

## Nastaviteľný laboratórny normál napätia 0-5,000 V

### Úloha

1. Podľa predloženej schémy zapojenia navrhnete motív plošného spoja.
2. Navrhnutý plošný spoj prekreslite alebo preneste na dosku plošného spoja.
3. Plošný spoj vyleptajte.
4. Osadíte súčiastky.
5. Zariadenie oživíte.

### Úvod

V praktickej časti budete stavať nastaviteľný laboratórny napäťový normál. Zapojenie poskytuje presnú a stabilnú hodnotu napätia, nastaviteľnú v rozsahu 0 až 5,000 V s rozlíšením 1 mV. Druhý výstup normálu je prúdovo posilnený a poskytuje výstupné napätie v rozsahu 0 až 20 V, pri prúde stoviek mA. Tepelná stabilita normálu je lepšia ako 5 ppm/°C, absolútna presnosť typicky 0,02% z rozsahu. Zariadenie nájde uplatnenie ako kalibrátor meracích prístrojov, senzorov, AD/DA prevodníkov, alebo na cvičeniach z elektrotechnického merania v škole.

Organizátori zabezpečili jednostranné dosky plošných spojov potiahnuté fotocitlivou vrstvou o veľkosti 150x200 mm. Presná veľkosť Vášho návrhu plošného spoja nie je daná, z materiálu použijete toľko, koľko potrebujete. Ak ste si priniesli vlastný materiál, môžete ho použiť.

**Na USB kľúči máte pripravené súbory so schémou pre návrhový systém Eagle a dokumentáciu ku použitým súčiastkam.**

**V prípade, že Vám po odovzdaní oživeného výrobku ostane čas, môžete normál v niekoľkých bodoch okalibrovať pomocou 7,5 miestneho multimetra a získať bonusové body.**

### Hodnotenie

Hodnotenie praktickej časti je nasledovné:

- Návrh plošného spoja maximálne 20 bodov
- Kvalita spájkovania maximálne 15 bodov
- Čistota vyhotovenia maximálne 5 bodov
- Funkcia zhotoveného zapojenia maximálne 40 bodov, z toho:
  - Blok referencie 5 bodov
  - Blok Kelvin-Varleyho deliča a vysoko precízneho výstupu 15 bodov
  - Zosilňovač výkonového výstupu 10 bodov
  - Napájacie zdroje 10 bodov
- Bonus za kalibráciu 10 bodov.

Za praktickú časť možno získať maximálne 80 bodov. Bonusové body sa podľa pravidiel súťaže do hodnotenia priamo nezapočítavajú a zohľadnia sa v prípade ak viacerí súťažiaci získajú zhodný počet bodov.

## Popis zapojenia napäťového normálu

Kompletná schéma zapojenia napäťového normálu je priložená na konci dokumentu. Ide o vysoko precízny analógový obvod, preto by ste mali venovať zvýšenú pozornosť návrhu plošného spoja.

Základom normálu je napäťová referencia IC1 typu MAX6250ACSA+ s fixným výstupným napätím 5,000 V. Integrovaný obvod poskytuje napätie s vynikajúcou počiatočnou presnosťou  $\pm 0.02\%$  (t.j. v rozsahu 4,999 V - 5,001 V) a extrémne nízkym tepelným driftom 1 ppm/°C (t.j. 5  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ).

Úžitkovú hodnotu normálu napätia výrazne zvýši možnosť veľkosť výstupného napätia nastavovať. Na tento účel využijeme princíp navrhnutý Lordom Kelvinom už v 19. storočí, tzv. "Kelvin-Varley divider". Ide o sústavu rezistorových deličov, kde sa výstupné napätie nastavuje skokovo pomocou prepínania odbočiek. Závaž prvej sekcie deliča je ďalší rezistorový delič s nastaviteľnými odbočkami, ten je zaťažený nasledujúcim deličom atď. Pri vhodnej voľbe krokov jednotlivých rezistorových deličov je možné výstupné napätie nastavovať pohodlne v dekadických skokoch, napríklad 1 V - 0,1 V - 0,01 V - 0,001 V. Išlo o vôbec prvý číslícovo analógový prevodník v histórii elektrotechniky.

