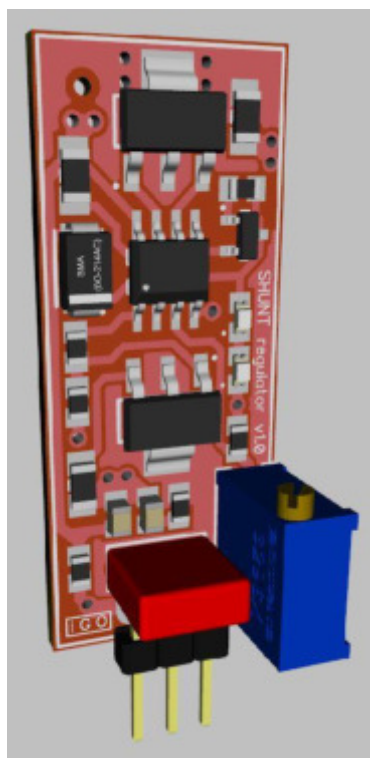


# SÖNT feszültség stabilizátor

$\approx 100\text{mA}$  áramterhelhetőség (3,3-5-12V...)



## Tartalomjegyzék

Motiváció, tulajdonságok .....	2
Összeszerelés, gyakorlati tanácsok .....	2
Működési alapelvek, görbék .....	3
Alkatrészlista .....	4
Kapcsolási rajzok .....	5
Tervezési tippek másoktól .....	6
Szimulált mérések .....	8
Valós mérések .....	9
Képek .....	10
Adatok, irodalomjegyzék, megjegyzés .....	11
Függelék .....	12

### Motiváció, tulajdonságok:

A sönt feszültség stabilizátor előnyei a hagyományos, soros szabályozóval szemben:

- kevésbé érzékeny a bementi feszültség-tranziensekre
- nem veri vissza a töltőáram tranzienseket a tápforráshoz
- hirtelen megszűnő terhelésre nem reagál túllövással
- gyakorlatilag rövidzár védett
- **szubjektív vélemények szerint audió DAC-ok analóg tápjában való alkalmazása előnyös (jobb térlekepezés és mikrodinamika)!**

Hatrányai:

- rosszabb hatásfok (bár ez a teljesítményszint tekintetében elenyésző)
- diszkrét felépítés esetén költségesebb mint az integrált megoldások.
- egyedi méretezést igényel

### Összeszerelés:

Mint általános útmutatás itt is érvényes, hogy mindig a kisebb alkatrészekkel kezdjük és haladjunk a nagyobbak felé.

Első körben érdemes a referencia-feszültség áramkört összerakni és tesztelni [D1, T3, R3, LED1, LED2, J1, stb.]. R3 értékével állítjuk be a diódák áramát (esetünkben  $300R \rightarrow 3,5mA$ ). A D1-en mért feszültségből kiszámolhatjuk a sönt névleges áramához szükséges R2 értékét, illetve a LED-eken eső feszültségből a szükséges feszültségosztó értékeket [R4-R5]. Mérjük meg a diódaáramot, értéke kb. 5-10mA között kell legyen.

A tényleges finombeállítás végett R5 helyére trimmer-potit tegyünk, később esetleg helyettesíthető fix ellenállással (a potit nagy mérete miatt csak a végén ültessük be).

Forrasszuk be a műveleti erősítőt és T1 tranzisztort. Ha R2 is a helyén van, mérjük meg a ténylegesen leadott (névleges) áramot, hogy megfelel-e az elképzeléseinknek (kb. 65mA).

Végül ültessük be T2 tranzisztort a környező ellenállásokkal [R6-R7-R8], illetve a be- és kimenő szűrőtagokat is. Teszteljük a kimenő feszültséget, szükség esetén állítsunk utána.

Vizsgáljuk meg hogy több bekapcsolási szituáció esetén és eltérő környezetekben is stabil marad-e szabályozónk!

Ellenőrizzük (még az előzetes számítás alkalmával) hogy termikusan nem terhelődnek-e túl a kiválasztott alkatrészek! Normál működés esetén (terheléstől függően) az alkatrészek langyosak / enyhén melegek lehetnek. Ha kézzel már nem bírjuk megfogni, vagy égett szagot érzünk, biztos hogy valami nem rendeltetés szerűen működik (pl. gerjed)!

### Gyakorlati tanácsok:

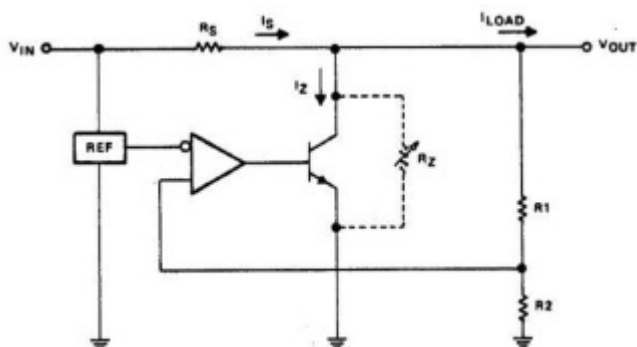
A műveleti erősítő feszültségszabályozó része (B) hajlamos a gerjedésre, ezért a kimeneti puffer kondenzátor [C3] minimális értéke kb. 100nF kell legyen a stabil működéshez! Túlzottan nagy érték azonban kerülendő ( $\leq 10\mu F$ ).

