



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TEORIE OBVODŮ**

**Obvodové funkční bloky pro ultrazvukové měřicí systémy a senzory**  
**Circuit building blocks for ultrasonic measurement systems and sensors**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Studijní program: Komunikace, multimedia a elektronika

Studijní obor: Elektronika a komunikace

Vedoucí práce: Ing. Martin Pokorný Ph.D.

**Jan Motyčka**

**Praha, 2019**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Motyčka** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **328573**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra teorie obvodů**  
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**  
Studijní obor: **Komunikace a elektronika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Obvodové funkční bloky pro ultrazvukové měřicí systémy a senzory**

Název bakalářské práce anglicky:

**Circuit building blocks for ultrasonic measurement systems and sensors**

Pokyny pro vypracování:

Prostudujte principy měřících metod využívajících ultrazvuk a ultrazvukové senzory. Seznamte se s možnostmi řešení a blokovou strukturou ultrazvukových měřících systémů (např. pro měření vzdálenosti, rychlosti, průtoku, rychlosti a směru větru, hloubky, výšky hladiny apod.). Bližší se seznamte s vybranými funkčními bloky určenými pro generování a zpracování signálů pro ultrazvukové senzory. Navrhněte, realizujte a oživte vybrané obvodové bloky ve formě vývojových vzorků, ověřte jejich funkci a dosažené parametry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ĎAĎO, Stanislav - KREIDL, Marcel. Senzory a měřicí obvody. 2. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-02057-6.
- [2] HRDINA, Zdeněk - VEJRAŽKA, František. Signály a soustavy. 1. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01726-5.
- [3] VEDRAL Josef - FISCHER Jan. Elektronické obvody pro měřicí techniku. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-01950-0.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Martin Pokorný Ph.D., katedra teorie obvodů FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **20.02.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2018**

\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

**23.3.2017**  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne 08.01.2019

Jan Motyčka

## Poděkování

Děkuji panu Ing. Martinu Pokornému, Ph.D., vedoucímu bakalářské práce za ochotu a trpělivost, se kterou mi poskytoval cenné rady a připomínky, které pro mne byly velmi nápomocné.

Také děkuji manželce, že mě i přes naše pracovní vytížení a náročnou rekonstrukci domu v průběhu celého studia podporovala a hlavně za to, že dala život našemu malému synovi, který se v průběhu mého studia narodil. Děkuji Ti, Ivanko.

## **Abstrakt :**

Cílem této práce je seznámení se s ultrazvukem a jeho využití v různých odvětvích, zejména pak jeho využití při měření rychlosti a vzdálenosti na principu radaru (sonaru) v impulzním režimu. V dalších částech se pak zabývá návrhem obvodového bloku provádějící operaci druhá mocnina, jsou představeny možnosti řešení takového obvodu.

**Klíčová slova :** ultrazvuk, druhá mocnina

## **Abstract :**

The main goal of this thesis is to get acquainted with ultrasound and its use in various branches, especially its use in measuring speed and distance on the principle of the radar (sonar) in the pulse mode. In the next parts, the design of the circuit block carrying out the second power operation is discussed, the possibilities of such a circuit are presented.

**Keywords :** ultrasound, second power operation

## Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Ultrazvuk.....	2
2.1	Základní charakteristika ultrazvuku .....	2
2.2	Použití ultrazvuku.....	2
2.2.1	Výskyt v přírodě.....	2
2.2.2	Defektoskopie .....	3
2.2.3	Sonar.....	4
2.2.4	Medicína .....	4
2.2.5	Měření vzdálenosti.....	4
2.2.6	Další aplikace.....	4
3	Radar a sonar.....	5
3.1.	Primární a sekundární radary .....	5
3.2.	Radar v impulzním režimu.....	5
3.3.	Radar v kontinuálním režimu .....	6
3.4.	Dopplerův jev .....	6
4	Měření vzdálenosti za pomoci radaru .....	8
4.1.	Měření pomocí CW radaru.....	8
4.2.	Měření pomocí impulzního radaru .....	9
5	Příjem a vyhodnocení signálu v radaru.....	11
5.1	Autokorelační funkce .....	11
5.2	Přizpůsobený filtr .....	12
5.3	Detekce maxima a rozhodovací úroveň .....	13
6	Návrh obvodového bloku.....	15
6.1.	Ultrazvukový měřič vzdálenosti.....	15
6.2.	Vyhodnocovací obvody .....	16
6.3.	Obvody získání obálky.....	17
6.3.1	Digitální zpracování .....	18
6.3.2	Analogové násobičky.....	18
6.4.	Kvadrátor – možnosti realizace .....	18
6.4.1	Srovnávání napětí s kvadratickou funkcí času .....	19
6.4.2	Výpočet plochy obdélníkového impulzu s jednotaktní integrací.....	20
6.4.3	Výpočet plochy obdélníkového impulzu s dvoutaktní integrací.....	21



6.5. Kvadrátor – vybraný způsob návrhu .....	22
6.5.1. Analogově číslicový převodník s dvoutaktní integrací .....	22
6.5.2. Kvadrátor s dvoutaktní integrací.....	25
6.6. Kvadrátor – součástky vhodné k realizaci .....	30
7. Závěr .....	33
Zdroje.....	34



## Seznam obrázků

Obrázek 2.1 Spektrum ultrazvuku a jeho typické aplikace. Obrázek převzat z [1] .....	2
Obrázek 2.2 Princip měření vad materiálu odrazem od nehomogenit. Obrázek převzat z [11].....	3
Obrázek 4.1 Nákres principu radaru s kontinuální vlnou .....	8
Obrázek 4.2 Impulzní radar - vyslání a příjem odraženého impulsu .....	9
Obrázek 4.3 Princip fungování impulzního radaru v čase.....	9
Obrázek 5.1 Dva signály se stejným průběhem posunuté v čase .....	11
Obrázek 5.2 Vzájemná korelační funkce vyslaného a přijatého impulsu .....	12
Obrázek 5.3 Detekce maxima a rozhodovací úroveň .....	13
Obrázek 6.1 Blokové schéma ultrazvukového měřiče vzdálenosti .....	15
Obrázek 6.2 Blokové schéma získání amplitudové obálky z obálky komplexní .....	16
Obrázek 6.3 Blokové schéma přizpůsobeného filtru.....	17
Obrázek 6.4 Blokové schéma srovnávání napětí s kvadratickou funkcí času .....	19
Obrázek 6.5 Blokové schéma – výpočet plochy impulsu s jednotaktní integrací .....	20
Obrázek 6.6 Blokové schéma – výpočet plochy impulsu s dvoutaktní integrací.....	21
Obrázek 6.7 Schéma analogově číslicového integračního převodníku s dvoutaktní integrací .....	22
Obrázek 6.8 Invertující integrační zesilovač.....	23
Obrázek 6.9 Průběh napětí na výstupu integrátoru v analogově číslicovém převodníku s dvoutaktní integrací .....	24
Obrázek 6.10 Blokové schéma kvadrátoru v intervalu $t \in (0; T_1)$ .....	25
Obrázek 6.11 Blokové schéma kvadrátoru v intervalu $t \in (T_1; T_1 + T_2)$ .....	26
Obrázek 6.12 Průběh napětí na vstupu integrátoru INT1.....	27
Obrázek 6.13 Průběh napětí na výstupu integrátoru INT1.....	27
Obrázek 6.14 Průběh napětí na výstupu druhého integrátoru INT2.....	28
Obrázek 6.15 Průběh napětí na vstupu druhého integrátoru INT2 .....	29
Obrázek 6.16 Dvoucestný operační usměrňovač.....	30
Obrázek 6.17 Část obvodu kvadrátoru obsahující invertor a součtový člen .....	30
Obrázek 6.18 Diferenční zesilovač s operačním zesilovačem .....	31
Obrázek 6.19 TL084 Operační zesilovač - vnitřní zapojení a rozložení pinů .....	31
Obrázek 6.20 LM311 Komparátor - Vnitřní zapojení a rozložení pinů .....	31
Obrázek 6.21 LF398 Sample and Hold - Vnitřní zapojení a rozložení pinů .....	32
Obrázek 6.22 ADG411 Spínače s tranzistory JFET .....	32



## 1. Úvod

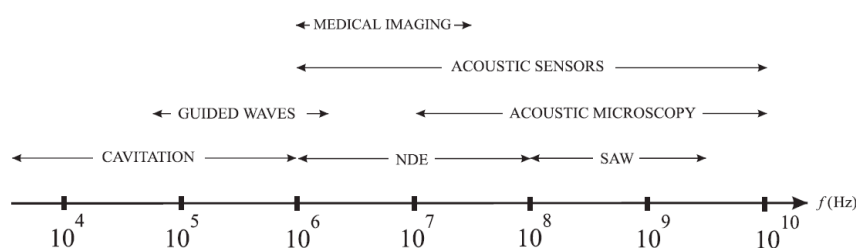
Zadáním mé práce je návrh obvodového bloku využitelného v měřících přístrojích, které ke své činnosti používají vlastností ultrazvukových vln. Nejprve se proto zaměřím na ultrazvuk jako takový, popíši jeho základní vlastnosti, dále uvedu jeho přirozený výskyt v přírodě a v neposlední řadě také jeho praktické využití v různých oborech lidské činnosti. Po základním seznámení s ultrazvukem se zaměřím na konkrétní využití ultrazvuku pro měření vzdálenosti a rychlosti na principu radaru (sonaru), tedy na základě měření doby zpoždění odraženého signálu. Budu se konkrétně věnovat základní funkci radaru a uvedu i dělení radarů dle principu jejich fungování. Dále nastíním princip fungování radarů v impulzním a kontinuálním režimu, s čímž souvisí Dopplerův jev, o kterém se také zmíním.

V další části se již budu věnovat problematice návrhu samotného obvodového bloku. K návrhu jsem zvolil obvodový blok získání amplitudové obálky z komplexní obálky signálu. Uvedu schémata a princip fungování vyhodnocování zpoždění přijatého signálu a pak se již budu věnovat samotnému bloku. Zvolil jsem blok, který je nedílnou součástí vyhodnocování amplitudové obálky a to tzv. kvadrátor, neboli obvod počítající druhou mocninu signálu. Nejprve se budu zabývat možnostmi, které by pro návrh přicházely v úvahu, poté jednu variantu zvolím a podrobně rozeberu princip fungování. Na závěr práce uvedu možné součástky k realizaci a provedu shrnutí mé práce.

## 2. Ultrazvuk

### 2.1 Základní charakteristika ultrazvuku

Stejně jako viditelné spektrum pokrývá jen nepatrnou část elektromagnetického spektra, tak slyšitelné spektrum pokrývá oblast frekvencí akustického vlnění zhruba od 20 Hz až do 20 kHz. Ultrazvuk je takové akustické vlnění, jehož dolní frekvence leží nad horní hranicí slyšitelného spektra, tedy více než 20kHz, pokračuje do oblasti MHz a konečně zhruba okolo 1 GHz přechází do tzv. hypersonického režimu nebo také hyperzvuku. Celé spektrum je ukázáno na obr. 1 kde jsou pro každé pásmo znázorněny typické aplikace. [1]



Obrázek 2.1 Spektrum ultrazvuku a jeho typické aplikace. Obrázek převzat z [1]

Obr. 1.1. Spektrum ultrazvuku a jeho typické aplikace v určitých oblastech. Obrázek převzat z [1].

