

Bakalářská práce

2008

Lukáš Macht

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Pedagogická fakulta
Katedra fyziky

Bakalářská práce

Elektronické moduly – komparátory a integrační zesilovače pro výuku elektroniky

Electronic modules - comparators and integrating amplifiers for education in electronics

Vedoucí práce: doc. Paeddr. Petr Adámek, Ph.D.

Autor: Lukáš Macht

Obor: Měřicí a výpočetní technika

Forma studia: prezenční

Ročník: 3.

Rok: 2008

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské, a to v nezkrácené podobě pedagogickou fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Borovanech dne 21. 4. 2008

.....

Anotace

Práce se zabývá popisem činnosti operačního zesilovače, konstrukcí a realizací modulu komparátoru a integračního zesilovače pro měření analogových signálů. Popisuje principy a funkci operačního zesilovače, jeho vlastností a složení. Výstupem práce je konkrétní realizace modulu určeného k měření pomocí osciloskopu.

Annotation

The project aims at analysis of operation, construction and implementation of comparator module and integrating amplifier for measuring of analog signále. It describes principles, function, features and diffrent kinds of integrating amplifiers specific module implementation is done in consultion and used elektronice practises to measurement osciloskope.

Poděkování:

Děkuji Doc. PaedDr. Petru Adámkovi, Ph.D. za odborný dohled, za cenné rady, inspiraci a trpělivost při vedení mé bakalářské práce.

OBSAH

1. Úvod	7
2. Operační zesilovač	8
2.1 Základní vlastnosti operačního zesilovače.....	8
2.2 Praktické seznámení s operačním zesilovačem.....	11
2.3 Invertující zesilovač.....	12
2.4 Neinvertující zesilovač.....	19
3. Diferenční zesilovač	21
4. Operační zesilovač bez zpětné vazby	22
5. Integrátor a generátor funkcí	25
5.1 Generátor funkcí.....	27
6. Souhrn o operačních zesilovačích	31
Generátor s operačním zesilovačem	33
7. Závěr	36
Seznam použité literatury	37
Přílohy	38
Návrh jednoduché úlohy do praktika elektroniky	43

1. Úvod

Motivací k napsání této práce byla myšlenka doplnit a obohatit výuku praktika z elektroniky na katedře fyziky. Práce se zabývá operačním zesilovačem, popisem jeho funkce, principem, znaky, základními zapojeními operačního zesilovače. Dále je zde pak popis navrženého modulu a v něm použitého zesilovače. V příloze je zobrazena deska plošných spojů, schéma zapojení, seznam součástek.

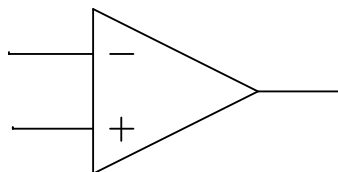
Cílem této práce bylo navržení, realizace a konstrukce elektronického modulu pro výuku elektroniky.

2. Operační zesilovače

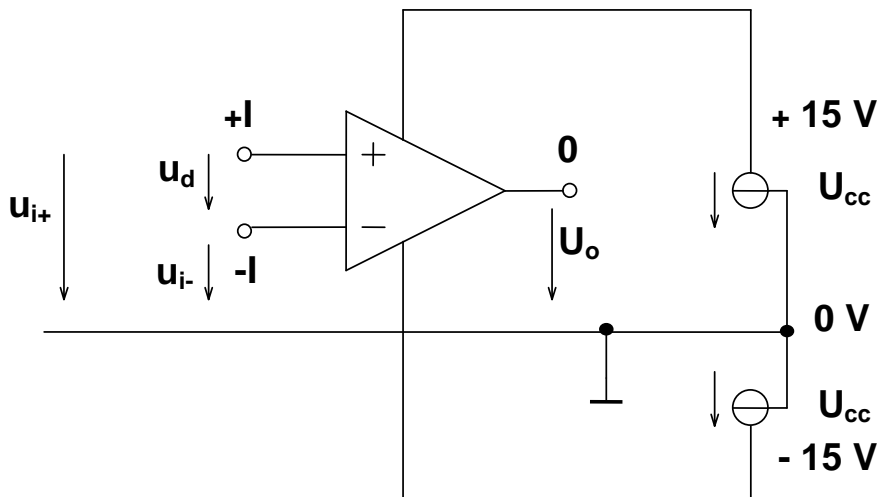
Operační zesilovače původně vznikly jako složité elektronické obvody pro použití při zpracování analogových (spojitě se měnících) stejnosměrných a nízkofrekvenčních střídavých signálů v analogových počítačích. Moderní polovodičová technologie umožnila vytvoření operačních zesilovačů v podobě levných integrovaných obvodů s malým počtem vývodů, které mají nepatrnou spotřebu, jsou odolné proti zkratu a umožňují jednoduše realizovat nejrůznější elektronická zařízení. To vedlo k jejich masovému rozšíření v průmyslové i spotřební elektronice. Obvody s operačními zesilovači obsahují méně součástek než rovnocenné obvody s tranzistory a matematický popis jejich vlastností je většinou mnohem jednodušší. [1]

2. 1 Základní vlastnosti operačního zesilovače

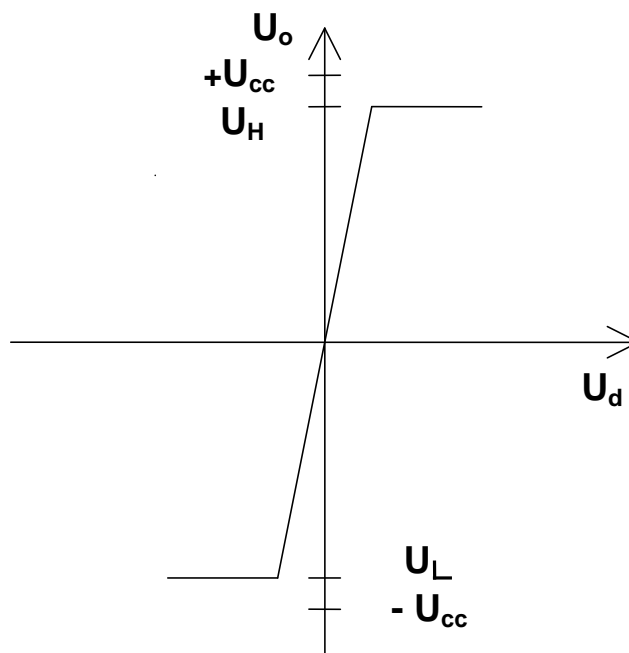
Běžně používané operační zesilovače můžeme rozdělit na bipolární, které obsahují pouze bipolární tranzistory NPN a PNP, a na operační zesilovače se vstupními tranzistory řízenými polem (FET), které jsou často označovány jako "bifetové". Oba druhy se používají stejným způsobem a mají stejnou schématickou značku. Pro uživatele není důležitá vnitřní struktura operačního zesilovače, ale pouze jeho celkové vlastnosti, které se projevují na vstupních a výstupních svorkách. Schématickou značku a základní zapojení [2] operačního zesilovače vidíme na obr. 1 a), b). Napájení obstarávají dva sériově spojené stejnosměrné zdroje o stejném napětí U_{cc} , nejčastěji 15 V. Jejich společnou svorku zvolíme za místo nulového potenciálu.



Obr. 1 a) Schématická značka operačního zesilovače.



Obr. 1 b) Základní zapojení operačního zesilovače.



Obr. 2 Statistická převodní charakteristika

Jeden ze vstupů operačního zesilovače se nazývá neinvertující vstup a je označen znaménkem +, druhý vstup se nazývá invertující a je označen znaménkem -. Přivedeme-li na neinvertující vstup napětí U_+ a na invertující vstup napětí U_- , pak rozdíl těchto napětí se nazývá vstupní diferenciální napětí zesilovače.

$$U_d = U_{i+} - U_{i-} . \quad (1)$$

Vlastnosti zesilovače v základním zapojení znázorňuje statická přenosová charakteristika, tj. graf závislosti výstupního napětí U_a na vstupním napětí U_d (obr. 2). Její strmá část je popsána vztahem:

$$U_0 = A_{u0} U_d , \quad (2)$$

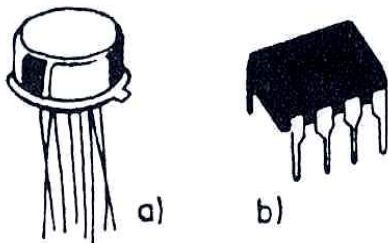
kde A_{u0} je napět'ové zesílení, které se v praxi pohybuje od 10^4 do 10^6 . Vstupní svorky neodebírají prakticky žádný proud. Vstupní odpor u bipolárních operačních zesilovačů je $10^5 \Omega$ až $10^6 \Omega$, u bifetových operačních zesilovačů je větší než $10^{12} \Omega$. Výstupní napětí je jen málo závislé na připojené zátěži a z toho plyne, že výstupní odpor je 10Ω až 100Ω . Výstupní proud však nemůže překročit mezní hodnotu 25 mA.