A "snubber" [R9-C2] tag méretezése is fontos. Szimuláció alapján a  $4,7R - 0,22\mu F$  vagy  $1,0R - 1\mu F$  ( $F_c \approx 155kHz$ ) megfelelő párosítás lehet.

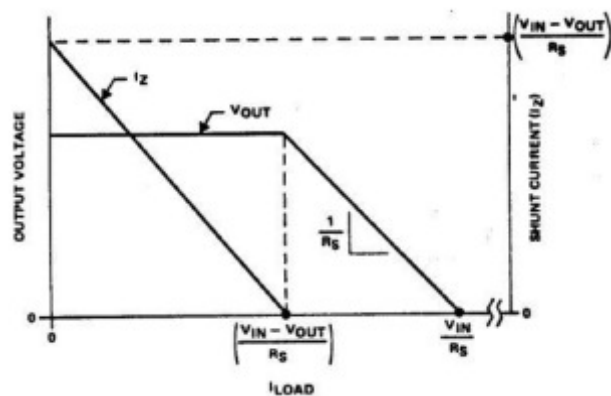
Célszerű a szabályozót minél közelebb helyezni az ellátott alkatrész(ek)hez!

**Oscilloszkóppal történő vizsgálat mindenképp javasolt!**

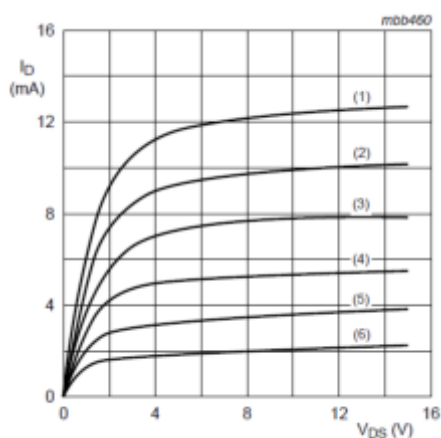
## Működési alapelemek, görbék:



A sönt-szabályozó sematikus felépítése



működési jelleggörbe

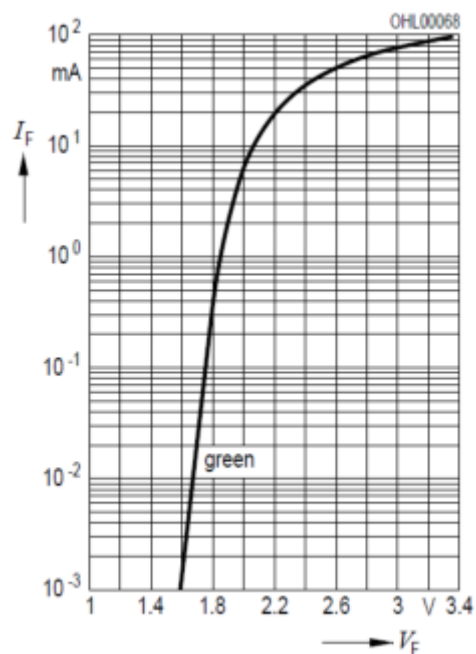


BF545B

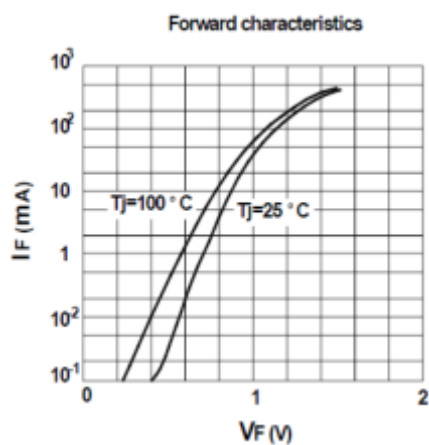
$T_J = 25^\circ\text{C}$ .

- (1)  $V_{GS} = 0\text{ V}$ .
- (2)  $V_{GS} = -0.5\text{ V}$ .
- (3)  $V_{GS} = -1.0\text{ V}$ .
- (4)  $V_{GS} = -1.5\text{ V}$ .
- (5)  $V_{GS} = -2.0\text{ V}$ .
- (6)  $V_{GS} = -2.5\text{ V}$ .

