

Základní vlastnosti číslicového voltmetru s měřicím usměrňovačem

1. Zadání:

A. Na číslicovém voltmetru s integračním A/D převodníkem (C520 D, MHB 7106 ...):

- a) Nastavte minimum a maximum rozsahu voltmetru
- b) Změřte linearitu voltmetru v celém měřicím rozsahu a určete maximální chybu voltmetru v procentech měřicího rozsahu δ_{FS}
- c) Změřte vstupní odpor voltmetru
- d) Zjistěte, jak voltmetr reaguje na mírné překročení měřicího rozsahu (o 10 %) a na nesprávnou polaritu měřeného napětí

B. Na operačním usměrňovači změřte:

- a) Statickou převodní charakteristiku v rozsahu vstupního napětí - 15 V až + 15 V. Určete nelinearitu převodní charakteristiky v %
- b) Dynamickou převodní charakteristiku v rozsahu vstupního napětí 0 až 5 V_{ef} při kmitočtech 100 Hz a 100 kHz a určete nelinearitu v % pro oba měřené kmitočty
- c) Kmitočtovou charakteristiku napět'ového přenosu usměrňovače při vstupním napětí 5 V_{ef} a určete mezní kmitočet, při němž hodnota přenosu klesne o 2 % oproti přenosu při nízkých frekvencích

C. Spojením operačního usměrňovače a voltmetru vytvořte střídavý číslicový milivoltmetr a určete:

- a) maximální chybu voltmetru v % měřicího rozsahu δ_{FS} pro $f = 1$ kHz
- b) mezní kmitočet milivoltmetru po pokles maximálního údaje o 2 %

2. Popis měřeného předmětu

Integrovaný obvod C520 D je A/D převodník pracující metodou dvojí integrace. Patří mezi obvody LSI a je zhotoven technologií I²L. Obsahuje více než 1200 integrovaných prvků, z nichž 75 % patří k číslicové a 25 % k analogové části obvodu.

Tab. 1: Mezní údaje C520 D:

Veličina	Min	Max
Napájecí napětí [V]	0	7
Napětí na vstupu H [V]	- 15	15
Napětí na vstupu L [V]	- 15	15
Napětí na výstupech [V]	0	7
Napětí na vstupu pro druh provozu [V]	0	7

Tab. 2: Provozní a jmenovité údaje C520 D:

Veličina	Min.	Typ.	Max.
Napájecí napětí [V]	4,5		5,5
Teplota okolí [°C]	0		70
Vstupní napětí [mV]	- 99		999
Napětí na vstupu 6:			
pomalý převod [V]	0		0,4
hold (neměří) [V]	0,8		1,6
rychlý převod [V]	3,2		5,5
Napájecí proud [mA]		10	20
Chyba linearity [%]	- 0,1	0,05	0,1
	1 digit	1 digit	1 digit
Napětí na výstupech BCD pro úroveň L [mV]		90	400
Potlačení souhlasného rušení (CMR) [dB]		48	
Vstupní proud [nA]		110	
Teplotní součinitel nuly (TK ₀) [μV/K]		28	
Teplotní součinitel konečné hodnoty (TK ₉₀₀) [ppm/K]		27	
Rychlost měření / s :			
pomalý převod	2	5	7
rychlý převod	48	122	186

