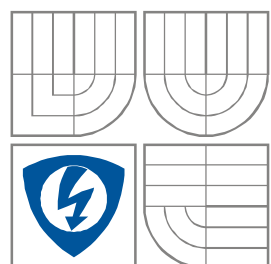


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

SYNCHRONNÍ DETEKCE MODULOVANÝCH OPTICKÝCH SIGNÁLŮ

SYNCHRONOUS DETECTION OF MODULATED OPTICAL SIGNALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

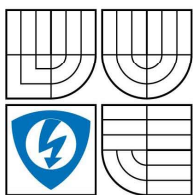
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Juraj Poliak

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Petr Drexler, Ph.D

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Juraj Poliak
Ročník: 3

ID: 78397
Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Synchronní detekce modulovaných optických signálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy synchronní detekce modulovaných signálů. Popište její principy a použití. Na základě získaných poznatků navrhnete obvodové řešení synchronního demodulátoru pro měření slabých optických signálů. Realizujte synchronní demodulátor signálu a ověřte jeho funkci a parametry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] JOHNSON, M. Photodetection and Measurement: Maximizing Performance in Optical Systems. New York: McGraw-Hill, 2003.

[2] Katalogový list AD630, firemní literatura Analog Devices [online]. Analog Devices [cit. 7. května 2008]. Dostupné na [www: http://www.analog.com/](http://www.analog.com/)

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 5.6.2009

Vedoucí práce: Ing. Petr Drexler, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

ABSTRAKT

Bakalárska práca pojednáva o vlastnostiach systému pre synchronnú detekciu slabých optických signálov. V práci budú rozobrané jednotlivé aspekty návrhu, ako aj jednotlivé časti systému. V závere bude navrhnutá celková schéma zapojenia systému, ktorá bude realizovaná a jej funkčnosť overená na optickom experimente.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Synchronná detekcia, fázový záves, posúvač fáze, modulovaný signál.

ABSTRACT

Bachelor's thesis deals with common features of synchronous detection system of modulated optical signals. Theoretical aspects of design as well as separate parts of system design will be discussed. In conclusion, the complete circuitry design will be presented, realized and his functionality will be tested on optical experiment.

KEYWORDS

Synchronous detection, phase locked loop, phase shifter, modulated signal.

POLIAK, J. *Synchronní detekce modulovaných optických signálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Drexler, Ph.D..

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému Synchronna detekcia modulovaných optických signálov som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Zb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia § 152 trestného zákona č. 140/1961 Zb. platných v Českej republike.

V Brne dňa 5. júna 2009

.....
podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Petrovi Drexlerovi, Ph.D za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovávaní mojej bakalárskej práce. Ďalej ďakujem firme Amtek, spol. s.r.o., Brno za poskytnutie testovacích vzoriek obvodu AD 630.

V Brne dňa 5. júna 2009

.....
PODPIS AUTORA

OBSAH

1.ÚVOD.....	8
2.SYNCHRÓNNA DETEKCIA	9
2.1. PRINCÍP	9
2.2. VOĽBA NOSNEJ FREKVENCIE	11
2.3. DEMODULÁCIA OBDĽŽNIKOVÝM SIGNÁLOM.....	12
2.4. VPLYV FÁZE	14
3. NÁVRH RIEŠENIA MERACIEHO SYSTÉMU	17
3.1. VÝCHODISKOVÝ STAV	17
3.2. NÁVRH.....	18
3.2.1. <i>Blok synchrónnej detekcie</i>	18
3.2.2. <i>Blok fázového posúvača</i>	23
3.3. CELKOVÁ SCHÉMA SYSTÉMU	28
4. NÁVRH DPS	30
4.1 ZOZNAM SÚČIASTOK	32
5. OŽIVENIE OBVODU.	34
6.NÁVRH EXPERIMENTU	38
6.1 FARADAYOV EFEKT	38
6.2 MERANIE SLABÝCH ZMIEN MAGNETICKÉHO POĽA	38
7.ZÁVER.....	41
8.BIBLIOGRAFIA.....	42
9.ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK.....	43

1.Úvod

V dnešnej dobe, kedy sa čoraz viac používajú rôzne optické zariadenia, stúpajú aj požiadavky na čoraz presnejšiu detekciu výstupov týchto zariadení v podobe optických signálov. Tieto signály, často pomerne slabej intenzity, sú vystavené pri prechode prostredím (vzduch, voda...) rôznym vplyvom, ktoré často krát znemožňujú prijatie tohto signálu v dostatočnej intenzite. Pod rôznymi vplyvmi zväčša rozumieme iné zdroje svetla a to hlavne osvetlenie v laboratóriách a prirodzené svetlo.

V laboratóriách nachádzame všemožné druhy osvetlenia, ktoré by sa mohli v našom prijímači objaviť ako rušenia na frekvenciách rovných násobkom 50 Hz. Obzvlášť silné sú rušenia na 50 Hz, 100 Hz a 150 Hz, pričom tieto rušenia majú pôvod v rozvodnej sieti a napájacích zariadeniach. Tieto vplyvy môžu byť však veľmi dobre potlačené, ak nie úplne eliminované vhodným elektrostatickým, prípadne feromagnetickým tienením prijímačov. Ďalej sú tu prítomné rušenia z blikajúcich obrazoviek televízorov a počítačov (25 až 120 Hz) a ich napájanie (15 až 150 kHz).

Navyše vždy prítomné rušenie z prirodzených svetelných zdrojov, a to hlavne slnečné svetlo (perióda 24 hodín), slnečné svetlo navyše modulované mrakmi (perióda rádovo v minútach).

Rušenia nemajú teoreticky žiadne konkrétne spektrálne rozloženie, avšak, ako by sme videli, v skutočnosti väčšina rušení, ktoré sa vyskytujú v laboratóriách so vzrastajúcou frekvenciou klesajú a to typicky až do 500 Hz.

Všetky tieto úvahy nútia k tomu, aby sa, pokiaľ to len je možné, merania optických signálov uskutočňovali za hranicou 500 Hz. A práve toto je úlohou modulácie. Synchronna modulácia vyniká navyše tým, že modulujeme aj demodulujeme tým istým signálom, čo má nesporne mnoho výhod, avšak prináša aj isté obmedzenia.

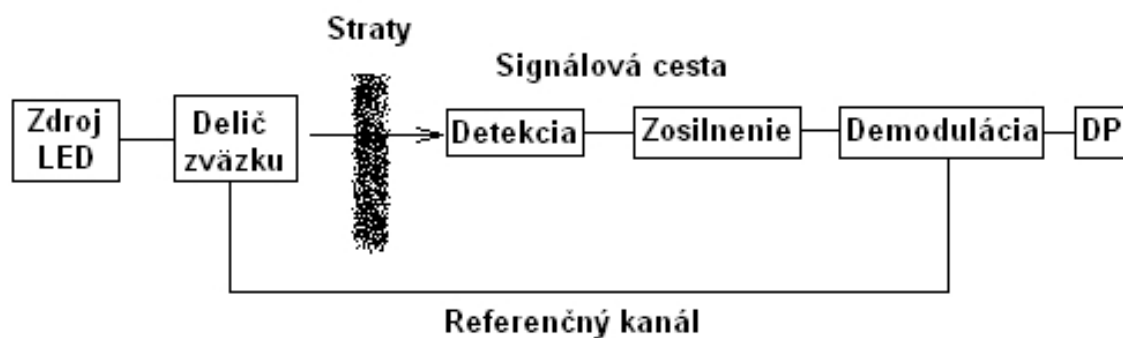
2. Synchronná detekcia

2.1. Princíp

Namiesto pracovania jednosmerne s optickým prijímačom pripojeným na voltmetr, je výhodné prijímať optický signál najprv modulovať, napríklad amplitúdovo, a ďalej sa pracuje už len s AM signálom. Situácia je jednoduchšia, pokiaľ uvažujeme iba jeden zdroj a tak môžeme použiť napr. LED diódu a k modulácii postačí pripojiť túto diódu ku generátoru signálu a obdĺžnikový signál bude efektívne modulovať optický výstup našej diódy. Pokiaľ je potrebná sínusová modulácia, mali by byť dióda napájaná jednosmerne približne polovičným maximálnym prúdom.

Detegovaný signál môžeme pozorovať na osciloskope, prípadne vhodným voltmetrom. Avšak tie nie sú najvhodnejšie na pozorovanie modulovaných signálov. K očakávaným výsledkom sa dá dopracovať použitím synchronnej detekcie.

Synchronná detekcia sa využíva pri malých zmenách intenzity zdroja a následné sledovanie zmeny výstupu. Taktiež sa dá použiť aj na meranie veľmi malých odporov, rádovo $10^{-6} \Omega$. Toto je veľmi mocný princíp a nie len v elektronike. Principiálne je synchronná detekcia zobrazená na obr.1 [1].



Obr.1: Realizačná schéma synchronnej detekcie.

Obrázok ukazuje zdroj optického signálu - LED diódu – ktorá môže byť riadená napríklad prúdovým generátorom, ktorého výstupom je harmonicky premenný optický signál, s frekvenciou f_{mod} . Signál ďalej prechádza prostredím, kedy pravdepodobne dôjde ku stratám a ovplyvneniu meranou veličinou a je ďalej detegovaný prijímačom tvoreným fotodiódou.

Detegovaný signál je však zmesou viacerých signálov. V prvom rade je to modulované svetlo LED diódy na vstupe, ďalej však aj jednosmerná zložka a drift použitého operačného zosilňovača a možno aj statického okolitého svetla. Ďalej tu sú prítomné iné striedavé zložky a v neposlednom rade aj už v úvode spomenuté rušivé signály.

Tento signál je privedený na vstup demodulátora, pred ktorý je ešte vhodné pripojiť kondenzátor na odstránenie jednosmerných a nízkofrekvenčných rušení. Ako referenčný signál je použitý signál z toho istého generátora harmonických signálov, aký sme použili na napájanie LED diódy na vstupe.

Po demodulácii je výsledný signál filtrovaný dolnopriepustným RC-filtrom. Ten sa chová ako integrátor. Preto táto časť obvodu rozdelí demodulovaný signál na harmonické zložky a integruje ho. Matematicky sa tento princíp synchronnej detekcie popisuje Fourierovou transformáciou (FT). Tento princíp sa používa na určenie amplitúdy zložky signálu prijatého signálu s konkrétnou frekvenciou.

Ak je prijatý signál $S(t)$ premenný v čase t s frekvenciou f , tak vlastne demoduláciu realizujeme integrál:

$$S_{\text{int}} = \int S(t) \sin(2\pi ft) dt . \quad (1)$$

Tak v rovnakom duchu zapojenie z obr.1 [1] určuje jednosmernú úroveň nášho prijatého signálu. Tak ak je signál približne harmonický a vo fáze s referenčným signálom, určuje priamo amplitúdu samotného signálu. Fázová podmienka je veľmi dôležitá, preto sa jej venujeme ďalej hlbšie.

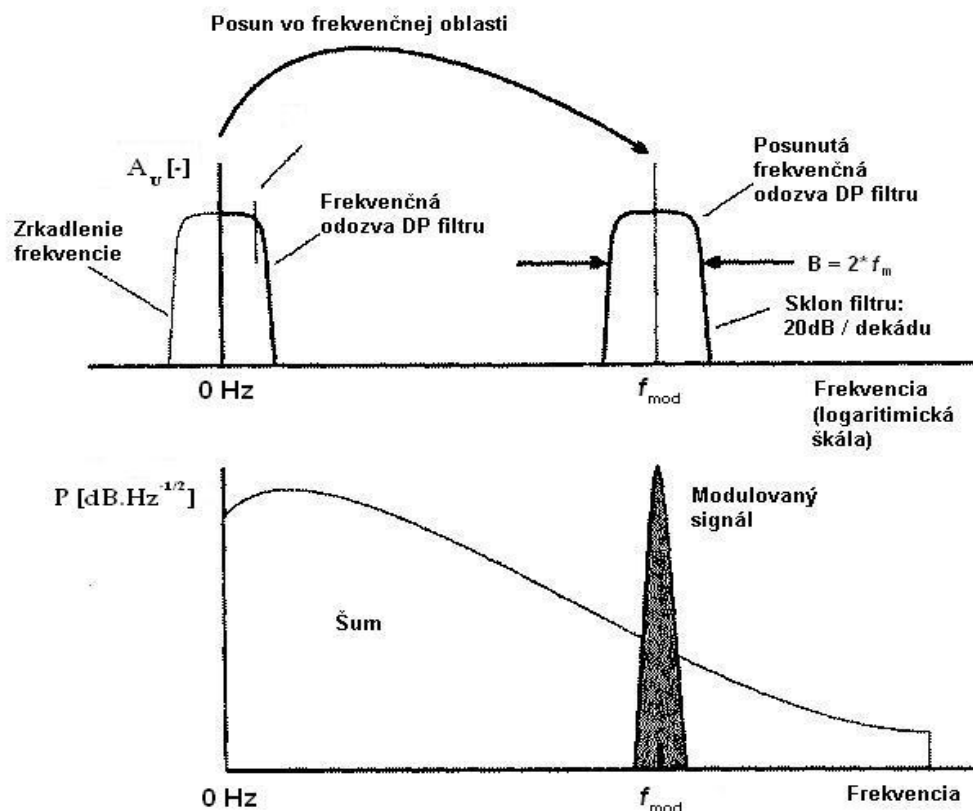
Vo frekvenčnej oblasti môžeme fungovanie synchronného detektoru popísať ako kmitočtový filter s medzným kmitočtom f_m . Tento kmitočet je potom daný vzťahom

$$f_m = \frac{1}{2\pi\tau} , \quad (2)$$

,kde τ je časová konštanta definovaná ako

$$\tau = R \cdot C . \quad (3)$$

Myslené ako jednopásmový dolnopriepustný filter s medznou frekvenciou rovnou f_m , ktorý sa však zrkadlí okolo nulovej frekvencie. Táto nulová frekvencia sa moduláciou presunie na frekvenciu modulačného signálu f_{mod} a vytvorí obojstrannú pásmovú prepust' centrovanú na f_{mod} so šírkou pásma B rovnou dvojnásobku modulačného kmitočtu f_m .



Obr.2: „Premena“ DP na PP centrovanú na f_{mod} v oblasti s nižšou hladinou šumu.

Z obr.2 [1] priamo plynie výhoda používania synchronných detektorov. Vytvorili sme tak kmitočtový filter centrováný presne na frekvenciu, kde sa očakáva užitočný signál, so šírkou pásma nastaviteľnou jednoducho voľbou hodnôt R a C . Filter však prepustí okrem užitočného signálu aj časť šumu a interferujúcich signálov obsiahnutých v jeho šírke pásma. Presun do vyšších frekvencií by však mal zabrániť najsilnejším rušeniam.

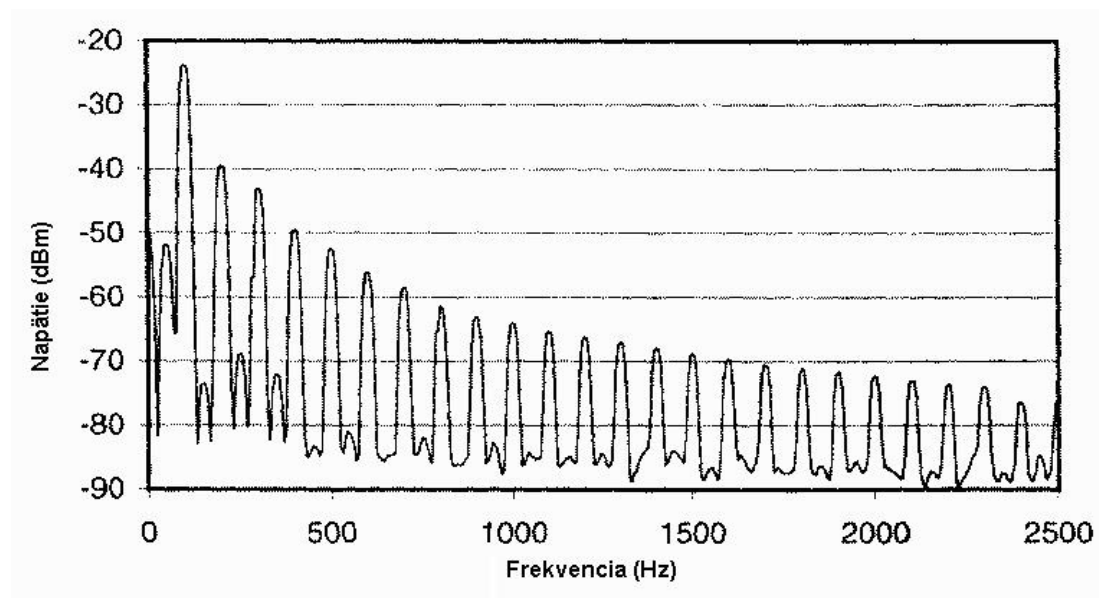
Z toho priamo vyplýva úvaha o zúžení pásma priepustnosti filteru nastavením väčších hodnôt časovej konštanty τ . V prípade voľby $R = 1\text{M}\Omega$ a $C = 1\mu\text{F}$ sa dosiahne časová konštanta $\tau = 1\text{s}$, resp. šírka pásma $B = \pm 0,16\text{Hz}$ nezávislá na frekvencii. Avšak vytvoriť kmitočtový filter so šírkou pásma $B = 0,16\text{ Hz}$ na $f_{\text{mod}} = 10\text{ kHz}$, je náročná úloha. Dosiadnutím úzkeho pásma filteru totiž so sebou prináša požiadavku na pomalé zmeny vstupného signálu.

