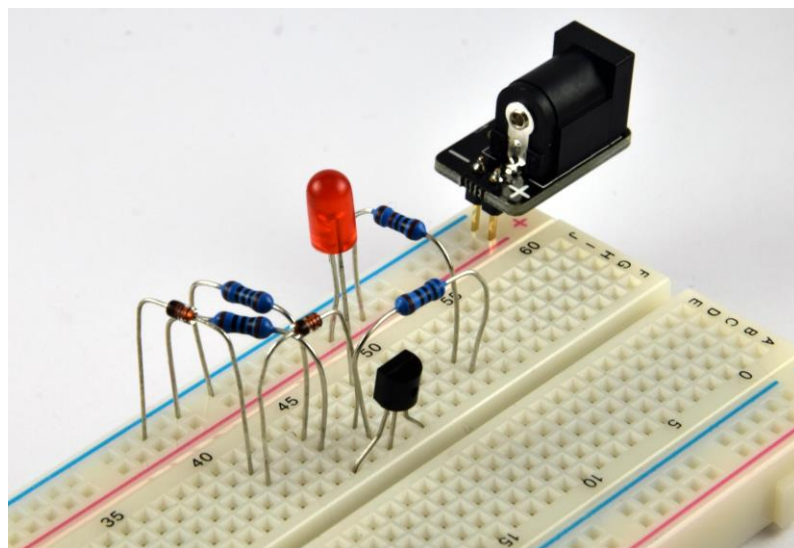
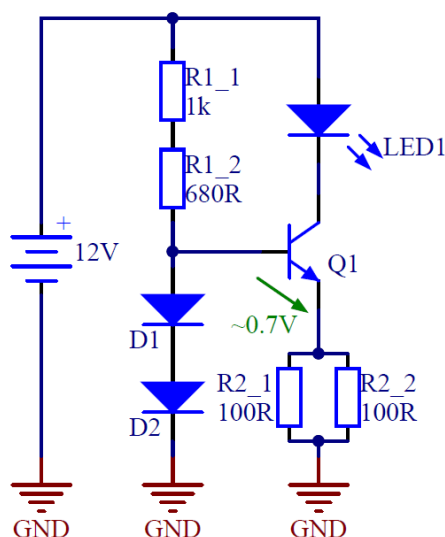
Ha a fogyasztónk áramfelvétele jelentősen megnövekszik, az általában hibára utal, és mind a fogyasztót, mind akár a tápegységet is maradandóan károsíthatja. Ezért ez ellen a legtöbb esetben szeretnénk védekezni. A legegyszerűbb módja áramkörünk megvédésének az olvadóbiztosító. Ez a megoldás olyan esetben alkalmazható, amikor a hibajelenség előfordulásának valószínűsége alacsony. Ha mégis bekövetkezik a hiba, akkor kénytelenek vagyunk egy alkatrészt kicserélni. (Van még egy ennél is jelentősebb problémája az olvadóbiztosítónak: a sebessége. Az érzékeny digitális áramkörök könnyen tönkremennek az alatt az idő alatt, mire a biztosító kiolvad.)

A fenti a problémákra jelent megoldást az elektronikus áramkorlát.

Feladat B:

LED meghajtása áramgenerátorral

Az lenti ábrán látható kapcsolás az egyike a legegyszerűbb áramgenerátoros LED meghajtóknak, ezt fogjuk most megépíteni:



10. ábra - LED meghajtása áramgenerátorral

Ez a kapcsolás alkalmas arra, hogy akár nagyobb teljesítményű LED-eket is kiszolgáljunk vele, de mi most kisebb áramú LED-vel fogjuk ezt megépíteni. A kapcsoláshoz egy darab npn tranzisztorra, egy LED-re, két diódára, két 100Ω-os, egy 1kΩ-os és egy 680Ω-os ellenállásra van szükségünk.

A két diódát arra használjuk, hogy közel állandó feszültséget (1.4V) biztosítsanak a tranzisztor bázisa és a földpont között. Mivel a bázis emitter feszültségesés (V_{be}) 0.7V, ezért a maradék 0.7V az R_2 ellenálláson fog esni. Ennek köszönhetően a LED árama úgy számolható, hogy:

$$I_{LED} = \frac{0.7 [V]}{R_2}$$

Ha mondjuk van egy LED-ünk, amit 20mA árammal szeretnénk meghajtani, akkor 35Ω-os ellenállást kellene válasszunk R2-nek, de 50Ω-os ellenállást használva is 14mA lesz a LED árama. Ehhez kössünk párhuzamosan két 100Ω-os ellenállást. Az ellenálláson így 0.0098W fog disszipálódni.