Cavitation – tzv. Kavitace neboli vznik dutin v kapalině při lokálním poklesu tlaku a jejich následnou implozi. Tento jev je pozorovatelný např. u lodního šroubu.

Guided Waves – Testování za pomoci řízených vln – využití pro identifikaci poruch na dlouhých prvcích např. kolejnicích nebo potrubí.

NDE – Non Destructive Examination, neboli nedestruktivní testovací metody

SAW – Surface Acoustic Wave – aplikace týkající se povrchové vlny

## 2.2 Použití ultrazvuku

### 2.2.1 Výskyt v přírodě

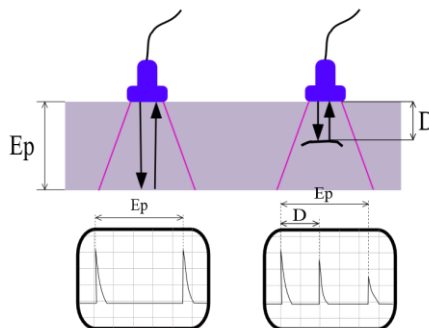
V přírodě se nalézá více druhů živočichů využívajících ultrazvuk a to zpravidla pro orientaci v prostoru či komunikaci. Nejznámějším druhem živočicha je jednoznačně netopýr, který využívá ultrazvuk pro orientaci v prostoru při letu a lovu. Jeho schopnosti

navigace jsou natolik přesné, že je schopen díky ultrazvuku proletět i otvory, které jsou jen o málo větší, než je jeho rozpětí křídel. Také je schopen za letu přesně lokalizovat i ulovit svou kořist.

Zajímavé je, že například i některé oběti netopýra jsou vybaveny protizbraní, kdy využívají principu navigace netopýra při letu a jsou schopny jeho „vysílač“ obalamutit, případně dokonce krátkodobě zahltit vlastním vysíláním. [4] Dle pozorování jde v tomto případě o jakousi formu obrany, která by se dala přirovnat k specifickému zabarvení některých živočichů sloužící k maskování před případnými predátory. Dalším příkladem výskytu ultrazvuku v přírodě jsou například delfíni, kteří ultrazvuk používají ke komunikaci.

## 2.2.2 Defektoskopie

Vlastností ultrazvuku se využívá pro zjišťování vnitřních i povrchových vad různých materiálů. Základním principem je vyslání vysokofrekvenční akustické vlny do materiálu, přičemž vlna mění své vlastnosti při průchodu každou nehomogenitou v materiálu. Jakákoliv nechtěná nehomogenita uvnitř, či na povrchu materiálu značí materiálovou vadu. Měří se buď změna vlastností akustické vlny po průchodu materiálem, případně odraz vlnění od vad materiálu zpět k vysílači. Tímto způsobem je možné zkoumat vnitřní vady materiálu nedestruktivní formou.



Obrázek 2.2 Princip měření vad materiálu odrazem od nehomogenit. Obrázek převzat z [11].

Velkou výhodou je prakticky okamžité zobrazení výsledků, které lze následně ihned zpracovávat. Ultrazvukem se dají měřit nejrůznější materiály jako jsou kovy, plasty a keramika a dokonce i např. dřevo. Hojně je měření ultrazvukem využíváno také pro kontrolu kvality a tloušťky svárů, či studených spojů.

Určitým omezením je pak nutnost přímého přístupu k povrchu materiálu a většinou je také potřeba přenést ultrazvukové vlny do zkoušeného materiálu skrze nějaké medium. Dále je to velmi špatný přenos signálu v hrubozrnných materiálech, pro které tato metoda není úplně vhodná.

### 2.2.3 Sonar

Zkratka sonar je z anglického názvu sound navigation and ranging, a jde o zařízení pracující na principu radaru, ovšem namísto radiových vln využívá vln ultrazvukových. Sonar je využíván zejména pod vodou, kde má ultrazvuk výrazně vhodnější vlastnosti než radiové vlny, které pod vodou nemají tak velký dosah jako právě vlny akustické v oblasti ultrazvuku. Využíván je proto pro podmořské aplikace typu skenování reliéfu mořského dna nebo pátrání po vracích potopených lodí. A samozřejmě ve službách armády pro navigaci, lokalizaci ostatních plavidel a jiných zařízení. Podrobněji se budu sonaru i samotnému principu radaru věnovat v dalších částech práce.

### 2.2.4 Medicína

Pojem ultrazvuk je mezi širokou veřejností nejvíce znám jakožto synonymum pro prenatalní ultrazvukové vyšetření plodu. Užití ultrazvukové sonografie má ovšem daleko více využití. Jde o metodu, u které nebyl prokázán zásadně negativní efekt na lidské tělo u nízkovýkonových diagnostických nástrojů. [7] Ultrazvukovým vyšetřením lze zobrazit vnitřní orgány a měkké části (žlázy a uzliny). Metoda je neinvazivní, prakticky bezbolestná a orgány dnes lze díky moderním přístrojům zobrazovat trojrozměrně a v reálném čase. Další metodou je tzv. Dopplerovské vyšetření, kdy lze určit např. rychlost průtoku krve v cévách a díky tomu zjistit jejich průchodnost, nebo posoudit stupeň jejich zúžení.

### 2.2.5 Měření vzdálenosti

Ultrazvuk se využívá také pro měření vzdálenosti a to v dnešní době v levnějších a jednodušších aplikacích, jelikož je nahrazován měřiči laserovými, které mají daleko lepší vlastnosti. Přesto se ultrazvukové senzory stále uplatňují a jejich aplikace je velmi rozšířená. Typickou ukázkou jsou např. parkovací senzory v automobilech. Dále se užívá u robotů kdy je ultrazvuk užíván pro měření vzdálenosti od překážek a tedy bezpečné orientaci v prostoru.

### 2.2.6 Další aplikace

Mezi další aplikace nesmíme zapomenout na měření průtoku, rychlosti proudění větru, měření rychlosti pohybujících se předmětů. Všechny tyto měřiče pracují na základě vyslání ultrazvukových vln do prostředí a jejich příjem a vyhodnocení změny jejich vlastností, případně jejich zpoždění na základě čehož je možné následně určit vlastnosti měřeného prostředí, případně vzdálenost, kterou vlny urazily.



## 3 Radar a sonar

Zkratka radar je z anglického výrazu Radio detecting and ranging, tedy volně přeloženo jako radiové zjišťování a zaměřování. Radary fungují na principu vysílání radiových vln do okolí a následný příjem jejich odrazů od okolních objektů. Po zpracování přijatého signálu a určení jeho vlastností lze vyhodnotit vzdálenost případně rychlost pohybu sledovaného objektu.

Radary se dělí na primární a sekundární podle toho, zda aktivně vysílají a sledují odraz vlastního vysílání, případně přijímají smlouvenou odpověď sledovaného objektu. Dále se dělí dle způsobu vysílání, a to na impulzní a kontinuální.

Sonar je obdobou radaru, pracuje na podobném principu, pouze k vysílání se neuvžívají elektromagnetické vlny, ale vlny akustické. Od toho je také odvozen název sonar z anglického sound navigation and ranging. V dalších částech práce budu ilustrovat způsoby měření na principu radaru.

### 3.1. Primární a sekundární radary

Primární radary pracují na principu vysílání elektromagnetického vlnění do prostoru a příjmu odrazů od sledovaných objektů. Primární radar tedy pracuje zcela nezávisle na sledovaných objektech, sám vysílá a své vlastní vysílání po odrazu opět přijímá. Oproti tomu sekundární radar ke svému fungování potřebuje protistranu. Někdy se protistrana označuje také jako odpovídač a to ze zcela prostého důvodu. Sekundární radar totiž vysílá smlouvený signál a pokud jej zachytí odpovídač, odpoví radaru tím, že vyše směrem k němu opět smlouvený odpovědní signál. Tohoto principu je hojně využíváno pro řízení letového provozu, kdy letadla jsou vybavena odpovídači a odpovídají specifickým kódem, podle kterého je možné letadlo identifikovat.

### 3.2. Radar v impulzním režimu

Radar v impulzním režimu se vyznačuje přerušovaným vysíláním krátkých impulzů a jejich následným příjmem. Tímto způsobem lze dosáhnout daleko většího dosahu radarů a to bez významného zvyšování výkonu. Vyslaný impuls musí mít sice poměrně vysoký výkon, ovšem vzhledem k tomu, že radar je po relativně dlouhou dobu v tzv. tichém režimu, tedy pouze přijímá, není jeho celkový výkon z hlediska spotřebované energie za čas vysoký. Velkou výhodou impulzního radaru je tedy hlavně maximální dosah, nevýhodou pak nemožnost detekovat blízké cíle kvůli nutné přítomnosti tzv. slepého intervalu.

### 3.3. Radar v kontinuálním režimu

Oproti pulznímu radaru využívá tzv. CW (continuous wave) radar nepřetržité vysílání radiových vln a zároveň jejich přijímání. Proto je u těchto radarů oddělená vysílací a přijímací anténa a jsou obě neustále aktivní. Zatímco u pulzních radarů se využívá přerušovaného vysílání a přijímání. Vzhledem k tomu, že se vysílá a přijímá současně, je nutné zajistit, aby elektromagnetické vlnění ihned po výstupu z vysílače nepůsobilo rušení na přijímací anténě. Výhodou kontinuálního režimu je schopnost detekovat velmi blízké předměty, schopnost měřit aktuální rychlost sledovaného objektu, ale také nižší nároky na vybavení. Jeho nevýhodou je malý dosah a neschopnost změřit vzdálenost. Měření vzdálenosti však lze vyřešit modulací vysílaného signálu.

