

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2011

Radek Schwarz

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Komparátory – laboratorní úloha

Comparators – laboratory work

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne

.....
(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Pavelkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky při zpracování mé závěrečné práce.

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je návrh kompletního zapojení, mechanického řešení a sestavení modulu komparátoru, který bude sloužit studentům jako laboratorní úloha. Zařízení se skládá ze dvou nízkofrekvenčních generátorů, sumátoru s operačním zesilovačem a obvodu napět'ového komparátoru. Popis jednotlivých částí zařízení je zahrnuto v jedné z kapitol. Na začátku bakalářská práce je teoretický úvod do komparátorů, který je dostačující pro pochopení problematiky. Další kapitola pojednává o idealizovaném modelu reálného měření – jde o modelování a simulaci komparátorů v programu OrCAD. Laboratorní úloha je formulována v závěru práce. Funkčnost zařízení je ověřena kontrolním měřením.

KLÍČOVÁ SLOVA

Napět'ový komparátor, hystereze

ABSTRACT

The aim of this bachelor's thesis is the design of complete circuitry, mechanical solutions and build device of comparator, which will be use by students as laboratory work. Device is consist of two low-frequency generators, summing amplifier and circuit of voltage comparator. Description of each single part of device is include in one of chapters. At the beginning of bachelor's thesis is theoretical introduction of comparators, which be enough to understand the issue. Another chapter is engaged in idealized model of real measuring – it's about modeling and simulation of comparators in program called OrCAD. Laboratory work is define at the end of this publication. Utility of device is verified by check measurement.

KEY WORDS

Voltage comparator, hysteresis

Obsah

Seznam obrázků	ix
ÚVOD	1
1. Komparátory	2
1.1 Teorie komparátorů	2
1.1.1 Hystereze	4
1.2 Oblasti použití	6
1.3 Realizované zapojení komparátoru	7
2. Simulace v OrCAD/Pspice	7
2.1 Simulace v časové oblasti	8
2.1.1 Simulované zapojení	8
2.1.2 Výstupy ze simulace	8
2.2 Simulace převodní charakteristiky	10
2.2.1 Simulované zapojení	10
2.2.2 Výstupy ze simulace	11
3. Návrh zapojení a konstrukční řešení	14
3.1 Celkové blokové schéma zapojení	14
3.2 Komparátor	15
3.3 Generátor nosné vlny	15
3.4 Generátor šumu	16
3.5 Sumátor se zesilovačem	17
3.6 Návrh DPS	17
4. Zadání laboratorní úlohy	20
4.1 Zadání	20
4.2 Výklad	20
4.2.1 Hystereze	21
4.3 Vysvětlivky k modulu komparátoru	23
4.4 Doporučený postup měření	25

5. Kontrolní měření laboratorní úlohy	26
ZÁVĚR	35
Seznam zdrojů	36
Seznam příloh	37

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Schématické značky napěťového komparátoru	2
Obr. 1.2 Vnitřní blokové schéma komparátoru (upraveno [3])	3
Obr. 1.3 a) Komparátor s operačním zesilovačem, b) Ideální průběh při komparaci	4
Obr. 1.4 Vstupní a výstupní napětí komparátoru: a) bez hystereze, b) s hysterezí	5
Obr. 1.5 Komparátor s hysterezí	5
Obr. 1.6 a) Ideální převodní charakteristika, b) reálná převodní charakteristika	6
Obr. 1.7 Schématická značka komparátoru se zabudovanou hysterezí	6
Obr. 1.8 Realizované zapojení komparátoru s hysterezí (upraveno [5])	7
Obr. 2.1 Zapojení pro simulaci v časové oblasti	8
Obr. 2.2 Vstupní signál a odezva komparátoru bez hystereze	9
Obr. 2.3 Vstupní signál a odezva komparátoru při $R_H = 750k\Omega$	9
Obr. 2.4 Vstupní signál a odezva komparátoru při $R_H = 240k\Omega$	10
Obr. 2.5 Zapojení pro simulaci převodní charakteristiky	11
Obr. 2.6 Přebodní charakteristika komparátoru bez hystereze	11
Obr. 2.7 Přebodní charakteristika komparátoru při $R_H = 750k\Omega$	12
Obr. 2.8 Přebodní charakteristika komparátoru při $R_H = 240k\Omega$	13
Obr. 3.1 Blokové schéma zařízení	14
Obr. 3.2 Schéma obvodu komparátoru	15
Obr. 3.3 Schéma generátoru nosné vlny	16
Obr. 3.4 Schéma generátoru šumu	16
Obr. 3.5 Schéma sumátoru s OZ	17
Obr. 3.6 Schéma zapojení v programu Eagle	18
Obr. 3.7 DPS při pohledu shora.....	18
Obr. 3.8 DPS při pohledu shora – rozmístění součástek	19
Obr. 3.9 DPS při pohledu shora – spoje	19
Obr. 4.1 a) Komparátor bez hystereze, b) Ideální průběh při komparaci	21
Obr. 4.2 Vstupní a výstupní napětí komparátoru: a) bez hystereze, b) s hysterezí	21
Obr. 4.3 Komparátor s hysterezí	22
Obr. 4.4 a) Ideální převodní charakteristika, b) reálná převodní charakteristika	22
Obr. 4.5 Blokové schéma zařízení	24
Obr. 4.6 Značení modulu komparátoru	25
Obr. 5.1 Přebodní charakteristika bez hystereze při $U_{ref} = 0V$	26