Ideální operační zesilovač by měl nekonečné zesílení, nekonečně velký vstupní odpor a nulový výstupní odpor. Už při nepatrném kladném vstupním napětí (několik desetin mV) přechází operační zesilovač do kladné saturace (saturace je ustálený stav na výstupu, kdy se zesilovač otevře naplno a dále již odpovídajícím způsobem nereaguje na napět'ové změny na vstupu.), kdy napětí na výstupu dosáhne maximální hodnoty U_H a dále se nemění. Podobně při nepatrném záporném vstupním napětí přejde operační zesilovač do záporné saturace s konstantním minimálním výstupním napětím U_L . Obě saturační napětí mají prakticky stejnou absolutní hodnotu $U_{sat} = U_H = -U_L$, která je přibližně o 1 V menší než napájecí napětí (U_{cc}). Statická přenosová charakteristika vystihuje vlastnosti operačního zesilovače dostatečně přesně jen pro stejnosměrná vstupní a výstupní napětí a pro střídavé napětí velmi nízké frekvence. [1]

2.2 Praktické seznámení s operačním zesilovačem

Poslouží k tomu běžný bipolární operační zesilovač s číselným kódem 741. Písmenný kód se neuvádí z důvodu, že různí výrobci označují své výrobky

různě, přestože jsou vzájemně nahraditelné (kompatibilní). Takže TESLA[®] používá písemné značení MAA741, Analog Device značí AD741[®], RCA[®] a Harris Semiconductor označují CA741[®], National Semiconductor LM741[®], Siemens TBB741[®], Valvo TDAO741[®] a podobně i další výrobci. Práce s tímto integrovaným obvodem je jednoduchá, a na rozdíl od některých jiných typů nevyžaduje připojení vnější součástky kvůli tzv. kmitočtové kompenzaci. Má totiž zabudovanou kompenzaci uvnitř. Všichni výrobci jej vyrábí v kovovém pouzdru TO99 (TO5) a v plastovém pouzdru mini dip, častěji značeném DIP8 (obr. 3 a,b) [4]. Na drátové vývody kovového pouzdra pohlížíme, stejně jako u tranzistorů, při pohledu zespodu. Do kruhu je jich rozestavěno celkem osm. Je to značný počet, takže některé zůstávají nezapojeny, zvláště má-li zesilovač vnitřní kompenzaci. Vývody nelze zaměňovat. Aby k tomu nedošlo a abychom se dovedli správně orientovat v jednotlivých vývodech, řídíme se malým výstupkem na boku pouzdra.



Obr. 3 a) operační zesilovač v kovovém pouzdře TO99 (TO5), b) operační zesilovač v plastovém pouzdře DIP 8.

Pravidlem je, že drátový vývod náležející k orientačnímu výstupku má vždy číslo osm. To platí při pohledu na pouzdro „zdola“, ve směru hodinových ručiček pak sousední vývod začíná číslem jedna. Ve stejném smyslu pokračuje další číslování. Plastové pouzdro DIP8 má osm vývodů, tj. čtyři na každé straně. Vývody se číslovají tentokrát při pohledu shora. Orientujeme se podle malé prolisované značky na svrchní straně pouzdra, umístěné na užší straně.

Pokud se pohlíží na pouzdro tak, že prolis je vlevo, pak první vývod zleva na straně blíže k nám začíná číslem jedna. Ostatním vývodům se přidělují čísla

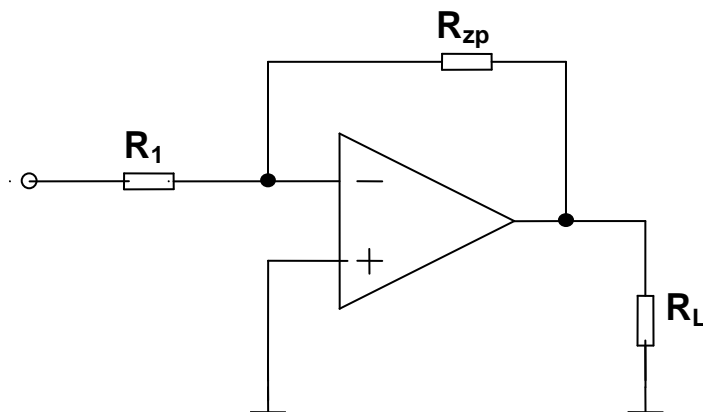
proti směru otáčení hodinových ručiček. Takto se číslovají všechna plastová pouzdra integrovaných obvodů. Operační zesilovače najdeme i ve větších plastových pouzdrech. Pak ovšem obsahují více takových obvodů, dva nebo i čtyři. Obecně platí, že operační zesilovač v plastovém pouzdru je levnější než v kovovém, ale kvůli zhoršenému odvodu tepla mívá horší parametry.

2.3 Invertující zesilovač

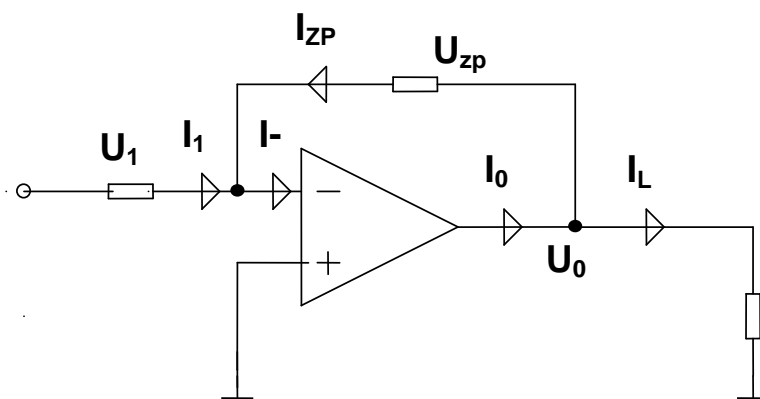
Operační zesilovač se často vyskytuje v zapojení, kde se požaduje zesílení určitého signálu, ať již stejnosměrného nebo střídavého. Takových zapojení je mnoho druhů.

U invertujícího zesilovače je mezi vstupy nulové napětí a oba vstupy jsou na společném nulovém potenciálu. Další předpoklad je, že ani jedním vstupem neprochází žádný nulový proud, viz obr. 4 a, b. [2]

a)



Obr. 4 a) Nejjednodušší zapojení invertujícího zesilovače. R_1 vstupní odpor, R_{zp} je zpětnovazební odpor, R_L výstupní odpor.



Obr. 4 b) Rozložení napětí a proudů u invertujícího zesilovače. Mezi jednotlivými proudy platí vztahy $I_1 + I_{zp} = 0$, dále platí $I_0 = I_{zp} + I_L$

Na obrázku (4 a) je znázorněno základní zapojení invertujícího zesilovače. Princip funkce spočívá v tom, že signál přichází do invertujícího vstupu (-), zatímco druhý neinvertující vstup (+) je uzemněn. K výstupu je připojena jednak zátěž R_L proti uzemnění a dále zpětnovazební odpor R_{zp} , který vede zpět na vstup operačního zesilovače. Je to záporná zpětná vazba, která zmenšuje původní vysoké zesílení samotného operačního zesilovače. Vstupní signál prochází odporem R_1 . Rezistor R_1 svou velikostí zároveň určuje vstupní odpor, kterým se invertující zesilovač projevuje. Na vedlejším obrázku (obr. 4 b) je patrný směr proudu, který protéká zapojením operačního zesilovače. Na vstupní svorku je připojeno napětí U_1 ze zdroje napětí a celé toto napětí se rozloží na rezistoru R_1 .

Jelikož na invertujícím vstupu je uzel s nulovým napětím, tzv. virtuální zem, začne téci proud I_1 podle Ohmova zákona má velikost:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} \quad (3)$$

$$I_{zp} = -\frac{U_{zp}}{R_{zp}} \quad (4)$$

Na pravé straně rovnice před zlomkem se nachází záporné znaménko, které je velmi důležité. Protože nikde nezankl žádný proud, platí pro oba proudy Kirchhoffův zákon: „Součet proudu vstupního a výstupního je roven nule.“ [3] Tedy $I_1 + (-I_{zp}) = 0$. Podporuje to tvrzení, že invertující vstup má nulový potenciál, ačkoliv není uzemněn. Neinvertující vstup je uzemněn přímo, takže oba vstupy jsou na nulovém potenciálu. Vztahy vyjadřující činnost invertujícího zesilovače platí za předpokladu, že operační zesilovač pracuje s nekonečně velkým zesílením a nulovými vstupními proudy. V tomto případě se vstupní proud do invertujícího vstupu označuje I_- . Dále se předpokládá, že zesilovač má nulové diferenční (rozdílové) napětí U_d mezi vstupy. Na výstupu teče proud I_o jednak do zpětné vazby I_{zp} a také I_L zatěžovacím odporem R_L k zemi.

Platí, že $I_o = I_{zp} + I_L$.

Z dříve vyvozených vztahů se může odvodit rovnice zesilovače, která platí jen pro ideální zesilovač.

$$U_o = -\frac{R_{zp}}{R_1} \cdot U_1 \quad (5)$$

U_o je výstupní napětí, U_1 je vstupní napětí, R_{zp} je odpor ve zpětné vazbě, R_1 je vstupní odpor

Plyne z ní, že výstupní napětí U_0 je přímo úměrné vstupnímu napětí U_1 a zpětnovazebnímu odporu R_{zp} . Nepřímo úměrné je vstupnímu odporu R_1 . Čím větší bude zpětnovazební odpor a čím menší vstupní odpor, tím větší zesílení na výstupu. Záporné znaménko na pravé straně znamená, že zvětšující se kladné napětí na invertujícím vstupu vyvolá zvětšující se záporné napětí na výstupu. Přivede-li se na vstup střídavý signál, pak signál na výstupu je posunut o 180° . Tato obrácená inverzní funkce dala jméno zesilovači.