### 3.4. Dopplerův jev

Dopplerův jev je fyzikální jev, který nastává v případě, kdy vysílač a přijímač jsou vůči sobě v pohybu. Tedy kdy se buď pohybuje přijímač směrem k vysílači, či naopak. Známý přírůdek je např. projíždějící automobil vybavený sirénou, kdy pozorovatel slyší jinou frekvenci když se automobil přibližuje a jinou když se automobil vzdaluje. V obou případech přibližování nebo oddalování však slyší jinou frekvenci, než siréna umístěná na automobilu skutečně vysílá. Pokaždé když je zdroj v pohybu vzhledem k přijímači či naopak, pak přijímaná frekvence je jiná než vysílaná. Jediné v čem se liší přibližování a oddalování přijímače a vysílače je ve směru posunu frekvence na vyšší respektive nižší frekvence. Základní princip Dopplerova jevu vyjadřuje rovnice (2.1) přičemž znaménka se užívají dle směru pohybu vysílače a přijímače.

$$f_r = \frac{c \pm v_r}{c \mp v_s} f_t$$

$v_r$  - rychlost přijímače

$v_s$  - rychlost vysílače

$c$  – rychlost šíření dané vlny v daném prostředí

$f_t$  – vyslaná frekvence

$f_r$  – přijatá frekvence

Pro tzv. Dopplerovou frekvenci, která vyjadřuje rozdíl mezi vyslanou a přijatou frekvencí, platí následující vzorec (2.2)

$$f_d = f_r - f_t = \frac{c}{c \mp v_s} f_t - f_r = \pm \frac{f_t v_s}{c \mp v_s}$$

V případě této rovnice je předpoklad, že přijímač je stacionární a tudíž jeho rychlost  $v_r$  z předešlého vzorce 2.1 je rovna nule, zatímco rychlost zdroje  $v_s$  je nenulová. Vzorec lze dále zjednodušit zanedbáním rychlosti zdroje  $v_s$ , protože je daleko nižší než rychlost světla  $c$ . Výsledná chyba zanedbáním je pro praktické použití akceptovatelná. Tato rovnice platí pro stacionární přijímač a pohybující se vysílač.

$$f_d = \pm 2v_s \frac{f_t}{c}$$

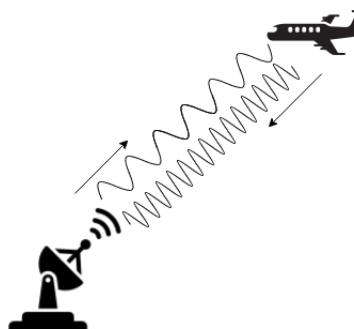
V případě radaru ovšem platí, že nejprve vysílá a až následně přijímá vlny odražené od sledovaného objektu. K dopplerovskému posunu frekvence tedy dochází hned dvakrát. Proto výsledný vzorec je (2.3)

## 4 Měření vzdálenosti za pomoci radaru

V této kapitole se blíže zaměřím na měření vzdálenosti a rychlosti za pomoci radarů v kontinuálním režimu a v impulzním režimu. Dále uvedu některé aplikace. Při zpracování jsem vycházel zejména z [9], [10], [13].

### 4.1. Měření pomocí CW radaru

Radar v kontinuálním režimu (CW radar – continuous wave) není schopen sám o sobě změřit vzdálenost. Radar neustále vysílá souvislý harmonický signál s konstantní frekvencí a přijímá signál odražený od okolních objektů.



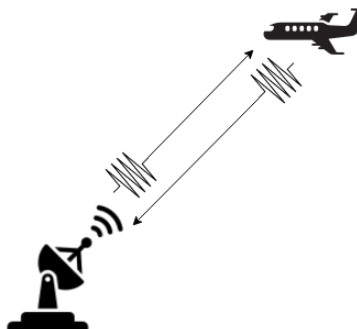
Obrázek 4.1 Nákres principu radaru s kontinuální vlnou

Z obrázku 4.1. je patrné, že radar s kontinuální vlnou sleduje změnu frekvence (viz kapitola 3.4. Dopplerův jev), ze které je následně schopen vypočítat rychlost. Proto je vhodný pouze pro detekci pohybujících se objektů. U tohoto typu radaru nelze změřit vzdálenost, jelikož nejsme schopni spočítat čas, protože se vysílá trvalý harmonický signál. Řešením je do vysílaného signálu vnést takovou informaci, ze které bychom byli schopni čas určit. K tomu se dají využít modulace signálu. Tedy je potřeba zvolit vhodnou úpravu charakteristiky vysílaného signálu za pomoci tzv. modulačního signálu. U CW radarů se užívá zejména frekvenční a fázová modulace.

U frekvenční modulace se již podle názvu periodicky mění frekvence vysílaného signálu. Vhodně zvoleným modulačním signálem lze na základě porovnání vysílaného a přijatého signálu vypočítat čas. Nejčastěji se užívá pilovitý nebo trojúhelníkový průběh modulačního signálu.

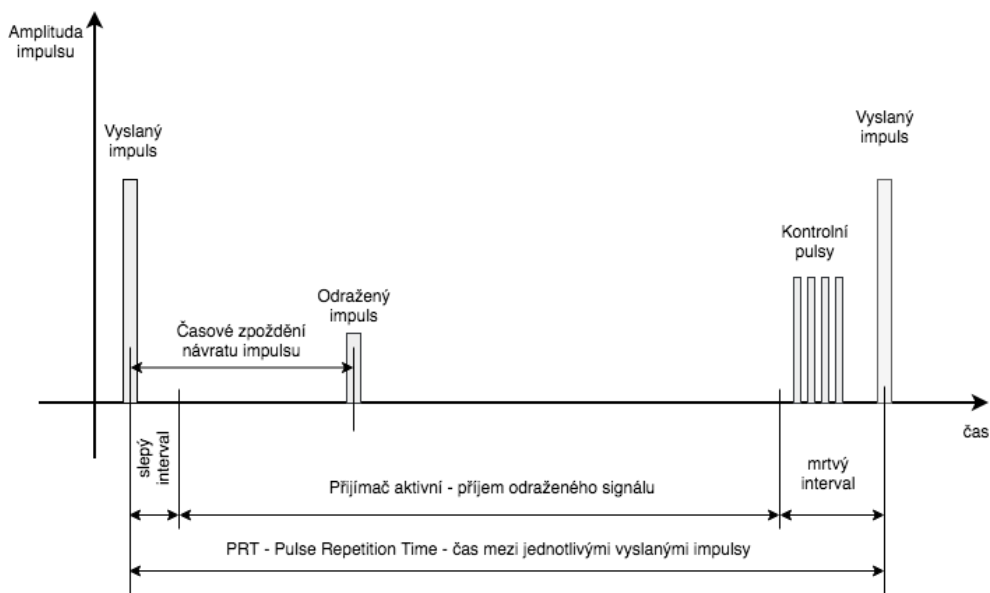
## 4.2. Měření pomocí impulzního radaru

Impulzní radar měří vzdálenost za pomoci vysílání krátkých impulzů, jejich zpětného příjmu a na základě časového zpoždění dopočítává vzdálenost. Šířka vyslaného pulzu PW (Pulse width) závisí na požadovaných parametrech výstupu z radaru. Pokud použijeme větší šířku pulzu, získáme lepší dosah, ale nižší rozlišení, zatímco u užšího pulzu je to naopak, tedy vyšší rozlišení za cenu kratšího dosahu.



Obrázek 4.2 Impulzní radar - vysílání a příjem odraženého impulsu

Na obrázku 4.2 je znázorněn základní princip fungování impulzního radaru, kdy radar vyšle impuls směrem ke sledovanému objektu a zpětně přijímá odražený impuls, který následně vyhodnocuje. Podrobněji si fungování ukážeme na následujícím obrázku časového průběhu vysílání a příjmu odraženého signálu.



Obrázek 4.3 Princip fungování impulzního radaru v čase

Nejprve radar vyšle krátký impuls o dané šířce. Následuje krátký ochranný interval mezi vysíláním a přijímáním zvaný slepý interval. Slepý se nazývá proto, že pokud v tuto dobu dopadne na přijímač impulz od blízkého objektu, není radarem zachycen, protože přijímač ještě nebyl aktivován. Tento slepý interval slouží jako ochrana pro přijímač, jelikož vyslaný impuls v tuto dobu ještě doznívá. Zároveň určuje minimální dosah radaru, protože radar kvůli tomuto slepému intervalu není schopen zachytit blízké předměty. Po jeho uběhnutí následuje samotný příjem užitečného signálu, kdy je aktivní pouze přijímač. Na závěr cyklu proběhne tzv. mrtvý interval, který je důležitý zejména pro soustavy s fázovým řízením (Phased arrays), kdy je potřeba před vysláním dalšího pulsu nakonfigurovat její jednotlivé prvky. V této době také probíhají kontrolní pulzy. Poté se opět vysílá další impuls. Celkový čas mezi jednotlivými vyslanými impulsy se označuje zkratkou PRT (Pulse Repetition Time) [9].

## 5 Příjem a vyhodnocení signálu v radaru

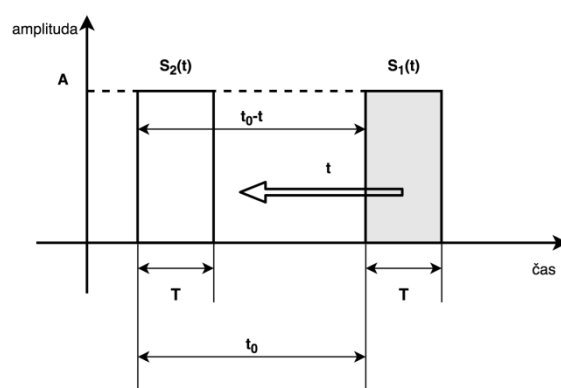
V této kapitole uvedu způsob, jakým vyhodnocovací obvody určují časové zpoždění mezi vyslaným a odraženým signálem. Teoretický rozbor funkce vyhodnocení časového zpoždění jsem zpracoval a částečně převzal z [8] a [2]. Nejprve rozeberu důležité pojmy týkající se autokorelační funkce a přizpůsobeného filtru a následně popíši princip nalezení maxima a tedy určení zpoždění přijatého signálu.

### 5.1 Autokorelační funkce

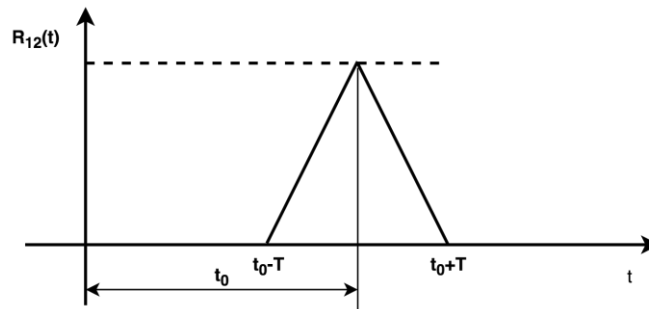
Autokorelační funkce je speciální případ vzájemné korelační funkce, kdy srovnáváme signál se sebou samým. Vzájemná korelační funkce vyjadřuje míru podobnosti dvou signálů na základě jejich vzájemné energie. Vzájemná energie je vysoká pro shodné signály a nízká pro signály s odlišným průběhem nebo pro signály se stejným průběhem, ale posunutými v čase. Pro energetické signály ve spojitém čase platí následující vzorec pro vzájemnou energii, tedy pro vzájemnou korelační funkci  $R_{12}$ .

$$E_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t + \tau) s_2^*(t) dt = R_{12}(\tau)$$

Vzájemná korelační funkce dvou signálů se stejným průběhem, ale posunutých v čase o dobu  $t_0$ , nabývá svého maxima právě v  $t_0$ , což je časové zpoždění obou signálů. Graficky znázorněno na obr.5.1 a 5.2.



Obrázek 5.1 Dva signály se stejným průběhem posunutý v čase



Obrázek 5.2 Vzájemná korelační funkce vyslaného a přijatého impulsu

Tohoto principu se využívá v radarové technice pro vyhledání odraženého signálu se známým průběhem v přijatém neznámém signálu a určení jeho zpoždění oproti signálu vyslanému. Autokorelační funkce je pak speciálním případem vzájemné korelační funkce, kdy je korelován signál sám se sebou. U autokorelační funkce se maximum nachází v nule.