3. Teoretický rozbor

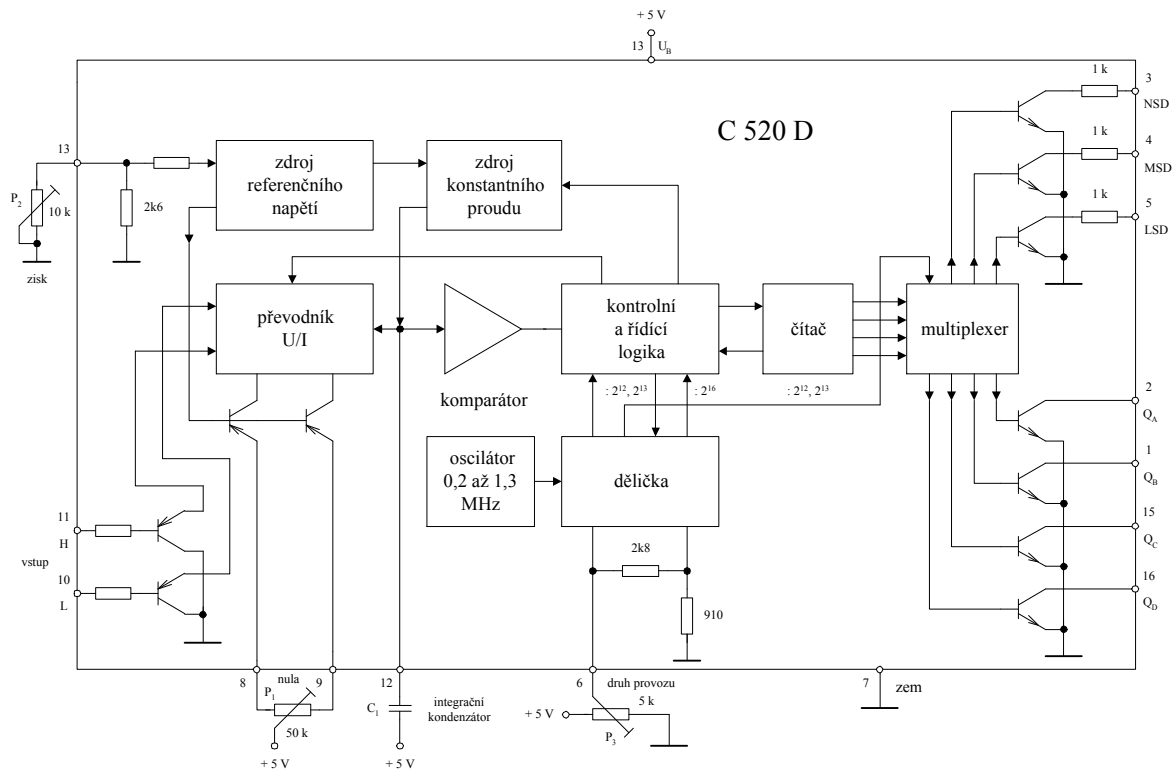
a) vlastností měřeného předmětu

Číslicový voltmetr s integračním A/D převodníkem

Integrační A/D převodníky pracují na principu řízené integrace vstupního napětí, která se provádí pomocí zpětnovazebního integrátoru s OZ.

A/D převodník C520 D

Blokové schema zapojení integračního převodníku C520 D je na obr.1. Převodník se skládá z analogové a digitální části. Do analogové části patří vstupní převodník napětí/proud, komparátor, zdroj referenčního napětí a konstantního proudu. Číslicová část je tvořena oscilátorem, děličkami, kontrolní a řídicí logikou, čítačem, multiplexerem a výstupními obvody.