Fázový posuv je znám i u tranzistoru. Operační zesilovač se od tranzistoru kromě jiného liší tím, že je souměrný, a to jak z hlediska vstupu, tak i výstupu. Znamená to, že na vstupu může pracovat s napětím jak kladným, tak i záporným. Proto se i na výstupu může naměřit kladné i záporné hodnoty napětí. Bez vstupního napětí je však na výstupu nula. To vše u tranzistoru není možné. Buď jsou naměřeny jenom kladné hodnoty - u vodivosti NPN, nebo jenom záporné - u vodivosti PNP. Tranzistor NPN nereaguje na vstupní záporné napětí, tranzistor PNP nereaguje na vstupní kladné napětí. Také zesilovací činitel, známý u tranzistoru, operační zesilovač nezná, jelikož celkové zesílení v obvodu vůbec nezáleží na zesilovacích schopnostech operačního zesilovače. Tato vlastnost je příznivá k výměně obvodu, je-li to zapotřebí, za jiný, aniž by se jakkoliv změnila velikost zesílení. U tranzistoru naopak jakákoliv výměna bez následné úpravy, přinejmenším bez nastavení pracovního bodu, znamená jinou velikost zesílení, případně nesprávnou funkci obvodu.

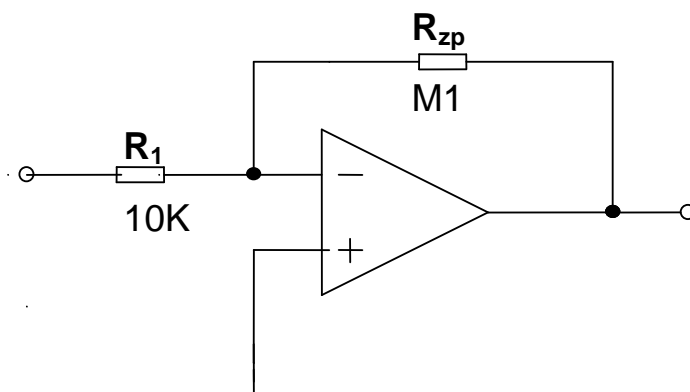
Vlastnosti vstupů operačního zesilovače:

- Invertující vstup: Má vliv na zesílení prostřednictvím vstupního a zpětnovazebního rezistoru. Na obr. 5 a) je příklad zapojení invertujícího zesilovače, který má zesílení $A = 10$, což znamená, že vstupní signál se desetkrát zesiluje. Zlomek z předchozího vzorce tento poměr zesílení jasně dokladuje:

$$\frac{R_{zp}}{R_1} = \frac{100000}{10000} = \frac{10}{1} = 10 \quad (6)$$

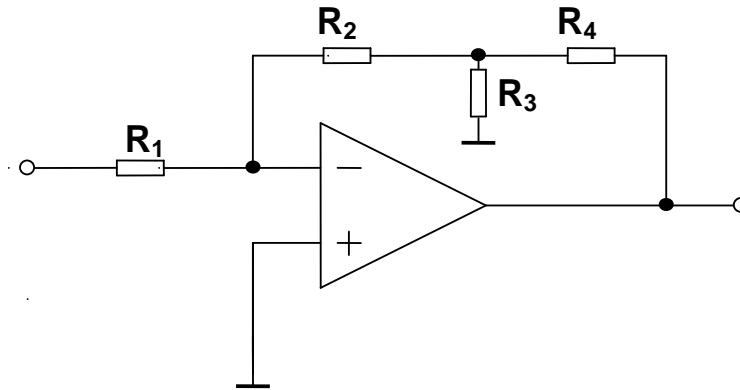
Výpočet platí pro ideální zesilovač. Ve skutečnosti tomu bude přibližně stejně. Pokud se vezme v úvahu skutečné zesílení operačního zesilovače 741, pak se uvedenými hodnotami odporů může dopočítat k číslu o málo menšímu, tj. $A = 9,9$. V porovnání s předchozí hodnotou zesílení je to chyba nepatrná, přibližně 1%. Tato chyba je velice malá. Další chybu může zatížit výpočet obvykle neznámá hodnota vnitřního odporu zdroje vstupního signálu. Nepříznivě se však uplatní pouze v případě, že zdroj signálu se bude vyznačovat velkým vnitřním odporem.

a)



Obr. 5 a) Invertující zesilovač se zesílením $A = 10$.

b)



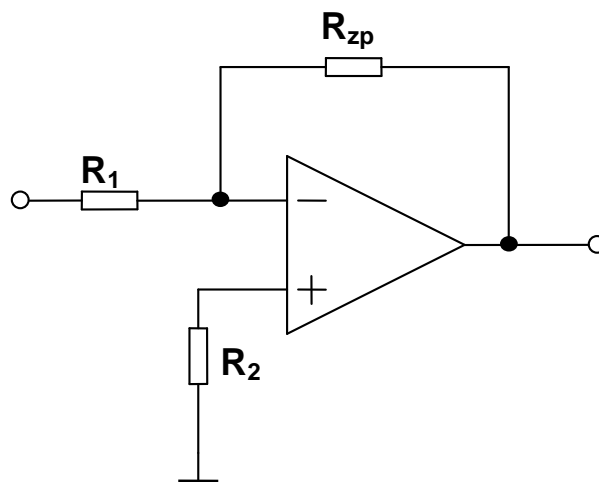
Obr. 5 b) Invertující zesilovač s T- článkem ve zpětné vazbě, nahrazující příliš velký zpětnovazební odpor R_{zp} . Platí, že R_3 musí být mnohem menší než R_2 .

- Neinvertující vstup: Problémová je kompenzace tj. vyrovnání vstupních proudů, které by mohly být v zapojení nevhodné. Problém by měl být vyřešen vložením rezistoru, který proudy obou vstupů vyrovná na stejnou úroveň. Na obr. 6 a) přibyl k zapojení invertujícího zesilovače rezistor R_2 , zařazený tentokrát v neinvertujícím vstupu. Jeho velikost se spočítá velikostí paralelně zapojených rezistorů R_1 a R_{zp} podle vzorce:

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot R_{zp}}{R_1 + R_{zp}} \quad (7)$$

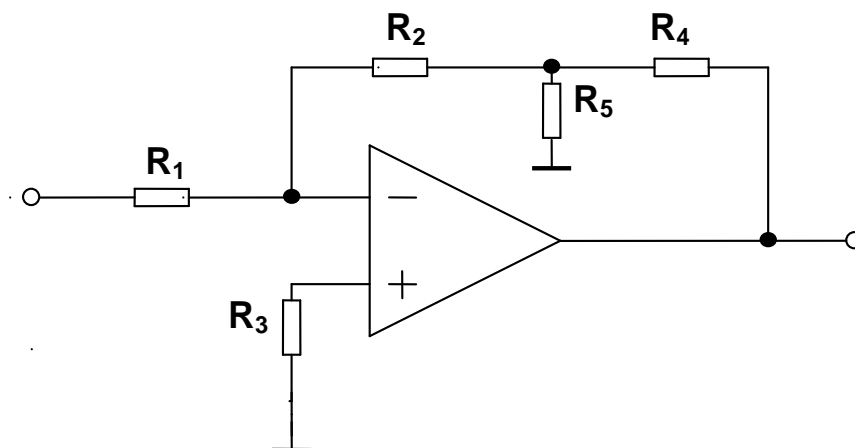
Při paralelním spojení je výsledný rezistor menší než nejmenší rezistor z dvojice. Menší je rezistor R_1 než zpětnovazební R_{zp} . Kompenzační rezistor R_2 bude o málo menší než R_1 a zpravidla se od něho nebude příliš lišit. Na celkové funkci zesilovače se R_2 jinak neuplatní. Pokud je ve zpětné vazbě pouze jeden rezistor, výpočet je jednoduchý. Složitější počítání bude v případě, kdy ve zpětné vazbě funguje několik rezistorů, jako např. podle obr. 5 b).

a)



Obr. 6 a) Kompenzace vstupní proudové nesymetrie pomocí kompenzačního rezistoru R_3 v neinvertujícím vstupu.

b)



Obr. 6 b) Kompenzace vstupní proudové nesymetrie při T-článku ve zpětné vazbě vyžaduje složitější výpočet. Kompenzační rezistor R_3 je vždy menší než vstupní rezistor R_1 .

2.4 Neinvertující zesilovač

Vstupní napětí přivedeno do neinvertujícího vstupu označeného ve značce (+). Druhý vstup, v tomto případě invertující (-), je připojen k odporovému děli-

či. Tvoří jej odpor R_1 a zpětnovazební odpor R_{zp} . V zapojení neinvertujícího zesilovače (obr. 7 a) by neměly být oproti invertujícímu zapojení rozdíly jeho vlastnostech. Rozdíly však nastávají v jeho vlastnostech. Zesílení sice zůstává beze změny, ale odlišnost je u polaritě napětí. Napětí vypočítá se podle vzorce:

$$U_0 = U_1 \cdot \left(1 + \frac{R_{zp}}{R_1}\right) \quad (8)$$

V tomto případě rozhoduje poměr zpětnovazebního rezistoru R_{zp} a rezistoru R_1 , avšak zvětšený o jednu. Rozdíl v zesílení je proto zanedbatelný. Důležité je, že vlivem sčítance 1 před zlomkem nemůže být hodnota v závorce nikdy menší než jedna, tedy záporná. Proto ani zesílení nemůže být menší než jedna, tj. bude vždy kladné.