## 5.2 Přizpůsobený filtr

Je to takový filtr, který za určitých podmínek pro známý průběh signálu dosáhne maximální hodnoty odstupů signálu od šumu tzv. SNR (Signal to Noise Ratio). Charakteristiky filtru – přenosová funkce  $H(\omega)$  a impulzní odezva  $h(t)$  jsou vázány s charakteristikami signálu následujícími vztahy.

$$H(\omega) = A \cdot S_{\text{in}}^*(\omega) \cdot e^{-j\omega T_0}$$

$$h(t) = A \cdot s_{\text{in}}^*(T_0 - t)$$

$S_{\text{in}}(\omega)$  - spektrum vstupního signálu

$s_{\text{in}}(t)$  – vstupní signál, na který je filtr přizpůsoben

A - zisk filtru

$T_0$  - časové zpoždění filtru



Na kmitočtech, kde má užitečný signál soustředěno nejvíce energie je přenos filtru maximální a naopak tam, kde má signál minimální (případně nulovou) hustotu výkonu, filtr potlačuje i šum. Signál na výstupu přizpůsobeného filtru má tvar autokorelační funkce vstupního signálu s maximem posunutým o  $T$ , což je zpoždění filtru. Pokud tedy na vstup filtru přijde zpožděný odražený signál, pak jeho výstup je uveden vztahem níže. Převzato z [8].

$$s_P(t) = a s_V(t - t_d)$$

$$s_{out}(t) = a A R_V(t - T_0 - t_d)$$

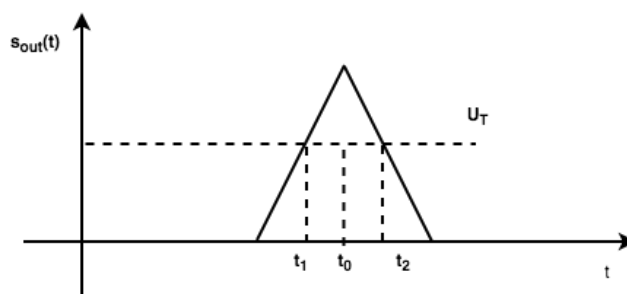
$s_P(t)$  – přijatý signál vstupující do přizpůsobeného filtru

$s_{out}(t)$  - signál na výstupu přizpůsobeného filtru

### 5.3 Detekce maxima a rozhodovací úroveň

Na výstupu přizpůsobeného filtru tedy získáváme signál s tvarem vzájemné korelační funkce tedy s tvarem posunuté autokorelační funkce. Každá autokorelační funkce má hlavní maximum a může mít více postranních maxim. Z toho důvodu je důležité zvolit takovou modulaci vyslaného signálu, aby hlavní maximum bylo jasně dominantní oproti postranním. Jinak by mohlo dojít k chybné detekci cíle, nebo může dojít k zamaskování slabého cíle postranními maximy cíle silného.

Obvody zařazené za přizpůsobený filtr mají za úkol nalézt maximum signálu a určit rozhodovací úroveň pro detekci cíle. Zpravidla se poloha maxima hledá z polohy průsečíků náběžné a sestupné hrany signálu se zvolenou prahovou úrovní  $U_T$ .



Obrázek 5.3 Detekce maxima a rozhodovací úroveň

Na obrázku 5.3 je výstupní signál uveden bez přidaného šumu. V reálu je takový signál šumem ovlivněn. Poloha maxima je pak tedy dána aritmetickým průměrem průsečíků  $t_1$  a  $t_2$ .

$$t_0 = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

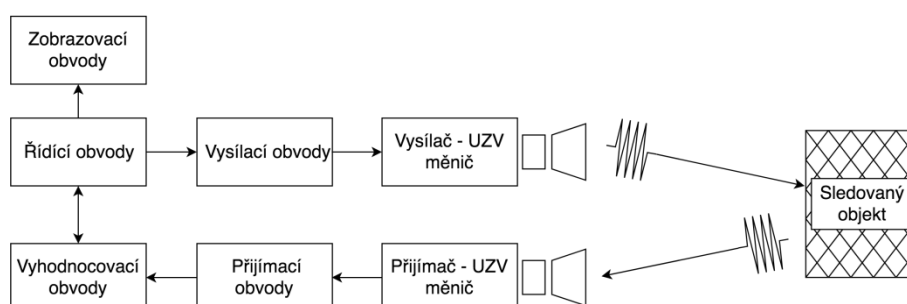
Úroveň prahu detekce  $U_T$  se volí dostatečně vysoko nad obvyklé hodnoty šumu a to proto, aby nedocházelo k tzv. falešnému poplachu (false alarm). Vzhledem k tomu, že na radar dopadají různorodé signály je nutné i parametry detekce upravovat průběžně tak, aby zůstala zachována konstantní úroveň falešného poplachu CFAR (Constant False Alarm Rate). Přestože existuje více způsobů jak toho dosahovat, nejjednodušší způsob je právě adaptivně určovat pouze práh [8].

## 6 Návrh obvodového bloku

V této části práce se již zaměřím na konkrétní obvodové bloky, které je možné použít při měření za použití ultrazvuku. Uvedu principiální schéma ultrazvukového měřiče vzdálenosti pro představu bloků nutných pro vyhodnocení měření na principu ultrazvuku. Každý měřič se skládá z velkého počtu obvodových bloků. Pro příklad uvedu následující - vysílací a přijímací části, obvody vyhodnocující přijatý signál (ať už odražený, či přijatý přímo z vysílače), a dále řídicí obvody, generátor ultrazvukových impulzů, měniče. V dalších podkapitolách blíže popíši vyhodnocovací obvody a následně se budu věnovat návrhu jedné jejich částí.

### 6.1. Ultrazvukový měřič vzdálenosti

Ultrazvukový měřič vzdálenosti, který určuje vzdálenost na základě měření doby zpoždění odraženého impulzu pracuje na principu radaru v impulzním režimu popsaném v kapitole 4.2. Principiální blokové schéma takového měřiče je znázorněno na obr. 6.1.

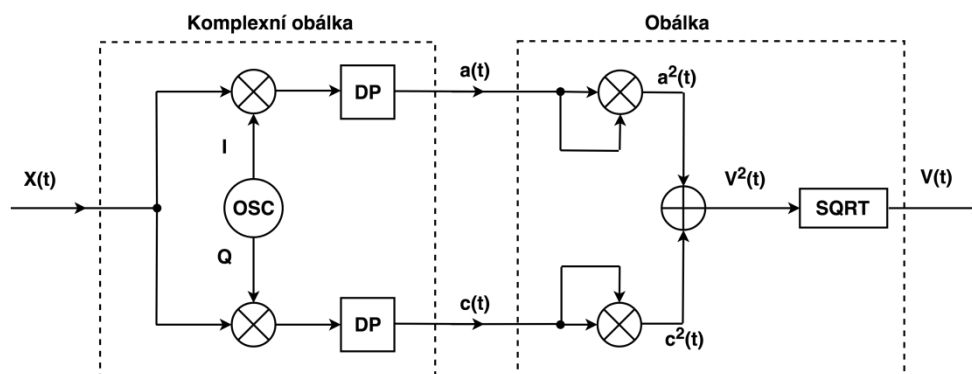


Obrázek 6.1 Blokové schéma ultrazvukového měřiče vzdálenosti

Skládá se z řídicích obvodů, vysílací části pro generování ultrazvukového impulzu, přijímací části pro zpracování odraženého signálu, ultrazvukových měničů pro převod elektrického signálu na akustický a zpět a dále vyhodnocovacích obvodů, které přijatý signál zpracují a zobrazovací obvody pro zobrazení výsledných dat uživateli. V mé práci se budu blíže zabývat obvodovým blokem, který je součástí vyhodnocovacích obvodů a je využitelný ve většině měřících systémech, které využívají ultrazvuk, ale i v jiných aplikacích. Jedná se o analogový blok, za pomoci kterého získáme amplitudovou obálku signálu (envelope) z komplexní obálky přijatého signálu.

## 6.2. Vyhodnocovací obvody

Vyhodnocovací obvody mají za úkol určit časové zpoždění odraženého impulsu vzhledem k impulsu vyslanému. Princip činnosti je popsán v kapitole 5. Příjem radarového signálu. V této kapitole uvedu bloková schémata obvodů získávajících amplitudovou obálku z obálky komplexní a přizpůsobeného filtru.



Obrázek 6.2 Blokové schéma získání amplitudové obálky z obálky komplexní

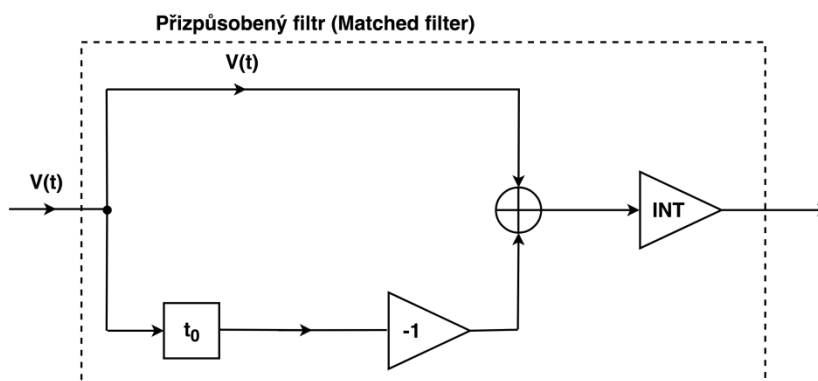
Princip činnosti obvodů, které převádí komplexní obálku na obálku amplitudovou je následující. Přijatý signál je za pomoci kvadrurního oscilátoru (OSC) rozdělen na složky fázově posunutě o 90 stupňů a to složky I (In-Phase) a Q (Quadrature). Obě tyto složky poté přechází přes dolní propust (DP) do bloku získání amplitudové obálky. Zde dochází za pomoci kvadrátorů k výpočtu druhé mocniny obou složek signálu a jejich následné sečtení sčítacím členem a odmocněním jejich součtu získáme obálku signálu  $V(t)$ , která je dále směřována na přizpůsobený filtr. Celý proces je popsán následujícími rovnicemi. Obvody získání komplexní obálky zpracovávají vzorec 6.2.1 kdy je příchozí signál rozložen na jednotlivé složky I a Q reprezentovány jeho reálnou a imaginární částí.

$$X(t) = a(t) + j \cdot c(t) \quad (6.2.1)$$

Blok získání amplitudové obálky provádí operace uvedené v rovnici (6.2.2) a to tedy umocnění obou jednotlivých složek signálu a následné odmocnění jejich součtu, čímž získáme amplitudovou obálku signálu (tzv. envelope).

$$V(t) = \sqrt{a^2(t) + c^2(t)} \quad (6.2.2)$$

Po provedení operací získání komplexní obálky a následně obálky amplitudové se výsledný signál přivádí na tzv. přizpůsobený filtr (matched filter), jehož blokové schéma je uvedeno na obr. 6.3



Obrázek 6.3 Blokové schéma přizpůsobeného filtru

Princip činnosti přizpůsobeného filtru je popsán v kapitole 5. Ve zkratce slouží pro nalezení známého průběhu signálu v signálu neznámém, tedy detekuje známý vyslaný signál v signálu neznámém (přijaté) za pomoci korelace přijatého signálu se stejným signálem, jen časově posunutým o  $t_0$ . Horní větví prochází signál nezměněný, ve spodní větvi dochází ke zpoždění signálu ve zpožďovacím členu a jeho následné změně polaritu v invertujícím zesilovači se zesílením  $A_u = -1$ . Dále se oba signály sečtou v součtovém členu, projdou integračním členem a následně je takto upravený signál přiveden do bloku určení časového zpoždění signálu přijatého oproti vyslanému, ze kterého je následně možné určit vzdálenost objektu, od kterého se vyslaný signál odrazil zpět k přijímači.