2.2. Voľba nosnej frekvencie

Z úvah spomenutých v úvode projektu plynie záver že, pokiaľ je to možné, by sa mala voliť frekvencia vyššia než 500 Hz, kedy sú rušenia značne menšie, než na nižších kmitočtoch. Avšak voľba pracovného (modulačného) kmitočtu nie je ľubovoľná ani na vyšších kmitočtoch, nakoľko spektrum šumu nie je zanedbateľné ani na veľmi vysokých frekvenciách.

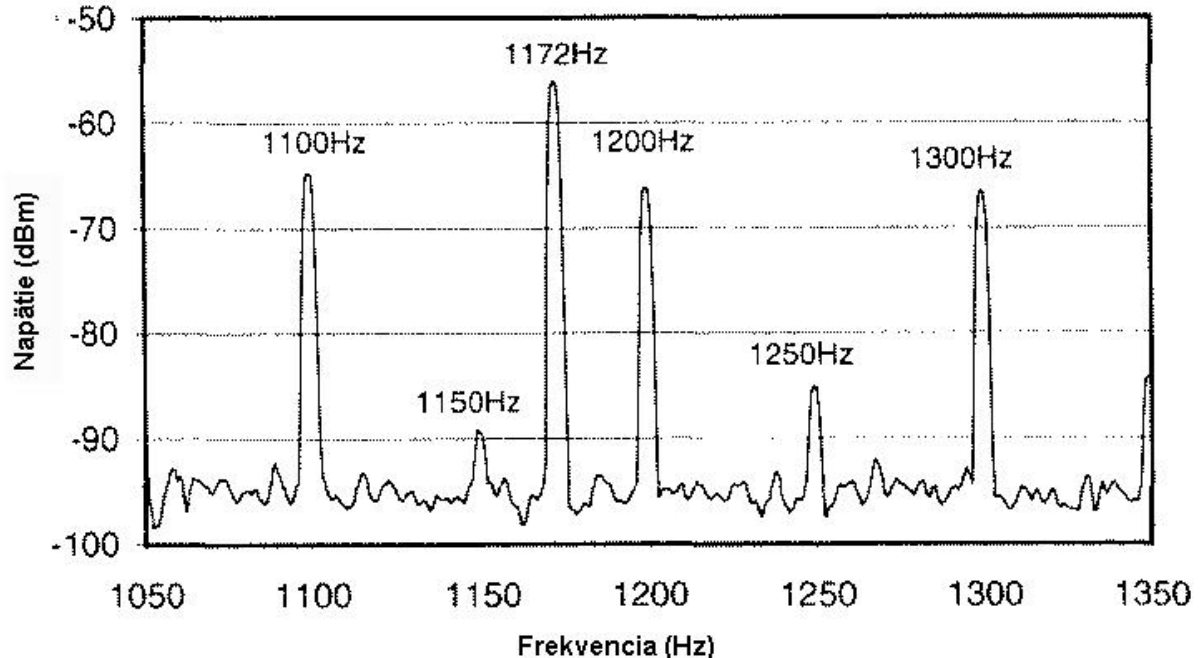
Jedným z nepríjemných a všadeprítomných zdrojov optického šumu je fluorescenčné osvetlenie používané vo väčšine laboratórií. Tieto zdroje môžu byť vážnejšie, než by sa na prvý pohľad mohlo zdať. Hoci sú tieto osvetlenia napájané viac, či menej harmonickým napätím s frekvenciou 50 Hz, rôzne procesy vedú k jeho skresleniu. Kmitočtové spektrum tak vykazuje prítomnosť relatívne silných harmonických 50 Hz, ktoré môže byť následne detekované až do niekoľkých kilohertzov.

Obr. 3 [1] ukazuje spektrálnu analýzu výstupu transimpedančného prijímača so šírkou pásma 10 kHz s interferujúcim fluorescenčným interiérovým osvetlením. Napriek optickej filtrácii (spôsobom, ktorý je pre nás irelevantným) sú stále zreteľné harmonické zložky 100 Hz aj za hranicou 2.5 kHz.



Obr.3: Spektrum fotodetektoru osvetleného 50 Hz fluorescenčným osvetlením v rozmedzí 0 až 2.5kHz.

V bežných podmienkach je často ťažké potlačiť tieto interferujúce harmonické zložky. Pri zhodnotení odstupu signálu od šumu (S/N) meraného systému, sa dá pozorovať, že tieto rušivé signály môžu byť tak zlé, ako prípadná vyššia úroveň šumu. V takom prípade je dôležité, aby sa modulovalo na správnej frekvencii. To môže znamenať presne medzi dvoma harmonickými zložkami 50 Hz.



Obr.4: Umiestnenie nosnej frekvencie (1172 Hz) medzi interferujúce harmonické zložky.

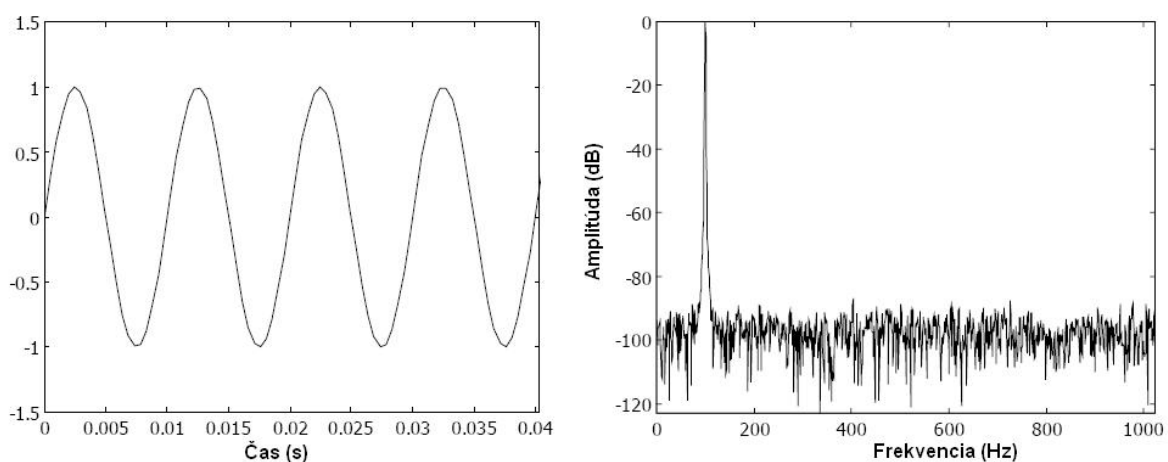
Na obr. 4 [1] je zobrazený detail spektrálnej analýzy zachycujúci frekvencie v rozmedzí 1050 ÷ 1350 Hz. 1100, 1200 a 1300 Hz zložky osvetlenia, ako aj zvyšky zložiek 50 Hz sú neprehliadnuteľné. Modulovaný signál tak bol zámerné umiestnený medzi 2 harmonické zložky, v našom príklade na frekvencii 1172 Hz. Ak by napriek tomu bola nosná frekvencie zvolená na 1200 Hz, odstup signálu od šumu by sa tak znížil o viac než 25 dB. Avšak nie len zníženie S/N pôsobí problémy, ale aj skutočnosť, kedy je kmitočet referenčného signálu premenný v čase, sa môže meraná amplitúda taktiež meniť v čase, čo môže mať za následok stratu synchronizácie.

A tak jediná rozumná cesta ako určiť nosnú frekvenciu je najprv vyšetriť kmitočtové spektrum výstupu optického prijímača. To je možné vykonať pomocou bežného spektrálneho analyzátoru využitím Fourierovej transformácie, ktoré sú dnes súčasťou väčšiny osciloskopov.

2.3. Demodulácia obdĺžnikovým signálom

Na demoduláciu sa namiesto harmonického signálu môže použiť obdĺžnikový. Výhoda je jasná: jednoduchá obvodová realizácia, a taktiež pri snahe o pochopenie je jednoduchšie si predstaviť demoduláciu obdĺžnikovým signálom. Konkrétne bude tomuto faktoru venovaná kapitola o vplyve fáze (kap.2.4). V ďalšom bude ukázané, ako použitie obdĺžnikového demodulačného signálu nepriaznivo vplyva na výstupný signál.

Na obr.5 [2] je zobrazený jednoduchý harmonický signál s kmitočtom 100 Hz a vpravo je zobrazené jeho spektrum pomocou osciloskopu pracujúceho v režime využívajúcom FT (obr.5) [2].

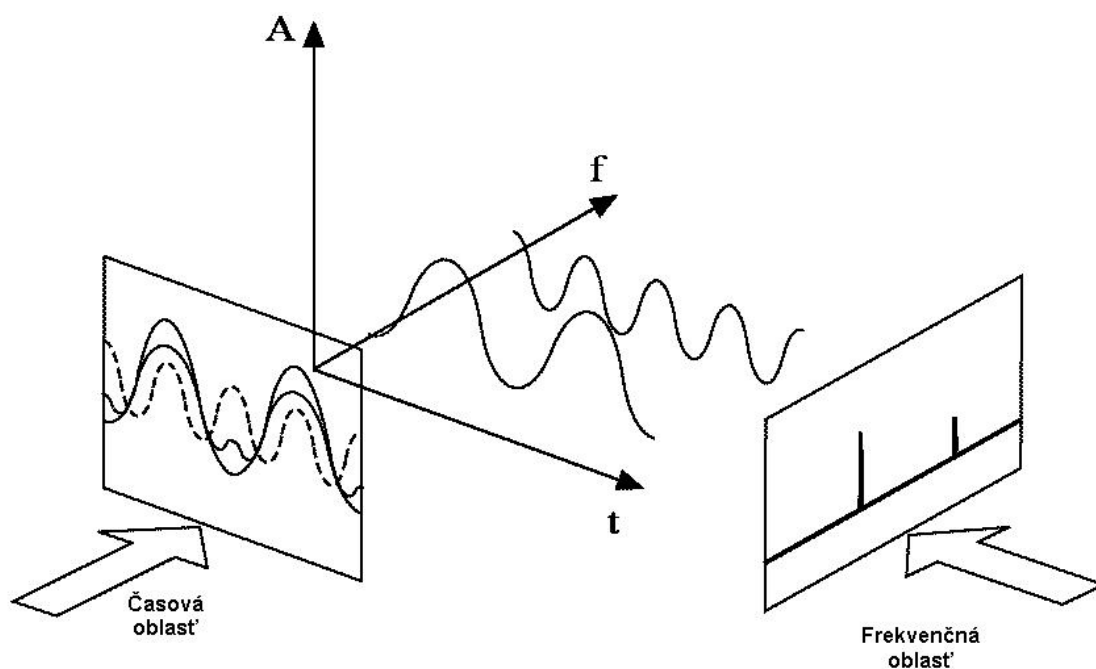


Obr.5: Harmonický signál – časový priebeh (vľavo) a jeho kmitočtové modulové spektrum (vpravo).

Ak by sa k tomuto signálu pripočítal ďalší s iným kmitočtom, dalo by to pozorovať v spektre vo forme ďalšej harmonickej zložky, nakoľko sa dá každý periodický signál popísať ako zmes rôznych harmonických signálov rôznej amplitúdy, frekvencie a fázy, ako plynie z Fourierovej analýzy:

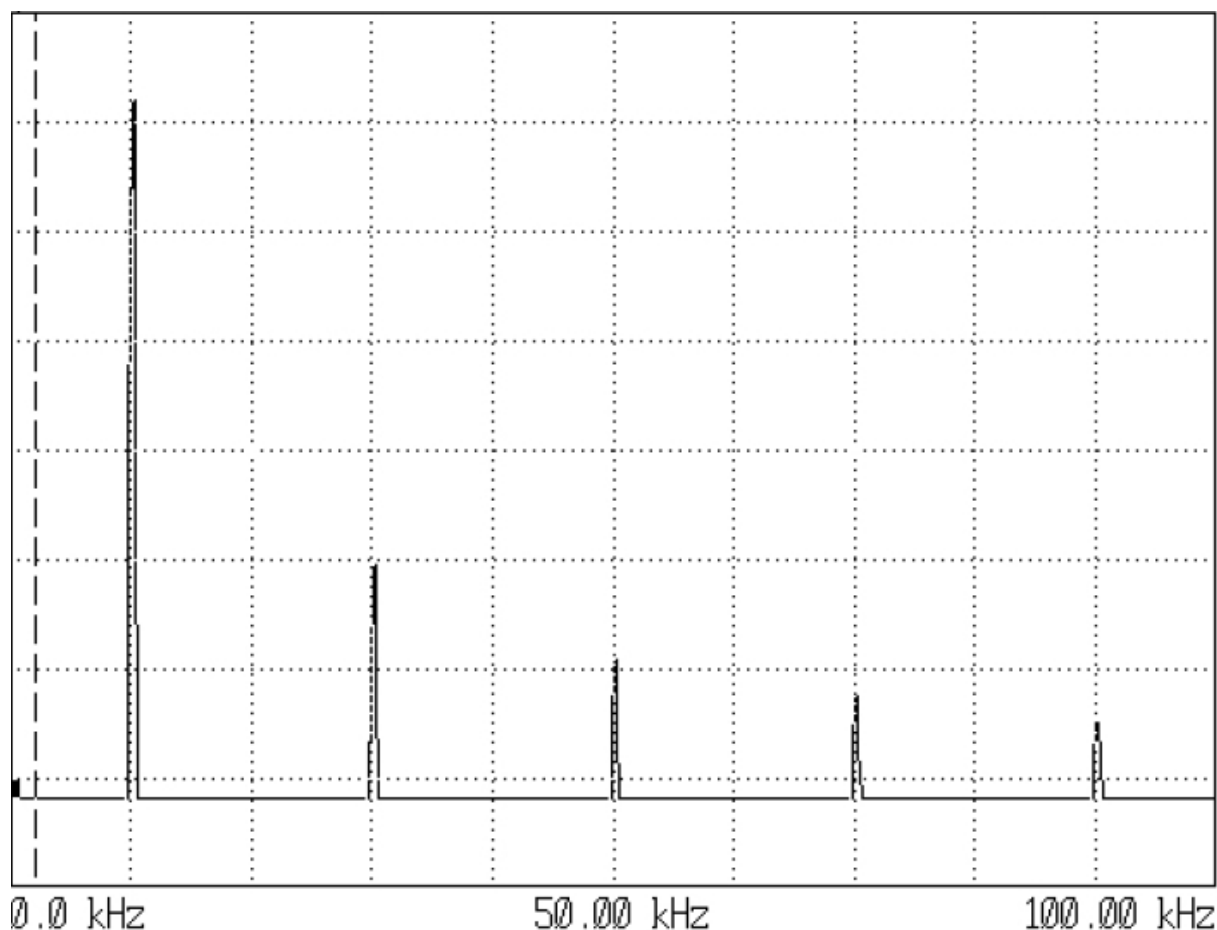
$$x(t) = X_0 + \sum_{k=1} X_k \cdot \sin(k\omega t + \varphi_k), \quad (4)$$

a aj z obr.6 [2].



Obr.6: Fourierova transformácia a spektrálny popis signálov.

Avšak, ako by sa následne zistilo, nie je obdĺžnikový signál nič iného, než zmes harmonických signálov konkrétnych frekvencií, ako to nakoniec vyplýva aj zo samotnej FT.



Obr.7: Kmitočtové modulové spektrum obdĺžnikového signálu s viditeľnou 1.,3.,5.,7. a 9. harmonickou.

Na obr. 7 [2] je zachytené spektrum obdĺžnikového signálu s kmitočtom 10 kHz. Je zrejmé, že spektrum obdĺžnikového signálu obsahuje vyššie nepárne harmonické, a tak je následne synchronný detektor citlivý aj na iné kmitočty, než len na požadovaný, aj keď amplitúda vyšších harmonických klesá nepriamo úmerne s frekvenciou. Napriek tomu sa využíva spínačovej detekcie využívajúcej obdĺžnikový signál za použitia výstupného filtra s vhodne zvoleným medzným kmitočtom tak, aby odfiltroval len žiaducu prvú harmonickú signálu.