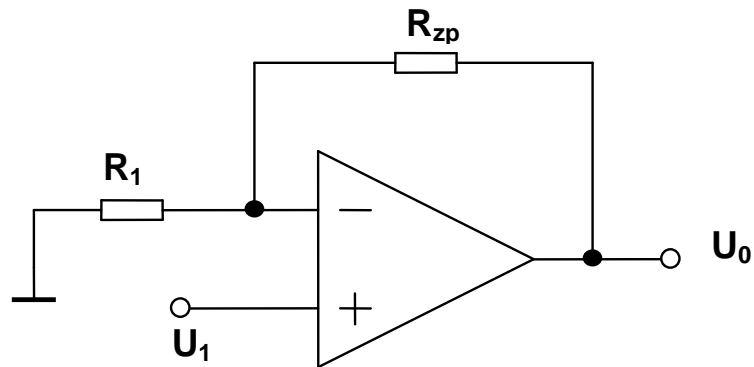
U neinvertujícího zesilovače je výstupní signál ve fázi se vstupním signálem. Zvětšuje-li se vstupní napětí do kladných hodnot, zvětšuje se ve stejném smyslu i výstupní napětí, tj. opět do kladných hodnot. Stejná závislost platí pro záporné napětí. [2]

Nejdůležitější vlastností neinvertujícího zesilovače je vysoký vstupní odpor. Ten je možné využít v případě připojení k měkkému zdroji napětí a nedochází tím k zatěžování zdroje. Neinvertující zesilovač, stejně jako invertující, je dokonale souměrný a pracuje se stejnosměrným i střídavým napětím. Protože oba vstupy jsou na úrovni vstupního signálu (nikoliv na nulové úrovni), je potřeba dbát na to, aby použitý operační zesilovač vykazoval co nejlepší potlačení souhlasného (součtového) signálu, označovaného jako CMR. Přičemž souhlasným napětím rozumíme část napětí, která je společná oběma vstupům. Projevuje se jako zdroj chybového napětí a zhoršuje především linearitu přenosu.

Krajní variantou neinvertujícího zesilovače je zapojení podle obr. 7 b), kde chybí oba rezistory R_1 i R_{zp} , takže výstup je přímo spojen s invertujícím vstupem.

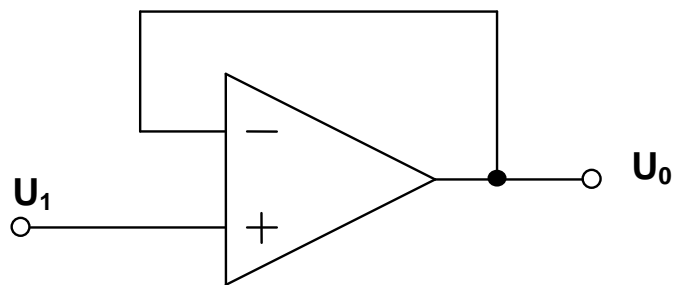
Vynecháme vysvětlení činnosti, ale zapamatujeme si, že takové zapojení slouží jako impedanční člen mezi dvěma obvody.

a)



Obr. 7 a) *U* neinvertujícího zesilovače se vstupní napětí přivádí do neinvertujícího vstupu.

b)



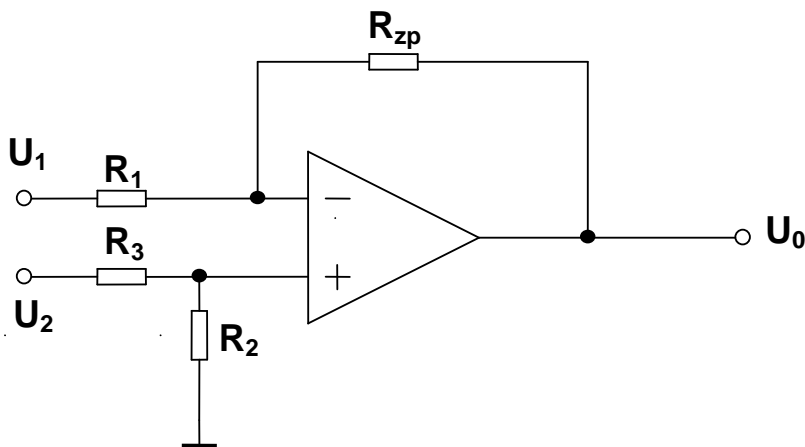
Obr. 7 b) *Neinvertující* zesilovač jako impedanční převodník.

Má za úkol oddělit předchozí obvod od následujícího, aby první obvod nebyl zatěžován. Přiváděné napětí se nezesiluje, zesílení impedančního členu je rovno jedné. Podstatné však je, že takové zapojení vykazuje vstupní odpor řádově desítky megaohmů a výstupní odpor prakticky nulový. Proto impedanční člen (impedanční převodník) nalezneme za obvody, které nesnesou jakékoliv i sebe-nepatrnější zatížení. Běžně se připojuje k výstupu různých generátorů, aby následující obvody nezpůsobily zkreslení průběhu signálu a nebyly příčinou nestability vlivem připojené zátěže.

3. Diferenční (rozdílový) zesilovač

V měřicí a regulační technice se osvědčilo jiné zapojení operačního zesilovače. Nazývá se diferenční nebo rozdílový zesilovač. Má za úkol sledovat dva signály zpravidla s malým rozdílem napěťové úrovně. Dvě málo odlišná napětí se přivádějí k oběma vstupům operačního zesilovače a změnou napětí na výstupu se vyhodnocuje jejich rozdílná úroveň. Obvyklé zapojení diferenčního zesilovače vidíte na obr. 8. Můžeme na něj pohlížet tak, že invertující zesilovač zesiluje napětí U_1 , zatímco neinvertující zesilovač zesiluje U_2 . Je tedy zřejmé, že napětí U_2 v neinvertujícím vstupu se musí zmenšit odporovým děličem R_3/R_2 , aby zesílení obou větví bylo stejné.

Má-li diferenční zesilovač zesilovat skutečně jen rozdílové napětí, musí se dodržet následující podmínka, vyjádřená úměrou



Obr. 8 Základní zapojení diferenčního zesilovače.

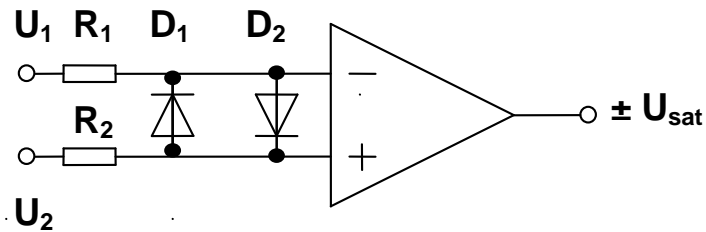
Znamená to, že dvojice rezistorů R_2 a R_3 musí být ve stejném poměru jako rezistory R_{zp} a R_1 . Jinak situaci zkomplikuje souhlasný signál, který může výsledek zcela znehodnotit. Velmi záleží na tom, aby se použily stejné odpory s co největší přesností. Výstupní napětí U_a . Vyjadřuje vztah:

$$U_0 = \frac{R_{zp}}{R_1} \cdot (U_2 - U_1) \quad (9)$$

Rovnice platí pro ideální zesilovač, ale ve skutečném zapojení se příliš neliší. V podstatě potvrzuje, že rozdíl přivedených napětí se násobí poměrem, zlomkem, určujícím velikost zesílení. V praxi se nepříznivě uplatňují také výstupní odpory zdrojů napětí U_1 a U_2 , přičemž hodnota odporů zpravidla nebývá známá a navíc nebývá stejná..

4. Operační zesilovač bez zpětné vazby

Operační zesilovač bude bez zpětné vazby fungovat tak, že jeho obrovské zesílení nebude ničím omezeno a projeví se naplno. Stačí zcela nepatrné napětí na vstupu a výstup zesilovače se dostane do saturace. Přitom u operačního zesilovače je na výstupu maximální výstupní napětí. Není ovšem známo, jestli se otevřel do kladných nebo záporných hodnot. Ve skutečnosti je možné obojí. Rozhodující je, který vstup jej otevřel, neboli na kterém vstupu bylo momentálně vyšší napětí a jaká byla polarita napětí. Přitom rozdíl obou napětí může být nepatrný, často řádově milivolty. Na výstupu se pak zjišťuje kladná nebo záporná saturace. Zapojení, které zmíněným způsobem porovnává dvě napětí, se nazývá komparátor. Pracuje v obvodech s pomalu se měnícími průběhy napětí. Jako příklad typického zapojení s operačním zesilovačem poslouží obr. 9. Diody zapojené proti sobě (antiparalelně) mezi oběma vstupy omezují jak kladné tak i záporné vstupní napětí. Nepřesáhne proto prahové napětí diody, tj. maximálně 0,7 V.

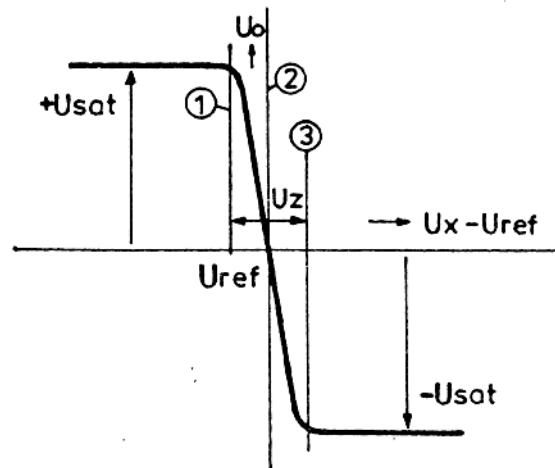


Obr. 9 Komparátor s operačním zesilovačem. Na výstupu je kladné nebo záporné saturační napětí.