### 6.3. Obvody získání obálky

Obvod získání obálky z jednotlivých složek komplexní obálky  $a(t)$  a  $c(t)$  nejprve u každé složky získá druhou mocninu za pomoci kvadrátoru, poté jsou obě umocněné složky přivedeny na sčítací člen, kde dochází k součtu obou umocněných složek signálu. Výsledný signál je potřeba ještě odmocnit, abychom získali výslednou amplitudovou obálku přijatého signálu  $V(t)$ . Důležitou součástí obvodového bloku získání obálky je tedy kvadrátor počítající druhou mocninu signálu a pak také obvod, který provede odmocnění signálu. Dále se podíváme na možnosti realizace druhé mocniny signálu.

### 6.3.1 Digitální zpracování

Získání druhé mocniny signálu se dá realizovat více způsoby. Dnes asi nejčastěji používaným způsobem je digitalizace původních analogových složek komplexní obálky  $a(t)$  a  $c(t)$ . Dále je již výpočet obálky realizován pomocí digitálního zpracování signálu. Zde záleží na výběru vhodného procesoru, tedy je možné využít rovnou procesor typu DSP (Digital signal processor), jehož návrh je optimalizován přímo pro zpracování digitálních signálů. Dále je zde možnost použít klasický mikroprocesor, nebo dokonce tzv. FPGA neboli programovatelné hradlové pole (Field Programmable Gate Array).

V mé práci se zabývám řešením získání druhé mocniny signálu za pomoci analogového zpracování signálu. Stejně jako u digitálního zpracování, i u analogového je více možností řešení. V následujících podkapitolách uvedu některé ze způsobů.

### 6.3.2 Analogové násobičky

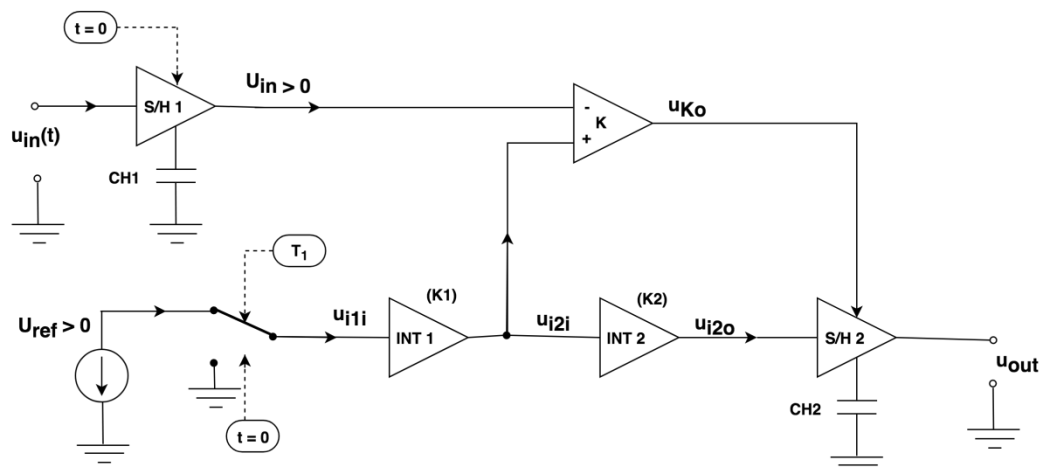
Analogové násobičky slouží k násobení, dělení, umocňování, odmocňování spojitých signálů a k dalším jejich nelineárním operacím. Je jich více druhů. Nejčastěji užívanými typy jsou násobičky s proměnnou strmostí, řízeným činitelem přenosu, logaritmické a násobičky modulační – tyto dosahují vysoké přesnosti až 0,01%. Analogovými násobičkami se v mé práci nezabývám, podrobnější popis jednotlivých typů násobiček a jejich základní zapojení a princip činnosti lze nalézt např. v [6].

## 6.4. Kvadrátor – možnosti realizace

Kvadrátor je možné také realizovat na principu analogově číslicového převodníku s jednotaktní, dvoutaktní či vícetaktní integrací. Všechna zapojení níže uvedená předpokládají zpracování navzorkovaného signálu, tedy tento systém musí na vstupu obsahovat vhodný vzorkovací obvod a jelikož pracujeme se vzorkovaným signálem, musíme vzít v úvahu vzorkovací teorém a to s ohledem na spektrum vstupního spojitého signálu a všech ostatních signálů, které vznikají v ostatních členech systému. Z tohoto důvodu musí být vzorkovači předřazen vhodně zvolený anti aliasingový filtr typu dolní propust. Dále záleží na dalším zpracování signálu, zda systém bude i nadále pracovat se vzorky. Pokud bychom dále chtěli pracovat se spojitým signálem, bylo by nutné převést signál opět na spojitý za pomoci interpolačního filtru zařazeného za kvadrátor, případně za výstup celého bloku výpočtu obálky.

### 6.4.1 Srovnávání napětí s kvadratickou funkcí času

Jedná se o zapojení s využitím principu analogově číslicového převodníku s jednotaktní integrací. Vycházím z předpokladu, že vstupní napětí  $U_{in}$  je větší než nula. Blokové schéma je uvedeno na obrázku.



Obrázek 6.4 Blokové schéma srovnávání napětí s kvadratickou funkcí času

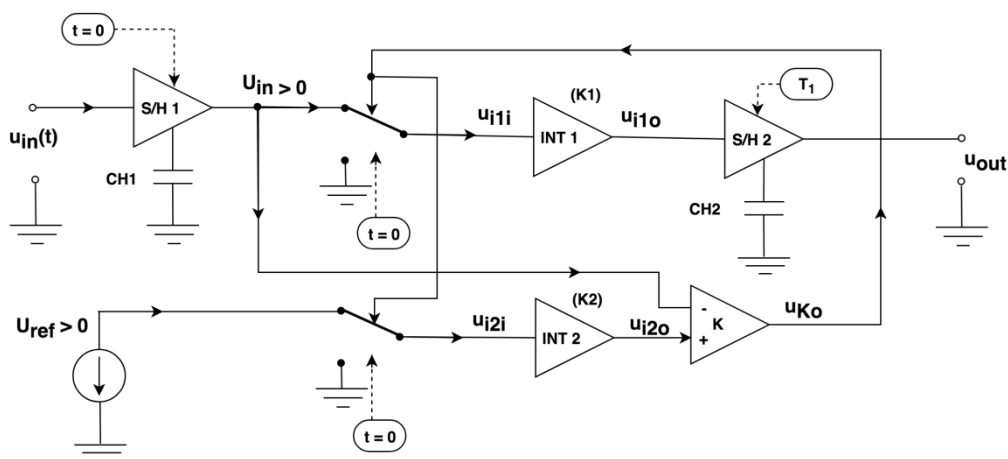
Srovnávání s kvadratickou funkcí času proto, že výstupní napětí druhého integrátoru INT2 má průběh druhé mocniny času. Tedy napětí na výstupu  $u_{i2o}$  je závislé na druhé mocnině času a referenčním napětí. Pro výpočet výstupního napětí je potřeba vypočítat vstupní a výstupní napětí na jednotlivých členech systému, zejména pak v čase  $T_0$ , kdy dojde k překlopení komparátoru do kladné saturace a na výstupu se objeví napětí  $U_{out}$ , které je úměrné druhé mocnině vstupního napětí  $U_{in}$ . Pokud bychom vypočítali průběhy napětí za jednotlivými členy a vzorce upravili, dostaneme následující výsledný vzorec pro výstupní napětí  $U_{out}$ .

$$U_{out} = U_{in}^2 \cdot \frac{K_2}{2 \cdot K_1 \cdot U_{ref}}$$

Jak lze ze vzorce vyčíst, výsledné výstupní napětí je závislé nejen na vstupním a referenčním napětí, ale také na konstantách  $K_1, K_2$  - konstantách integrátorů. Co je konstanta integrátoru popisují dále v kapitole 6.5.1. Přesnost výsledku tedy závisí také na přesnosti a stabilitě těchto konstant, což je velká nevýhoda.

## 6.4.2 Výpočet plochy obdélníkového impulsu s jednotaktní integrací

Jedná se o zapojení s využitím principu analogově číslicového převodníku s jednotaktní integrací. Blokové schéma je uvedeno na obr. 6.5.



Obrázek 6.5 Blokové schéma – výpočet plochy impulsu s jednotaktní integrací

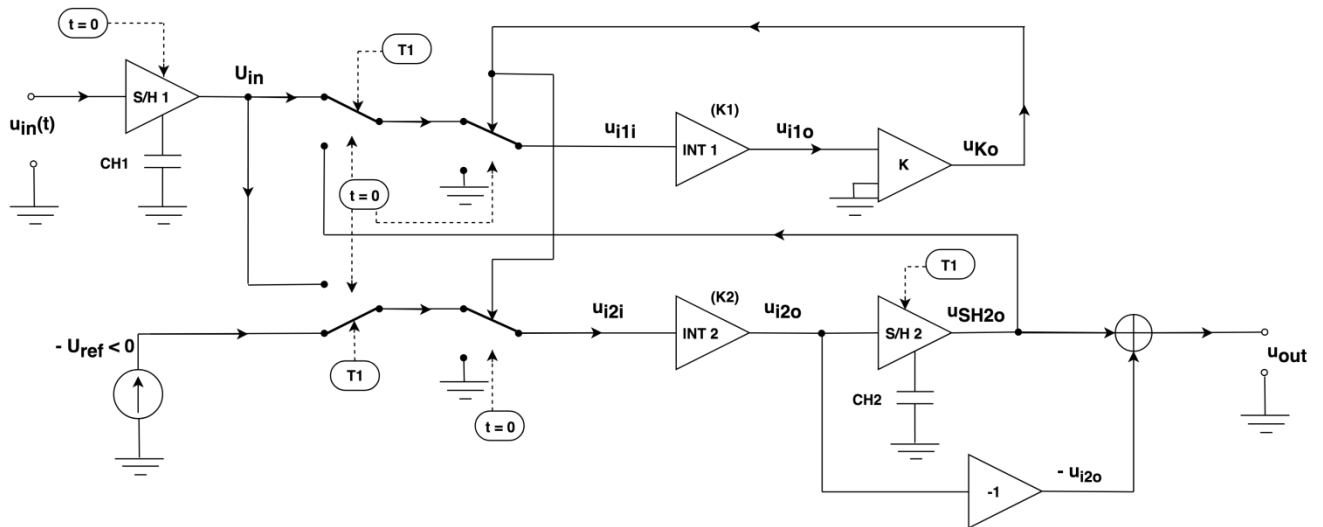
Tento princip je podobný principu modulační násobičky s amplitudově šířkovou modulací. Viz [6]. Princip fungování je takový, že napětí na výstupu INT2 se zvyšuje v závislosti na čase, a je srovnáváno se vstupním napětím  $U_{in}$ . V čase  $T_0$  dojde k překlopení komparátoru a odpojení vstupního napětí od integrátoru INT1. Výstup na něm potom bude úměrný ploše impulsu na vstupu, která se dá vypočítat jako  $U_{in} \cdot T_0$ , což odpovídá výrazu  $U_{in}^2$ . Po vypočtení průběhů napětí na jednotlivých členech systému a úpravách vzorců dostaneme výsledný vzorec pro výpočet výstupního napětí.

$$U_{out} = U_{i1o}(T_0) = U_{in}^2 \cdot \frac{K_1}{K_2 \cdot U_{ref}}$$

I u tohoto schématu je vidět, že výsledek je opět závislý na obou konstantách integrátorů, tedy není příliš vhodný z hlediska přesnosti výsledku.