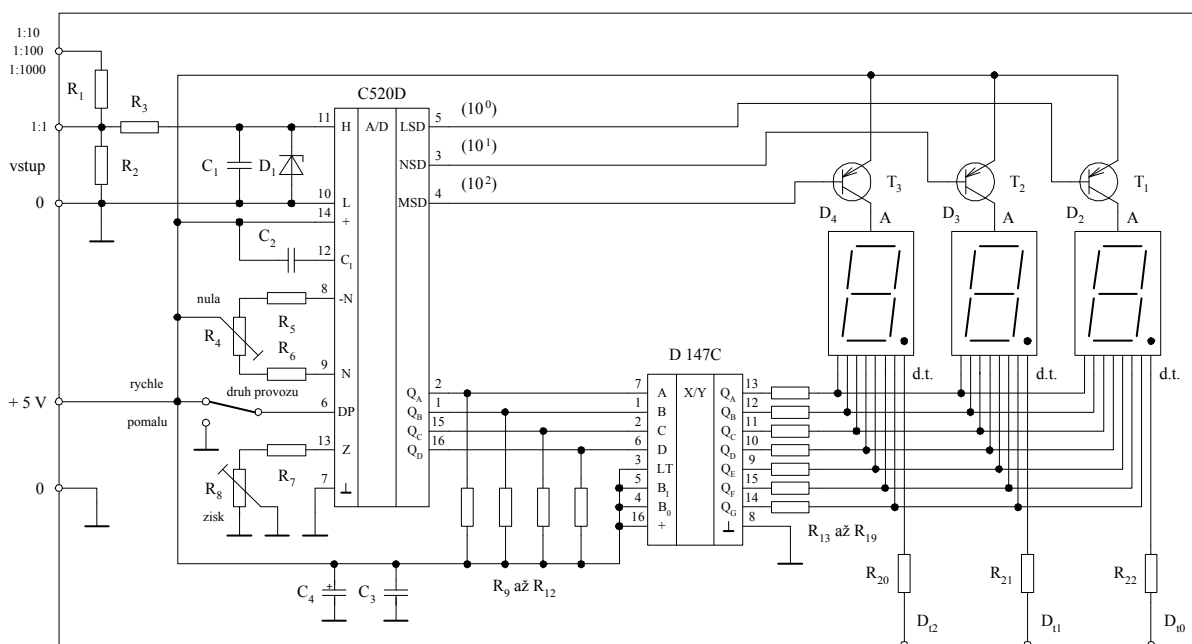
Obr. 1

Celý převod se skládá ze dvou časových intervalů. Během prvního intervalu T_1 se nabíjí integrační kondenzátor C_1 proudem z výstupu převodníku napětí/proud. Nabíjecí proud je přímo úměrný vstupnímu napětí převodníku. Doba trvání intervalu T_1 , po kterou je kondenzátor nabíjen, je konstantní a je určena generátorem hodinového kmitočtu v číslicové části. Stupeň nabití kondenzátoru tedy odpovídá velikosti vstupního napětí. Kondenzátor je v druhé fázi převodu během intervalu T_2 vybíjen zdrojem konstantního proudu až do prahového napětí komparátoru. Po dosažení prahového napětí se komparátor překlápí a přes obvody řídicí a kontrolní logiky se zablokuje čítač. Protože je kondenzátor vybíjen konstantním proudem, je délka druhého časového intervalu přímo závislá na stupni jeho nabití a tedy i na velikosti vstupního napětí.

Stav čítače tak odpovídá v číslicové formě vstupnímu analogovému napětí. Obě fáze převodu jsou řízeny stejným hodinovým kmitočtem, takže jeho pomalé kolísání neovlivňuje přesnost měření. Pro dobré potlačení rušivého napětí 50 Hz na vstupu převodníku je nutno zvolit dobu integrace vstupního napětí jako celý násobek 20 ms. Protože je u převodníku doba integrace delší než 1 ms, má tento IO malé potlačení rušivého vstupního napětí. Převodník napětí na proud obsahuje diferenční zesilovač s Darlingtonovou dvojicí na vstupu. Zesilovač je napájen přes proudové zdroje. Nastavení nuly trimrem P_1 se mění symetrie proudových zdrojů a tedy i ofset diferenčního zesilovače. Vstupy 10 a 11 jsou vnitřním zapojením chráněny až do napětí ± 15 V proti zemi. Z výstupu 12 je pak nabíjen vnější integrační kondenzátor. Komparátor vyhodnocuje stav nabití a vybití integrační kapacity a jeho výstup

ovládá start nebo zastavení čítače. Zdroj referenčního napětí řídí zdroj konstantního proudu a proudové zdroje napájení vstupního převodníku U/I. Trimrem P_2 - nastavení zisku (konečné hodnoty) je na vývodu 13 ovlivněn poměr odporů ve zdroji referenčního napětí, čímž se mění i velikost konstantního proudu, kterým je vybíjen integrační kondenzátor. Změnou odporu trimru P_2 tedy nastavujeme zisk (konečnou hodnotu) voltmetru s C520 D. Oscilátor se skládá z devítistupňového kruhového generátoru, jehož kmitočet se může měnit podle rozptylu stavebních prvků od 0,2 do 1,3 MHz. U oscilátoru je požadována jen krátkodobá stabilita kmitočtu pro časy do 5 ms (což splňuje). Všechny ostatní hodinové impulzy jsou z oscilátorového kmitočtu odvozeny, takže se mohou případně měnit v daném rozsahu kmitočtu oscilátoru. Celá dělička je sestavená z devatenácti klopných obvodů dělicích kmitočet oscilátoru. Po vydělení 2^{12} nebo 2^{13} se získávají hodinové impulzy k řízení multiplexeru a k řízení integrace v rychlém režimu. Ve zbylých stupních se hodinové impulzy dělí pro řízení integrace v poma-lém režimu. Dělicí poměr (volba druhu provozu) se přepíná změnou napětí na vývodu 6.