Při větších vstupních napětí se diody otevřou a zkratují napětí přesahující zmíněnou hodnotu. Je to účelné, protože na vstupech se porovnává napětí obvykle o několik řádů nižší. Zapojení v praxi: Na vstupy se přivádí dvě různá napětí. Neznámé napětí U_x , které komparátor hlídá, tj. porovnává s jiným známým napětím, tzv. referenčním. To se stanovuje podle potřeby. Pomocí tohoto referenčního nebo také prahového napětí operační zesilovač zjišťuje, jestli neznámé napětí je větší nebo menší než referenční. Existují tedy současně dvě vstupní a jedno výstupní napětí. Výstupní napětí se nachází v jedné ze dvou stabilních úrovní: kladné nebo záporné saturaci. Přičemž velikost výstupního napětí se nemění s velikostí vstupního napětí. [5]

Na neinvertující vstup se přivede malé napětí, takže $U_{ref} = + 0,1 \text{ V}$. Toto napětí je stálé a nemění se. Na invertující vstup pomalu roste napětí, ale je dosud menší než referenční. Proto se uplatňuje větší hodnota referenčního napětí. Protože toto převládající napětí je na neinvertujícím vstupu, je výstupní napětí kladné, stejně jako vstupní napětí. V okamžiku, kdy napětí U_x dostoupí na úroveň referenčního napětí, nastává na okamžik přechodný stav. Pak již rozhoduje invertující vstup. Na něm se nepatrně zvýšilo kladné napětí a vyvolalo reakci invertujícího zesilovače: opačné napětí na výstupu, což znamená změnu polarit výstupního napětí. Na výstupu se objevuje záporné napětí, tj. $-U_{sat}$. Činnost komparátoru se tedy projevuje tím, že se "překlápí" a na výstupu se mění $+U_{sat}$ na $-U_{sat}$. V jiném zapojení to však může být i obráceně.

Může vzniknout myšlenka, jak velké hodnoty je třeba k tomu, aby se po vyrovnání obou napětí na vstupech změnilo výstupní napětí v opačné. Říká se tomu rozlišovací schopnost komparátoru.



Obr. 10 Převodová charakteristika komparátoru. Napětí U_z představuje změnu vstupního napětí, potřebnou k překlopení komparátoru [2].

Rozlišovací schopnost neboli nejmenší rozdíl mezi oběma napětími, které komparátor registruje, názorně ukazuje graf zvaný převodová charakteristika komparátoru (obr. 10). Z něho je patrné, jak probíhá změna $+U_{sat}$ na $-U_{sat}$ vztaženo k vodorovné ose, která představuje vstupní napětí U_x rostoucí ve směru šipky. Výstupní napětí -momentálně v podobě kladného saturačního napětí -se v bodě 1 začíná zmenšovat, v bodě 2 je na nulové úrovni a v bodě 3 se dostává znovu na plné saturační napětí, i když opačné polarity. Důležitý je úsek mezi body 1 až 3, označený v grafu jako U_z . Ten znázorňuje změnu vstupního napětí, registrovanou od velikosti referenčního napětí k nepatrně vyšší hodnotě, na kterou dostoupilo neznámé napětí U_x . Jinak řečeno, představuje nejmenší rozdíl vstupních napětí, který rozhoduje o změně saturace. Velikost U_z určuje strmost převodové charakteristiky komparátoru. Čím je U_z menší, tím více se charakteristika podobá obdélníkovému průběhu. Ovlivňuje ji velikost zesílení operačního zesilovače. Čím

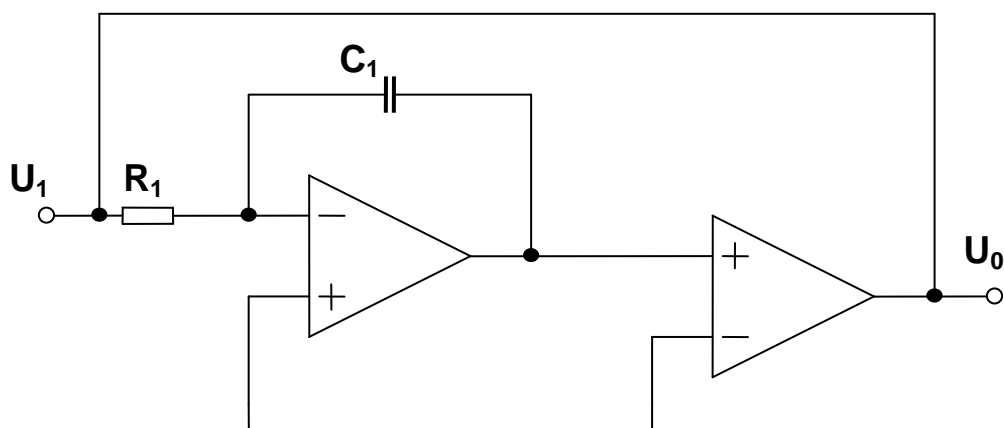
větší zesílení, tím menší změna postačí k rychlému překlopení. Uplatňuje se přitom i teplotní drift, šum, případně šíře přenášeného pásma.

5. Integrátor a generátor funkcí

Integrátor se na první pohled liší od dosavadních zapojení, a to v obvodu zpětné vazby. Místo rezistoru se ve zpětné vazbě nachází kondenzátor (obr. 11 a). Vyznačuje se postupným nabíjením, úměrně k velikosti vstupního proudu. Proud je závislý, stejně jako v předchozích případech, na velikosti vstupního napětí a rezistoru R_1 . Rychlost nabíjení se řídí i kapacitou kondenzátoru. Čím je kapacita větší, tím delší čas potrvá než se nabije na plné napětí přicházející na invertující vstup.

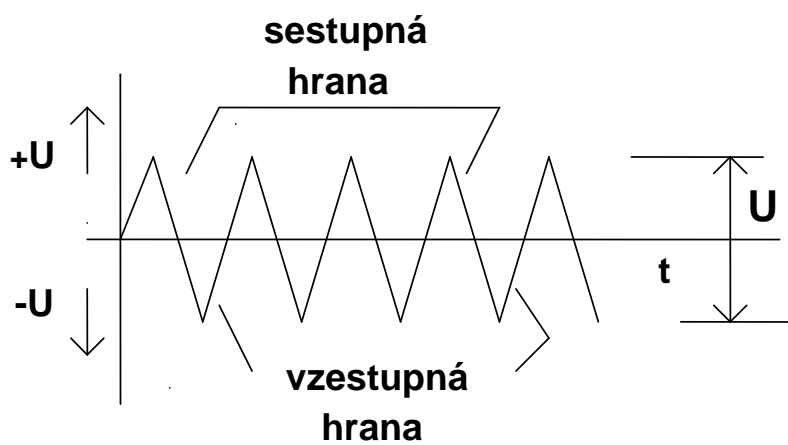
Integrátor spolu s komparátorem vyrábějí kmity, které jsou na výstupu komparátoru trojúhelníkového průběhu. U trojúhelníkového průběhu napětí rozlišujeme vzestupnou a sestupnou hranu (obr. 11 b). Vzestupná hrana odpovídá stoupajícímu napětí, zatímco sestupná hrana klesajícímu napětí. V daném případě se průběh nad osou pohybuje v oblasti kladných hodnot napětí, pod osou v oblasti záporného napětí. Napětíový rozdíl mezi vrcholy trojúhelníkového průběhu nad osou a pod osou nazýváme mezi vrcholovou hodnotou napětí a značíme „ u s trojúhelníkem“. Čteme „ u -delta“. (Index „delta“ se někdy vkládá před označení veličiny, v tom případě by se psalo „delta u “). Zmíněná vlastnost integrátoru se v plné míře využije v kombinovaném obvodu zvaném generátor funkcí.

a)



Obr. 11 a) Zapojení integrátoru s operačním zesilovačem. V obvodu zpětné vazby je integrační kondenzátor.

b)



Obr. 11 b) Trojúhelníkový průběh napětí na výstupu komparátoru.