Az n-jFET áramgenerátor görbéi



Zöld LED karakterisztika



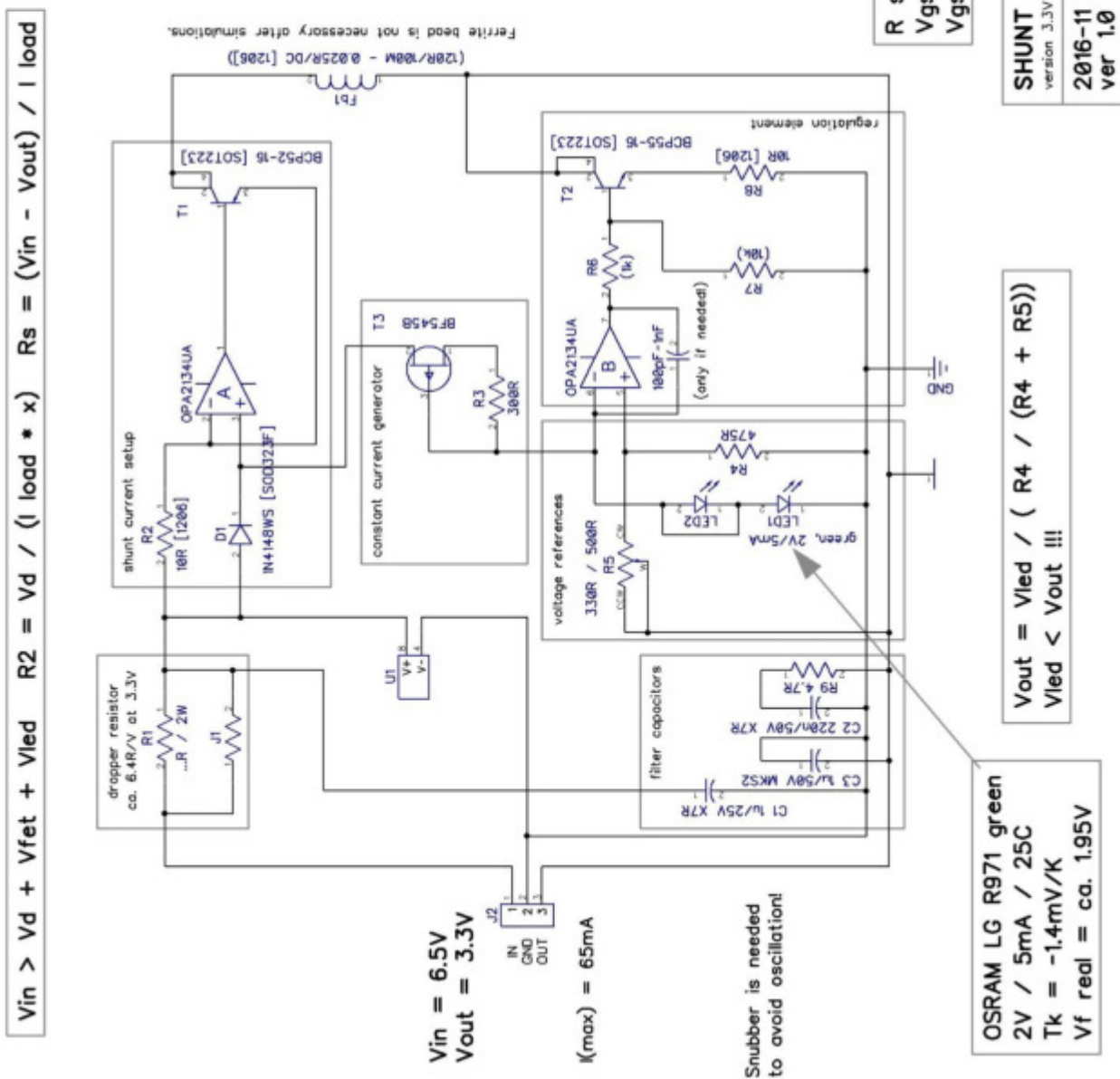
1N4148WS dióda jelleggörbéi

# SHUNT regulator

## Alkatrészlista:

SÖNT stabilizátor (5,0V / 50mA)									
		BÜRKLIN		Darabár (NYÁK-kal, szerelés nélkül) kb. <b>10 €</b>					
		REICHELT							
Á.k. jel	Megnevezés	Rendelési szám	Paraméterek	Gyártó	Euro	M.1	Összeg	M.2	Összeg
<b>Kondenzátorok, ferrit</b>									
C9	Kondenzátor	53 D 2370	100nF 50V X7R 0805	KEMET	0,05	1	0,05		0,00
C2	Kondenzátor	53 D 2422	1uF 25V X7R 0805	KEMET	0,08	1	0,08		0,00
C3	Kondenzátor	42 D 2850	1uF 50V MKS2 2# 10% szél.: 3,5mm	WIMA	0,42	1	0,42		0,00
Fb1	Induktivitás	eBay	120R/100MHz, Rs=0,025R, 3000mA, 120€ MUTARA		0,27	1	0,27		0,00
<b>Ellenállások, trimmer</b>									
	Ellenállás	33 E 100	0R 1206 0,25W		0,06	0	0,00		0,00
	Ellenállás	10 E 950	0R 0805 0,125W		0,04	0	0,00		0,00
R9	Ellenállás	12 E 100	1R0 0805 0,25W HighPower	Phycomp	0,08	1	0,08		0,00
R2, R8	Ellenállás	33 E 512	10R 1206 0,5W HighPower	Phycomp	0,09	2	0,18		0,00
R3	Ellenállás	11 E 168	300R 0805 0,125W	Phycomp	0,05	1	0,05		0,00
R4	Ellenállás	11 E 231	475R 0805 0,125W	Phycomp	0,05	1	0,05		0,00
R6	Ellenállás	11 E 194	1k 0805 0,125W	Phycomp	0,05	1	0,05		0,00
R7	Ellenállás	11 E 242	10k 0805 0,125W	Phycomp	0,05	1	0,05		0,00
R5	Trimmer	76 E 2710	500R, 0,5W, álló, 3296X	Bourns	1,09	1	1,09		0,00
<b>Aktiv elemek</b>									
T3	Tranzisztor	BF 545B SMD	BF545B jFET (SOT23)		0,31		0,00	1	0,31
T1	Tranzisztor	BCP 52-16 SMD	BCP52-16 (SOT223)	NXP	0,14		0,00	1	0,14
T2	Tranzisztor	BCP 55-16 SMD	BCP55-16 (SOT223)	NXP	0,15		0,00	1	0,15
D1	Dióda	1N 4148 WS	0,15A, 0,75V (SOD323F)		0,04		0,00	1	0,04
U1	OPA	41 S 8349	2134UA (SOIC-8)	TI	2,58	1	2,58		0,00
LED1-2	LED	LG R971	SMD2012 (0805), 20mA, zöld (1,9V)	OSRAM	0,06		0,00	2	0,12
<b>Egyéb (csatlakozók, stb.)</b>									
-	Tüskesáv		3 x 1 pól. (2,54mm)		0,15		0,00		0,00
-	Tüskesáv		3 x 1 pól. (2,54mm) 90 fokos		0,28	1	0,28		0,00
<b>Postaköltség</b>									
Árak mennyiségi kedvezménnyel (legkisebb rendelési egységre figyelni)! [€]							<b>5,23</b>	<b>0,76</b>	
NYÁK gyártatás: <a href="http://www.pcbway.com/">http://www.pcbway.com/</a>				45\$/ 50db (postával)			Dátum: 27.10.2016		