### 6.4.3 Výpočet plochy obdélníkového impulzu s dvoutaktní integrací



Obrázek 6.6 Blokové schéma – výpočet plochy impulzu s dvoutaktní integrací

Pro obě předchozí schémata platilo, že výsledné napětí je ovlivněno konstantami integrátorů, což není vhodné z hlediska přesnosti výsledku. Výše uvedené zapojení vychází z principu analogově číslicového převodníku s dvoutaktní integrací. Princip fungování dvoutaktní integrace i funkce celého systému včetně výpočtů se věnují v následující kapitole 6.5. Zde pouze uvedu výsledný vzorec pro výpočet výstupního napětí.

$$U_{out} = U_{in}^2 \cdot \frac{1}{U_{ref}}$$

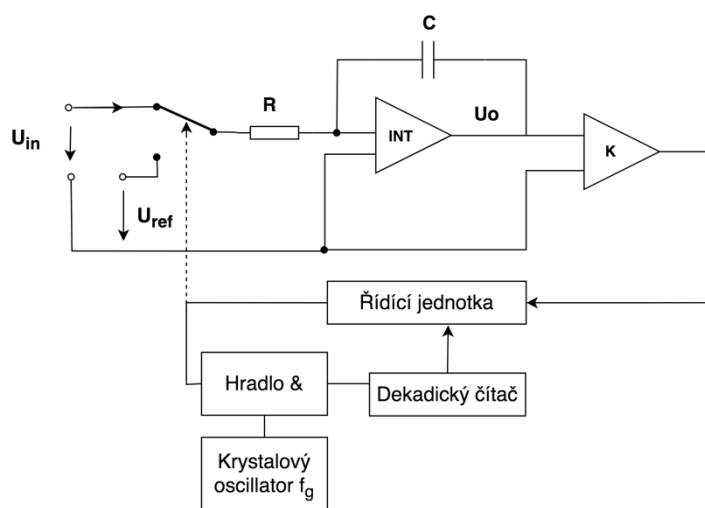
Uvedením pouze výsledku chci ukázat, že výstupní napětí v tomto zapojení nemá závislost na přesnosti a stabilitě konstant integrátorů  $K_1, K_2$ . Z toho důvodu může dosahovat vysoké přesnosti a je tedy vhodné pro návrh.

## 6.5. Kvadrátor – vybraný způsob návrhu

K návrhu jsem zvolil možnost popsanou v kapitole 6.4.3 tedy kvadrátor na principu výpočtu plochy obdélníkového impulzu s dvoutaktní integrací. Schéma na obr. 6.6 vychází z principu analogově číslicového převodníku s dvoutaktní integrací. Zvolil jsem ho proto, že nemá závislost na přesnosti a stabilitě konstant použitých integrátorů INT1 a INT2, jak vyplývá z výpočtů níže.

### 6.5.1. Analogově číslicový převodník s dvoutaktní integrací

Před vysvětlením principu fungování schématu uvedeného na obr.6.6 je třeba se seznámit se samotnou funkcí analogově číslicového převodníku s dvoutaktní integrací. Jeho schéma je uvedeno na obr.6.7. Při popisu principu činnosti a zapojení jsem vycházel z [6].



Obrázek 6.7 Schéma analogově číslicového integračního převodníku s dvoutaktní integrací

Důležitým pojmem je tzv. délka taktu  $T_1$ . Jedná se o tzv. první takt a tedy dobu, po kterou je integrováno vstupní napětí  $U_{in}$ . Délka prvního taktu  $T_1$  je konstantní a je určena dobou potřebnou k naplnění čítače impulsy hodinové frekvence  $f_g$  z krystalového oscilátoru. Viz vzorec 6.5.1 níže.

$$T_1 = \frac{N_1}{f_g}$$

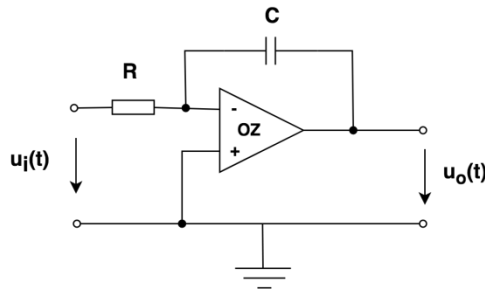
V prvním taktu je po dobu  $T_1$  integrováno vstupní napětí  $u_{in}$ . Na konci této doby je výstupní napětí integrátoru dáno střední hodnotou vstupního napětí.

$$U_{i10} = -\frac{1}{RC} \int_0^{T_1} u_{in}(t) dt$$

Člen před integrálem ve vzorci 6.5.2. se nahrazuje konstantou  $K$ , která se nazývá konstanta integrátoru.

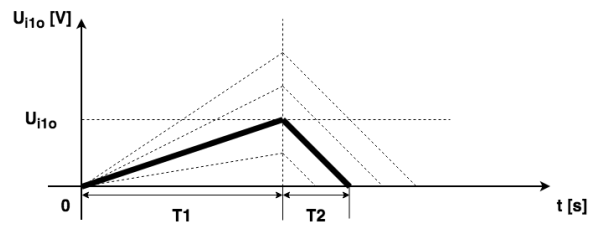
$$K = \frac{1}{RC}$$

Členy  $R$  a  $C$  představují rezistory a kapacitory integračních zesilovačů. V reálných zapojeních se používá invertující integrátor, tedy takový integrační zesilovač jehož výstupní napětí klesá, pokud integruje kladné vstupní napětí a naopak. Invertováno je tedy znaménko derivace výstupního signálu oproti znaménku vstupního signálu. Jeho zapojení je uvedeno na obr. 6.8. V průběhu návrhu systému dále počítám s integrátory neinvertujícími, které polaritu napětí nemění. V reálném zapojení je toto nutné zohlednit.



Obrázek 6.8 Invertující integrační zesilovač

Vraťme se ale zpět k dvoutaktní integraci. Nacházíme se na konci prvního taktu. Ten je ukončen naplněním dekadického čítače a jeho vynulováním. Po vynulování je vyslán impuls do řídicí jednotky, která přepne spínač, čímž připojí na integrátor referenční napětí  $U_{ref}$ , které má opačnou polaritu než vstupní napětí  $U_{in}$ . Jelikož má referenční napětí opačnou polaritu, začne se snižovat náboj na integračním kapacitoru, tudíž se začne snižovat hodnota výstupního napětí integrátoru po dobu  $T_2$  dokud nedosáhne nuly. Průběh napětí na integrátoru je znázorněn na obr. 6.9.



Obrázek 6.9 Průběh napětí na výstupu integrátoru v analogově číslicovém převodníku s dvoutaktní integrací

Délka intervalu  $T_2$  je změřena čítáním pulsů v dekadickém čítači. Počet pulsů  $N_2$  který se načte za čas  $T_2$  určuje tzv. elektrolytickou střední hodnotu vstupního napětí.

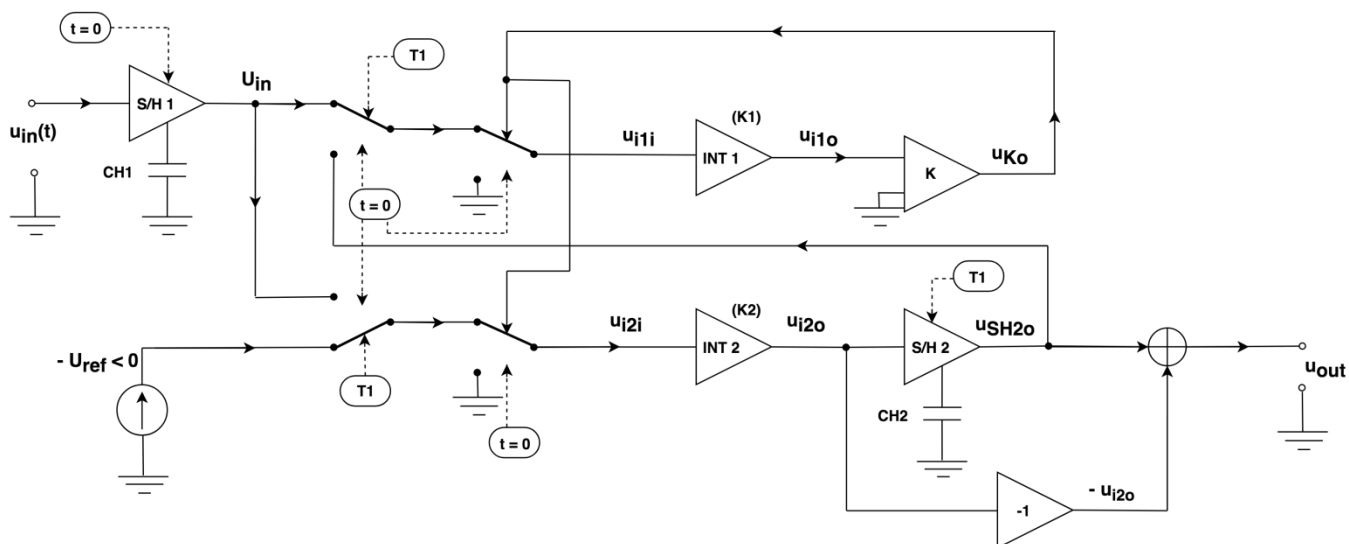
$$\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} u_i(t) dt = U_r \frac{T_2}{T_1} = U_r \frac{N_2}{N_1}$$

## 6.5.2. Kvadrátor s dvoutaktní integrací

Zvolené schéma pro návrh pracuje s předpokladem práce se vzorkovaným signálem kladné polaridy. Pro funkčnost i pro opačnou polaridu signálu by bylo nutné předřadit např. dvoucestný operační usměrňovač, který by vypočetl absolutní hodnotu signálu.