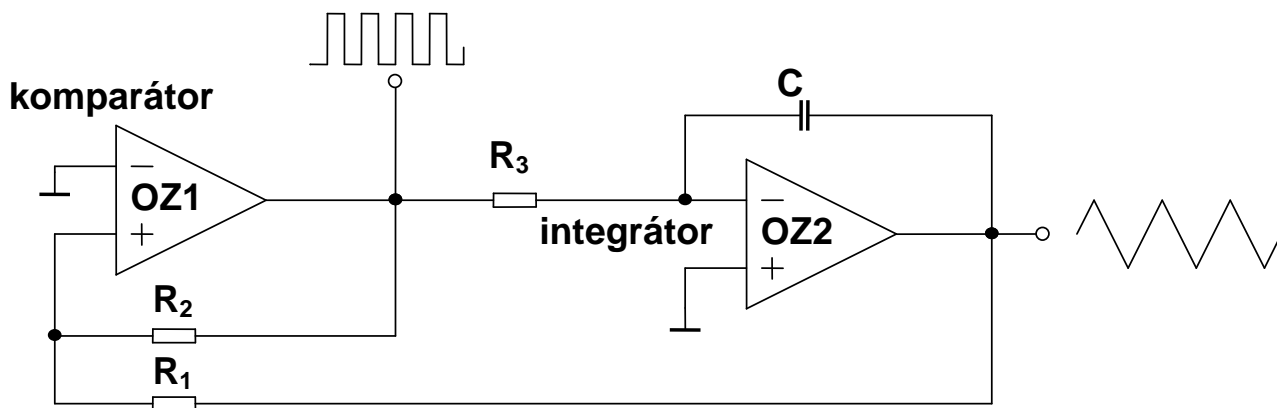
5.1 Generátor funkcí

Generátor dokáže generovat neboli vyrábět kmity. Mohou mít různý průběh, ale nejčastěji se jedná o obdélníkový nebo trojúhelníkový průběh. Dokáže kmitat ve velkém rozsahu frekvencí. Počínaje kmity značně pomalými, s frekvencí řádově desetiny Hertz až po vysoké frekvence, řádově mega Hertz. Takový rozsah kmitání jiné druhy generátorů nedokáží uskutečnit nebo jen s obtížemi.

Generátor funkcí se v nejjednodušším případě skládá ze dvou částí a na každé se účastní operační zesilovač. Jedná se o komparátor, na jehož výstupu je obdélníkový průběh napětí a o integrátor, který vyrábí kmity s trojúhelníkovým průběhem (obr. 12). Frekvenci kmitů určuje RC-člen složený z rezistoru R_3 a kondenzátoru C . Doba jednoho kmitu neboli perioda T se zjistí podle vztahu:

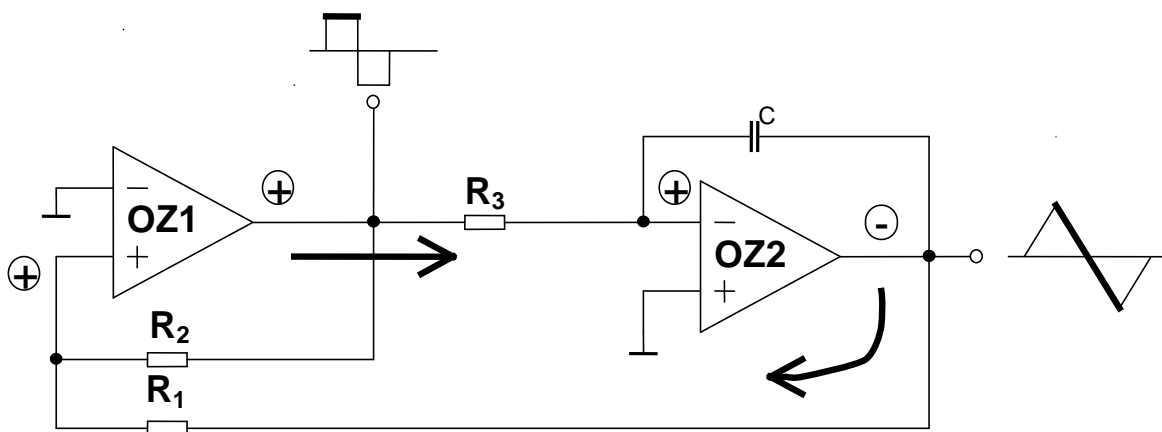
$$T = 4 R_3 C \frac{R_1}{R_2} \quad (10)$$

Ze vzorce plyne, že čím je větší odpor a čím větší kapacita, tím delší je doba jednoho kmitu. Zmenšováním hodnot se frekvence kmitů zvyšuje. Rezistory R_1, R_2 zajišťují bezchybnou činnost generátoru.

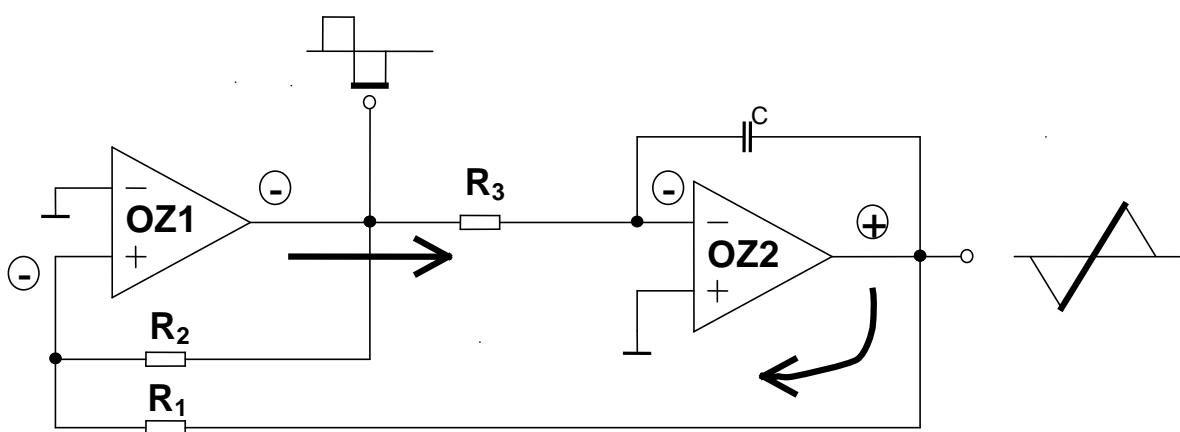


Obr. 12 Základní zapojení generátoru funkcí, složeného z integrátoru a komparátoru.

Komparátor se nejčastěji zapojuje jako Schmitův klopný obvod. Vyznačuje se kladnou zpětnou vazbou zavedenou do neinvertujícího vstupu. Pro názornost, jak probíhají periodické děje v generátoru funkcí, jsou rozloženy průběhy napětí na vstupech a výstupech operačních zesilovačů do dvou fází. Veškerá napětí v první fázi činnosti, tj. v první půlperiodě, ukazuje obr. 13. Zde je patrné, že se vychází ze situace, kdy na výstupu komparátoru je kladné napětí. To se zpětnovazebním rezistorem R_2 dostává na neinvertující vstup a tím podporuje stabilní stav saturace. Z výstupu komparátoru však proniká kladné napětí také do invertujícího vstupu integrátoru přes rezistor R_3 . Protože se jedná o invertující vstup, musí se očekávat opačné napětí na výstupu. Na výstupu původní napětí klesá a postupně -lineárně - nabývá opačných hodnot, momentálně záporných. Vzniká tak trojúhelníkový průběh napětí. Klesajícímu původnímu napětí, tj. růstu záporného napětí, odpovídá sestupná hrana.



Obr. 13 Činnost generátoru funkcí v první půlperiodě se zakreslenými úrovněmi a výstupními průběhy – značeny tučně.



Obr. 14 Činnost generátoru funkcí v druhé půlperiodě - výstupními průběhy značeny tučně.

Toto narůstající záporné napětí se dostává také přes rezistor R_1 na neinvertující vstup komparátoru, kde je dosud kladné napětí. To je postupně vytlačováno až se obě napětí vyrovnají. V okamžiku, kdy záporné napětí ještě nepatrně stoupne, nastává změna. Záporné napětí na neinvertujícím vstupu komparátoru naráz změní polaritu výstupního napětí. Na výstupu se objeví záporné tj. souhlasné napětí, jak to přísluší funkci neinvertujícího vstupu. Komparátor se překlopil.

Generátor funkcí pokračuje ve své činnosti. Záporné napětí z komparátoru přichází na vstup integrátoru. Invertující vstup se zachová podle očekávání a na výstupu integrátoru zjistíme opačnou odezvu, tj. zmenšování záporného napětí. Této druhé fázi činnosti odpovídá situace zakreslená na obr. 14. Na výstupu integrátoru je tentokrát náběžná hrana trojúhelníkového průběhu. Děj pokračuje dále a vše se znovu opakuje.

Nárůst i pokles napětí na výstupu integrátoru se řídí velikostí rezistoru R_3 a kapacitou kondenzátoru C ve zpětné vazbě. Kondenzátor se střídavě nabíjí a vybíjí, a to zcela rovnoměrně, lineárně. Rychlost změny závisí na RC členu (R_3, C), zatímco amplitudu výstupního napětí určuje poměr odporů R_1 a R_2 . Mezi- vrcholová hodnota napětí trojúhelníkového průběhu závisí proto jak na napájecím napětí, tak i na poměru odporů R_1/R_2 . Vypočítá se podle vztahu:

$$\delta u = 2U_{sat} \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (11)$$

Změnou jednoho z těchto odporů se řídí amplituda napětí, ale musí být přitom dodržena podmínka $R_1 < R_2$. Tímto poměrem se zaručí, že se integrátor nedostane do saturace. Jinak řečeno, při dodržení této podmínky mezní výstupní napětí integrátoru dosáhnou včas překlopení komparátoru. Na obr. 13 a 14 šipky znázorňují směr probíhajících změn v obvodu. Na výstupu komparátoru i integrátoru se zjišťuje pravidelný signál s charakteristickým průběhem a stálým kmitočtem. Tučně je tu značena ta část průběhu, která probíhá v dané půlperiodě.