## Kapcsolási rajz



### Tervezési tippek „tothbela“-tól (Hobbielektronika fórum):

*(utólagos engedelmével, ez úton is köszönet neki!)*

A felső tranzisztor a felső műveleti erősítővel egy áramgenerátort alkot. Ha egy egyszerű zéner + ellenállás söntszabályzóhoz hasonlítjuk, akkor az az ellenállás, az alsó meg a zéner. Persze csak funkcióját tekintve, mert jóval stabilabb.

Egyébként van létjogosultsága a söntstabilizátornak. Nagy előnye, hogy hirtelen megszűnő terhelésre nem reagál túllövésessel, mint az áteresztő stabilizátorok. Talán épp ezért szeretik DAC áramkörökben, mert ott viszonylag kicsi az áramfelvétel, de fontos a rövidtávú stabilitás.

A bemenő tápfesz átfolyik a D1 diódán, tovább a fetes áramgenerátoron, le a két soros L1-L2 LED-ig. A második LED katódja a GND-n van. Az alsó műveleti erősítő a hozzá tartozó tranzisztorral meg a körítésként szolgáló ellenállásokkal, a két LED nyitófeszültségét referenciának használva egy zénerdiódát utánoz, ami a visszacsatolt műveleti erősítőnek, meg a viszonylag stabil FET-es áramgenerátornak köszönhetően szilárdan tartja a kimeneti feszültséget. Tulajdonképpen ez a söntszabályzó. A felső tranzisztor a műveleti erősítővel meg a körítéseivel a D1 dióda nyitófeszültségét referenciának használva, áramgenerátort alkot. Ez az áram folyik át a stabil kapocsfeszültségű söntszabályzón, létrehozva a kimeneti feszültséget. Figyelni kell a jFET tresshold (vagy kicsípési) feszültségére, mert ez az egyetlen olyan alkatrész, aminek hatalmas szórása van. A FET G-S közötti ellenállását úgy kell megválasztani, hogy megfelelő áramértéket kapjunk. Szélsőséges esetben eldurranhat a FET is.

*Jó lenne előbb egy tesztkapcsolásban meghatározni annak az ellenállásnak az értékét, vagy az eredeti tizszeresét tenni be először, aztán a mérés során módosítani. Szeretem a jFET-eket, de az egy külön állatfaj, nem teszi igába a fejét azonnal.*

A jFET-en folyó áram 1-5 mA lehet. Kezdem az alsó résszel, vagyis a söntszabályzóval. Az R6-R7 feszültségosztó miatt a kimeneti feszültség nagyobb, mint a két LED együttes nyitófeszültsége. Fehér LED-nél darabonként 3 V körüli, kéknél is hasonló, pirosnál 1,6V körül ez a feszültség. Kék LED-et választva csak egy darabot tehetünk bele. Mivel 3,3V a cél, akkor vagy két piros sorosan, vagy egy kék, ahogy szimpatikus. De akár a D1 helyére is tehetünk LED-et, ha ez optikailag jobban tetszene. Ha ez megvan, jöhet a FET. Mivel nem igazán nagy a választék P csatornás jFET-ekből, mehet bele N csatornás is. Persze ekkor megcserélődik a polaritás. Itt a Hestore árul BF545-öt. Ebből a B jelzésű lehet a nyerő, de mint írtam elég nagy a szórás, így ha nem gond, kellene belőle egy pár minta, mert lehet hogy kilóg az optimális értékből. Ha megvan a FET meg a LED-ek, be lehet ültetni a nyákra, de csak ezeket. R5 helyére kezdetnek 2-10 kOhmot. Valószínűleg változtatni kell az értékén, de ha rámérünk hogy mekkora rajta a feszültség (R5), akkor abból következtetni lehet a fet CUT-OFF feszültségére. Kis matek után betehető a végleges érték. Utána meg kell mérni, mekkora feszültség esik a LED-eken. Ebből kiszámolható az R4-R5 osztó értéke. Következhet a söntszabályzó áramának kiszámolása. Meg kell határozni, vagy mérni, hogy a mekkora áramot kell szolgáltatni ennek a kis panelnak. Ha megvan, akkor ezt 1,2-1,5-el megszorozva meghatározhatod az áramgenerátor áramát. Figyelni kell, hogy mekkora a bemenő tápfeszültség, mert nem szabad hogy a két teljesítmény-tranzisztor túldisszipáljon. Ha szükséges, be kell ültetni a tápfeszültség csökkentő ellenállást (R1). Az áram beállításához tudni kell, hogy mi a D1. Ha sima SI dióda, akkor 0,6-0,8V, ha LED, akkor az annak megfelelően 1,6-3V körüli feszültségből kell kiszámolni az R2 értékét egyszerű Ohm törvénnyel. Minden alkatrész meghatározása után ellenőrizni kell, nem terhelődik túl valamelyik közülük.