V deliči sú použité SMD rezistory rovnakej hodnoty 1,8 k $\Omega$ , s toleranciou 0,1% (t.j.  $\pm 1,8 \Omega$ ) a nízkym tepelným koeficientom 25 ppm/°C. Delič by mal preto poskytnúť maximálnu chybu nastavenia výstupného napätia na úrovni 1 mV aj bez špeciálneho triedenia rezistorov, dôležité je len aby mali všetky rezistory rovnaký odpor. **Na absolútnu presnosť rezistorov je najcitlivejší prvý stupeň, ak budete mať pri osadzovaní čas, požiadajte organizátorov o presný multimeter a rezistory R2..R7 do prvej sekcie si cielene vyberte.** Ak si vytriedite aj rezistory R8..R22 do druhej sekcie, výstupné napätie by dokonca malo mať absolútnu chybu nižšiu ako 100  $\mu\text{V}$ . Výrazne tým zvýšite presnosť a hodnotu Vášho prístroja. To isté platí aj o R55..R58.

Výstupné napätie sa nastavuje prepínaním odbočiek jednotlivých sekcií deliča. Prepínať treba naraz dve odbočky, preto by sme v ideálnom prípade potrebovali prepínače s dvoma sekciami, každá s 10 polohami. Takéto prepínače sú ale pre účely súťaže ZENIT príliš nákladné. Preto sme ich nahradili dvojicami 10-pólových DIP prepínačov. Výstupné napätie sa nastavuje prepnutím oboch spínačov z dvojice do polohy ON. Polohy spínačov sú označené v schéme, pre jednoduchosť ovládania doporučujeme hodnoty označiť aj na plošnom spoji.

Príklad ovládania - chceme nastaviť výstupné napätie na 4,096 V:

- spínače S1+S2 musia byť zapnuté v polohe 5
- spínače S3+S4 musia byť zapnuté v polohe 1
- spínače S5+S6 musia byť zapnuté v polohe 10
- spínače S7+S8 musia byť zapnuté v polohe 7

Delič správne funguje len ak nie je výstup zaťažený. Z tohoto dôvodu je výstup poslednej sekcie pripojený na precízny operačný zosilňovač IC6 typu OPA177F s vysokým vstupným odporom a veľmi nízkym napäťovým offsetom (typ. 10  $\mu\text{V}$ ). Výstup IC6 je zároveň hlavným výstupom napäťového normálu. Hlavný výstup poskytuje regulovateľné napätie v rozsahu 0,000 V až 5,000 V a dá sa zaťažiť prúdom do 10 mA.

Normál je vybavený aj druhým, pomocným výstupom cez IC5, ktorý je posilnený tranzistormi Q1 a Q2. Tento výstup umožňuje výstupné napätie normálu zosilniť. IC5 je bežné neinvertné zapojenie operačného zosilňovača. Aby sme udržali presnosť zosilnenia, pre spätnoväzobnú sieť použijeme rovnaké rezistory ako v deliči. V schéme sú pripravené tri voľné pozície R56-R57-R58. Podľa počtu osadených rezistorov bude výstupný rozsah nasledovný:

- R56-R57-R58 skrat: výstupný rozsah 0-5V, krok 1 mV
- R56 osadený, R57-R58 skrat: výstupný rozsah 0-10V, krok 2 mV
- R56-R57 osadený, R58 skrat: výstupný rozsah 0-15V, krok 3 mV
- R56-R57-R58: výstupný rozsah 0-20V, krok 4 mV

Druhý výstup poskytuje prúd až niekoľko stoviek mA, hornú hranicu určuje kvalita a chladenie použitých tranzistorov. Možnosti rozšírenia tohoto výstupu na vyššie napätia, alebo prúdy sú takmer neobmedzené.

## Poznámky k návrhu plošného spoja

Ako už bolo spomenuté, navrhujete precízny analógový obvod. Schéma sa môže zdať jednoduchá, ale ako sa vraví, diabol sa skrýva v detailoch.

Pre správnu funkciu zariadenia je dôležité, aby bola teplota celej dosky s referenciou, deličmi aj výstupnými zosilňovačmi rovnaká a nemenná. Doporučujeme preto starostlivo zvážiť ako budú na doske rozložené stabilizátory a výstupné tranzistory, ktoré produkujú množstvo tepla.