2.4. Vplyv fáze

V optickej aj elektrickej trase signálu dochádza k tomu, že sa meraný aj referenčný signál fázovo posúvajú. K tomu dochádza z niekoľkých dôvodov.

V elektrickej trase signálu by sa nemal zanedbať fázový posun v zosilňovačoch napätia. Ten vzniká z dôvodu prítomnosti parazitných reaktančných prvkov v zosilňovači.

Pre zvláštne aplikácie, kde by sa tento systém mohol využívať na meranie vlastností prostredia, v ktorom prechádza meraný zväzok, by mohlo dôjsť k posunu aj v dôsledku nehomogenity prostredia. Tento jav sa však môže celkom zanedbať v bežných podmienkach, kedy zväzok prechádza vzduchom, ideálne vákuom.

V ďalšom texte bude ukázané, aký dopad by mal na meranie fázový posun.

Demodulácia meraného signálu sa obvykle realizuje jeho násobením s referenčným signálom.

Ak je daný meraný a referenčný signál:

$$\begin{aligned} U_{\text{sig}} &= U_{0\text{sig}} \cdot \sin(\omega_{\text{sig}}t + \varphi_{\text{sig}}) \\ U_{\text{ref}} &= U_{0\text{ref}} \cdot \sin(\omega_{\text{ref}}t + \varphi_{\text{ref}}), \end{aligned} \quad (5)$$

potom výstupný signál demodulátoru bude:

$$\begin{aligned} U_{\text{nás}} &= U_{\text{sig}} \cdot U_{\text{ref}} = U_{0\text{sig}} \cdot U_{0\text{ref}} \cdot \sin(\omega_{\text{sig}}t + \varphi_{\text{sig}}) \cdot \sin(\omega_{\text{ref}}t + \varphi_{\text{ref}}) = \\ &= \frac{1}{2} U_{0\text{sig}} \cdot U_{0\text{ref}} \cdot \cos[(\omega_{\text{sig}} - \omega_{\text{ref}})t + \varphi_{\text{sig}} - \varphi_{\text{ref}}] + \frac{1}{2} U_{0\text{sig}} \cdot U_{0\text{ref}} \cdot \cos[(\omega_{\text{sig}} + \omega_{\text{ref}})t + \varphi_{\text{sig}} + \varphi_{\text{ref}}]. \end{aligned} \quad (6)$$

Z takto vyjadreného výstupného signálu násobičky jasne plynie vplyv fáze referenčného signálu z argumentu kosínovej funkcie prvého člena.

Ak budú kmitočty oboch signálov rovnaké, t.j. ak $\omega_{\text{sig}} = \omega_{\text{ref}}$ a navyše fázový rozdiel nulový, čiže $\varphi_{\text{sig}} = \varphi_{\text{ref}}$, tak argument kosínu v prvom člene bude rovný nule a tak bude prvý člen rovný polovici násobku amplitúd signálu referenčného a meraného. Tento prípad pre obdĺžnikový modulačný signál ukazuje obr.8a [1].

V druhom člene v argumente kosínovej funkcie vystupuje súčet kmitočtov oboch signálov. Tento člen tak bude následne odfiltrovaný DP filtrom zaradeným za demodulátorom.

Po filtrácii výsledného signálu z obr.8a dostaneme v podstate priemer tohto výstupného signálu, ktorý je kladný a nenulový.

Ak sa relatívna fáza φ medzi prijatým a referenčným signálom líši presne o π , filtrovaný a tak spriemerovaný výstup bude síce nenulový, ale záporný, ako ukazuje obr.8b.

Obr.8c ukazuje prípad, kedy sa signály líšia o $\pi/2$, kedy je jasné už z grafickej predstavy, že kladné a záporné oblasti sa vyrušia a vo výsledku, keď daný signál zintegrujeme našim filtrom, dostaneme nulový signál na výstupe. Vtedy vravíme, že dané signály sú v kvadratúre.

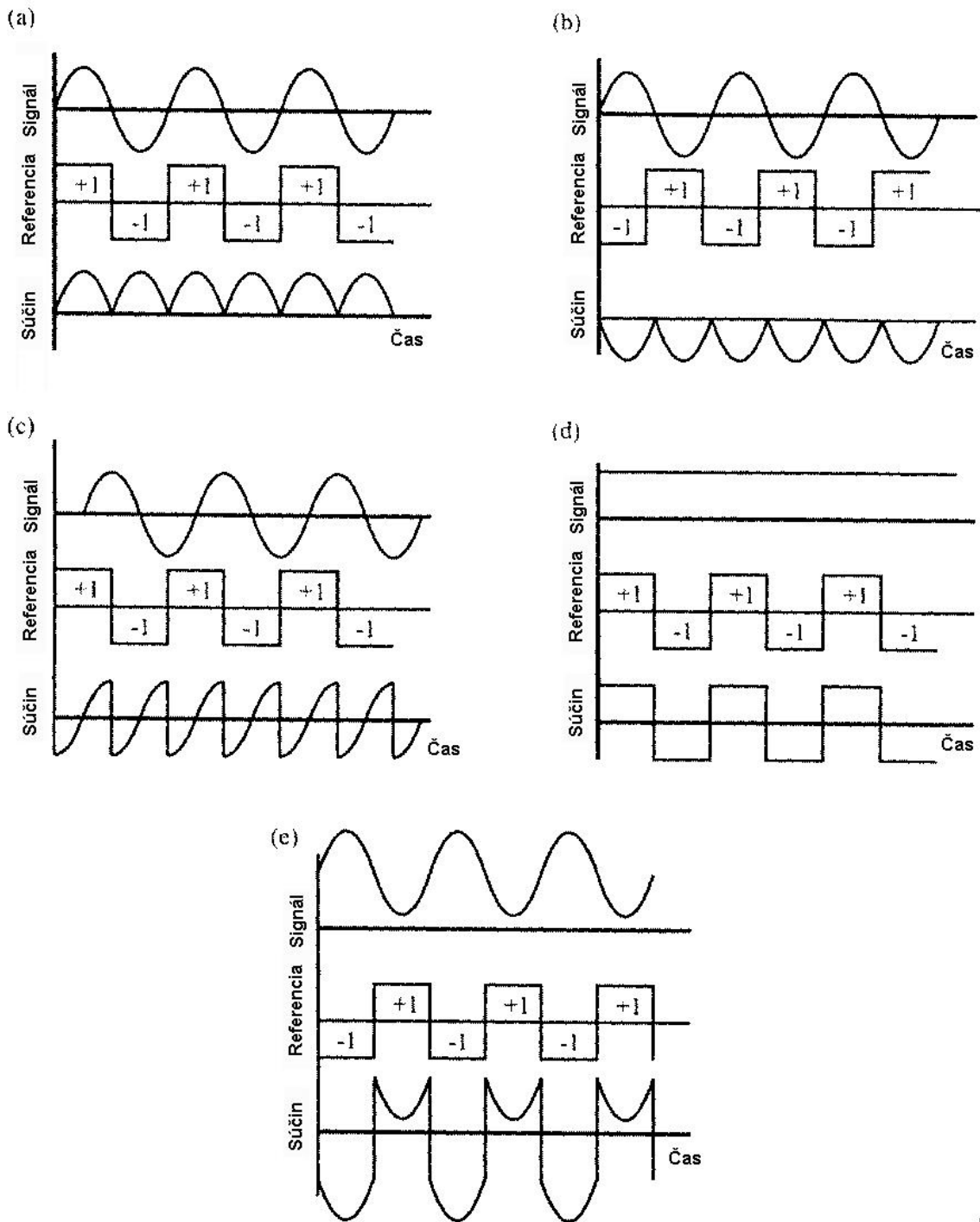
Medzi týmito fázami sa výstup harmonicky mení s meniacou sa fázou, kedy má výstupný filtrovaný signál amplitúdu $S \cdot \cos(\varphi)$. Preto môže byť jednakanálový synchronný detektor použitý buď na meranie amplitúdy S , alebo fáze φ , ale nikdy nie oboch naraz.

Obr.8d ďalej ukazuje odozvu synchronného detektoru na konštantný vstupný signál. Signál nám potom na výstupe dáva binárny signál, ktorého priemerná hodnota je nulová. Táto nulová jednosmerná zložka odpovedá nulovej odozve v pásme 0 Hz až f_{mod} , ako je ukázané na obr.2.

Na obr.8e je k synchronnému signálu pridaná jednosmerná zložka. Opäť tu bola jednosmerná zložka odstránená a ostala tak len konečná nenulová záporná zložka zo striedavej zložky signálu.

Preto je veľmi dôležité, aby fázový rozdiel nadobúdal hodnôt práve takých, aké potrebujeme. Pri meraní slabých signálov toho môžeme dosiahnuť jednoducho, keď nastavíme fázu na príjem maximálnej úrovne signálu za našim filtrom. Avšak, vzhľadom na to, že v okolí maxima sa fáza výstupného signálu mení len málo, ako funkcia kosínus v okolí svojho maxima pri nulovom uhle, tak je výhodnejšie nastaviť prístroj na najmenší výstupný signál a potom jednoducho otočiť fázu presne o 90° .

Bežne používané synchronne detektory využívajú 2 a viac oddelených detekčných kanálov. Ak použijeme dve násobičky riadenými signálmi posunutými o 90° , tak dva demodulované výstupy by sa menili harmonicky ako funkcie sínus a kosínus vo svojich uhloch.



Obr.8: Časové priebehy pre jednotlivé relatívne fázové rozdiely: a) vo fáze b) v protifáze c) rozdiel 90° d) nulová odozva na jednosmerný signál e) odstránená jednosmerná zložka, detekcia iba striedavej zložky.

3. Návrh riešenia meracieho systému

3.1. Východiskový stav

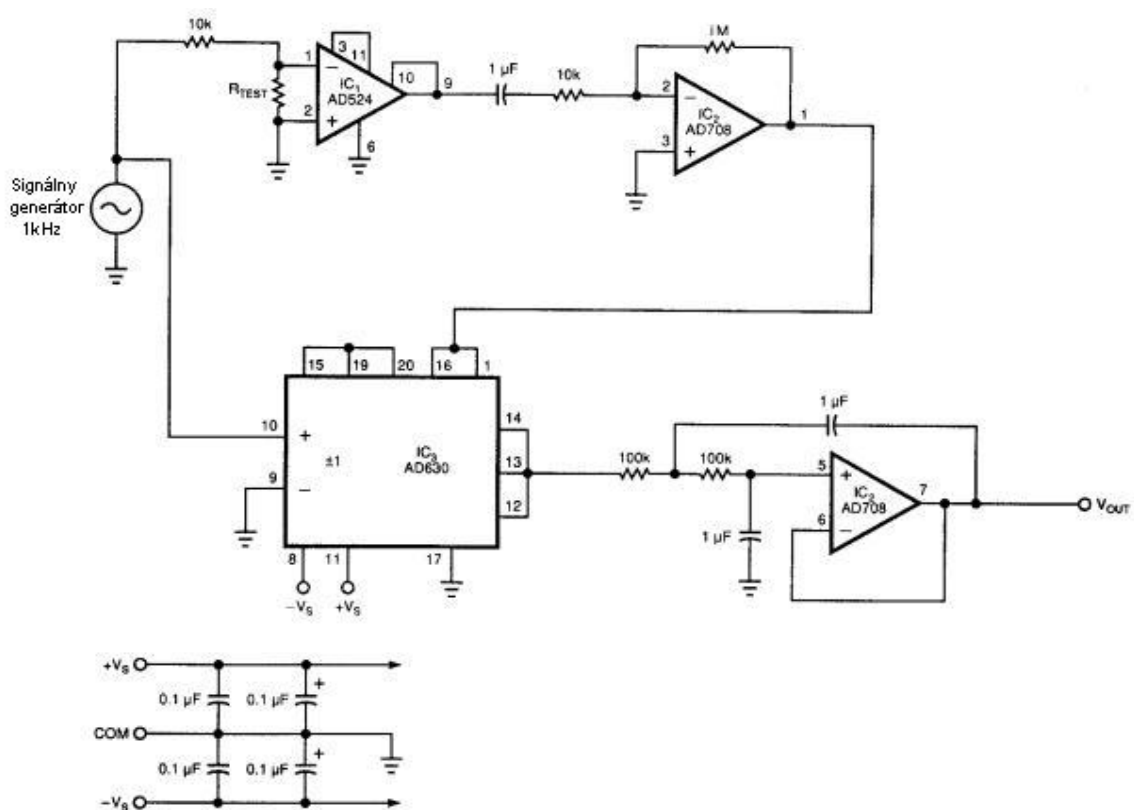
Pri návrhu meracieho systému sa vychádza z toho, že navrhovaný systém bude schopný merania a detekcie slabých optických signálov, prípadne malých zmien výstupu optických zariadení.

Z dôvodu jednoduchej obvodovej realizácie a aj z dôvodu nutnosti kompenzácie fázového posuvu bola zvolená realizácia obdĺžnikovým signálom.

Jednou z možností realizácie synchronného detektoru je realizácia z diskretných súčiastok, kedy by obvod fungoval ako zosilňovač s prepínateľným zosilnením +/- 1. Avšak niektorí výrobcovia ponúkajú už integrovaný synchronný detektor na 1 čipe.

Pre synchronnú detekciu signálu bol zvolený obvod AD630 od výrobcu Analog Devices. Tento obvod má viacero aplikačných možností. Konkrétne popisu tohto obvodu bude venovaná kapitola 3.2.1. V ďalšom budú najprv naznačené niektoré aplikácie.

Jednou z aplikácií je meranie veľmi malých malých odporov (rádovo $10^{-6} \Omega$). Existujú aj iné možnosti merania tak malých odporov, ale tie zbytočne zaťažujú obvod veľkým prúdom. Popísaný obvod funguje tak, že meria úbytok napätia na testovanom odpore (R_{TEST} (obr.9) [3]). Zapojenie v jednoduchosti funguje tak, že tento úbytok napätia zosilní až 10^5 -krát, synchronne demoduluje a odfiltruje DP filtrom [3].



Obr.9.: Návrh meracieho obvodu pre meranie malých odporov. [3]

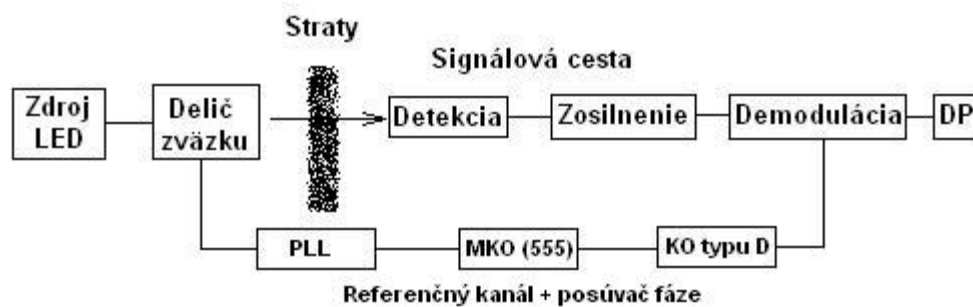
Ďalšími možnými aplikáciami obvodu AD630 sú použitie pri optickej kontrole polohy meraného objektu [4], či konkrétnejšia aplikácia, kedy bol použitý ako lock-in detektor pre EPR spektrometer [5].

3.2. Návrh

Navrhovaný obvod bol blokovo popísali v úvode. V kap. 2.4. bol zdôraznený vplyv fáze na spoľahlivé fungovanie obvodu. Preto navrhovaný obvod bude ešte v trase referenčného signálu obsahovať posúvač fáze, ktorý zaistí vyrovnanie prípadných fázových deviácií meraného a referenčného signálu.

Kvôli zjednodušeniu návrhového procesu a hlavne zjednodušeniu obvodovej realizácie bola zvolená modulácia obdĺžnikovým signálom. Táto modulácia je jednoducho realizovateľná aj mechanicky (pomocou mechanického modulátoru zväzku). Taktiež kvôli potrebe použitia posúvača fáze, ktorý sa pre obdĺžnikový signál realizuje jednoducho dostupnými obvodmi, ako ukážeme ďalej.

Finálny blokový návrh obvodu realizujúceho synchronnú detekciu s ohľadom na zaistenie fázovej citlivosti je na obr.10.



Obr.10.: Blokový návrh obvodu realizujúceho synchronnú detekciu slabých optických signálov.

Fázový záves v posúvači fáze je využívaný pre násobenie kmitočtu referenčného modulačného signálu na dvojnásobok. Zostupnou hranou tohto signálu je spúšťaný MKO realizovaný obvodom 555. Ten umožňuje generovať pulzy z nastaviteľnou dĺžkou, čím dochádza k posunu zostupnej hrany výstupného signálu. Ďalej táto hrana preklápa KO typu D. Ten slúži ako delič kmitočtu dvomi na pôvodný kmitočet modulačného signálu, avšak jeho priebeh je v čase posunutý o vopred nastavenú hodnotu tak, aby fázový rozdiel meraného a referenčného signálu bol nulový.