Az R1 csak akkor kell, ha már akkora a bemenő tápfesz, hogy a felső tranzisztor túldisszipálhat. Nem biztos hogy kell bele. Hasonló a szerepe az R8-nak is, leveszi a felesleges terhet a tranzisztorról. A félvezetőket illik 100-150 fok alatt tartani, de az ellenállások jóval robosztusabbak. Azonkívül ha elégne az R1, megszűnik a kimenő fesz. Ellenben a felső tranzisztor zárlatba is kerülhet ha tönkremegy, és akkor az egész tápfesz rámehet a kimenetre. Akkor meg elszáll a táplált drága IC. Ezért is kell nagyon figyelni a határadatokra, mert ebben a kapcsolásban nincs hőmegfűtés elleni védelem. Nem csak a tranzisztor melegíti önmagát, hanem egy egy sűrűn beültetett zsúfolt nyákon a szomszédos elemek is. Tipikus példa a PC táp. Az 5 V-os készenléti táp szűrőkondija mellett szorosan nekifeszülve ott vannak egyéb melegedő ellenállások, és persze készenléti üzemből nem megy a venti. Szívбай nélkül szolgáltat 20 ampereket, aztán beledöglik 200 mA készenléti áramfelvételbe. Ez csak egy véletlen volt, csak egy rossz példát akartam mutatni.

Akkor az a 100mA a biztonsági tartalékkal legyen 120, és ennek függvényében az R2 5,6-6,2 Ohm között legyen, ha D1 sima SI dióda. Igaz, hogy a BCP tranzisztor 1,5W-ot disszipálhat el, de ajánlatos csak a felével terhelni. Ezért max 6,25V eshet rajta. Így a bemenő fesz 9,6V-ra adódik. a DRP ellenállás pedig 8,2 Ohm per V.

Az Rx (*nincs a rajzon*) mivel áthidalja a FET-et, a LED-ek áramát, és ezzel a kimenő feszültség pontosságát módosítja a bemenő feszültség függvényében. Saját elképzelésem szerint el is hagynám, de lehet, hogy stabilitást fokozó szerepe van alacsony bemenő feszültségnél. Ezért az értéke 10kOhm feletti legyen.

Kicsit utánaolvastam a témának, és két dolog derült ki. A referenciaforrás zöld színű LED, mert állítólag ennek a legjobb a stabilitása. A másik, hogy 10 mA-en kell üzemeltetni ezt a ledet, mert ezen az áramon mindössze 0,2nV/√Hz a zaja. De mivel ezen az áramon 1,8V-2V, csak egy darab mehet 3,3V kimenőhöz. Két soros lednél csak 3,6-4V felettire lehet csak a kimenetet beállítani. Az R4, R5 értékei első körben jók, a bemérés során kell a kettő közül az egyiken változtatni +/- 10% körül. MMBFJ112 lehet még a JFET, de ez itthon nem biztos hogy van.

A TINA demóban (mert én CM2000-et használok) nem találtam olyan műveleti erősítő modellt, ami a + táp közelemben tud dolgozni. Itt ugyanis párszáz millivoltra van mind a két bemenete, meg a kimenete is a táptól. CM2000-ben leszimuláltam azt a kritikus részt. Konkrétan csak az egyenirányító utáni részt. Nálam jól működik. Az R4 az 220 Ohm, így 5 mA-es fet árammal, egy darab zöld LED-del 3,36V a kimenő. Ha nem az eredeti műveleti erősítő van benne, gerjed erősen. Ha nincs benne az alkatrészlistájában a TINA-nak, nagyon nehéz lesz leszimulálni. Az a baj, hogy nálam sem szerepelnek ezek az új alkatrészek az adatbázisban. Néha magamnak kell kreálni egy árva FET-et is.

A D1 nyitófeszültségét hasonlítja össze a műveleti az R2-n eső feszültséggel, és úgy szabályozza a T1-t, hogy ezen az R2-n mindig ugyanakkora feszültség legyen, mint a D1 diódán. Mivel a T1 sorosan kapcsolódik az R2-vel, így stabilizálja ezt az áramot az műveleti erősítő. Persze ennek a diódának a nyitófeszének ekkora áramnál 0,6-0,8V között kellene lenni. Válasszuk például az általánosan használt 1N4148-at.

A nagyobb kimeneti feszültséghez az R5 növelése a kulcs.  $U_{OUT} = [(R4 + R5) / R4] * U_{LED}$ . Tehát ha R4 330 Ohm, az R5 170 ohm, akkor az  $U_{OUT}$  az 1,515 x LED nyitó. Tehát 1,8V LED nyitónál kerekén 3V. De ha az R5 értékét már módosítottuk, akkor a másik limitáló dolog, hogy a bemeneti tápfeszültségneknek nagyobbnak kel lenni, mint a LED, a D1, és a FET G-S threshold feszültsége. De ez 6V felett már elméletileg megvan.