Ohmov zákon platí aj na súťaži ZENIT, preto je pre dosiahnutie maximálnej presnosti nutné uvažovať aj s odporom vodivých ciest na plošnom spoji. Prúdy tečúce medzi referenciou, rezistorovým deličom a výstupnými zosilňovačmi dosahujú desiatky mA. Úbytky napätia na zle navrhnutom plošnom spoji môžu pohybk dosiahnuť niekoľko milivoltov, čo je niekoľkonásobok rozlišovacej schopnosti nášho normálu. Ilustračné hodnoty odporu pre 10 cm dlhý vodič na materiále plošného spoja, ktorý máte k dispozícii sú uvedené v tabuľke 1. Pokúste sa teda nezničiť vynikajúce parametre prístroja zlým návrhom plošného spoja!

Šírka cesty	Odpor	Šírka cesty	Odpor
0,3 mm	200 mΩ	2 mm	24 mΩ
0,5 mm	100 mΩ	3 mm	16 mΩ
0,75 mm	65 mΩ	4 mm	12 mΩ
1,0 mm	48 mΩ	5 mm	10 mΩ

Tabuľka 1: Odpor 10 cm dlhej vodivej cesty v závislosti na jej šírke. Hrúbka medi 35 μm.

Ako už bolo vyššie spomenuté, výstupné napätie sa nastavuje prepnutím oboch spínačov z dvojice do polohy ON. Pri návrhu plošného spoja sa snažte spínače rozmiestniť čo najergonomickejšie, aby sa obsluha (Vy) nemusela zbytočne trápiť hľadaním požadovanej kombinácie.

**V prípade časovej tiesne nemusíte navrhovať alebo osadzovať plošný spoj pre zdrojovú časť (celý obvod v schéme ohraničený prerušovanou čiarou). Výrobok bude možné oživiť aj bez týchto súčiastok. Súťažiacemu sa ale ako kompenzácia strhne 10 bodov v kategórii funkčnosť.**

## Zoznam súčiastok

Súčiastka	Hodnota	Púzdro
R2, R3, R4, R5, R6, R7 skupina 1	1.8k 0.1% zmerať!	SMD 1206
R8, R9, R10, R11, R12, R13, R14, R15, R16, R17, R18, R19, R20, R21, R22 skupina 2	1.8k 0.1% zmerať!	SMD 1206
R23, R24, R25, R26, R27, R28, R29, R30, R31, R32, R33, R34, R35, R36, R37, R38, R39, R40, R41, R42, R43, R44, R45, R46, R47, R48, R49, R50, R51, R52, R53, R54	1.8k 0.1%	SMD 1206
C3, C4	1000u/50V	
C5, C6, C7, C9, C10, C11, C13, C17	100n, THT	vývodový
C1, C2, C8, C12, C15, C16	100n SMD 1206	SMD 1206
R1	Trimer 10k	
R55, R56, R57, R58 skupina 3	10k 0.1% zmerať!	vývodový
IC2	7805	TO220
IC4	7812	TO220
IC3	7824	TO220
B1, B2	B40R-DIO	
Q1	BD139	TO126
Q2	BD140	TO126
S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8	DIP SWITCH	
IC1	MAX6250ACSA+	SO-8
IC5, IC6	OPA177FP	DIL-08

## Oživenie a odovzdanie konštrukcie

Súťažiaci majú k dispozícii oživovacie pracovisko, kde môžu svoj výrobok pred odovzdaním otestovať. Problémy, ktoré súťažiaci zistia a opravia pred oficiálnym odovzdaním výrobku sa do hodnotenia nezapočítavajú. Problémy, ktoré sa zistia pri oficiálnom odovzdaní hodnotiacej komisii sa do finálneho hodnotenia započítavajú.