Popis navrhovaného obvodu bol rozdelený do dvoch hlavných blokov. V kap. 3.2.1. je to popis bloku synchronnej detekcie v hlavnej vetve a v kap. 3.2.2. je to popis bloku posúvača fáze, ktorý je zároveň referenčným kanálom.

3.2.1. Blok synchronnej detekcie

Blok synchronnej detekcie pozostáva z niekoľkých hlavných častí:

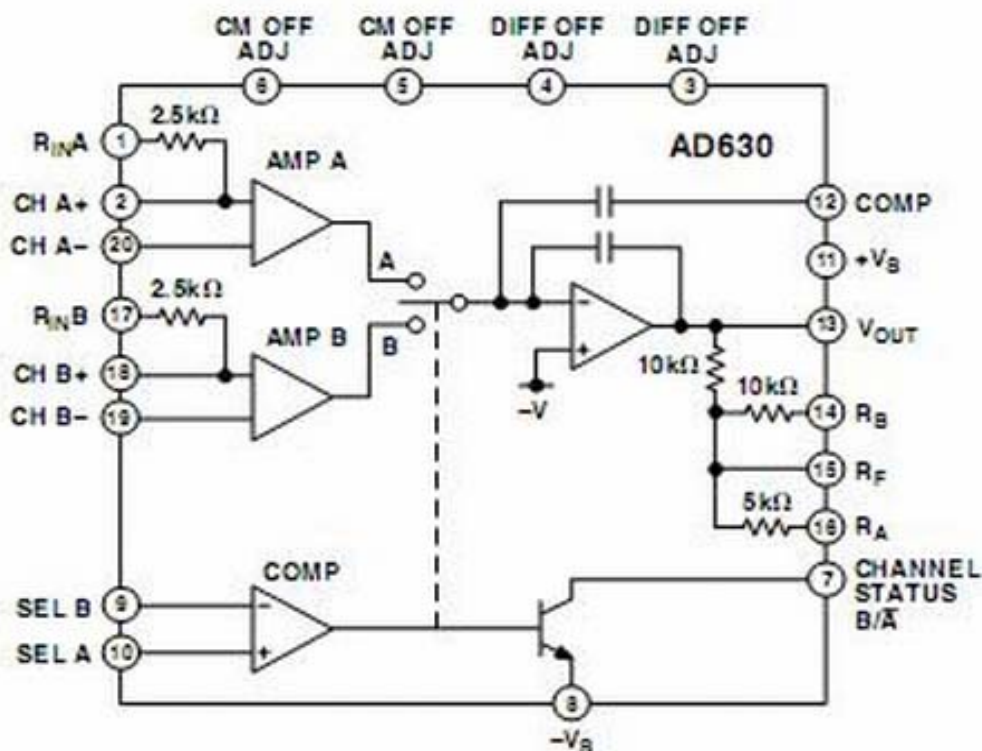
- Detekcia
- Zosilnenie
- Demodulácia
- DP filtrácia

Na zosilnenie detegovaného signálu bude použitý operačný zosilňovač v transimpedančnom zapojení. Takéto zapojenie zosilňovača má výhodu v tom, že umožňuje dosiahnuť veľkej šírky pásma detekcie pri použití fotodiódy ako kapacitného zdroja. Faktor zosilnenia budeme voliť taký, aby sme dosiahli požadovaný dostatočný rozkmit signálu na

vstupu demodulátoru. Voľba zosilnenia sa môže realizovať zosilňovačom s nastaviteľným zosilnením.

Ako už bolo spomenuté v kap.3.1., na demoduláciu signálu bude použitý obvod AD630 od výrobcu Analog Devices. Obvod bol vybraný na základe zhodnotenia parametrov. AD630 dokáže obnoviť signál až zo 100 dB šumu s rýchlosťou prebehu $45 \text{ V}/\mu\text{s}$ a použitím až do 350 kHz [6]. Okrem toho je aj mnohostranne použiteľný, či už na moduláciu a demoduláciu, vrátane synchronnej, fázovej a kvadráturnej detekcie, alebo na stavbu lock-in zosilňovača a násobičky obdĺžnikovým signálom.

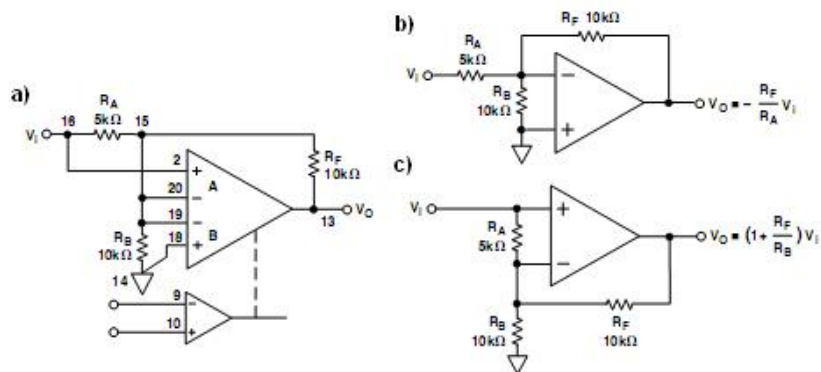
Obvod AD630 môže byť chápaný ako presný operačný zosilňovač s dvoma nezávislými diferenciálnymi vstupnými bránami s presným komparátorom, ktorý sa používa na určenie používaného kanálu. Medzi týmito kanálmi je udávaný presluch len -120dB pri kmitočte $f = 1 \text{ kHz}$.



Na obr.11. [6] je zobrazená bloková architektúra obvodu.

Obr.11.: Funkčný blokový diagram obvodu AD630.

Pre pochopenie fungovania obvodu sa dá zapojenie interpretovať ako dva vstupné zosilňovače s pevným zosilnením, medzi ktorými prepína citlivý napätový komparátor. V prípade prepínania medzi invertujúcim a neinvertujúcim zosilnením sa môže obvod použiť ako bežný modulátor, resp. demodulátor. Na obr. 12a) [6] je zobrazené zapojenie pre prípad zosilnenie ± 2 . V prípade potreby zosilnenia ± 1 stačí prepnúť rezistor R_B zo zeme [pin 14] na výstup [pin 13]. Komparátor vyberie jednu z dvoch vstupných brán tak, aby sa dosiahlo potrebného zapojenia podľa obr. 12b), resp. obr. 12c). V prípade aktivovania kanálu B sa rezistory R_A a R_F prepnú do zapojenia podľa obr. 12b). Zosilnenie v slučke zosilňovača je dostatočné na to, aby sa dalo zanedbať zaťaženie rezistorom R_B . Pri preklopení komparátoru dôjde k deaktivácii kanálu B a k následnej aktivácii kanálu A. Nové ekvivalentné zapojenie je na obr. 12c). V takom prípade je rezistor R_A zapojený medzi vstupnými svorkami brány. Nakoľko však sa toto diferenčné napätie kompenzuje na nulu, slučku to nijak neovplyvní.



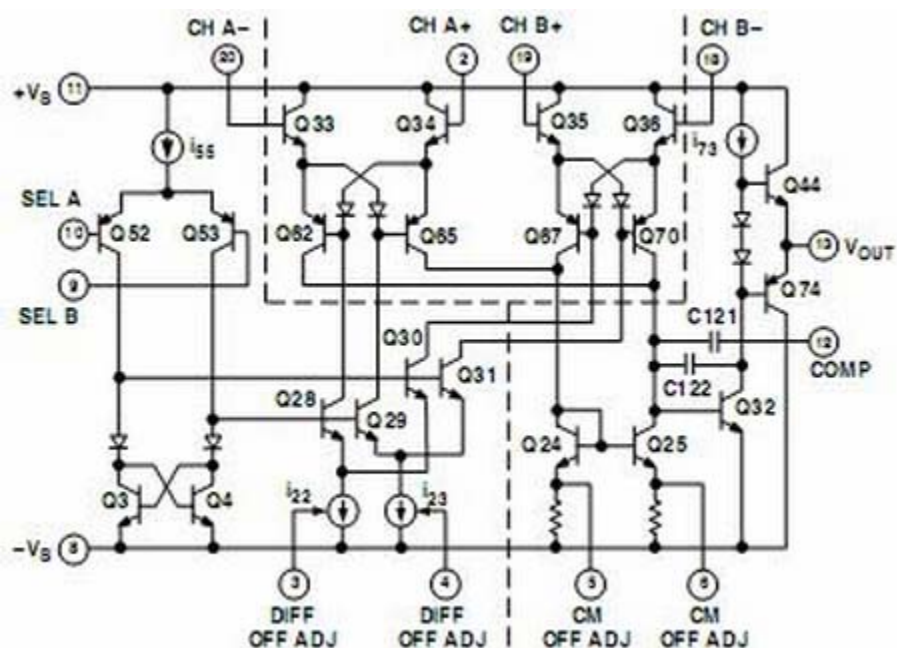
Obr.12.: a) Princípálne zapojenie AD630. b) Invertujúce zapojenie. c) Neinvertujúce zapojenie.

Na obr.13 je už zobrazené zjednodušené zapojenie obvodu AD630. Bolo rozdelené do troch hlavných častí: vľavo sa nachádza komparátor, v hornej časti dve vstupné brány a vpravo koncový stupeň.

Komparátor pozostáva z prednej časti tvorenej tranzistormi Q52 a Q53, prepínacou záťažou Q3 a Q4 a z dvoch prúdov ovládaných prepínačov Q28, Q29 a Q30, Q31. Toto zapojenie je navrhnuté tak, aby vstupné napätie s amplitúdou aspoň 1,5 mV postačilo na rozhodnutie o zopnutí príslušného prepínača. Znamienko vstupného napätia rozhodne o tom, ktorý prepínač by sa tak mal zopnúť.

Kolektor každého prepínača je pripojený na vstupný transkonduktančný stupeň. Zvolený prepínač potom aktivuje emitorové obvody vstupných tranzistorov, čím ich zaktivuje. Neaktívny prepínač potom blokuje emitorové obvody vstupných obvodov do svojho vstupného stupňa, čím ostane vypnutý.

Transkonduktančný stupeň funguje tak, že voči vstupnej svorke vykazuje vysokú impedanciu, pričom nevytvára žiadny prúd, keď je neaktívny. Neaktívny vstup tak vôbec neovplyvňuje aktívny vstup, čím zaisťuje nezávislosť kanálov.



Obr.13.: Zjednodušené schéma zapojenia obvodu AD630.

Ďalšou vlastnosťou vstupnej časti je, že zlepšuje dynamiku obvodu [6].

Výstupná časť obvodu obsahuje prúdové zrkadlo (Q24 a Q25), zosilňovač integrátora (Q32) a komplementárny výstupný buffer (Q44 a Q74).

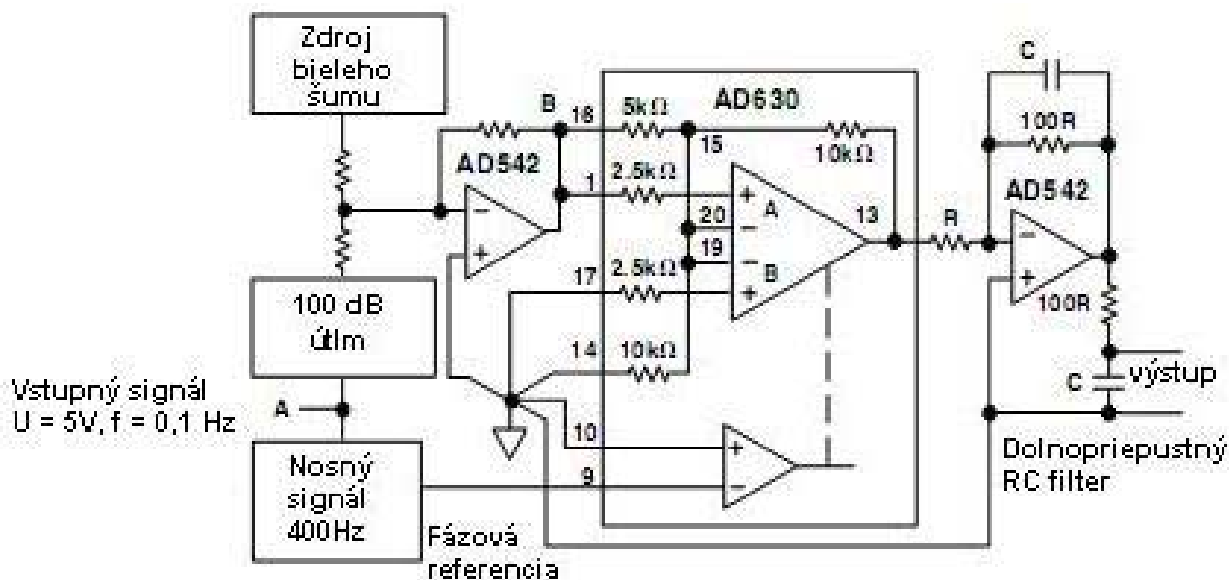
Napätový offset oboch vstupných stupňov ako aj komparátoru, bol už upravený, takže ďalšie úpravy budú nutné len v najnáročnejších aplikáciách. Keďže nám ide o detekciu malých signálov, je vhodné tento offset ešte skorigovať.

Napravenie offsetu oboch vstupov sa docielilo prostredníctvom rozdielového a súhlasného nastavenia. To uľahčí dostavenie chýb v spínaných aplikáciách.

Pri uzemnenom vstupe a zavedenou nosnou na komparátor, sa na výstupe objaví obdĺžnikový signál. Na vynulovanie amplitúdy rozdielového offsetu môžu byť použité potenciometre privedené na piny 3 a 4. Súhlasný offset môže byť použitý na vynulovanie jednosmerného výstupného napätia (piny 5 a 6). Jazdce oboch potenciometrov sa privedú na pin 8. [6]

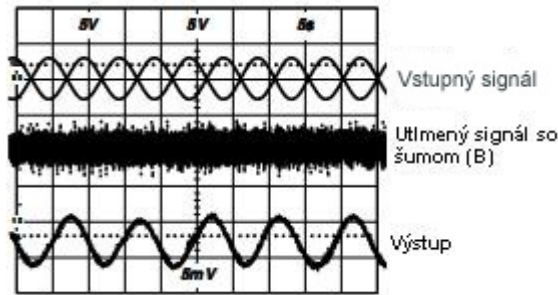
Obvod, ako vidíme, je bohatý na aplikácie aj na nastavenia. Výrobca udáva, že môže byť použitý či už ako vyvážený modulátor, demodulátor, ako aj fázový komparátor, či usmerňovač. Pre naše potreby využijeme obvod ako lock-in zosilňovač.

Lock-in zosilňovanie je spôsob používaný na obnovenie úzko pásmového signálu s malou intenzitou, ktorý je skreslený interferujúcim šumom. Lock-in zosilňovač sa dá popísať ako detektor signálu s v sérii zapojeným úzko pásmovým filtrom. V takom prípade sa aj veľmi malé signály dajú detegovať v prítomnosti nekorelovaného šumu. To však len za podmienky, že poznáme frekvenciu aj fázu požadovaného signálu. [6] Frekvencia signálu je daná frekvenciou referenčného signálu a jeho fázu dostaneme doladením fázového posúvača zapojeného vo vetve referenčného kanálu (obr.10). Lock-in zosilňovač je tak v podstate synchronný demodulátor nasledovaný dolnopriepustným filtrom. Zapojenie lock-in zosilňovača s použitým obvodom AD630 je zobrazené na obr. 14 [6].



Obr.14.: Zapojenie lock-in zosilňovača s obvodom AD630.

Na obr. 15 sa je znázornené, ako sa z modulovaného signálu, ktorý je útlmovým článkom utlmený o 100 dB, pomocou lock-in zosilňovača (obr.14) podarí získať na výstupe obvodu požadovaný signál.



Obr.15.: Pozorované signály v experimente s lock-in zosiľovačom.