Nyní tedy k samotnému popisu fungování navrženého kvadrátoru s výpočtem plochy impulzu s dvoutaktní integrací.

Pro čas mezi  $t = 0$  a  $T_1$ , tedy v intervalu  $t \in (0; T_1)$  jsou spínače v poloze znázorněné na obr.6.10.



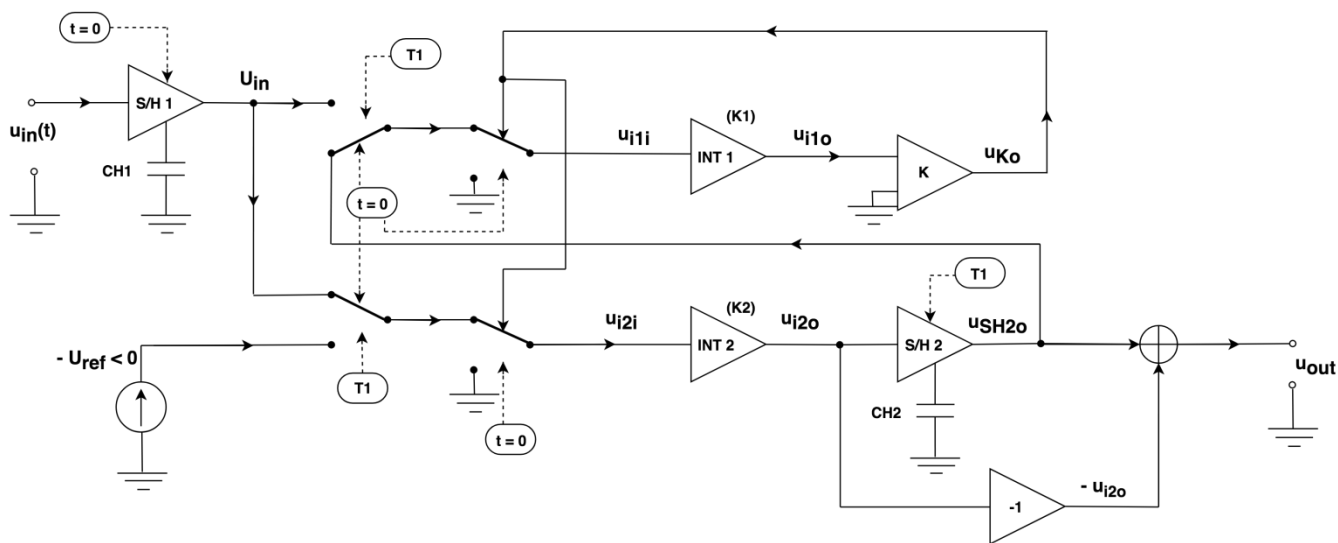
Obrázek 6.10 Blokové schéma kvadrátoru v intervalu  $t \in (0; T_1)$

Pro přehlednost jsou vstupní a výstupní napětí na integrátorech označeny následovně. Uvádím pouze pro první integrátor, pro druhý platí totéž analogicky.

$u_{i1i}$  – vstupní napětí prvního integrátoru (input)

$u_{i1o}$  – výstupní napětí prvního integrátoru (output)

Budeme nyní sledovat napětí na obou integrátorech INT1 a INT2. V intervalu od  $t = 0$  do uplynutí doby prvního taktu  $T_1$  integrátor INT1 integruje vstupní napětí  $U_{in}$ , zatímco integrátor INT2 integruje  $-U_{ref}$ . Po uplynutí doby  $T_1$ , která je vždy konstantní, dojde k přepnutí spínačů a zapojení se změní na následující.



Obrázek 6.11 Blokové schéma kvadrátoru v intervalu  $t \in (T_1; T_1 + T_2)$

V intervalu od doby  $T_1$  je na první integrátor INT1 přivedeno napětí  $u_{i20}$ , neboli výstupní napětí druhého integrátoru INT2 v čase  $T_1$  zachycené pomocí obvodu S/H-2. Na integrátor INT2 je naopak připojeno vstupní napětí  $U_{in}$ . Pro přehlednost jsou připojená napětí na jednotlivé integrátory v obou intervalech uvedena v následující tabulce.

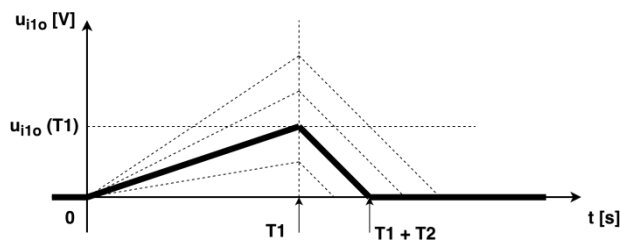
interval	Integrátor INT1	Integrátor INT2
$(0; T_1)$	$U_{in}$	$-U_{ref}$
$(T_1; T_1 + T_2)$	$u_{i20}(T_1)$	$U_{in}$

Nyní se podrobněji podíváme na průběhy jednotlivých napětí v systému. Začnu průběhem na integrátoru INT1, konkrétně na jeho vstupech a výstupech. Pro výstupní napětí prvního integrátoru vyjdeme ze vzorce pro výstupní napětí integrátoru (popsáno v kapitole 6.5.1). V čase  $T_1$  pro napětí  $u_{i10}$  platí:

$$u_{i10}(T_1) = K_1 \cdot U_{in} \cdot T_1$$

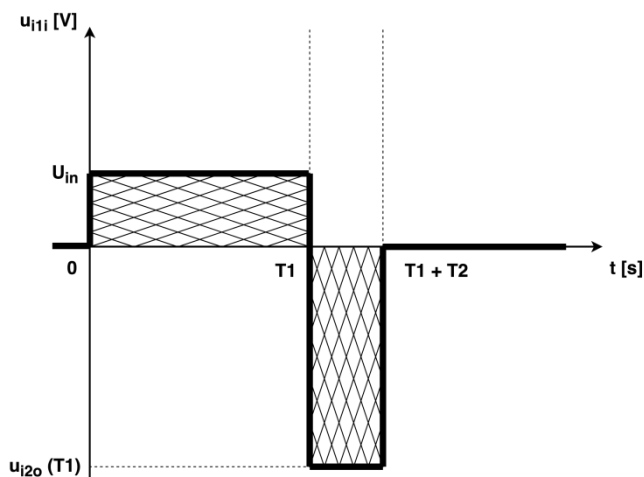
Dále na základě principu dvoutaktní integrace je dáno, že po uběhnutí doby  $T_2$  bude výstupní napětí nulové, jak ukazuje graf průběhu napětí na vstupu integrátoru INT1 na obrázku 6.12.

$$u_{i10}(T_1 + T_2) = 0$$



Obrázek 6.12 Průběh napětí na vstupu integrátoru INT1

Nyní se podíváme na průběh vstupního napětí integrátoru INT1. Tento integrátor je nejprve připojen na vstupní napětí  $U_{in}$ , v čase  $T_1$  je pak přepojen na výstupní napětí integrátoru INT2 v čase  $T_1$ , neboli  $u_{i20}(T_1)$ . Graficky znázorněno na obrázku 6.13.



Obrázek 6.13 Průběh napětí na výstupu integrátoru INT1

Z grafu je vidět, že v prvním taktu integrace je připojené napětí  $U_{in}$ , poté je připojeno napětí opačné polarity  $u_{i20}$ . Z principu se obě vyšrafované plochy rovnají. Tuto rovnost zapíšeme následujícím způsobem.

$$K_1 \int_0^{T_1} U_{in} \cdot dt = -K_1 \int_{T_1}^{T_1+T_2} u_{i20} \cdot dt$$

Pro jednotlivé plochy platí následující :

$$K_1 \int_0^{T_1} U_{in} \cdot dt = K_1 \cdot U_{in} \cdot T_1$$

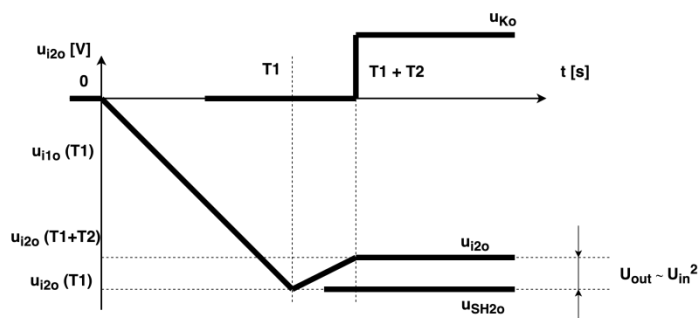
$$-K_1 \int_{T_1}^{T_1+T_2} u_{i2o} \cdot dt = -K_1 \int_{T_1}^{T_1+T_2} K_2 \cdot (-U_{ref}) \cdot T_1 \cdot dt = K_1 \cdot K_2 \cdot U_{ref} \cdot T_1 \cdot T_2$$

Položíme obě rovnice do rovnosti a následně upravíme, takže vypočteme dobu druhého taktu  $T_2$ :

$$K_1 \cdot U_{in} \cdot T_1 = K_1 \cdot K_2 \cdot U_{ref} \cdot T_1 \cdot T_2$$

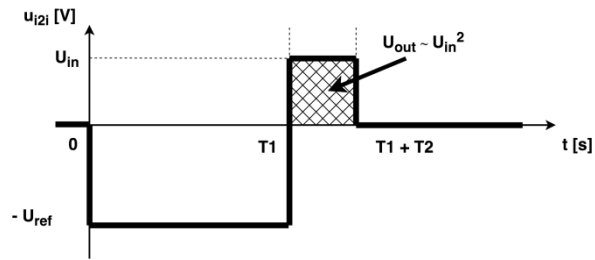
$$T_2 = \frac{U_{in}}{K_2 \cdot U_{ref}}$$

Nyní se podíváme na vstupní a výstupní napětí druhého integrátoru INT2. Graficky jsou průběhy napětí znázorněné na obrázku 6.14. a na obrázku 6.15. U výstupního napětí je zobrazeno i výstupní napětí napěťového komparátoru  $u_{Ko}$  a napětí na výstupu vzorkovacího obvodu  $u_{SH2o}$ . Z tohoto grafu lze výstupní napětí také vypočítat, ale my budeme vycházet z grafu na obrázku 6.15. tedy z průběhu napětí na vstupu integrátoru INT2.



Obrázek 6.14 Průběh napětí na výstupu druhého integrátoru INT2





Obrázek 6.15 Průběh napětí na vstupu druhého integrátoru INT2

Z grafu na obrázku 6.15 je vidět, že plocha impulzu v intervalu mezi  $T_1$  a  $T_1 + T_2$  je právě hledané výstupní napětí. Čas  $T_2$  známe z předchozích výpočtů, můžeme proto vypočítat obsah plochy a rovnou vypočítat.