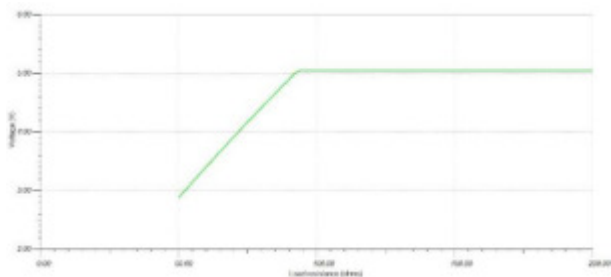
A végleges áramkör finom trimmelésére egy ötlet. A számított érték alatti szabvány ellenállásérték beültetése, majd egy célszerszámmal lekoptatni valamennyit a vezető rétegből. Lehet gyakorolni egy próbapanelen ha valaki nem csinált még ilyet. Nálam egy pici villanymotor tengelye van felérdesítve hosszirányban. Végül is pici gravírozó. Ezzel az SMD ellenállások oldalról kissé koptathatóak. Ezzel növelni lehet az értéküket (nem pénzbeli), majd a végén mehet rá egy pici lakk, vagy festék a seb elfedésére. Jobb mint a trimmerpoti, mert ez nem mászik el többé.

Egy stabilizátor paraméterei felhasználásfüggőek. Méréstechnikában egyértelműen a hosszú idejű stabilitás, meg a kimeneti feszültség pontossága a fontos. Audiótechnikában inkább a kimeneti fesz minél kisebb zaja, valamint a hangfrekvenciás tartományon belüli minél kisebb ingadozás a fontos. Ha nyáron 5 százalékkal magabb lesz a kimenő feszültség, akkor ennyivel nagyobb lesz a DAC kimenő jele is. De ezt senki sem fogja kihallani. Viszont egy integrált stabilizátor kimeneti zaja oly mértékben modulálhatja a kimenő hangfrekis jelet, hogy erre érzékenyebb fülű embert idegbajba lehet vele kergetni.

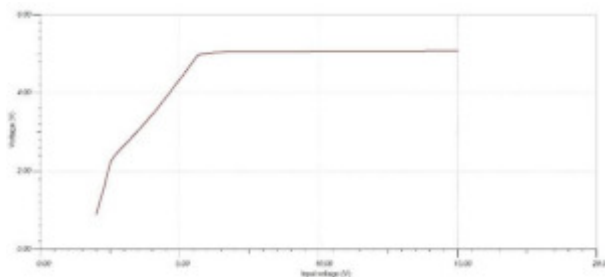
A sőtön kb 1-1,5W fog eldisszipálódni, ami a nyák méretéből adódóan 50-60 fokot jelent. De helyesebb lenne azt mondani, hogy 25-30 fokkal lesz magasabb, mint a környezeti hőmérséklet. Tehát ha az alaplap eleve 50 fokos, akkor a sönt 75-80 lesz. Ha áll a levegő a dobozban, akkor akár feljebb is mehet, míg jól szellőző helyen még a 40 fokot is alig éri el.



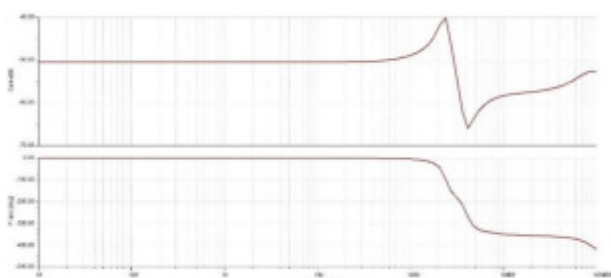
## Szimulált mérések (TINA 9-TI)



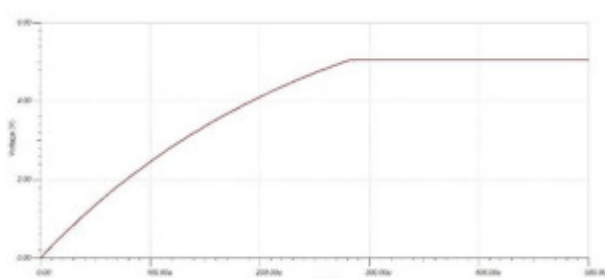
max. terhelhetőség meghatározása  
 $U_{ki} - R_{terh}$



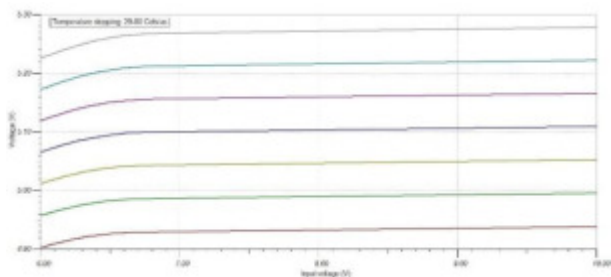
szabályozási jelleggörbe  
 $U_{ki} - U_{be}$



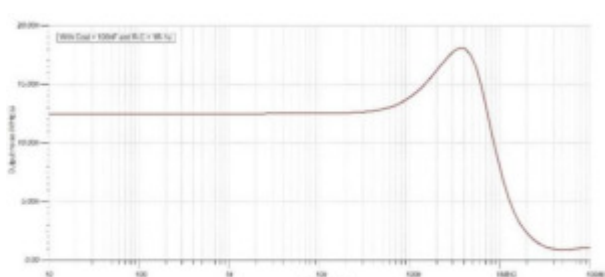
szabályozás átviteli függvénye (erősítés, fázis)  
 $A_{[dB, \phi]} - f_{[Hz]}$