Következő lépés az R1 meghatározása. Első lépésben keressük ki az adatlapból a tranzisztor áramerősítését. Ez a BC546B esetében 290, tehát ahhoz hogy 20mA legyen a kollektor áram $20\text{mA}/290 = 0.07\text{mA}$ kell legyen a bázisáram. A diódáknak még további 2mA-re van szükségük ahhoz, hogy pontosan előálljon az elvárt feszültségesés. Tehát R1:

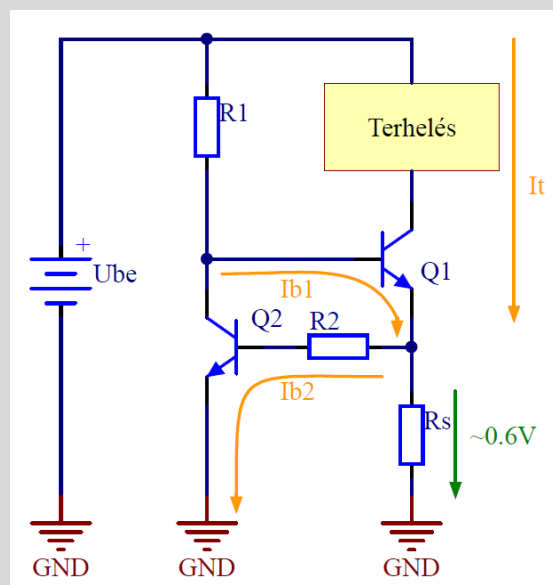
$$R_1 = \frac{V_{cc} - V_{dióda}}{I_b + 2 \text{ [mA]}} = \frac{5 \text{ [V]} - 1.4 \text{ [V]}}{0.07 \text{ [mA]} + 2 \text{ [mA]}} = 1.73 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

Mivel pontosan 1.73kΩ ellenállásunk nincsen, ezért kössünk sorosan egy 1kΩ-os és egy 680Ω-os ellenállást, így kapva 1.68kΩ-ot.

Az A feladatban megépített tápegységről táplálva a LED-et a teljesítmény jelentős részét az ellenálláson disszipáljuk el. Áramgenerátoros meghajtás esetében a tranzisztor egy változtatható értékű ellenállás szerepét látja el, amely úgy változtatja az ellenállását a feszültség függvényében, hogy a rajta átfolyó áram állandó maradjon. Ezt akár ki is próbálhatjuk, és meg is mérhetjük más bemenő feszültségek esetén. Fontos megjegyezni, hogy ilyen esetben jelentős teljesítményt fűtünk el a tranzisztoron. Emiatt tervezéskor figyelembe kell venni a tranzisztor maximális hőleadó képességét (maximal power dissipation) is.

Kitekintés

Az ábrán látható kapcsolás két tranzisztor felhasználásával biztosít, az előző két diódás kapcsoláshoz hasonló működést:



11. ábra - Áramkorlát kapcsolási rajza

A terhelésen csak a megengedett maximális áram folyhat. Az áramkörben az R1 ellenállás bekapcsolja a Q1-el jelölt tranzisztert, ennek köszönhetően áram fog folyni a terhelésen. Amikor az Rs-en átfolyó áram

túllépi a tervezett értéket, akkor a Q2 elkezd bekapcsolódni, ami pedig fokozatosan kikapcsolja a Q1-et, így limitálva az áramot. Az opcionális R2 ellenállás feladata a Q2 bázisáramának korlátozása. Az egyszerűségének köszönhetően ezt az áramkört is lehet nagy fényerejű LED-ek áramgenerátoros meghajtására is használni.

VÉGSZÓ

A tananyagrészt során megismertük a tápegységek működésének alapjait. Az elektronikának ezen kis szegletében is jelentős mennyiségű szakirodalom lelhető fel, így nem meglepő, hogy ez a tananyag rész nem törekszik teljességre, célja az, hogy felkeltse az olvasó érdeklődését.

Az első részben a legegyszerűbb Zener-diódán alapuló áramkörökkel ismerkedhettünk meg. Innen jutunk el a tranzisztoros LDO-kig és az áramgenerátorokig. Nem esik szó a kapcsolóüzemű tápegységekről, amikkel a hatásfok tovább javítható, de ha valakinek szüksége van a hatásfok további javítására, akkor a tananyagban szerzett ismeretekkel, már önállóan is képes lesz a témakör megismerésére.