## Kalibrácia

V prípade dostatku času je možné oživený napäťový normál okalibrovať pomocou 7,5 miestneho multimetra Keysight 34470A. Tento prístroj je minimálne o rád presnejší ako náš zdroj referenčného napätia. Postup kalibrácie je nasledovný:

1. Spínačmi nastaviť výstupné napätie na 5,000 V
2. Pripojiť multimeter na výstup zdroja referenčného napätia IC1, priamo na piny 4 a 6
3. Pomocou trimra R1 nastaviť na výstupe (pin 6 IC1) napätie 5,000 V (alebo aj presnejšie 5,000 0 V)
4. Odmerať hodnotu napätia na hlavnom výstupe normálu (svorka VOUT1)
5. Nastaviť hodnoty výstupného napätia z tabuľky a odmerať skutočné napätie na hlavnom výstupe výstupe (svorka VOUT1)
6. Odmerať hodnotu napätia na výkonovom výstupe normálu pre jednu hodnotu výstupného napätia (svorka VOUT2), napr.  $4,096 \text{ V} * 4 = 16,384 \text{ V}$

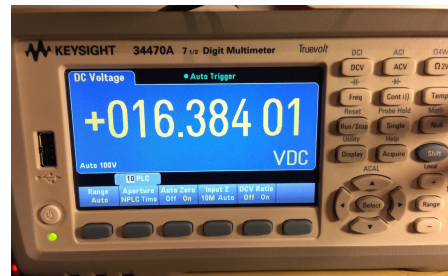
Nastavenie výstupného napätia (V)	Skutočná hodnota výstupného napätia na VOUT1 (V)	Nastavenie výstupného napätia (V)	Skutočná hodnota výstupného napätia na VOUT1 (V)
5,000		2,910	
4,000		2,920	
3,000		2,930	
2,000		2,940	
1,000		2,950	
0,000		2,960	
2,100		2,970	
2,200		2,980	
2,300		2,990	
2,400		2,993	
2,500		2,996	
2,600		2,999	
2,700			
2,800			
2,900		VOUT2 pri 16,384	

Autori: Ing. Daniel Valúch, PhD., [daniel.valuch@cern.ch](mailto:daniel.valuch@cern.ch), Ing. Tomáš Pavlíček, [xpavlicek@gmail.com](mailto:xpavlicek@gmail.com)

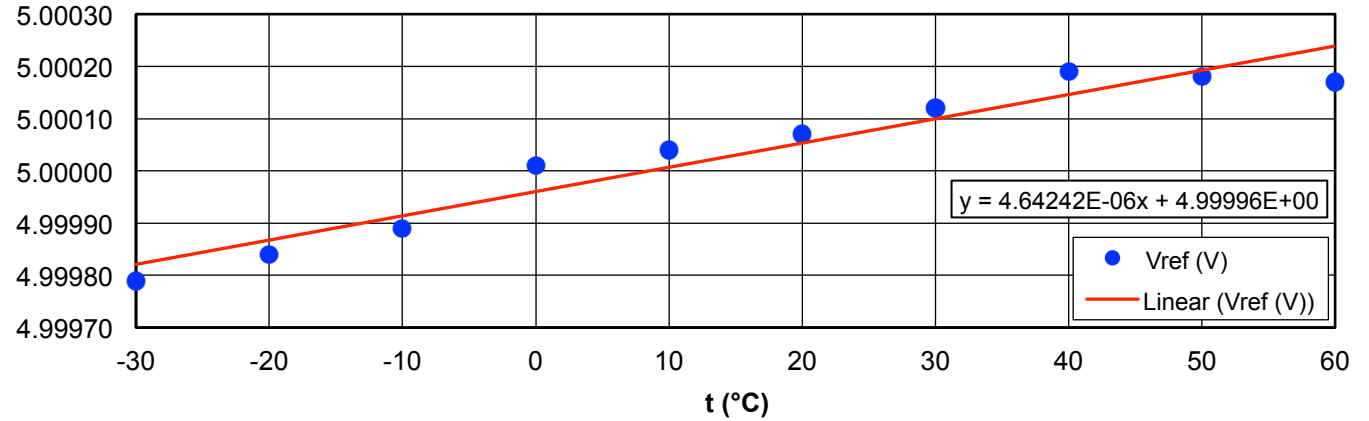
# Teplotná stabilita laboratórneho normálu napätia "ZENIT 2016"