Obr. 5.2 Převodní charakteristika bez hystereze při $U_{ref} = 5V$	27
Obr. 5.3 Převodní charakteristika s hysterezí U_{H1} při $U_{ref} = 0V$	28
Obr. 5.4 Převodní charakteristika s hysterezí U_{H1} při $U_{ref} = 5V$	28
Obr. 5.5 Převodní charakteristika s hysterezí U_{H2} při $U_{ref} = 0V$	29
Obr. 5.6 Převodní charakteristika s hysterezí U_{H2} při $U_{ref} = 5V$	30
Obr. 5.7 Vstupní (CH2) a výstupní (CH1) napětí komparátoru při $U_{ref} = 0V$	31
Obr. 5.8 Výstupní (CH1) napětí komparátoru při $U_{ref} = 5V$	31
Obr. 5.9 Vstupní (CH2) a výstupní (CH1) napětí komparátoru při $U_{ref} = 0V$	32
Obr. 5.10 Vstupní (CH2) a výstupní (CH1) napětí komparátoru pro 1.hysterezi U_{H1}	32
Obr. 5.11 Vstupní (CH2) a výstupní (CH1) napětí komparátoru pro 2.hysterezi U_{H2}	33

ÚVOD

Komparátor slouží k porovnávání dvou vstupních veličin, přičemž na výstupu nabývá pouze dva možné stavy. Často je však na tento vstupní signál superponován šum, které způsobuje několikanásobné nežádoucí překlápění výstupu komparátoru. V takovýchto případech se zavádí z výstupu komparátoru kladná zpětná vazba – hystereze.

Základní částí celého zařízení je obvod komparátoru s integrovaným obvodem LM311 – napěťový komparátor. Dále jsou součástí výrobku dva sinusové nízkofrekvenční generátory. První kmitá na frekvenci 1kHz a slouží jako nosná vlna, na kterou je superponována střídavá složka z druhého generátoru. Tento generátor šumu má frekvenci 15kHz a menší amplitudu. Součet těchto signálů zajišťuje sumátor v invertujícím zapojení.

Základní zapojení komparátoru jsou nejdříve teoreticky popsána a následně odsimulována v programu OrCAD a poslouží k porovnání s výstupy z kontrolního měření. Je zde simulováno měření převodní charakteristiky a měření v časové oblasti.

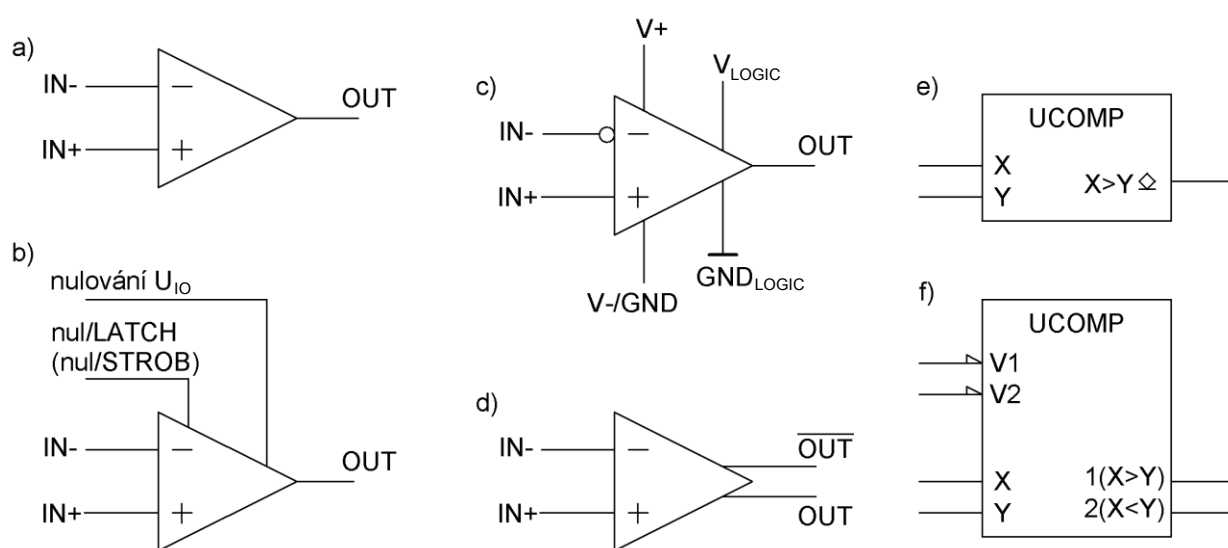
Modul komparátoru obsahuje ovládací prvky, jimiž lze nastavovat velikost hystereze nebo hysterezi vypnout. Dále je možné volit druh vstupního signálu komparátoru – stejnosměrný, střídavý a nebo střídavý s šumem. Toto zařízení komparátoru je konstruováno pro laboratorní výuku předmětu Technické prostředky pro řízení elektrických pohonů.