Dekadický čítač je synchronní 3 1/2 místný. Je sestaven též z klopných obvodů a jeho maximální čítaný stav je 1999. Integrační fáze vstupního signálu začíná od stavu 000 a končí 880. Dalších dvacet taktů trvá přepnutí integračního kondenzátoru na vybíjecí režim. Záporný měřený rozsah -1 až -99 mV odpovídá stavu čítače 901 až 999, přičemž 901 odpovídá -99 mV. S přechodem 999 na 1000 zhasne záporné znaménko. Kladný měřený rozsah začíná stavem 1000 až do 1999, čemuž odpovídá 000 až 999 mV. Nevýznamné přední nuly nejsou potlačeny. Dosažení hodnoty 2000 se indikuje jako překročení kladného rozsahu číslem 11 (HLHH) ve všech třech dekadách. Negativní znaménko se indikuje číslem 10 (HLHL) ve výstupu MSD (10^2). Při překročení maximálního záporného vstupního napětí se indikuje ve všech třech dekadách číslo 10 (HLHL). Po ukončení měřicího cyklu a vydání výstupní hodnoty je čítač opět vynulován. Kontrolní a řídicí logika řídí v průběhu měřicího cyklu všechny obvody převodníku. Dále tento obvod realizuje přepínání tří provozních stavů. Při napětí 0 až 0,4 V na vývodu 6 je zvolen pomalý cyklus integrace a rychlost měření je 2 až 7 za sekundu. Při napětí 3,2 až 5,5 V jsou hodinové impulzy pro měřicí cyklus odebrány z klopného obvodu 12 nebo 13 a rychlost měření je 48 až 168 za sekundu. Při napětí v rozmezí 0,8 až 1,6 V je průchod kmitočtu děličkou uzavřen a měření se zastaví. V čítači však zůstává poslední změřená hodnota.



Obr. 2

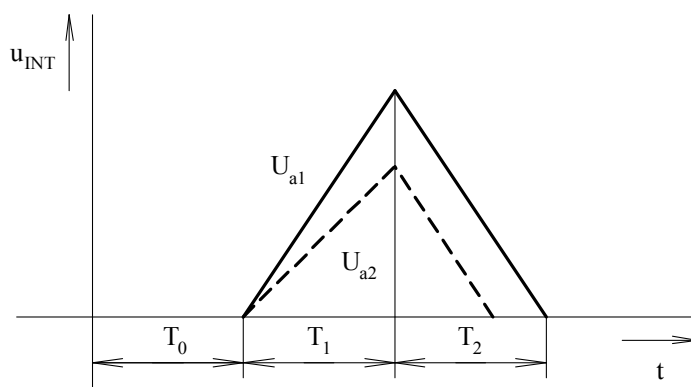
Úrovně napětí na vývodu 6 jsou shodné s úrovněmi logiky TTL a lze ji tedy na tento vstup přímo připojit. Pro výdej stavu čítače na výstup je použit multiplexer, který přivádí tři výstupní stavy čítačů (v kódu BCD) postupně na výstup. Multiplexer je řízen vyděleným hodinovým kmitočtem z oscilátoru. Při rychlém měření vydává multiplexer jen jeden výstupní údaj během každého cyklu, při pomalém opakuje výstupní údaj 24 x během každého cyklu. Výstupní obvody jsou ovládány multiplexerem a tvoří je tranzistory s otevřeným kolektorem. V kolektorech tranzistorů pro spínání dekád jsou seriové rezistory 1 k Ω . Mezní údaje IO jsou v tab. 1 a důležité provozní údaje v tab. 2.