Namerané dáta

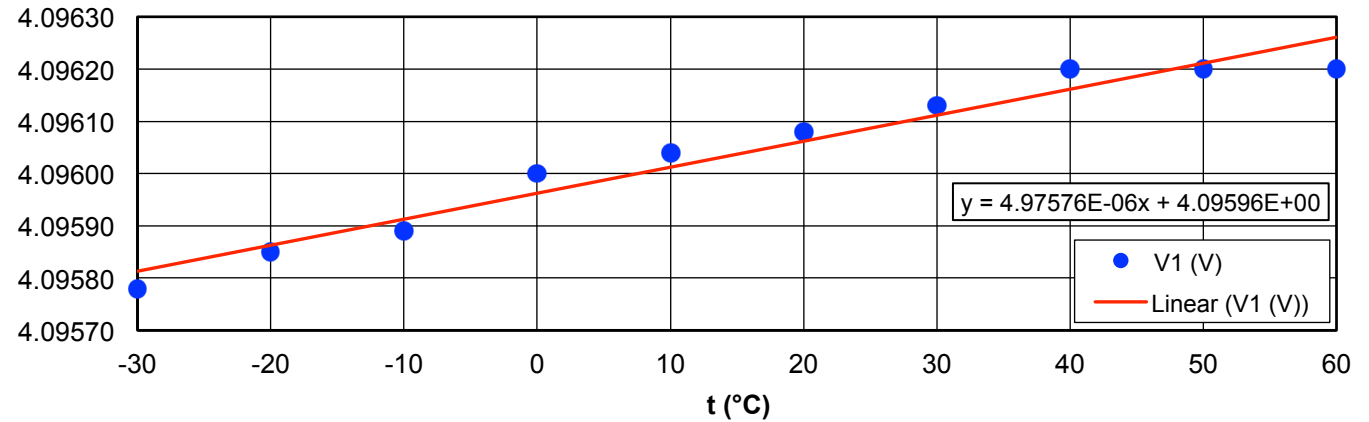
T (°C)	Vref (V)	V1 (V)	V2 (V)
-30	4.99979	4.09578	16.3803
-20	4.99984	4.09585	16.3812
-10	4.99989	4.09589	16.3819
0	5.00001	4.09600	16.3828
10	5.00004	4.09604	16.3835
20	5.00007	4.09608	16.3842
30	5.00012	4.09613	16.3849
40	5.00019	4.09620	16.3857
50	5.00018	4.09620	16.3862
60	5.00017	4.09620	16.3867



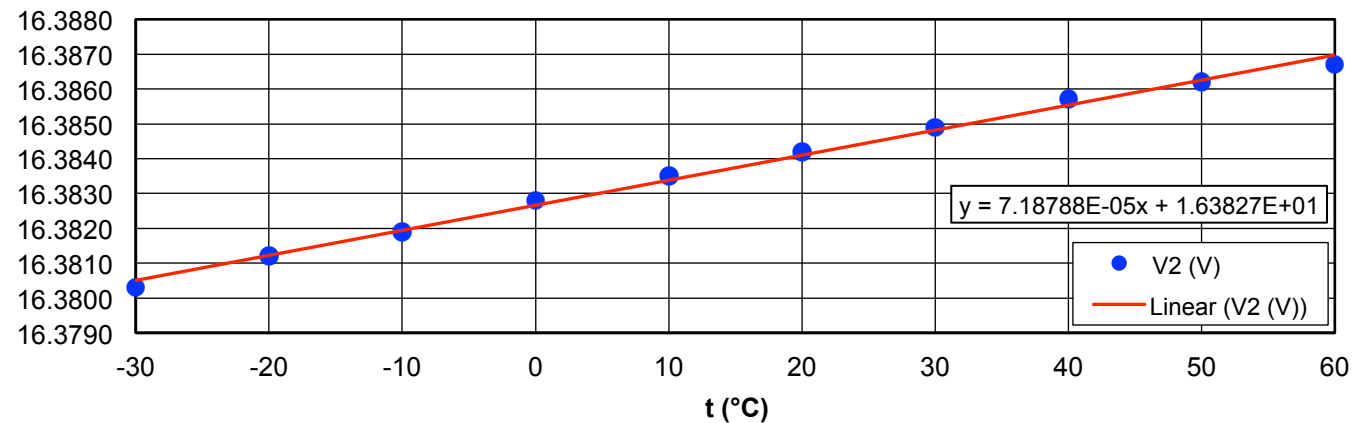
Referencia MAX6250  
Vref (V)