Na obr.15 [6] je vidieť obnovenie signálu modulovaného na nosnú s kmitočtom 400 Hz z šumu, ktorý je asi 10^5 krát väčší. Vstupný signál vznikol modulovaním tejto nosnej harmonickým signálom s kmitočtom 0,1 Hz. V hornej časti obr.15 je zobrazený priebeh vstupného signálu privádzaného v bode A lock-in zosiľovača. Tento signál je ďalej utlmený. V reálnom prípade, ktorý má tento experiment simulovať sa nám k prijímanému signálu pričítajú rôzne interferujúce zložky, popísané v úvode (kap.1). Posunutím kmitočtu nosnej za istú medznú oblasť (okolo 500 Hz) sa tieto rušivé zložky modelujú bielym šumom istej intenzity. Tento prípad je v experimente realizovaný zdrojom bieleho šumu. V experimente je však použitý pásmovo čiastočne obmedzený zdroj bieleho šumu. V prípade sofistikovanejšieho výstupného filtra, môžeme obnoviť signál aj z šumu, ktorý väčšiu šírku pásma. Stredný priebeh na obr.15 ukazuje stav signálu, kedy je už utlmený a bol k nemu pričítaný biely šum. Tento signál je následne synchronne demodulovaný obvodom AD630 použitím privedenej nosnej. Takto demodulovaný signál je privedený na dolnopriepustný aktívny filter, ktorý zároveň signál ešte zosilní. Tento výsledný priebeh je zobrazený v spodnej časti obrázku.

Koncový filter je dôležitý aj z dôvodu použitia obdĺžnikového modulačného signálu. Ako už bolo uvedené, obdĺžnikový signál sa skladá z nepárnych harmonických základného kmitočtu. Preto by mal byť tento filter navrhnutý tak, aby spoľahlivo prepustil len kmitočtet meraného signálu.

3.2.2. Blok fázového posúvača

Blok fázového posúvača by sme mohli rozdeliť do 3 hlavných častí:

- Fázový záves (angl. Phase locked loop, ďalej PLL)
- Monostabilný klopný obvod (ďalej MKO)
- Klopný obvod typu D (ďalej KO)

Pri riešení projektu sa kladie dôraz na vplyv fáze. Keďže sa fázovému posuvu v praxi nedá vyhnúť, je vhodné ho vhodnou metódou kompenzovať. Postupom popísaným v úvode kapitoly bude realizovaný posúvač fáze.

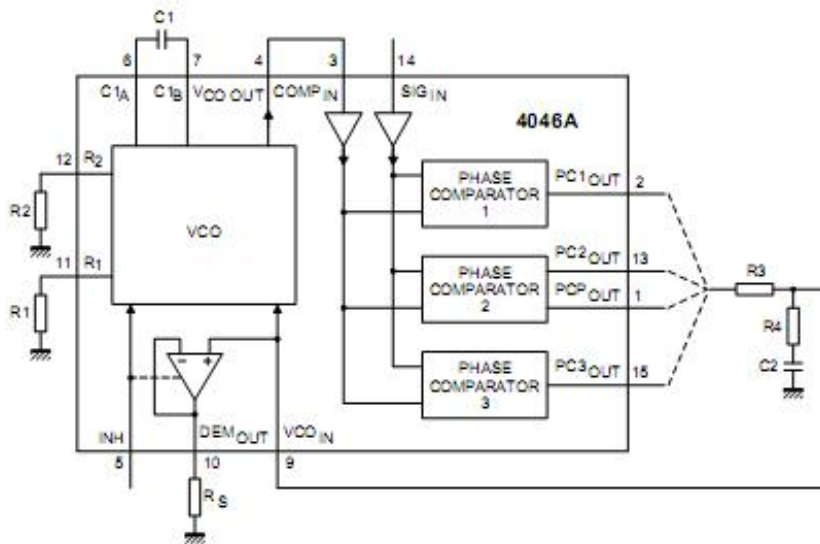
Fázový záves pozostáva z niekoľkých častí a jeho principiálna schéma pre násobenie kmitočtu je na obr.16.



Obr.16.: Principiálne zapojenie PLL pre násobenie kmitočtu.

Fázový záves slúži na vyrovnávanie malého rozdielu medzi frekvenciami vstupného a výstupného signálu. Frekvencia porovnávaného signálu je buď priamo frekvencia výstupného signálu ($N = 1$), alebo je daný podielom výstupnej frekvencie k N nastavenému týmto deličom. Výsledkom porovnávaného je chybový signál generovaný fázovým detektorom (komparátorom), ktorý sa získa ako rozdiel fáz porovnávaného a referenčného signálu. Tento chybový signál po filtrácii DP filtrom doladzuje frekvenciu napätím riadeného oscilátora (angl. Voltage controlled oscillator, ďalej VCO) tak, aby sa rozdiel frekvencií medzi referenčným a porovnávaným signálom vyrovnal [7].

Nami vybraný obvod realizujúci funkciu fázového závesu je obvod 74HC4046A od firmy Philips. Jeho principiálne zapojenie je na obr. 17 [8]. Obvod obsahuje lineárny napätím riadený oscilátor, tri rôzne fázové komparátory so spoločným vstupným zosilňovačom a spoločným vstupným komparátorom. Fázové komparátory sa odlišujú tým, akú funkciu generujú pri svojej činnosti. Pre fázový komparátor 1 (PC1) je to exkluzívny-OR, fázové komparátory 2, resp. 3 fungujú ako klopné obvody typu JK, resp. RS. Pre navrhovanú aplikáciu bude použitý PC1. Na signálny vstup môžeme priviesť aj malé signály, nakoľko vstupné zosilňovače si ich zosilnia natoľko, aby sa dostali do vhodnej pracovnej oblasti vstupných obvodov.



Obr.17.: Principiálne zapojenie obvodu 74HC4046A.

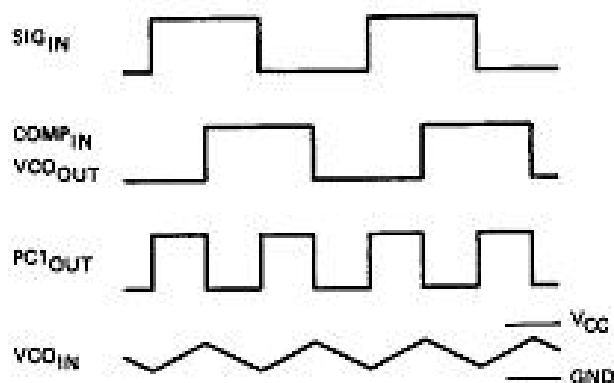
Pre nastavenie voľnobežnej frekvencie vyžaduje VCO jeden externý kondenzátor (C_1) a jeden externý rezistor (R_1), resp. 2 externé rezistory (R_1 a R_2). Rezistor R_1 a kondenzátor C_1 udávajú frekvenčný rozsah VCO. Prípadný rezistor R_2 udáva frekvenčný ofset, ak je potrebný. Výstup VCO, ako už bolo spomenuté vyššie, môže byť pripojený priamo k vstupu PC1, alebo k nemu môže byť vedený cez frekvenčný delič.

V navrhovanej aplikácii bude využívaný frekvenčný delič dvoma realizovaný KO typu D. V kap.3.2.2.c sa budeme pochopeniu a funkcii tohto obvodu venovať bližšie.

Ako už bolo spomenuté, z relatívne bohatej ponuky fázových komparátorov obsiahnutých v obvode, budeme využívať fázový komparátor 1. Signál na vstupe PLL a taktiež na vstupe PC1 musí mať 50% pracovný cyklus, aby sa dosiahla čo najväčšia oblasť sledovania. Prevodná charakteristika je daná vzťahom:

$$V_{\text{demout}} = \frac{V_{\text{cc}}}{\pi} \cdot (\varphi_{\text{sigin}} - \varphi_{\text{compin}}), \quad (7)$$

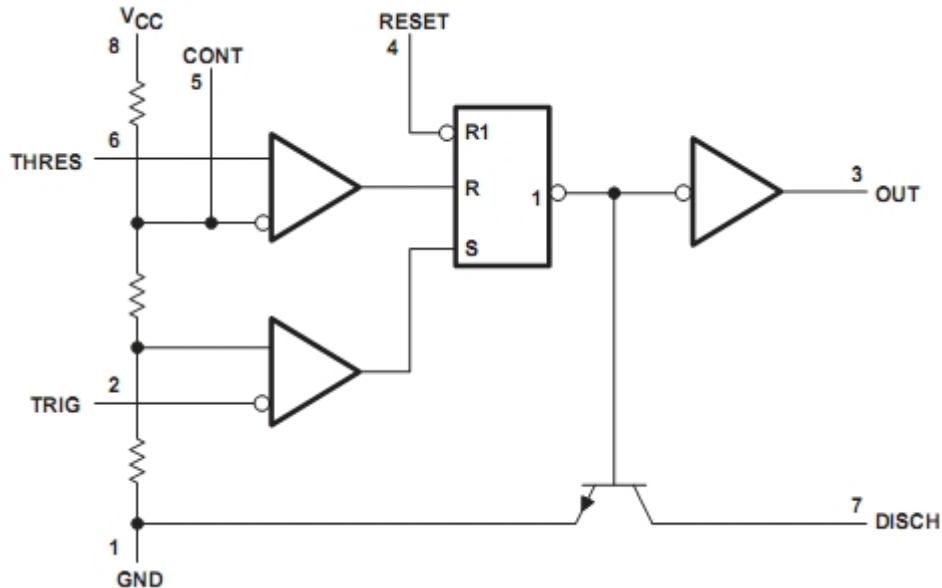
kde V_{demout} je výstup závesu a je rovný napätiu na výstupe PC1 za DP filtrom. Stredná hodnota výstupného napätia PC1, ktorá je vstupom VCO cez DP filter, je výsledok rozdielu fáz medzi vstupným signálom a vstupom komparátoru. Typické priebehy PLL v stave zavesenia sú na obr. 18 [8].



Obr.18.: Typické časové priebehy zaveseného PLL, pri použití PC1.

Oblasť zachytenia je definovaná ako frekvenčná oblasť vstupného signálu, na ktorú sa vie obvod fázového závesu zachytiť, ak bol predtým mimo synchronizmu. Oblasť sledovania je oblasť frekvencií vstupného signálu, v ktorej obvod fázového závesu ostáva v synchronizme, ak bol predtým zachytený. Oblasť zachytenia je menšia, nanajvýš rovná oblasti sledovania. Pri použití PC1, je oblasť zachytenia podmienená nastavením DP filtra. Ak sa nakonfiguruje obvod tak, že oblasti zachytenia a sledovania sú rovnako veľké, dokážeme obnoviť signál aj z predtým veľmi zarušeného vstupu. Typické pre tento komparátor je, že sa zachytí na signál s vstupnou frekvenciou blízkou tej, ktorá je nastavená ako stredná frekvencia VCO. Výstupný signál VCO bude ďalej slúžiť na spúšťanie monostabilného KO, ktorý bude realizovaný obvodom čítača a časovača 555.

Funkčná schéma tohto čítača je zobrazená na obr. 19 [8].

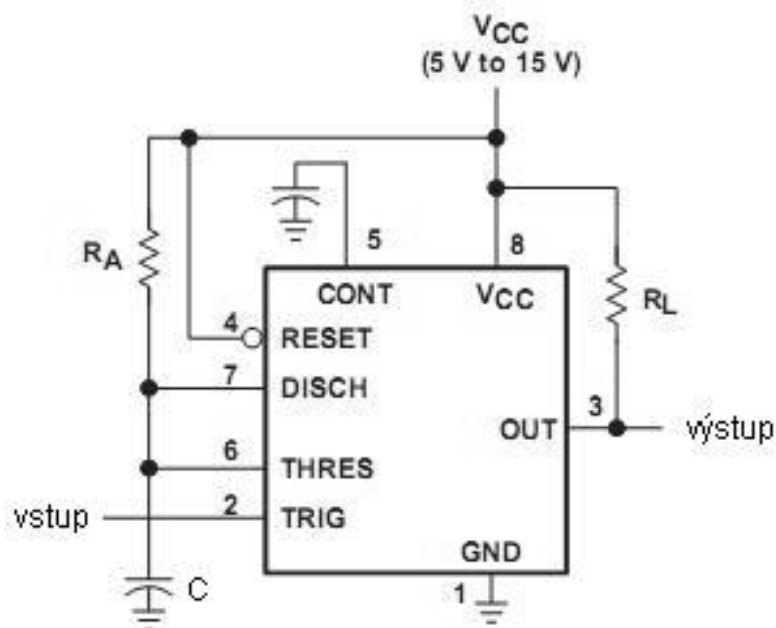


Obr.19.: Funkčné schéma obvodu čítača a časovača 555.

Obvod ako taký predstavuje presný časovač schopný poskytovať presné časové oneskorenia, či oscilácie. V prípade použitia ako MKO sa časovaný interval nastavuje jedným externým rezistorom a jedným kondenzátorom. Spúšťacia a prahová úroveň napätia je v jednej, resp. dvoch tretinách napájacieho napätia. Tieto úrovne môžu byť prenastavené použitím vstupu „riadiace napätie“ (Cont na obr.19). Keď úroveň signálu na vstupe „spúšťáča“ (Trig na obr.19) klesne pod spúšťaciu úroveň, KO je nastavený a výstup je na úrovni logickej „1“. Ak je úroveň signálu na vstupe spúšťáča nad spúšťacou úrovňou a úroveň signálu na vstupe „prahu“ (Thres na obr.19) je nad prahovou úrovňou, KO je resetovaný a výstup je na logickej „0“. Reset (obr.19) slúži na resetovanie obvodu bez ohľadu na úrovne signálu na iných vstupoch a môže tak slúžiť na začatie nového časovacieho cyklu.

Zapojeniu obvodu ako MKO zodpovedá zapojenie podľa obr.20.

Monostabilný KO má jeden stabilný stav, v ktorom môže ostať po ľubovoľne dlhú dobu a jeden nestabilný stav, do ktorého sa dostane privedením vonkajšieho impulzu. V tomto stave obvod zotrvá určitý čas, ktorý je definovaný rezistorom R_A a kondenzátorom C . Potom prejde opäť do stabilného stavu, v ktorom zotrvá do príchodu ďalšieho impulzu.



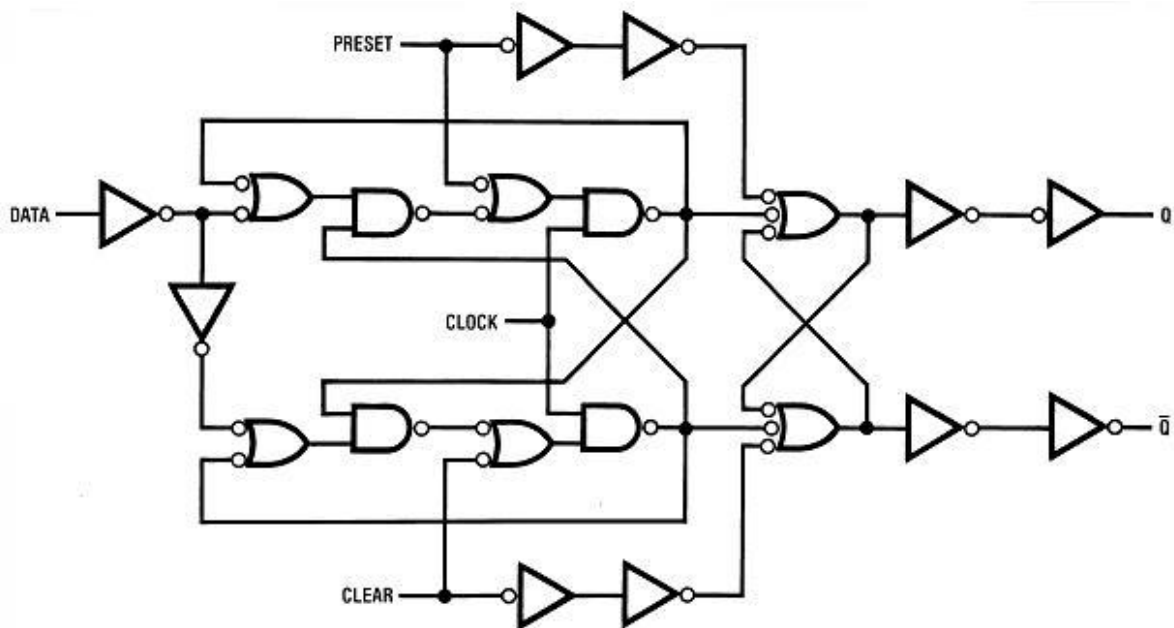
Obr.20.: Obvod 555 ako monostabilný klopný obvod.

Spúšťacie impulzy sú privedené na vstup spúšťáča (pin 2). Privádzané impulzy však nesmú mať amplitúdu väčšiu ako napájacie napätie V_{cc} . Pokiaľ je obvod v stabilnom stave, na kondenzátore, ako aj na výstupe je napätie nulové. RS klopný obvod je nastavený tak, že na výstupe je úroveň log. „0“. Po privedení záporného spúšťacieho impulzu na vstup sa RS KO prekloní, čím vypne vybíjací tranzistor. Kondenzátor sa začne nabíjať cez rezistor R_A a začne tak odpočítavať čas t nestabilného stavu MKO daného:

$$t_w = 1,1 \cdot R \cdot C . \quad (8)$$

Za tento čas dosiahne napätie na kondenzátore úroveň dvoch tretín V_{cc} . Po uplynutí tejto doby sa RS KO prekloní do východiskového stabilného stavu. Nevýhodou takto realizovaného MKO je, že pokiaľ sa počas plynutia doby t privedie na vstup spúšťáča ďalší záporný pulz, spôsobí ten vynulovanie a počítanie tejto doby odznova, čím spôsobí nespoľahlivosť činnosti MKO [9].