Na obr.2 je schéma číslicového panelového měřidla s IO C 520 D. Převodník A/D je v základním zapojení s rozsahem - 99 až 999 mV. Napěťový dělič R_1 a R_2 upravuje vstupní rozsah podle tab. 3.

Tab. 3: Odporů rezistorů R_1 a R_2 pro různé rozsahy

Napěťový rozsah	R_1	R_2	Proudový rozsah	R_1	R_2
1 V	0	10 k Ω	100 mA	0	10 k Ω
10 V	90 k Ω	10 k Ω	1 mA	0	1 k Ω
100 V	990 k Ω	10 k Ω	10 mA	0	100 Ω
1000 V	9,99 M Ω	10 k Ω	100 mA	0	10 Ω
			1 A	0	1 Ω
			10 A	0	0,1 Ω

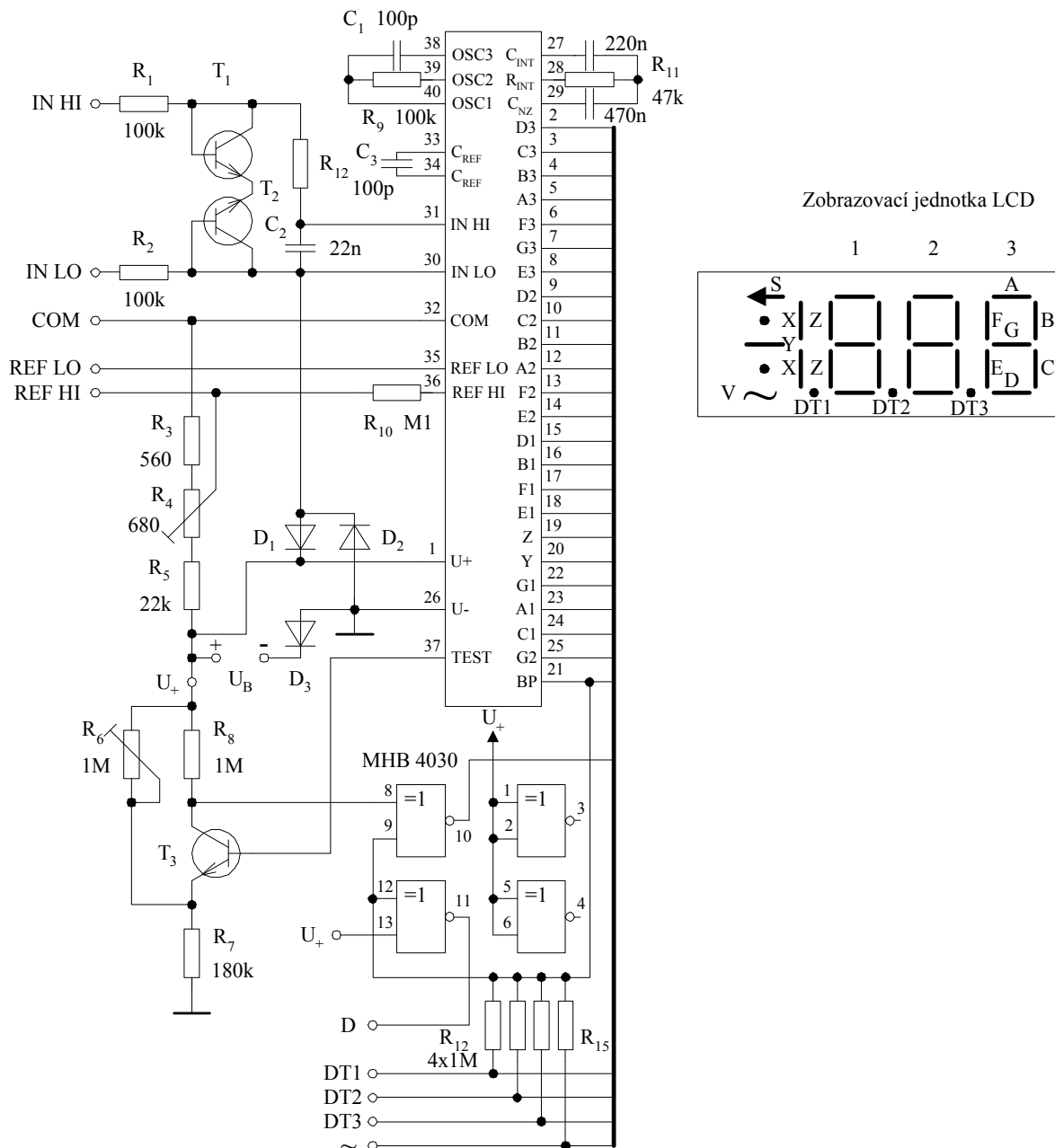
Proudové bočníky pro vyšší rozsahy proudů (1 A, 10 A) na místě R_2 jsou umístěny mimo desku s plošnými spoji, stejně jako rezistor R_1 pro rozsah 1000 V. Vzhledem k tomu, že převodník IO 1 má velké potlačení rušivého napětí sítě, je na vstupu zařazena dolní propust R_3 , C_1 . Chceme-li větší potlačení kmitočtu 50 Hz, je vhodné propust zařadit dvakrát za sebou a zvětšit kapacitu C_1 až 5x. Zenerova dioda D_1 a rezistor R_3 tvoří ochranu před vysokým napětím na vstupu v obou polaritách a to až do velikosti, kdy se přeruší dioda nebo rezistor R_3 (více jak 1000 V při rozsahu 1 V). Člen R_3 , C_1 zabrání přitom vytvoření napěťové špičky. Integrovaný kondenzátor C_2 je zapojen mezi výstup 12 a kladné napájecí napětí. Na obr. 3 je časový průběh napětí na integrovaném kondenzátoru C_2 pro dvě různá stejnosměrná napětí U_{a1} a U_{a2} ($U_{a2} < U_{a1}$).