6. Souhrn o operačních zesilovačích

- * Při symetrickém napájení: nulovému napětí na vstupu odpovídá nulové napětí na výstupu. .
- * Při nesymetrickém napájení: nulovému vstupnímu napětí odpovídá na výstupu poloviční napětí zdroje.
- * Vstupní napěťová (někdy i proudová) nesymetrie se koriguje nejčastěji přivedením malého napětí záporné nebo kladné polarity mezi piny 1-5.
- * Vstupní proudová ne symetrie vyžaduje korekci kompenzačním rezistorem v neinvertujícím vstupu, a to takové hodnoty, která odpovídá paralelně spojeným rezistorům v druhém vstupu.
- * Na invertující nebo neinvertující vstup je možné přivést napětí jak kladné tak i záporné polarity. Operační zesilovač na obojí napětí reaguje a na výstupu se objeví kladné nebo záporné napětí podle vlastnosti vstupu (při symetrickém napájení):
- * Jestliže se nachází nebo převažuje napětí na invertujícím vstupu, výstup se vyznačuje napětím fázově posunutým o 180° , tj. s opačnou polaritou.
- * Jestliže se nachází nebo převažuje napětí na neinvertujícím vstupu, na výstupu je napětí ve fázi se vstupním napětím, tj. se stejnou polaritou.
- * Jestliže se k oběma vstupům přivádějí dvě rozdílná napětí (diferenční vstup), operační zesilovač zesiluje pouze rozdíl vstupních napětí.
- * O velikosti zesílení rozhoduje výhradně poměr dvou rezistorů (impedancí) - zpětnovazebního a vstupního.
- * Zpětná vazba z výstupu do invertujícího vstupu je záporná, do neinvertujícího vstupu kladná.
- * Na přenosu signálu operačním zesilovačem se nejčastěji podílejí zvenku připojené rezistory, ale stejná pravidla platí pro jakoukoliv jinou impedanci.
- * Vstupní odpor invertujícího zesilovače -s bipolární technologií - určuje odpor vstupního rezistoru: je malý. Neinvertující zesilovač vykazuje vysoký vstupní odpor.

- * Kmitočtová kompenzace je nastavena ve vnitřní struktuře operačního zesilovače nebo se zřídka nastavuje zvenku pomocí malé kapacity (pin 1-8).
- * Dvě nejdůležitější skupiny operačního zesilovače se liší vstupním zesilovacím dílem. Záleží na tom, jestli jsou na vstupu bipolární tranzistory nebo tranzistory řízené polem -FET.

Generátor s operačním zesilovačem – zhotovený modul jako cíl bakalářské práce

Generátory se často vyskytují jako integrované obvody. Se dvěma dvojitými operačními zesilovači a externími součástky byl vyroben jednoduchý funkční generátor. Generátor umožňuje generovat signály obdélníkového, trojúhelníkového a sinusového průběhu s frekvencí asi od 6 Hz do 7 kHz (je dáno rozptylem hodnot součástek).

Schéma generátoru je v příloze na obr. 1. Jádrem obvodu je operační zesilovač NJM 4580. Jedna polovina IC1B je zapojena jako integrátor, druhá, IC1A je zapojena jako komparátor. Kmitočet generátoru si můžeme ladit potenciometrem P_1 a dále je určen rezistorem R_4 a kondenzátorem C_2 . Z výstupu IC1A je odebírán signál s obdélníkovým průběhem, na výstupu IC1B je signál s trojúhelníkovým průběhem. U tohoto generátoru není k dispozici signál o sinusovém průběhu. Ten se musí vytvořit ze signálu s trojúhelníkovým průběhem různými tvarovači. V tomto případě je tvarovač tvořen diodami D_1 až D_4 spolu s rezistory R_6 až R_{10} , které jsou zapojeny ve zpětné vazbě operačního zesilovače IC2A. Generátor je napájen zdrojem napětí 9V.

Generátor je zhotoven na oboustranné desce plošných spojů o rozměrech (80 x 100) mm. Rozložení součástek je na obr.4., na obr.2. je obrazec desky spojů ze strany spojů a na obr.3. je obrazec desky spojů ze strany součástek. Proveďte optickou kontrolu desky a připojte se napájecí napětí 9V. Kontrola funkčnosti je nejlepší na osciloskopu. [6]

Základní informace o operačním zesilovači NJM 4580.

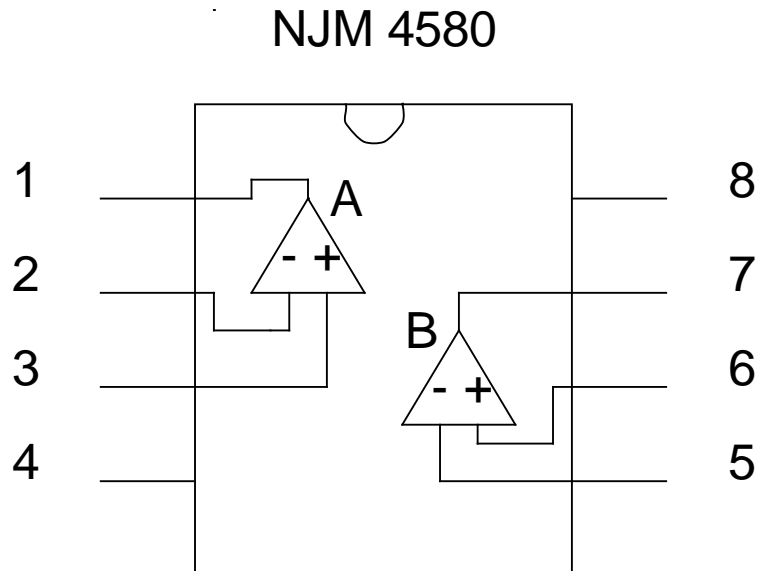
Všeobecný popis:

NJM 4580 je dvojitý operační zesilovač vytvořený pro zlepšení tónové clony, která je nejdůležitější pro audio techniku. Zesilovač má malý šum, zvýšenou šířku pásma, vysoký výstupní výkon s nízkým zkreslením a je vhodný nejen pro zvukové části audio předzesilovačů a aktivní filtry, ale také pro průmyslová měřicí zařízení. Je také vhodný pro sluchátkové zesilovače s vyšším výstupním

výkonem i pro mnohá další zařízení. Může být také použit v přenosných typech zesilovačů, obecně v zařízeních s nízkým napětím, která jsou založena na nízkém vstupním napětí zdroje. [7, 8]

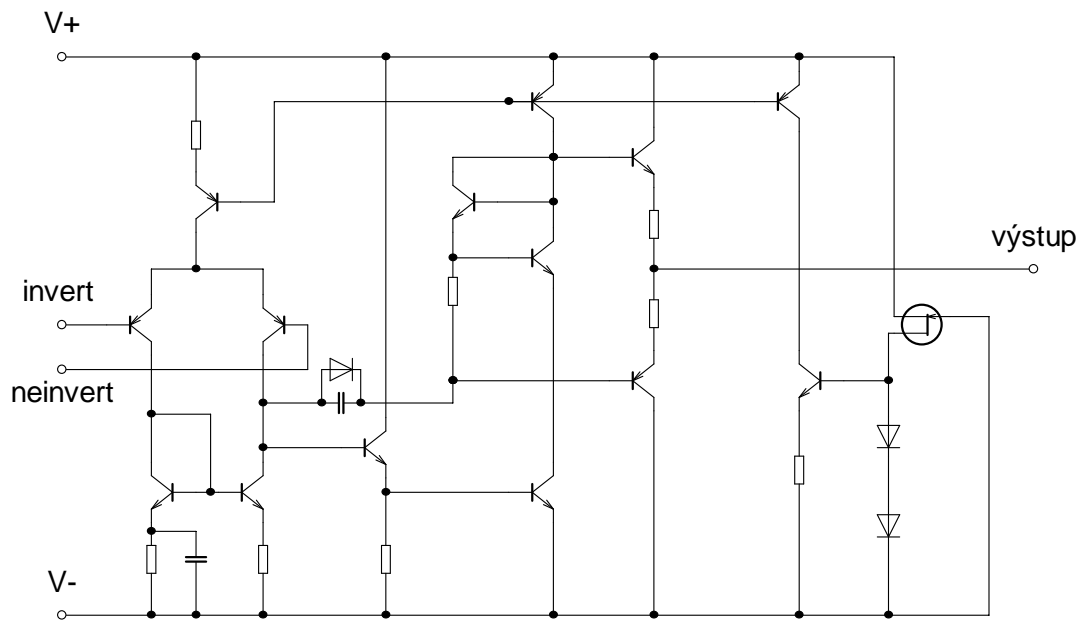
Znaky zesilovače:

- Pracovní napětí ($\pm 2V \sim \pm 18V$)
- Nízké vstupní šumivé napětí ($0,8\mu V$)
- Nízké zkreslení ($0,0005\%$)
- Rychlost přeběhu ($5V/\mu s$)
- Bipolární technologie
- Uspořádání vývodů:



Funkce vývodů:

1. A výstup
2. A invertující vstup
3. A neinvertující vstup
4. V -
5. B výstup
6. B invertující vstup
7. B neinvertující vstup
8. V +



Ekvivalentní zapojení 1/2 obvodu.

7. Závěr

Cílem této bakalářské práce byla realizace elektronického modulu- komparátoru a integračního zesilovače. Pro výuku elektroniky. V práci je navržena úloha s vhodným využitím sestaveného modulu.

Splňuje technické parametry a vlastnosti, které byly předem dohodnuty. Funkce modulu byla ověřena pomocí měření na osciloskopu.