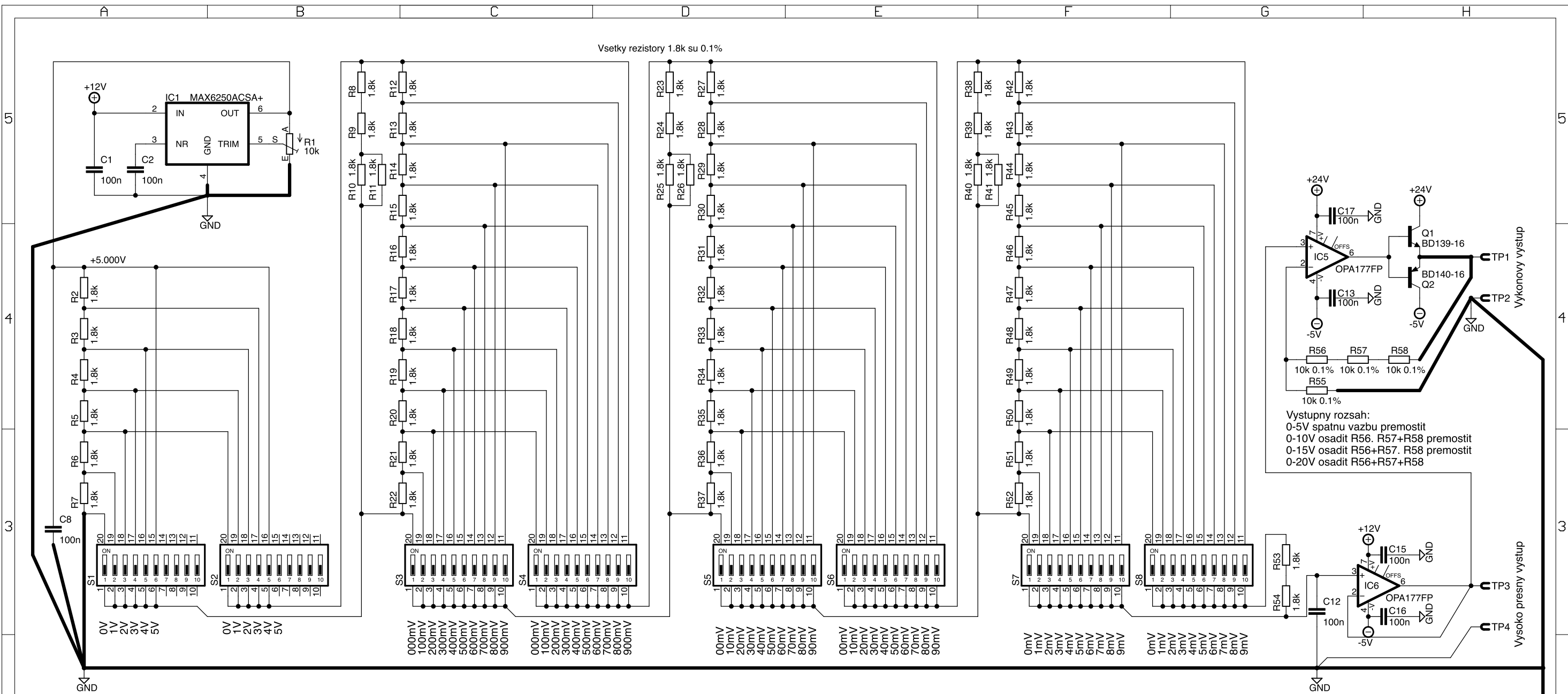


Vysoko presný výstup  
V1 (V)

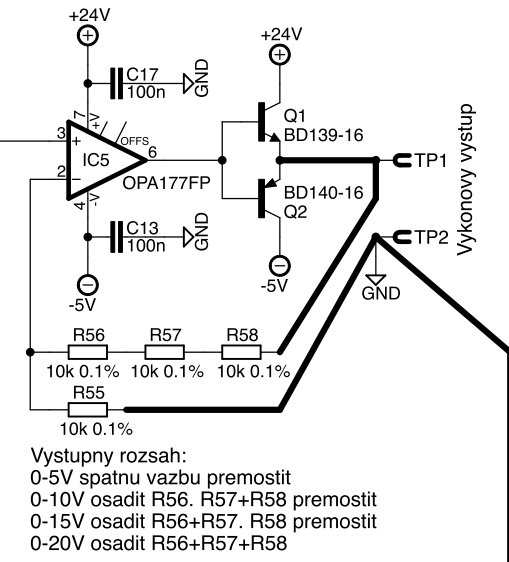


Výkonový výstup  
V2 (V)