Obr. 3

Mezi vývody 8 a 9 je zapojen nulovací obvod R_4 , R_5 , R_6 . Rychlost převodu se volí napětím na vývodu 6. Zisk převodníku se nastavuje změnou R_8 . Vývod 7 a vstup 10 jsou spojeny se zemí. Rezistory R_9 až R_{12} jsou v kolektorech výstupních tranzistorů převodníku a zabezpečují

Během fáze integrace měřeného napětí je smyčka automatického nulování rozpojena a na oba vstupy integrátoru Z_2 je připojeno rozdílové napětí mezi vstupními svorkami INHI a INLO (spínače S_1 , S_2 jsou sepnuty). Po dobu 4000 hodinových impulzů je nabíjen integrační kondenzátor C_{INT} měřeným napětím. Diferenční vstup převodníku umožňuje potlačit souhlasné rušivé napětí s hodnotou až 86 dB (CMRR). Integrace vstupního napětí se provádí v definované době T_1 , která je určena během hodinových impulzů a je konstantní. Při integraci referenčního napětí po dobu T_2 se neinvertující vstup integrátoru Z_2 spojí spínačem S_4 se svorkou COM a neinvertující vstup sledovače Z_1 se připojí na referenční kondenzátor C_{REF} s takovou polaritou, aby se výstupní napětí integrátoru vrátilo k nule. To zajišťují spínače S_8 až S_{11} , přičemž při jedné polaritě měřeného napětí jsou sepnuty S_8 a S_9 , při opačné polaritě S_{10} a S_{11} .



Obr. 5

Přitom se čítá počet impulzů, během nichž poklesne napětí na výstupu integrátoru na nulovou hodnotu. Při rovnosti vstupního a referenčního napětí 100 mV se načítá 1000 impulzů (doba integrace referenčního a měřeného napětí je stejná). Svorka COM je udržována na napětí, které je přibližně o 2.8 V menší než kladné napájecí napětí.

Časový průběh napětí na integračním kondenzátoru C_{INT} pro dvě různá stejnosměrná napětí U_{a1} a U_{a2} ($U_{a2} < U_{a1}$) je opět na obr. 3. Číslicová část obvodu se napájí z číslicové země (napětí asi 5 V vůči +U), která je vyvedena přes odpor 500 Ω na výstup TEST. Výstupní signál z generátoru o frekvenci $f = 50$ kHz je před vstupem do dekadického čítače dělen čtyřmi.