Vzhľadom k použitiu obvodu PLL ako násobičky kmitočtu dvomi sa musí na konci fázového posúvača frekvencia opäť deliť rovnakým pomerom. PLL bol použitý ako násobič kmitočtu dvoma, preto bude použitý za obvodom 555 delič kmitočtu dvoma. Ako ten poslúži KO typu D.



Obr.21.: Logické zapojenie KO typu D.

Principiálne zapojenie KO typu D z logických členov je na obr.21 [9], avšak jeho fungovanie je zreteľnejšie z pravdivostnej tabuľky (tab.1) [9].

Vstup				Výstup	
Preset	Clear	Clock	Data	Q	/Q
L	H	X	X	H	L
H	L	X	X	L	H
L	L	X	X	H*	H*
H	H	↑	H	H	L
H	H	↑	L	L	H
H	H	L	X	Q ₀	/Q ₀

Pozn.: * tieto stavy nie sú stabilné; t.j.: nezotrývajú v tomto stave v prípade návratu vstupov Preset a Clear do neaktívneho (H) stavu.

Q₀ označuje stav, ktorý bol na výstupe pred zavedením podmienok na vstupe.

Tab.1.: Pravdivostná tabuľka klopného obvodu typu D.

Z predposledných dvoch riadkov pravdivostnej tabuľky (tab.1) jasne vyplýva možnosť použitia KO typu D ako deličky kmitočtu dvomi. V prípade deaktivácie vstupov Preset a Clear, privedenia hodinového signálu na vstup Clock a prepojenia výstupu /Q s dátovým vstupom Data sa pri každej nábežnej hrane hodinového signálu preklolí hodnota výstupov Q a /Q navzájom. Z dôvodu, že obvodom 555 je nastavované časové oneskorenie zostupnej hrany výstupného signálu z VCO, musí byť medzi tento obvod a následný KO typu D vložený invertor. Ten spôsobí, že bude KO typu D preklápaný posúvanou hranou pulzu s premennou dĺžkou.

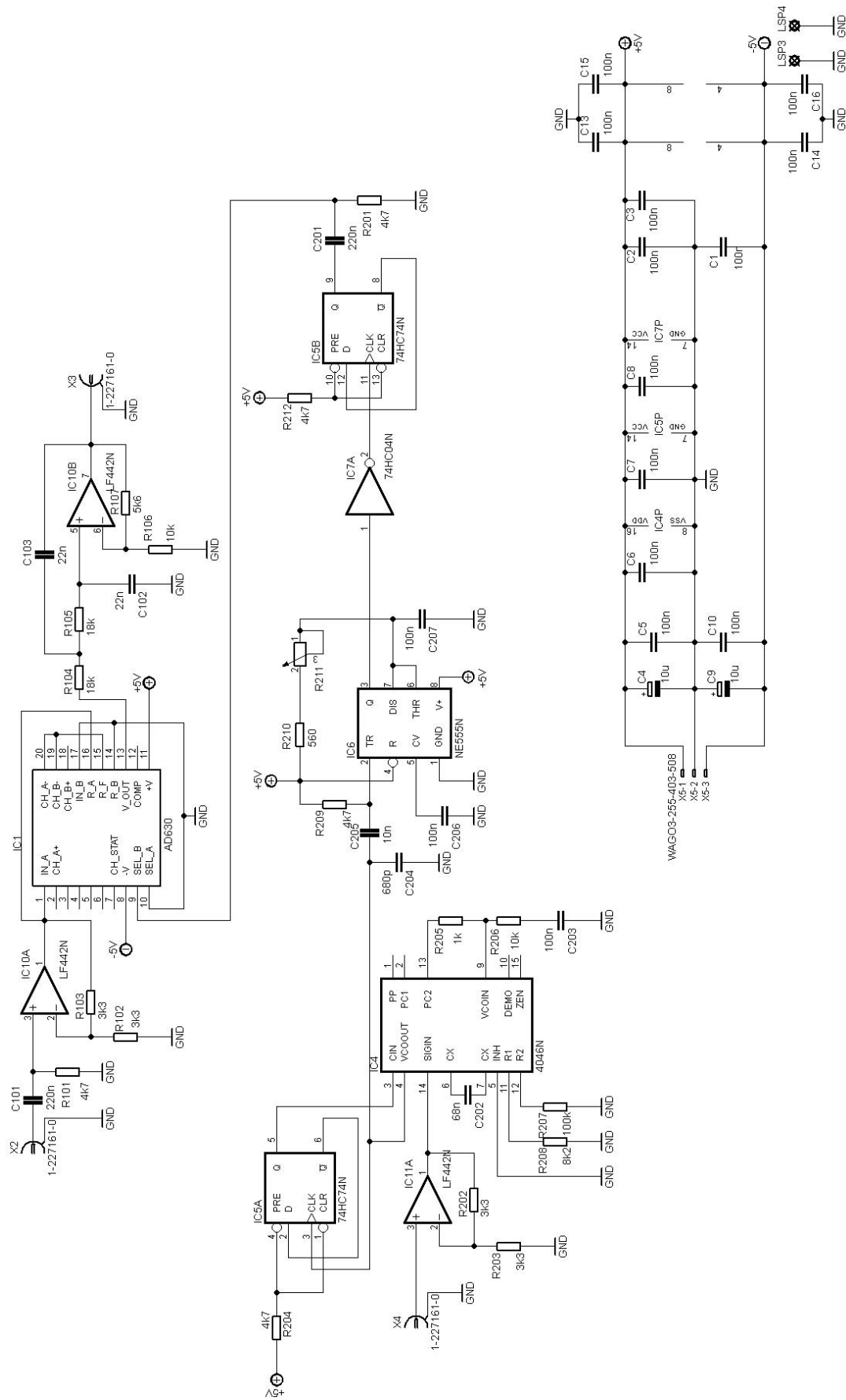
Výstup z KO bude nakoniec slúžiť ako referenčný signál pre synchronný demodulátor s možnosťou nastavenia fázového posuvu v rozsahu kladných aj záporných hodnôt.

3.3. Celková schéma systému

Na obr. 22 (str.29) je znázornená celková schéma navrhovaného systému pre synchronnú detekciu slabých optických signálov. V hornej časti schémy je zobrazená signálová cesta systému, v strednej časti bloky spracovania referenčného signálu ako posúvač fáze. V spodnej časti sa ďalej nachádzajú filtračné a blokovacie kondenzátory integrovaných obvodov.

Ako prvý je v signálovej ceste umiestnený zosilňovač v neinvertujúcom zapojení, ku ktorému je privádzaný vstupný signál cez CR filter, ktorý odstráni jednosmernú zložku zo spracovávaného unipolárneho signálu fotodiódy. Táto časť má za úlohu s dostatočnou šírkou pásma zosilniť signál prijímaný fotodiódou. Dostatočný rozkmit je dôležitý pre optimálne fungovanie obvodu AD630 a zaistenie vhodných šumových pomerov na jeho vstupe. Podľa potreby sa zosilnenie môže nastavovať pomocou rezistorov R_{102} a R_{103} . Na výstupe obvodu AD630 je zaradený aktívny dolnopriepustný filter, ktorý prepustí iba rozdielový produkt modulátoru a zosilní pozorované zmeny signálu. Zosilnenie výstupného aktívneho filteru je potrebné voliť s ohľadom na charakter pozorovaného signálu tak, aby nedošlo k saturácii OZ, prípadne k jeho rozkmitaniu. Zosilnenie sa nastavuje rezistormi R_{106} a R_{107} . Frekvenčná závislosť zosilnenia sa mení rezistormi R_{104} a R_{105} spolu s kondenzátormi C_{102} a C_{103} . V zostavenom prípravku bolo zvolené zosilnenie $A = 3$ a medzná frekvencia výstupného filteru pre pokles o 3 dB $f_m = 510$ Hz.

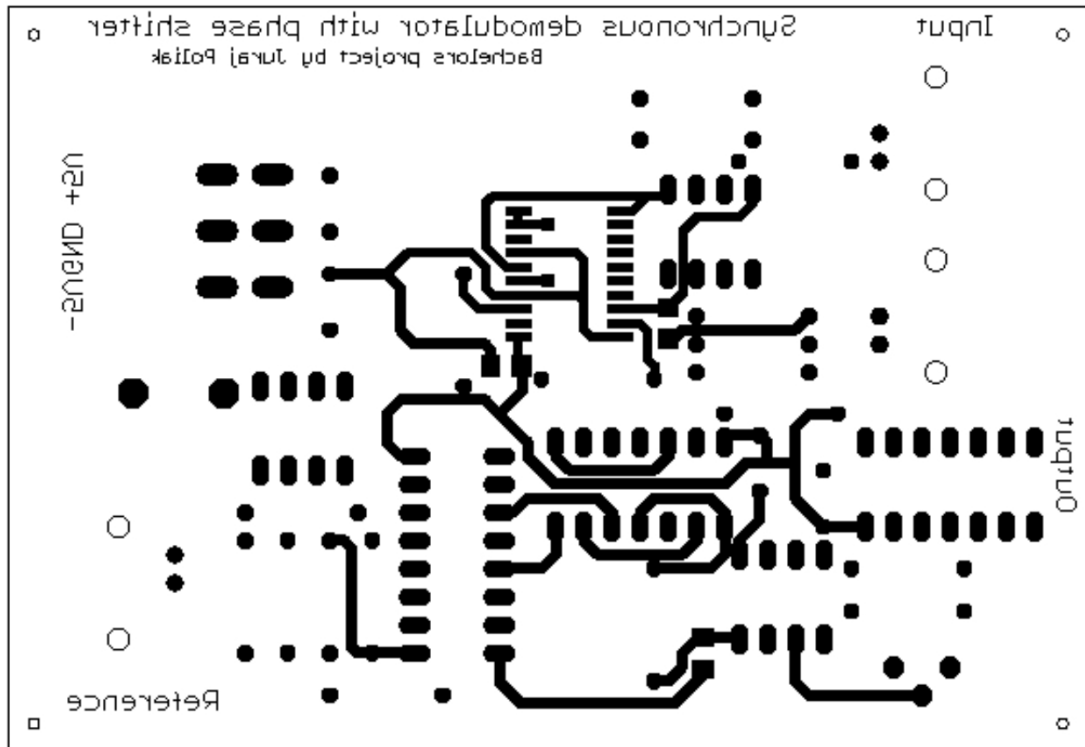
Referenčný signál sa privádza do obvodu PLL cez vstupný neinvertujúci zosilňovač. Voľnobežná frekvencia VCO však musí byť blízka frekvencii modulačného signálu, aby došlo k tzv. zachyteniu. Táto frekvencia sa nastavuje pomocou R_{208} a C_{202} . Do obvodu je z dôvodu stability zavedený aj frekvenčný ofset realizovaný odporom R_{207} . Filter na výstupe komparátoru integruje signál pre doladovanie VCO. Výstup VCO uzatvára slučku fázového závesu cez deličku dvoma realizovanú KO typu D a tento signál je privedený na vstup fázového komparátoru. Zapojenie deličky dvomi v súčinnosti s obvodom PLL realizuje obvod pre násobenie kmitočtu dvomi. To je dôležité aby sme mohli nastavovať fázový rozdiel signálov do kladných aj záporných hodnôt. KO je potom spúšťaný dvojnásobným kmitočtom. Zostupná hrana signálu výstupu VCO spúšťa MKO realizovaný obvodom 555. Na vstupe KO je derivačný obvod tvorený R_{209} , C_{205} a C_{204} . Tvaruje spúšťacie impulzy na negatívne úzke impulzy. Doba trvania týchto impulzov nemôže byť dlhšia, než doba trvania vstupných impulzov. Obvod 555 je zapojený tak, aby premenným odporom (R_{210} a R_{211}) bolo umožnené oneskorenie vzostupnej hrany výstupného signálu. Premenný odpor tak definuje časovú konštantu (8). Po logickej negácii tohto signálu v invertore zapojenom na výstupe obvodu 555 je možné takto získanou premennou zostupnou hranou preklápať KO typu D, ktorý funguje ako delič kmitočtu dvomi. Invertor nám umožní, aby sme zostupnou hranou výstupného signálu MKO mohli spúšťať KO typu D, ktorý reaguje na vzostupnú hranu. Na výstup tohto KO je zaradený opäť CR filter, ktorý odfiltráva jednosmernú zložku. Takto spracovaný signál je použitý ako referenčný pre demoduláciu v obvode AD630 a je možné posúvanie fáze v rozsahu -81° až $+47^\circ$.



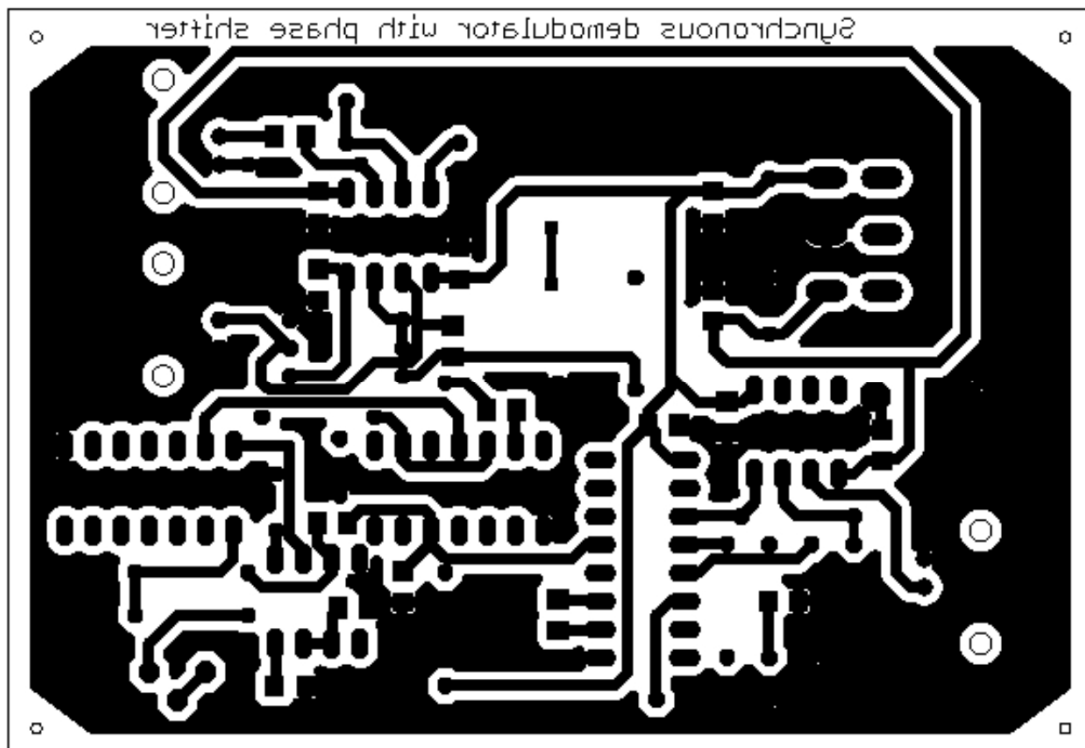
Obr.22.: Celková schéma systému.