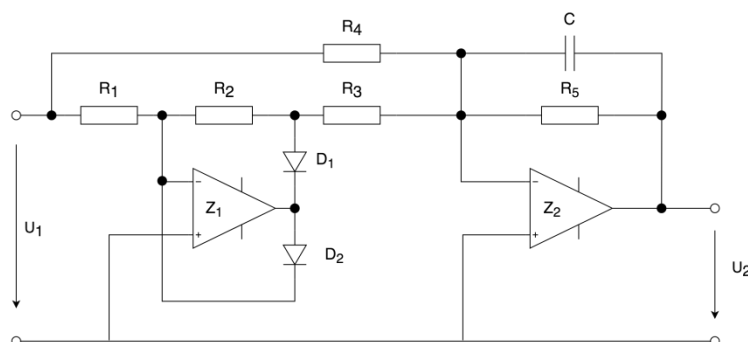
$$K_2 \int_{T_1}^{T_1+T_2} U_{in} \cdot dt = K_2 \cdot U_{in} \cdot T_2 = K_2 \cdot U_{in} \cdot \frac{U_{in}}{K_2 \cdot U_{ref}} = U_{in}^2 \cdot \frac{1}{U_{ref}} = U_{out}$$

Z výsledku výše vyplývá, že celkové výstupní napětí systému počítá druhou mocninu vstupního napětí, což splňuje předpoklad funkčnosti kvadrátoru. Z tohoto vzorce je vidět, že výsledné výstupní napětí není závislé na přesnosti a stabilitě konstant integrátorů. Lze tedy předpokládat, že systém by měl být schopen vypočítat druhou mocninu s relativně vysokou přesností.

Konstanty integrátorů ovšem nejsou jediné zdroje nepřesností. Výsledná integrace je také zatížena aditivními chybami jako jsou vstupní napěťová a proudová nesymetrie. Pokud bychom chtěli odstranit i tyto chyby, lze použít systém s vícetaktní integrací, který tyto nedostatky eliminuje. Pokud bychom zvolili třítaktní integraci, zařazuje se další takt převodu, během kterého je vstup integrátoru uzemněn, výstupní napětí je uchováno v kapacitoru a následně odečítáno od vstupního napětí integrátoru. [6]

## 6.6. Kvadrátor – součástky vhodné k realizaci

Pro realizaci konkrétního zapojení na principu probraného v kapitole 6.5 je potřeba vzít v potaz předpoklady, ze kterých jsem vycházel při návrhu systému. Jedním z prvních předpokladů je vstupní napětí kladné polarity. Proto je potřeba systému předřadit obvod, který vypočítá absolutní hodnotu vstupního signálu. Je tedy nutné předřadit např. dvoucestný operační usměrňovač. Jeho zapojení je uvedeno na obr. 6.16.

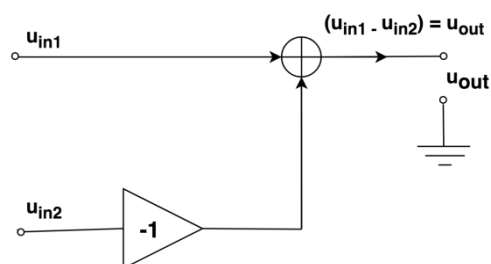


Obrázek 6.16 Dvoucestný operační usměrňovač

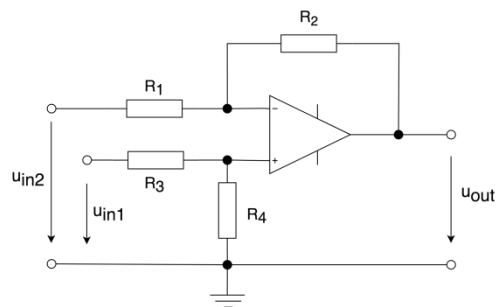
Pro správnou funkci dvoucestného operačního usměrňovače, tedy aby byl splněn definiční přenos usměrňovače  $U_2 = |U_1|$ , musíme v zapojení použít takové rezistory, aby platilo následující.

$$\frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} = 2 \quad R_4 = R_5$$

Dále část zapojení kvadrátoru obsahující součtový člen a invertor (obr.6.17.) lze realizovat pomocí diferenčního zesilovače s operačním zesilovačem (obr. 6.18.).

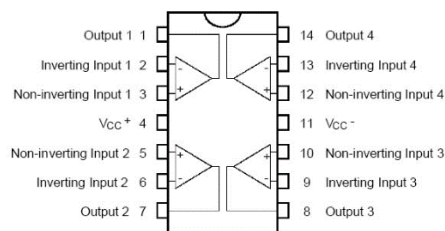


Obrázek 6.17 Část obvodu kvadrátoru obsahující invertor a součtový člen

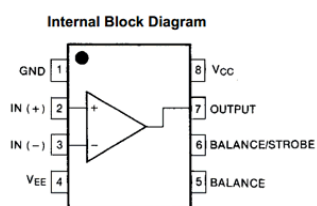


Obrázek 6.18 Diferenční zesilovač s operačním zesilovačem

Součástky vhodné k realizaci samotného kvadrátoru. Operační zesilovač - vzhledem k jeho využití jak v obou integrátoch a v součtovém členu je vhodné zvolit integrovaný obvod s více operačními zesilovači. Např. TL084 (obr. 6.19), díky kterému můžeme realizovat jak oba integrátory, tak diferenční zesilovač, který bude plnit funkci směšovače s invertorem na výstupu kvadrátoru. Pro komparátor bych zvolil běžně dostupný typ LM311 (obr. 6.20).

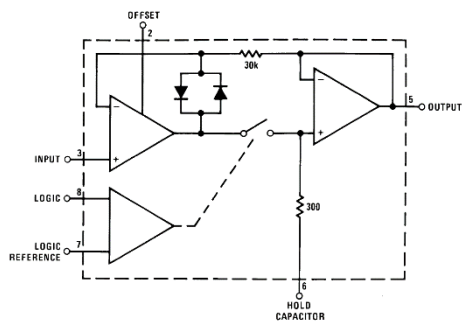


Obrázek 6.19 TL084 Operační zesilovač - vnitřní zapojení a rozložení pinů

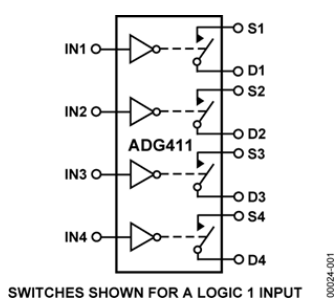


Obrázek 6.20 LM311 Komparátor - Vnitřní zapojení a rozložení pinů

Vzhledem k tomu, že je nutné v systému přepojovat napětí, bude nutné zařadit do obvodu větší množství spínačů. Jako příklad vhodného obvodu uvádím ADG411 (obr. 6.22), který obsahuje hned 4 spínače, pro vzorkovací obvody typu sample and hold pak např. LF398 (obr.6.21).



Obrázek 6.21 LF398 Sample and Hold - Vnitřní zapojení a rozložení pinů



Obrázek 6.22 ADG411 Spínače s tranzistory JFET

Generování signálů pro ovládání spínačů a taktování obvodů sample and hold je nutné vyřešit za pomoci řídicích obvodů, aby bylo možné správně taktovat jednotlivé fáze kvadrátoru. Tyto obvody lze vyřešit např. pomocí mikroprocesoru, případně pomocí logických obvodů.

## 7. Závěr

V mé práci jsem prostudoval ultrazvuk a jeho vlastnosti, výskyt v přírodě a jeho použití v různých oblastech lidské činnosti, včetně měření rychlosti a vzdálenosti. Věnoval jsem se hlavně měření rychlosti, případně vzdálenosti založeném na principu radaru v impulzním režimu. Prostudoval jsem a uvedl základní přehled fungování radaru a jeho jednotlivé typy. Na základě těchto poznatků jsem vybral obvodové bloky využitelné pro ultrazvuková měření k bližšímu studiu, a to konkrétně blok získávání amplitudové obálky z obálky komplexní. Uvedl jsem základní schémata a popsal princip fungování takového systému. Dále jsem zvolil ke konkrétnímu návrhu schématu blok získání amplitudové obálky, který provádí zejména operace umocňování a odmocňování. V práci jsem se zaměřil na návrh kvadrátoru, tedy obvodu, který počítá druhou mocninu signálu. Problematiku jsem rozebral teoreticky, uvedl různé možnosti řešení a nakonec navrhl řešení na principu analogově číslicového převodníku s dvoutaktní integrací. Návrh systému jsem rozebral teoreticky a popsal princip fungování, na závěr jsem uvedl možné součástky a zapojení některých členů. Systém je navržen dle předpokladů uvedených v mé práci, před realizací je nutné systém upravit odpovídajícím způsobem. Dalším krokem by bylo sestavit konkrétní zapojení z reálných součástek a jeho otestování pro zjištění dosažených parametrů.

## Zdroje

- [1] CHEEKE, J. David N. *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2002. ISBN 08-493-0130-0.
- [2] VEJRAŽKA, František. *Signály a soustavy*. Vyd. 4. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-0450-3.
- [3] KHYE, Teo Seow, Neo Chin SIM a Sia Hou You SOLOMON. Comparative analysis of radar and sonar principles. *DSTA Defence science & technology agency* [online]. Dostupné z: <https://www.dsta.gov.sg/docs/default-source/dsta-about/comparative-analysis-of-radar-and-sonar-principles.pdf?sfvrsn=2>
- [4] MILLER, Lee A. a Annemarie SURLYKKE. How Some Insects Detect and Avoid Being Eaten by Bats. *BioScience* [online]. 2001, 01.07.2001, **51**(7), 570-581. Dostupné z: [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0570:HSIDAA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0570:HSIDAA]2.0.CO;2)
- [5] *NDT Education Resource Center: Ultrasonics* [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: [https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc\\_ut\\_index.htm](https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc_ut_index.htm)
- [6] VEDRAL, Josef a Jan FISCHER. *Elektronické obvody pro měřící techniku*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-2966-2.
- [7] IZADIFAR, Zahra. Mechanical and Biological Effects of Ultrasound: A Review of Present Knowledge. *Ultrasound in Medicine and Biology* [online]. 2017, **43**(6), 1085-1104. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2017.01.023>
- [8] BEZOUŠEK, Pavel a Pavel ŠEDIVÝ. *Radarová technika*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-3036-9.
- [9] WOLFF, Christian. *Radar basics* [online]. 1998. Dostupné z: [www.radartutorial.eu](http://www.radartutorial.eu)
- [10] SKOLNIK, Merrill Ivan. *Introduction to radar systems*. 2d ed. New York: McGraw-Hill, c1980. ISBN 00-705-7909-1.
- [11] Ultrasonic testing. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic\\_testing](https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_testing)
- [12] PIŇOS, Michal. *Radarové měření pro rychlostní disciplíny*. Brno, 2017. Bakalářská práce.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Lukáš Maršík,

[13] DUDÁČEK, Luděk. Radarové měření vzdálenosti. Plzeň, 2012. bakalářská práce (Bc.). ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Masopust, CSc..