Čítačem jsou řízeny tři fáze A/D převodu. První fáze (automatické nulování) je dána 1000 až 3000 impulzy, fáze integrace měřeného napětí je dána počtem 1000 impulzů, fáze integrace referenčního napětí je dána až 2000 impulzy podle velikosti měřeného napětí. Celý cyklus měření trvá až 4000 impulzů, což je 16000 hodinových impulzů (320 ms).

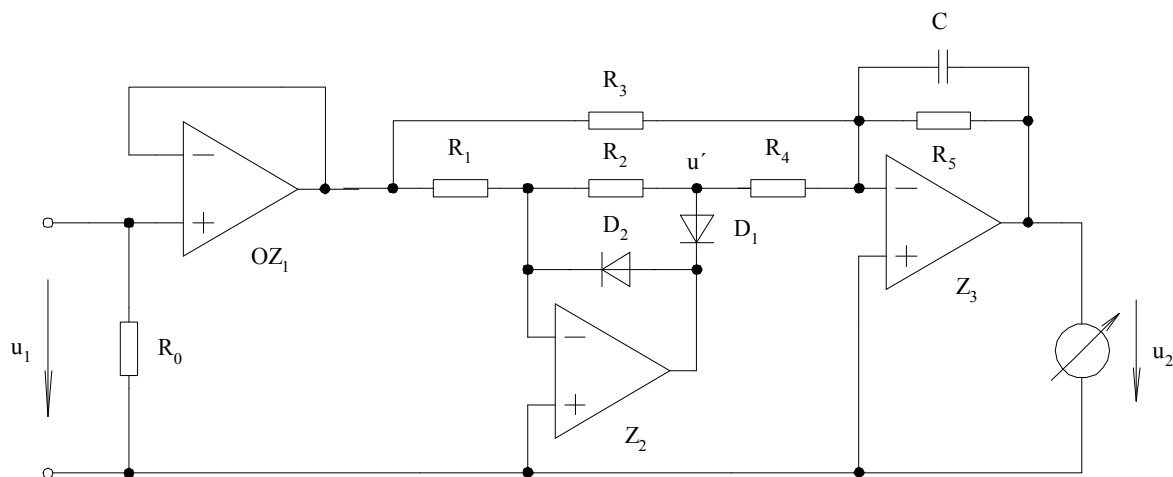
Výstupní napětí segmentových výstupů LCD zobrazovače má obdélníkový průběh s kmitočtem přibližně 60 Hz. Je-li segmentový výstup ve fázi s výstupem BP, pak se segment nezobrazí, jsou-li signály v protifázi, segment se zobrazí.

Integrovaný obvod MHB 7106 se napájí z jednoho zdroje napětí 9 V.

Zapojení přípravku pro měření je na obr. 5. Převodník MHB 7106 je doplněn ochrannými obvody s tranzistory T_1 , T_2 , vstupním filtrem tvořeným rezistory R_1 , R_2 , R_{12} , kondenzátorem C_2 a obvodem pro testování poklesu napájecího napětí s tranzistorem T_3 . K převodníku je připojena zobrazovací jednotka LCD.

Operační usměrňovač

Jako dvoucestný operační usměrňovač pro uzemněnou zátěž je možno použít následující zapojení. Zapojení na obr. 6 se skládá ze dvou částí: jednocestného invertujícího operačního usměrňovače Z_2 , D_1, D_2, R_1, R_2 a invertujícího sčítacího zesilovače Z_3 , R_3, R_4, R_5 , C .



Obr. 6

Při kladné polaritě vstupního napětí u_1 je dioda D_1 vodivá, D_2 nevodivá a přenos zesilovače Z_2 je -1 . Při záporné polaritě vstupního napětí je D_1 nevodivá, D_2 vodivá a přenos zesilovače je 0 . Dvojnásobek výstupního jednocestně usměrněného napětí u' je ve sčítacím zesilovači sečten se vstupním napětím u_1 . Vzniklé napětí je poté invertováno. Na výstupu zesilovače Z_3 se objeví dvoucestně usměrněné vstupní napětí s kladnou polaritou. Pomocí stejnosměrného voltmetru zapojeného na výstup obvodu můžeme určit aritmetickou střední hodnotu napětí u_1 , bez ohledu na tvar signálu.