Seznam použité literatury:

- [1] <http://fo.cuni.cz> (učební texty)

- [2] Rauner, K.: Elektronika (fyzikální a analogová část). Plzeň, Vydavatelství Západočeské university v Plzni, 2001.

- [3] Blahovec, A.: Elektrotechnika I. Praha, Intormatorium, 2000.

- [4] Malina, V.: Poznáváme elektroniku III. České Budějovice, Kopp, 1999.

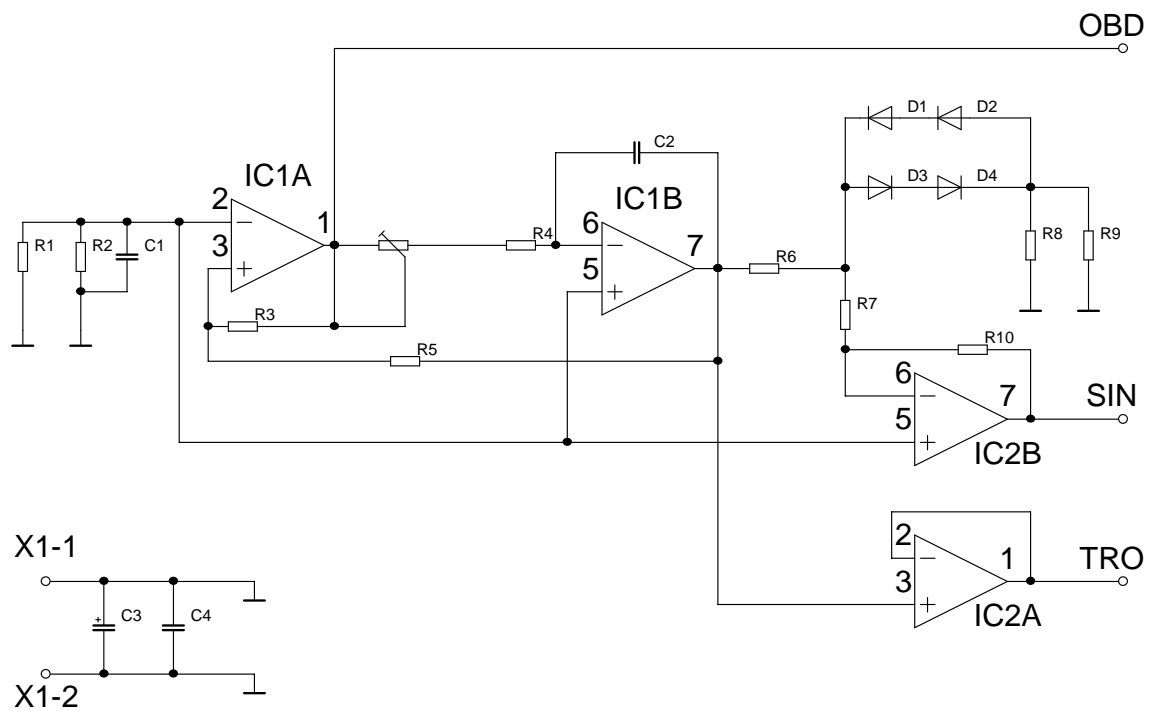
- [5] Punčochář, J.: Operační zesilovače, Praha, BEN, 1999, 4. vydání

- [6] <http://elektro-kon.ic.cz> (elektronické konstrukce)

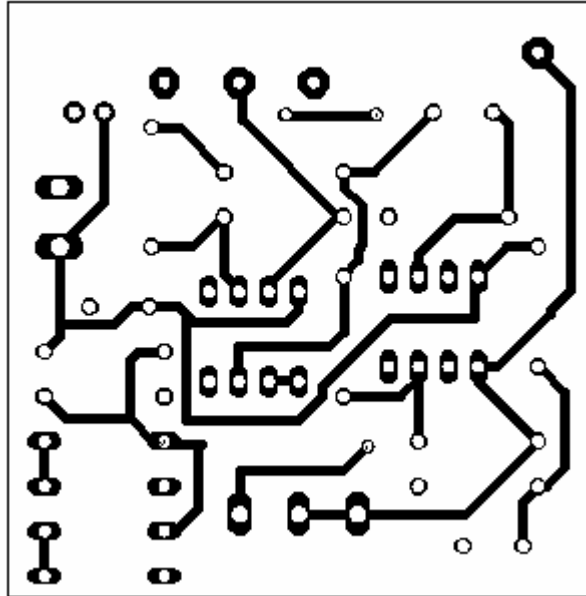
- [7] NJM 4580 D DATASHEET[®] katalogové listy

- [8] www.ezk.cz (elektronické součástky)

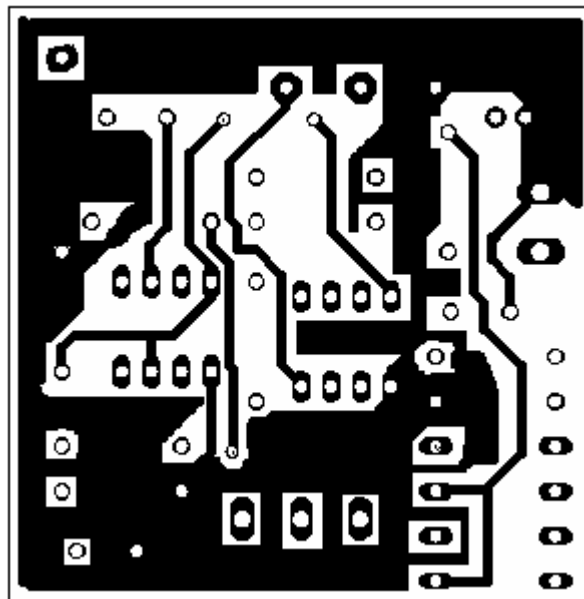
Přílohy



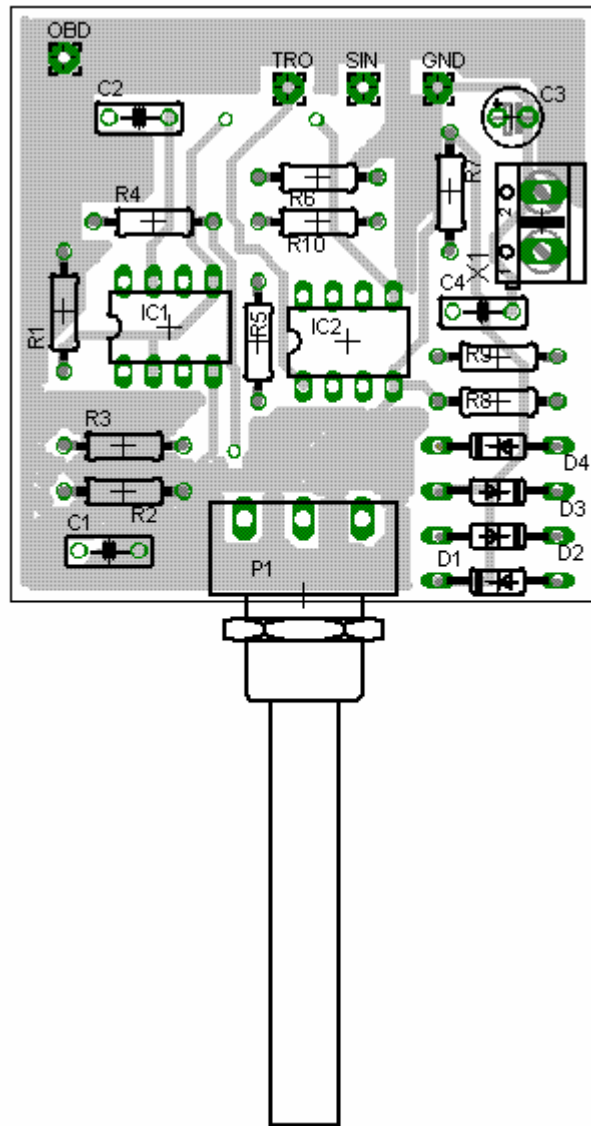
Obr. 15 Schéma zapojení generátoru tvarového signálu.



Obr. 16 Deska plošných spojů ze strany spojů.



Obr. 17 Deska plošných spojů ze strany součástek.



Obr. 18 Rozmístění součástek na desce.

Seznam součástek:

IC1, IC2 - NJM4580

D1 - D4 - 1N4148

C1, C2 - 47nF

C3 - 16 μ /16V

C4 - 100nF

R1 - 82k Ω

R2 - 100k Ω

R3 - 15k Ω

R4 - 560 Ω

R5 - 8k2

R6 - 10k Ω

R7 - 470k Ω

R8 - 1k Ω

R9 - 820 Ω

R10 - 1M Ω

P1 - 1M Ω

Oboustranná deska plošného spoje, zdířky pro napájení a výstupy.

Návrh jednoduché úlohy do praktika elektroniky.

Úkol:

Pomocí osciloskopu změřte výstupní signál tvarovače. Signál lze měnit pomocí potenciometru, dále pak záměnou rezistoru R4 a kondenzátoru C2. Vaším úkolem je navrhnout výchozí periodu, tu změřit osciloskopem, a od té měnit její rozsah na $\frac{1}{2} T$, $\frac{1}{3} T$, $\frac{1}{4} T$, $2 T$, $4 T$, atd. [6]

Hodnoty rezistorů a kondenzátorů zapisujte do tabulky, stejně tak periodu signálu T. Výstupem měření bude zpracovaný a odevzdaný protokol.