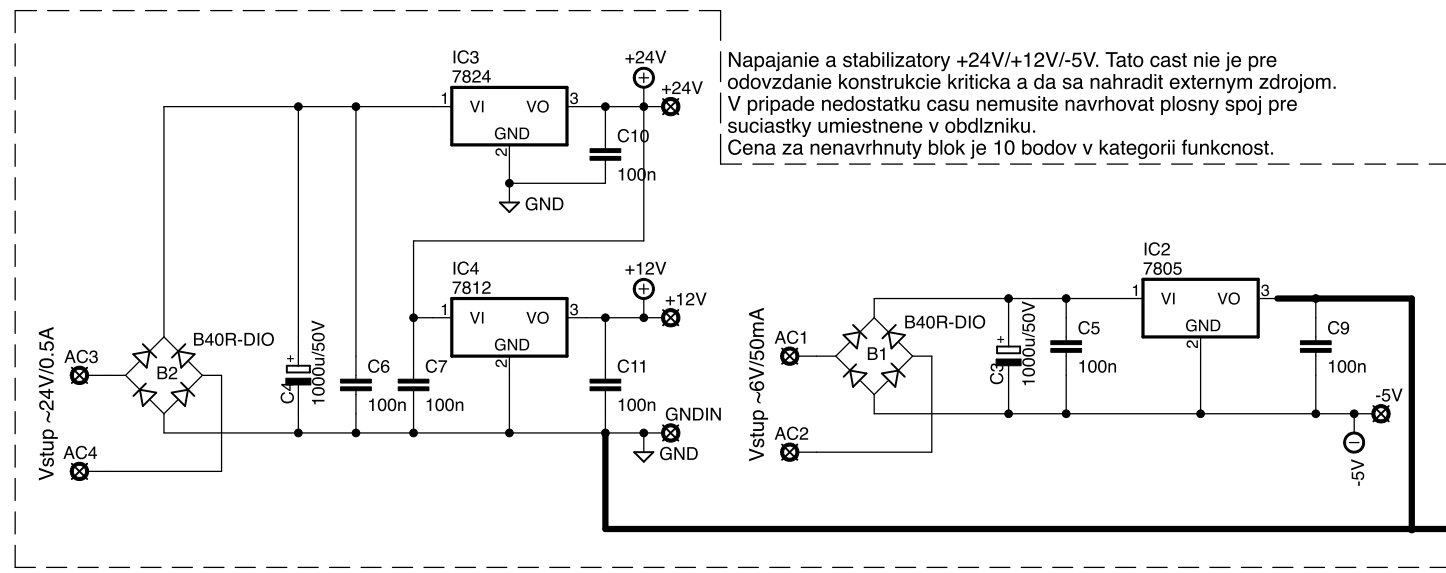




Všetky rezistory 1.8k su 0.1%



Vystupny rozsah:  
 0-5V spatnu vazbu premostit  
 0-10V osadit R56. R57+R58 premostit  
 0-15V osadit R56+R57. R58 premostit  
 0-20V osadit R56+R57+R58



Napajanie a stabilizatory +24V/+12V/-5V. Tato cast nie je pre odovzдание konstrukcie kriticka a da sa nahradit externym zdrojom. V pripade nedostatku casu nemusite navrhovat plosny spoj pre suciastky umiestnene v obdlniku. Cena za nenavrhnuty blok je 10 bodov v kategorii funkcnost.

Vysoko presny vystup

- Napatie 0-5V s krokom 1mV, prúd do 10mA.
- Absolutna presnost <0.02% z rozsahu
- Stabilita <5ppm/°C

Vykonovy vystup

- Napatie 0-20V s krokom 1..4 mV, prúd do 1A.
- Absolutna presnost <0.05% z rozsahu
- Stabilita <5ppm/°C

Rozvod zeme navrhnut tak, aby navratove prudy z vykonovneho bloku neovplyvnovali vysoko presny vystup. Hruha ciara naznajuje doporučený rozvod zeme.

Vykonovu cast tepelne izolovat od zdroja referencie a delicov!