Pro $u_1 > 0$ je výstupní napětí usměřovače

$$u_2 = -R_5 \cdot \left(\frac{u'}{R_4} + \frac{u_1}{R_3} \right) = -R_5 \cdot \left(-\frac{R_2}{R_1 \cdot R_4} \cdot u_1 + \frac{1}{R_3} \cdot u_1 \right) = \frac{R_5}{R_3} \cdot u_1 \cdot \left(\frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_4} - 1 \right)$$

Pro $u_1 < 0$ je výstupní napětí

$$u_2 = -\frac{R_5}{R_3} \cdot u_1$$

Aby pro výstupní napětí platilo:

$$u_2 = \frac{R_5}{R_3} \cdot |u_1|$$

musí být splněny podmínka

$$\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{R_3}{R_4} = 2$$

Zařadíme-li do zpětné vazby operačního zesilovače Z_3 filtrační kondenzátor C , získáme stejnosměrné výstupní napětí úměrné střední hodnotě dvoucestně usměrněného vstupního napětí. Při usměřování sinusového napětí se volí kapacita kondenzátoru C podle vztahu:

$$C \geq \frac{1}{12 \cdot \pi \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot f \cdot R_5} \quad [\mu F \ \& \ M\Omega, Hz]$$

kde f ... frekvence sinusového napětí

k_1 ... dílčí přenos sumátoru $k_1 = R_5/R_4$

k_2 ... poměr amplitudy druhé harmonické složky k velikosti stejnosměrné složky

Filtrace je účinná, pokud je časová konstanta $C \cdot R_5$ mnohem větší než doba periody sinusového napětí.

Oddělovací napěťový sledovač s OZ_1 na vstupu milivoltmetru zamezuje tomu, aby výstupní odpor zdroje signálu ovlivňoval zesílení následujících stupňů.

U operačních usměřovačů dochází ke zkreslení signálu na vyšších kmitočtech, a to jednak vlivem konečné rychlosti přeběhu OZ , jednak vlivem doby zotavení diody v závěrném směru.

Jistou nevýhodou zapojení je malý vstupní odpor a dále to, že rozdíl v časovém zpoždění přenosu proudů odpory R_3 a R_4 způsobuje při vyšších frekvencích vstupního napětí vektorovou chybu proudu, která vyvolává dynamickou chybu usměřovače. Tuto nevýhodu odstraňuje zapojení nf milivoltmetru s dvoucestným operačním usměřovačem a s rozdílovým zesilovačem místo sčítacího.

Nakonec je nutné pouze připomenout, že střední hodnota výstupního napětí operační usměřovače jako převodníku pro měření střední hodnoty je rovna střední hodnotě vstupního střídavého napětí. Chceme-li tedy určit efektivní hodnotu vstupního střídavého napětí, musíme napětí na výstupu operačního usměřovače na odpovídající efektivní hodnotu přepočítat pomocí činitele tvaru k_t příslušného signálu (pro sinusový signál $k_t = 1,11$).

b) měřicí metody

Statická převodní charakteristika je závislost stejnosměrného výstupního napětí převodníku U_2 na stejnosměrném vstupním napětí a měříme ji pomocí stejnosměrného regulovatelného zdroje. Nelinearitu převodní charakteristiky určíme jako maximální rozdíl

naměřené hodnoty U_2 a hodnoty teoreticky vypočítané, vztažený k maximální měřené hodnotě, vyjádřený v procentech.

Dynamická převodní charakteristika je závislost stejnosměrného výstupního napětí převodníku U_2 na střední hodnotě střídavého vstupního napětí a měříme ji pomocí střídavého regulovatelného zdroje.

Kmitočtová charakteristika napěťového přenosu převodníku je závislost

$$A_{\text{udB}} = 20 \cdot \log U_2/U_1 = f(f)$$

kde U_2 je velikost ss napětí na výstupu převodníku

U_1 je střední hodnota vstupního střídavého signálu