4. Návrh DPS

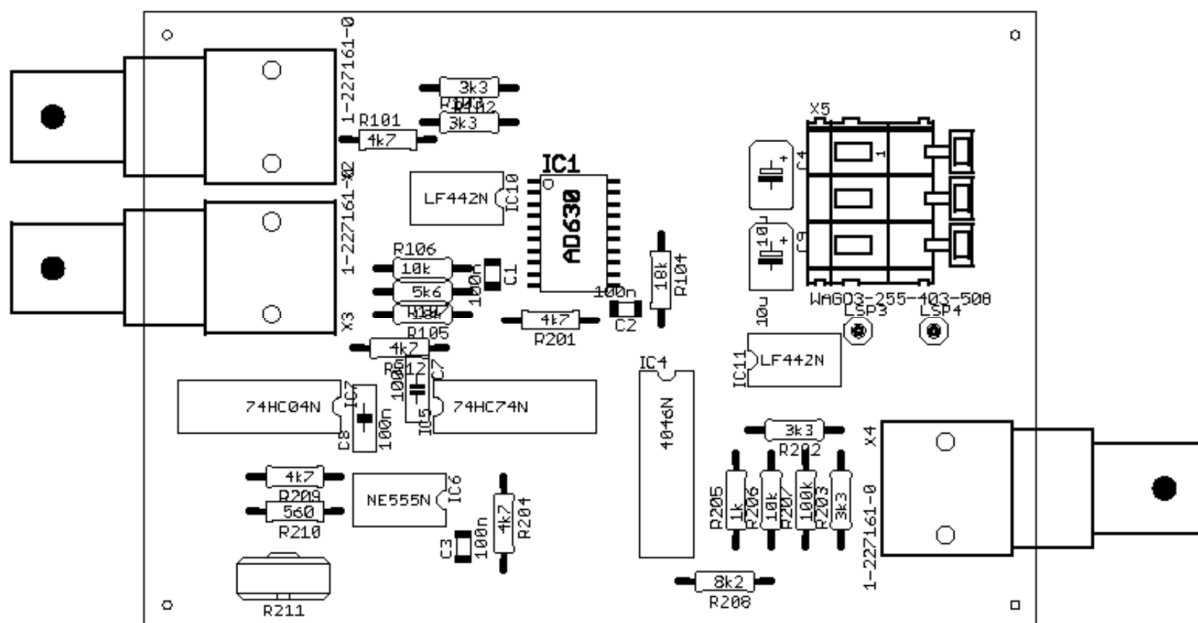
Pri návrhu sa vychádzalo zo zapojenia na obr. 22 a z dostupných súčiastok. Návrh dosky – matrice a osadzovacie plány – sú na nasledujúcich obrázkoch.



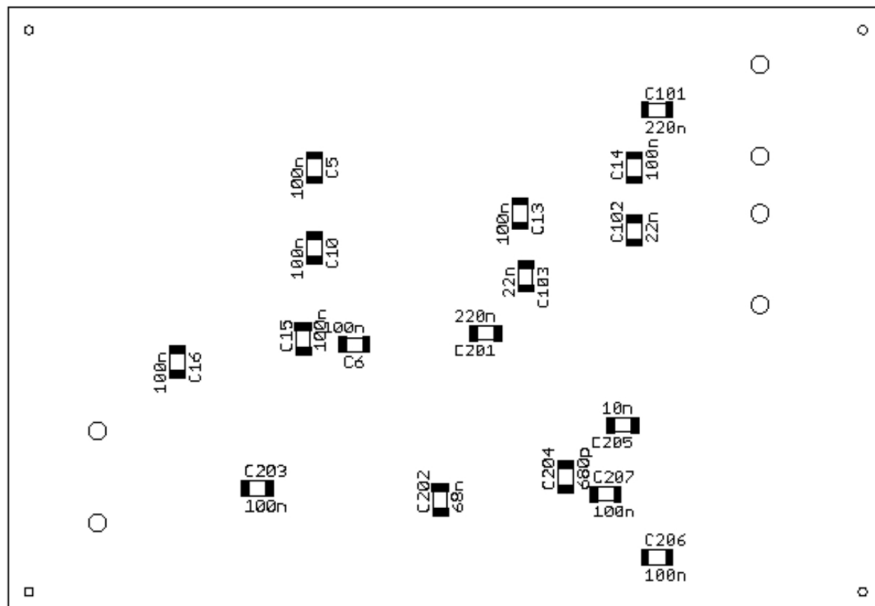
Obr.23.: Matrica – strana súčiastok



Obr.24.: Matrica – strana spojov.



Obr.25.: Osadzovací plán – strana súčiastok.

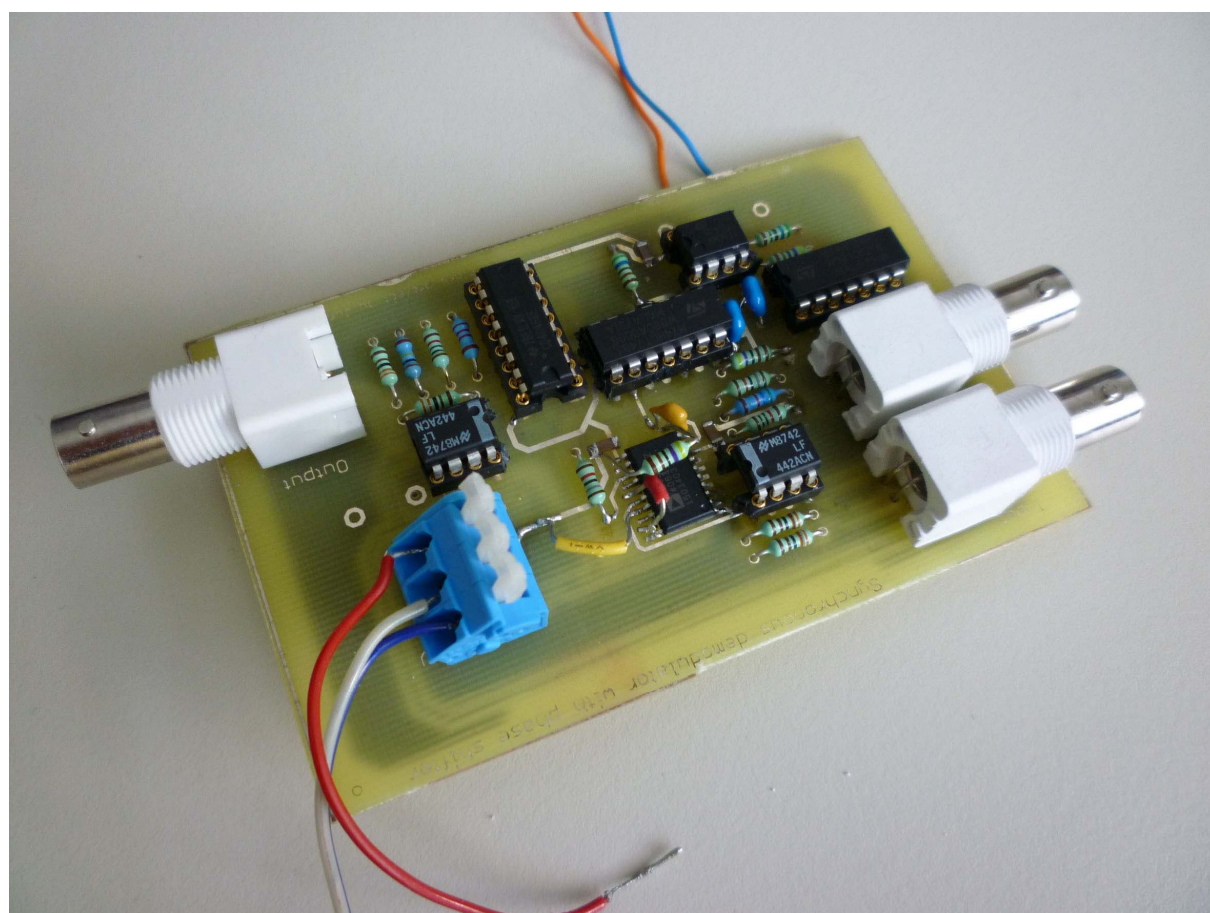


Obr.26.: Osadzovací plán – strana spojov.

4.1 Zoznam súčiastok

Súčiastka	Hodnota	Púzdro
C1	100n	C1206
C2	100n	C1206
C3	100n	C1206
C4	10u	B45181B
C5	100n	C1206
C6	100n	C1206
C7	100n	C050-025X075
C8	100n	C050-025X075
C9	10u	B45181B
C10	100n	C1206
C13	100n	C1206
C14	100n	C1206
C15	100n	C1206
C16	100n	C1206
C101	220n	C1206
C102	22n	C1206
C103	22n	C1206
C201	220n	C1206
C202	68n	C1206
C203	100n	C1206
C204	680p	C1206
C205	10n	C1206
C206	100n	C1206
C207	100n	C1206
IC1	AD630	SO20L
IC4	4046N	DIL16
IC5	74HC74N	DIL14
IC6	NE555N	DIL08
IC7	74HC04N	DIL14
IC10	LF442N	DIL08
IC11	LF442N	DIL08
LSP3	SE14	SE14
LSP4	SE14	SE14
R101	4k7	0207/10
R102	3k3	0207/10
R103	3k3	0207/10
R104	18k	0207/10
R105	18k	0207/10
R106	10k	0207/10
R107	5k6	0207/10
R201	4k7	0207/10
R202	3k3	0207/10
R203	3k3	0207/10
R204	4k7	0207/10
R205	1k	0207/10
R206	10k	0207/10
R207	100k	0207/10
R208	8k2	0207/10

R209	4k7	0207/10
R210	560	0207/10
R211	5k	PT-10S
R212	4k7	0207/10
X2	1-227161-0	AMP_227161
X3	1-227161-0	AMP_227161
X4	1-227161-0	AMP_227161
X5	WAGO3-255-403-508	255-403-508

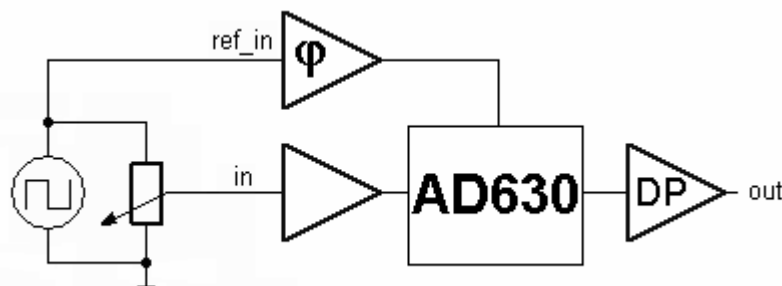


Obr.27.: Finálny návrh systému.

5. Oživenie obvodu.

Po osadení DPS bola najprv odskúšaná funkčnosť obvodu fázového posúvača nasledovne. Po pripojení napájania bola overená voľnobežná frekvencia, ktorá bola $f_0 = 930$ Hz. Na BNC konektor X4 bol následne privedený unipolárny obdĺžnikový signál s frekvenciou 1 kHz, ktorý bol zosilnený obvodom IC11A a privedený na vstup 14 obvodu IC4 (PLL). Na výstupe VCO (pin 4) tak bol signál s dvojnásobným kmitočtom. Vhodnou voľbou súčiastok bola zaručená oblasť zachytenia od $f_{in,min} = 500$ Hz do $f_{in,max} = 6$ kHz. Signál z výstupu VCO bol filtrovaný a privedený na spúšťací vstup (pin 2) obvodu 555 (IC 6). S každou nástupnou hranou vstupného signálu sa obvod zopol a podľa časovej konštanty (8) zotrval v zopnutom stave podľa nastavenia R_{211} . Zmenou R_{211} sa tak nastavovala doba, za ktorú prišlo k vypnutiu. Invertor (IC7A) výstupný signál (pin 3) invertuje. Takto získaná v čase premenná nábežná hrana privedená na hodinový vstup (11) KO typu D (IC5B) spúšťa tento obvod v rôznej dobe. Meraním boli zistené maximálne fázové rozdiely vstupného a výstupného signálu fázového posúvača: $\Delta\varphi_{min} = -81^\circ$ a $\Delta\varphi_{max} = 47^\circ$.

Po odskúšaní funkcie fázového posúvača bola odskúšaná funkčnosť celého systému synchronnej detekcie. Činnosť bola odskúšaná unipolárnym obdĺžnikovým signálom s frekvenciou $f = 1$ kHz. Pomalé zmeny modulačného signálu boli simulované zmenou vstupného signálu pomocou potenciometra (obr. 28), kde *in* je vstup bloku synchronnej detekcie a *ref_in* je vstup bloku fázového posúvača a *out* je výstup systému.



Obr.28.: Simulovanie pomalých zmien modulačného signálu.

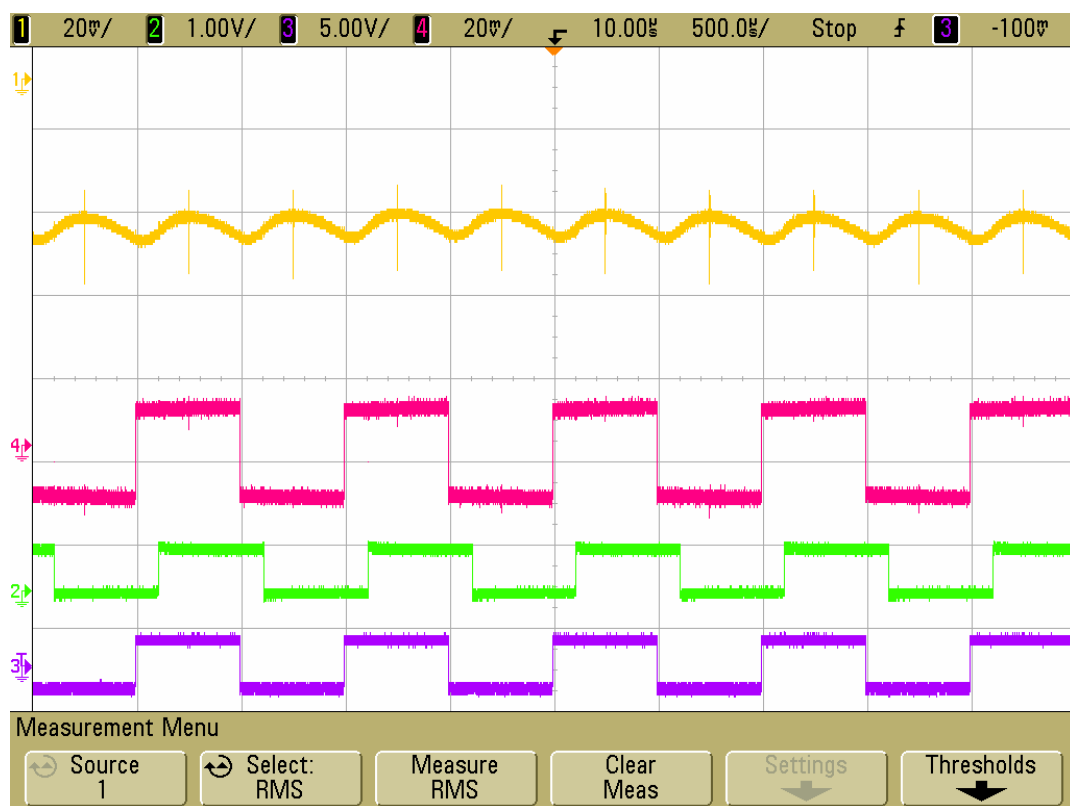
Pre zabezpečenie správnej funkcie systému je dôležité zabezpečiť nulový rozdiel fázy vstupného a referenčného signálu obvodu AD630. Nulový rozdiel je možné nastaviť buď priamo pomocou osciloskopu pozorovaním fázového rozdielu týchto signálov, alebo nepriamo, pozorovaním výchylky výstupného signálu pri zmene odporu potenciometra R_{211} . Vplyv fázového rozdielu je demonštrovaný na nasledujúcich obrázkoch.

Podľa (6) je maximálna výchylka výstupného signálu pri nulovom rozdieli fáz vstupného a referenčného signálu na vstupe demodulátoru. Táto situácia je zobrazená na obr.29. V prípade, že referenčný signál predbieha (obr.30), alebo zaostáva (obr.31) za vstupným signálom demodulátoru, dôjde k poklesu výchylky výstupného signálu. Na týchto 3 obrázkoch je vstupný signál potenciometru privádzaný na kanál 3 (fialová), signál zosilnený vstupným zosilňovačom a privádzaný na vstup demodulátora na kanál 4 (ružová), referenčný signál na kanál 2 (zelená) a výstupný signál na kanál 1 (žltá).

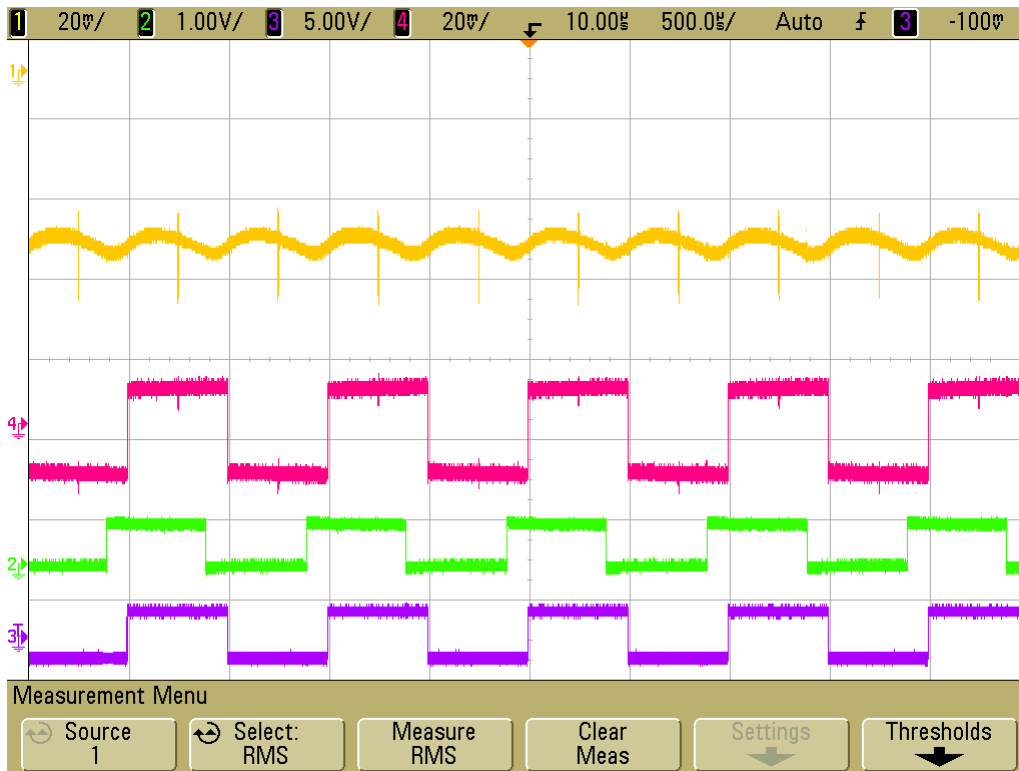
Potenciometrom bola nastavená hodnota vstupného signálu demodulátoru $U_{in} = 20$ mV (kanál 4). Výchylka pri nulovom rozdieli fáz bola $U_{out} = 72$ mV.