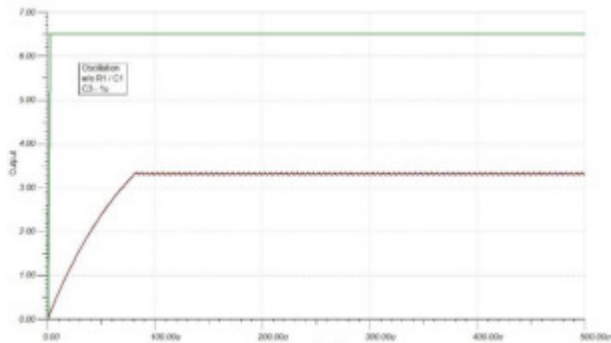
bekapcsolási tranziens  
 $U_{ki} - t_{[\mu s]} (U_{be} = \text{egységugrás})$



szabályozás hőmérsékletfüggése  
 $U_{ki} - T_{körny}$  (esetleg  $U_{ki} - U_{be} - t$  görbesereg)



zajosság (100nF kimeneti kondival)  
 $U_{zaj} - f_{[Hz]}$



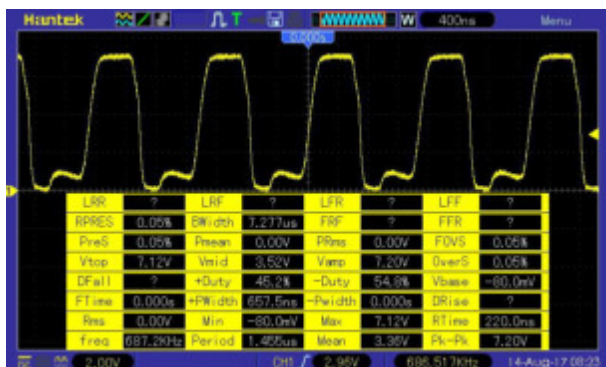
bekapcsolási tranziens  
 $U_{ki} - t_{[\mu s]}$  (példa oszcilláció esetére!)

???

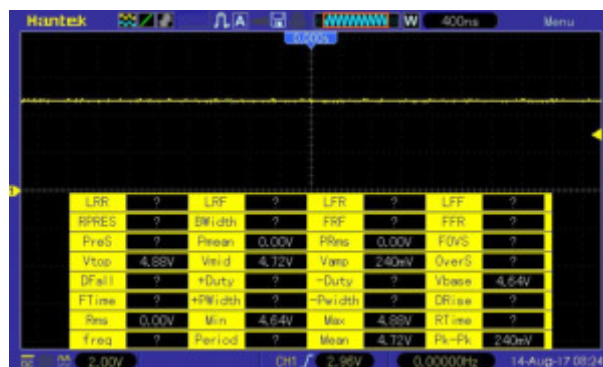
kimeneti impedancia  
 $Z_{ki} - f_{[Hz]}$



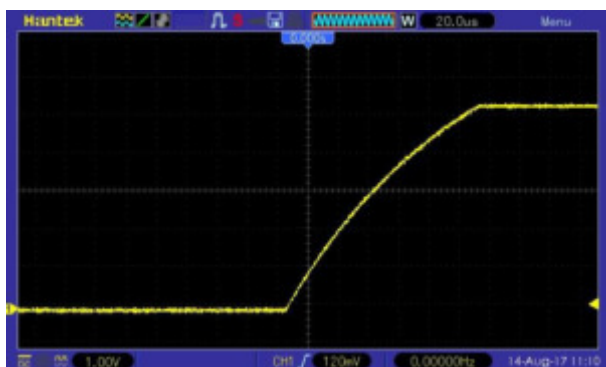
## Valós mérések (DSO5102P)



kimeneti kondenzátor nélküli gerjedés



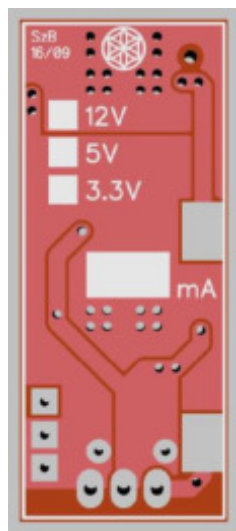
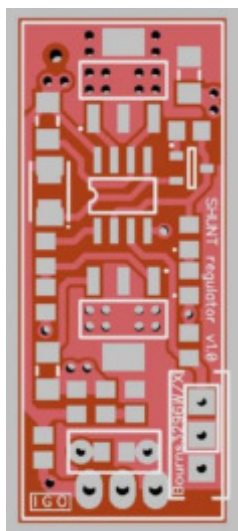
normál üzemmód



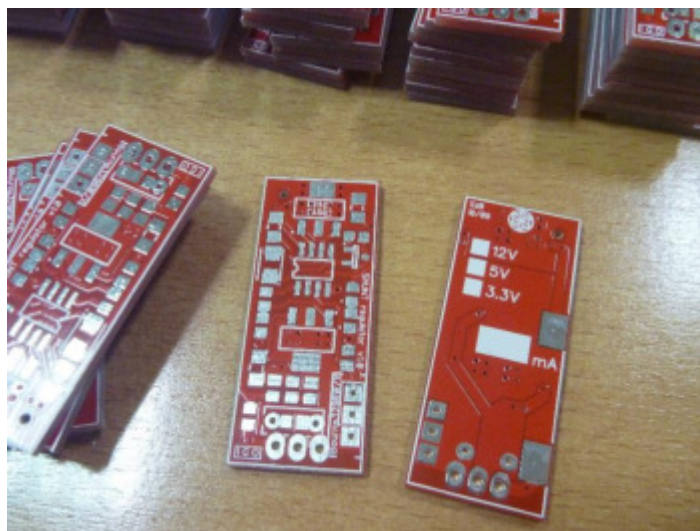
bekapcsolási tranziens ( $U_{be}$  = egységugrás)

$$U_{ki} - t_{\mu s}$$

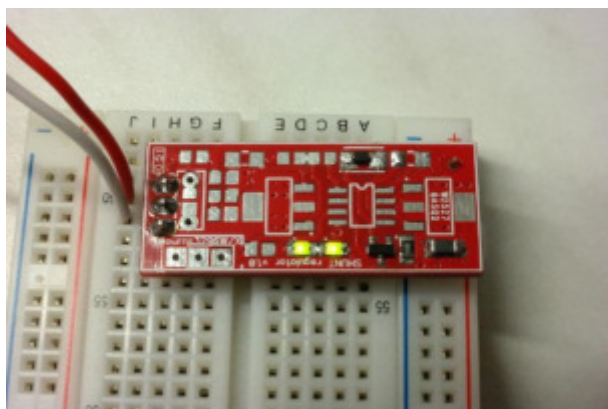
## Képek



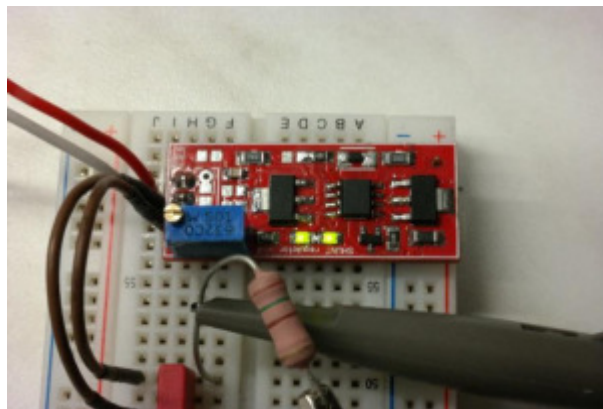
panel látványterv



legyártatott panelek



feszültség-referenciák tesztelése



szűrőtagok tesztelése

### Adatok (5V / 50mA-es verzió):

Ajánlott bemeneti feszültség: 8V

*(kissé megnövelhető, de túlzottan nem ajánlott a kellenél nagyobb disszipáció miatt)*

Névleges áramterhelhetőség: kb. max. 65mA

*(rövidzárlatban tesztelt áramérték)*

Tényleges áramfelvétel: kb. 78mA

*(terheléstől gyakorlatilag függetlenül)*

Feszültségreferenciák áramértéke: 3,4mA (BF545B és 300R esetén)

*(Az érték kissé növelhető a LED-ek terhelhetőségi határáig. Zaj és PSRR optimalizáció javasolt!)*

Tápjajelnyomás: kb. 50-55dB (10Hz-100kHz).

*(Figyelembe véve hogy egy masszív tápegység és elötétszabályozó használata javasolt, az érték a hagyományos soros szabályozók >60db-es értékétől függetlenül jónak tekinthető. Javítható az áramgenerátor még stabilabbá tételével.)*

Zajosság, kimeneti impedancia: 13nV/√Hz (10Hz-100kHz), \_\_mΩ

*(szimulált mérések, precíziós mérőberendezés hiányában)*

A kimenet felépítésénél fogva rövidzár védett!

Panel méretei: 16 x 35mm

Csatlakozó: 3 pólusú (2,54mm furattávolság)

### Irodalomjegyzék:

Hasonló projektek:

<http://www.tentlabs.com/Components/Shuntcomp/index.html>

<http://muzgdiy.wordpress.com/2015/05/17/hot-and-naked-v8-0-discrete-shunt-regulator/>

<http://twistedpearaudio.com/power/trident.aspx>

<http://hifiduino.wordpress.com/2013/02/19/es9018-dac-end-r-fully-assembled-dac/>

[http://www.waltjung.org/PDFs/UnivReg\\_122714.pdf](http://www.waltjung.org/PDFs/UnivReg_122714.pdf)

<http://www.audiodesignguide.com/HiResolution/usbdac2a.html>

<http://www.dddac.com/>

Programok, alkatrészkönyvtárak:

<http://www.diptrace.com>

<http://www.ti.com/tool/tina-ti>

<http://www.3dcontentcentral.com>



*Ezen dokumentum és a benne található összes információ szabadon és tetszőlegesen terjeszthető, felhasználható! (Csak a szabad és korlátlan információáramlás segíthet minket többek között egy élhetőbb világ küszöbére.) Használja mindenki józan belátása szerint, felelősséget mindazon által a szerző semmilyen tartalomra és a felhasználásból eredő esetleges következményekre nem vállal. A változtatás joga fenntartva.*

További információkért az elérhetőségem: [csigabigagyere@gmail.com](mailto:csigabigagyere@gmail.com)



### Függelék:

#### Intersil AN1092 (03.23.1998)

There are various ways to determine appropriate values for  $R_{SNUB}$  and  $C_{SNUB}$ , one of which is presented in [2]. We will describe an alternative method here. First, operate the amplifier as in the intended application and look at its frequency response on a network analyzer. Find the frequency at which the peak occurs, and denote that as  $f_p$ . Next, try loading the amplifier with different load resistances until the peaking reduces to a satisfactory level; this value will be  $R_{SNUB}$ . Finally, we need a capacitor that will make the snubber look resistive at the frequency of the peak. A rough guideline is to make the snubber zero frequency 3 times lower than  $f_p$ , resulting in the following design equation:

$$C_{SNUB} = \frac{3}{2\pi \cdot f_p \cdot R_{SNUB}}$$

Note that as opposed to the series resistor method, the use of a snubber does not degrade the gain accuracy or cause extra distortion when driving a nonlinear load.