Obr.29.: Priebeh signálov pri nulovom rozdieli fáz.



Obr.30.: Priebeh signálov v prípade oneskorenia referenčného signálu za vstupným.



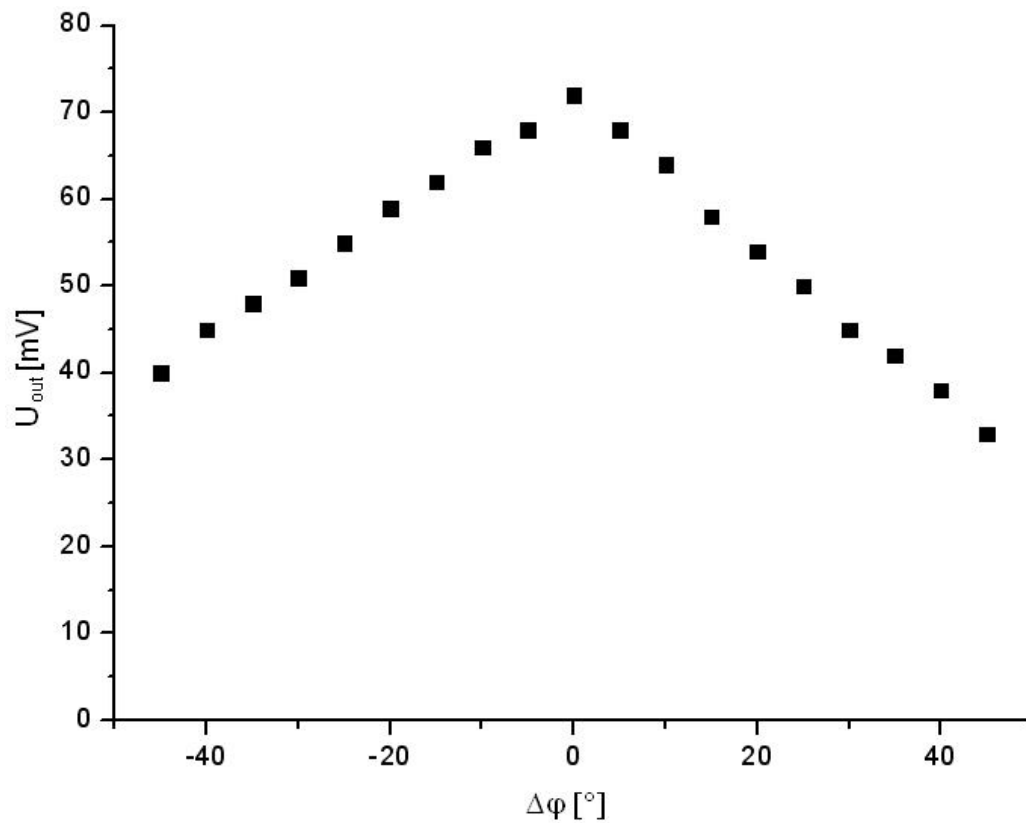
Obr.31.: Priebehy signálov v prípade oneskorenia vstupného signálu za referenčným.

Na obr. 32 je znázornená meraná závislosť napätia $U_{out} = f(\varphi)$ na rozdieli fáz vstupného a referenčného signálu. Záporný fázový rozdiel značí oneskorenie fáze vstupného signálu, takže sa v tomto prípade môžu kompenzovať fázové oneskorenia v ceste referenčného signálu. Obdobne to platí pre kladný fázový rozdiel. Merané hodnoty závislosti sú v tab.2. Tieto hodnoty sú taktiež zobrazené prehľadne v grafe na obr.32.

φ [°]	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0
U_{out} [mV]	40	45	48	51	55	59	62	66	68	72
φ [°]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
U_{out} [mV]	68	64	58	54	50	45	42	38	33	

$U_{in} = 20 \text{ mV}$

Tab.2.: Závislosť výstupného signálu na rozdieli fáz vstupného a referenčného signálu.



Obr.32.: Závislosť amplitúdy výstupného signálu na rozdieli fáz vstupného a referenčného signálu.

Z grafu na obr.32 je jasná silná závislosť amplitúdy výstupného signálu na fázovom rozdieli. Tohto sa dá ale aj využiť, napríklad pri sledovaní pomalých a malých zmien vstupného signálu. Z toho vychádza aj návrh experimentu na obr.33.

6.Návrh experimentu

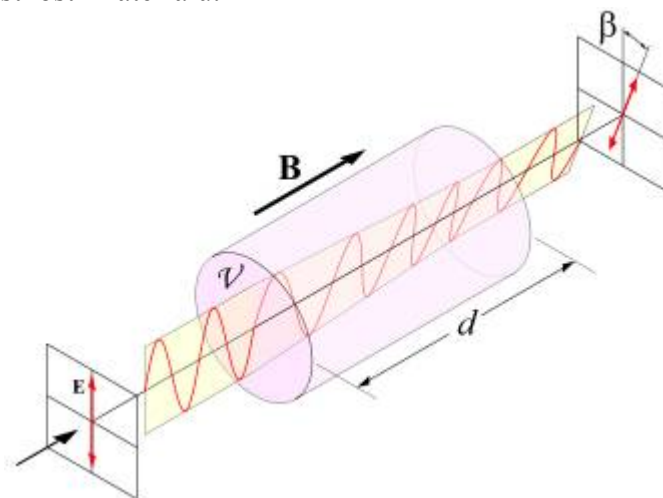
6.1 Faradayov efekt

Vo fyzike je pojmom Faradayov efekt (prípadne Faradayova rotácia) označovaný magneto-optický jav, pri ktorom dochádza k interakcii medzi svetlom a magnetickým poľom v médiu. Dochádza pri ňom následne k stáčeniu roviny polarizácie, ktoré je priamo úmerné intenzite zložky magnetického poľa v smere šírenia svetla.

Tento fenomén bol objavený Michaelom Faradayom v roku 1845 a bol tak prvým experimentálnym potvrdením spojitosti medzi svetlom a elektromagnetizmom. Samotný jav nastáva vo väčšine opticky priehľadných materiálov, ktoré sú vystavené pôsobeniu magnetického poľa. Následne dochádza k rozdeleniu prechádzajúcej elektromagnetickej vlny na dve kruhovo polarizované zložky šíriace sa rôznou rýchlosťou. Pri prechode prostredím tieto vlny na konci rekombinujú a z dôvodu rozdielnej rýchlosti dochádza k fázovému rozdielu, ktorý spôsobí stočenie roviny polarizácie. Uhol stočenia je kvantitatívne určený vzťahom (9)

$$\beta = v B d, \quad (9)$$

kde β [rad] je uhol stočenia, B [T] je intenzita magnetického poľa, d [m] dĺžka trasy, kde dochádza k interakcii a v [rad.T⁻¹.m⁻¹] je Verdetova konštanta materiálu, charakterizujúca magneto-optické vlastnosti materiálu.



Obr.33.: K vysvetleniu Faradayovej rotácie.

Faradayov efekt má niekoľko využití metrológií. Bol napríklad využitý pri meraní optickej rotačnej mohutnosti, na amplitúdovú moduláciu svetla, či diaľkové snímanie magnetických polí. Využíva sa aj pri výskume polarizácie elektrónového spinu v polovodičoch [10]. Taktiež je tento jav pozorovaný pri prechode svetla medzihviezdnou hmotou, či prechode rádiových vln v ionosfére.

6.2 Meranie slabých zmien magnetického poľa

Ako bolo spomenuté, môže byť Faradayov jav využitý na snímanie zmien magnetických polí. Návrh experimentu využívajúci tento efekt je na obr.33.

V pravej časti obr. 34 je laserová dióda modulovaná signálom s frekvenciou $f = 1$ kHz, slúžiacim ako nosný kmitočet. Laserový zväzok následne prechádzal Faradayovým rotátorom

(FR) umiestneným v slabom premennom magnetickom poli modelovaným magnetom. Za ním sa nachádzal polarizačný analyzátor a výsledný signál bol detegovaný fotodiódovým prijímačom. Každá zmena intenzity magnetického poľa v okolí FR spôsobí slabú zmenu v stočení polarizačnej roviny prechádzajúceho svetla. V dôsledku toho poklesne intenzita žiarenia za analyzátorom, čo sa prejaví v poklese intenzity žiarenia na fotodióde, čím dôjde k poklesu signálu na vstupe synchronného detektoru a tak aj k poklesu výstupného signálu. Dá sa odvodiť vzťah pre zisk synchronného detektoru ako pomer medzi zmenou výstupného signálu ku zmene vstupného signálu.

Pred priložením magnetu		Po priložení magnetu	
U_{in} [mV]	U_{out} [V]	U_{in} [mV]	U_{out} [V]
420	1,21	331	0,95

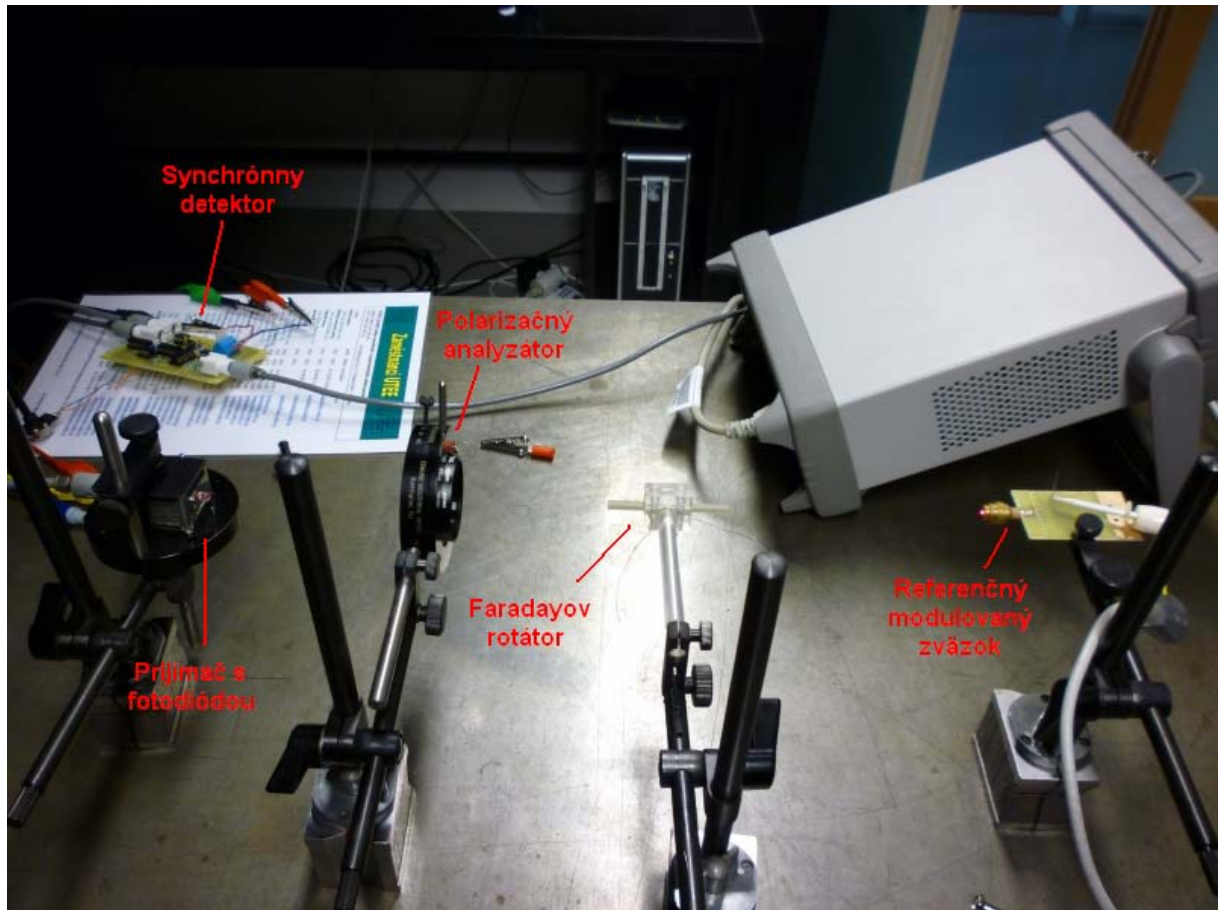
Pozn.: U_{in} je amplituda napätia na vstupe a U_{out} amplituda napätia na výstupe synchronného detektoru.

Tab.3.: Určenie zisku systému.

Zisk je potom

$$\frac{\Delta U_{out}}{\Delta U_{in}} = \frac{(1,21 - 0,95)}{(0,420 - 0,331)} = 2,92, \quad (10)$$

a zhoduje sa so zosilnením výstupného zosilňovača. Z toho následne vychádza požiadavka na veľké zosilnenie výstupného zosilňovača pre pozorovanie malých zmien signálu.



Obr.34.: *Návrh experimentu pre meranie slabých zmien magnetického poľa.*

7. Záver

V bakalárskej práci boli rozobrané teoretické aspekty synchronnej detekcie slabých optických signálov. Ďalej bol rozobraný vplyv časového priebehu modulačného signálu na fungovanie systému a na základe toho bola vybraná modulácia obdĺžnikovým signálom. V ďalšom bol rozobraný vplyv fáze a následne navrhnuté zapojenie posúvača fáze, ktorý prípadné zmeny fáze meraného signálu kompenzuje a je tak zaistená maximálna účinnosť systému.

V druhej časti boli rozobrané jednotlivé časti systému a navrhnutá celková schéma systému realizujúceho synchronnu detekciu slabých optických modulovaných signálov. Systém je vhodné doplniť výstupným zosilňovačom s veľkým zosilnením pre detekciu veľmi malých zmien signálov.

Na záver bol navrhnutý systém vyrobený, oživený a jeho funkcia odskúšaná na jednoduchej optickej úlohe. Uvedený systém má veľký potenciál nielen v metrológii, ale aj v iných vedných odboroch ako rádioelektronika, či astronómia.

8. Bibliografie

- [1] JOHNSON, M. *Photodetection and Measurement: Maximizing Performance in Optical Systems*. McGraw-Hill Professional, 2003
- [2] http://measure.feld.cvut.cz/groups/edu/sz/pdfs/synchronn%ED_detekce.pdf
- [3] AN-603 <http://www.analog.com>
- [4] <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/36296>
- [5] ERBEN, J. *Návrh a konstrukce synchronního detektoru pro ERP spektrometr*. Brno: Masarykova Univerzita, Přírodovědecká Fakulta, 2007. Diplomová práce.
- [6] <http://www.analog.com>
- [7] http://www.fornax.sk/~srnka/doc/sem5/fazovy_zaves.pdf
- [8] <http://www.ti.com>
- [9] <http://www.fairchildsemi.com>
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Faraday_rotator

Pozn.: Všetky internetové zdroje boli k 1.6.2009 dostupné a funkčné.

9.Zoznam použitých skratiek

AM	Amplitúdová modulácia
DP	Dolná prepust'
DPS	Doska plošných spojov
EPR	Elektrónová paramagnetická rezonancia (angl. Electron paramagnetic resonance)
FR	Faradayov rotátor (angl. Faraday rotator)
FT	Fourierova transformácia
KO	Klopný obvod
MKO	Monostabilný klopný obvod
PC	Fázový komparátor (angl. Phase comparator)
PLL	Fázový záves (angl. Phase-locked loop)
S/N	Odstup signálu od šumu (angl. Signal to noise ratio)
VCO	Napätím riadený oscilátor (angl. Voltage controlled oscillator)