1. Komparátory

1.1 Teorie komparátorů

Komparátor je obecně obvod, který porovnává dvě veličiny. Ty mohou být fyzikální – napětí, proud, tlak, teplota, vzdálenost apod. – nebo logické (číslicové). Ke zpracování logických veličin jsou určeny logické IO a (mikro)procesorové obvody. Fyzikální veličiny lze porovnávat nejrůznějšími způsoby. Tato práce se věnuje komparátorům porovnávajícím elektrické signály^[2] – napěťové komparátory.

Napěťový komparátor je zařízení, které porovnává dvě napětí nebo proudy a nastavuje výstup tak, aby indikoval, které z nich je větší. Proto mohou jejich výstupy v aktivním stavu nabývat pouze dvě hodnoty napětí, nízkou a vysokou, z hlediska terminologie používané v oblasti logických obvodů nabývá komparátor hodnoty log 0 nebo log 1, případně H (high) a L (low).^[1]

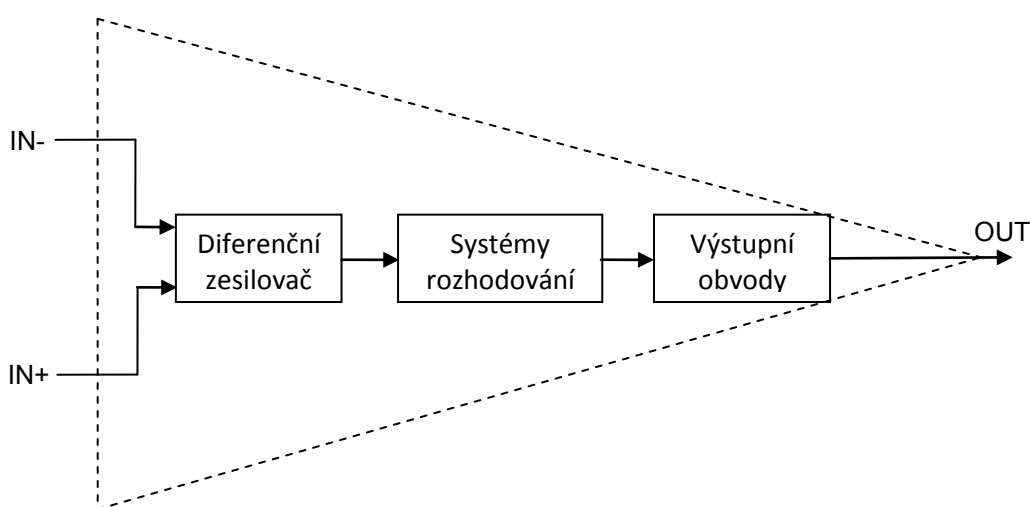


Obr. 1.1 Schématické značky napěťového komparátoru (upraveno [1])

Obr. 1.1a znázorňuje obecně používanou značku napěťového komparátoru. Některé komparátory mají pomocné řídicí a nastavovací vstupy, což znázorňuje značka na obr. 1.1b. Na obr. 1.1c je schématická značka napěťového komparátoru používající symboliku logických obvodů – invertující vstup je označen kolečkem. Na této značce je vyznačeno možné připojení napájecích napětí. Schématická značka znázorněná na obr. 1.1d odpovídá standardu ČSN IEC 617-13, Značky pro elektrotechnická schémata. Schématické značky podle obr. 1.1e, f jsou používány pro napěťové

komparátory s diferenciálními vstupy, značka pod písmenem f) odpovídá výše uvedenému standardu, vývody označené V1 a V2 jsou pomocné řídicí a nastavovací vstupy odpovídající obr. 1.1b.^[1]

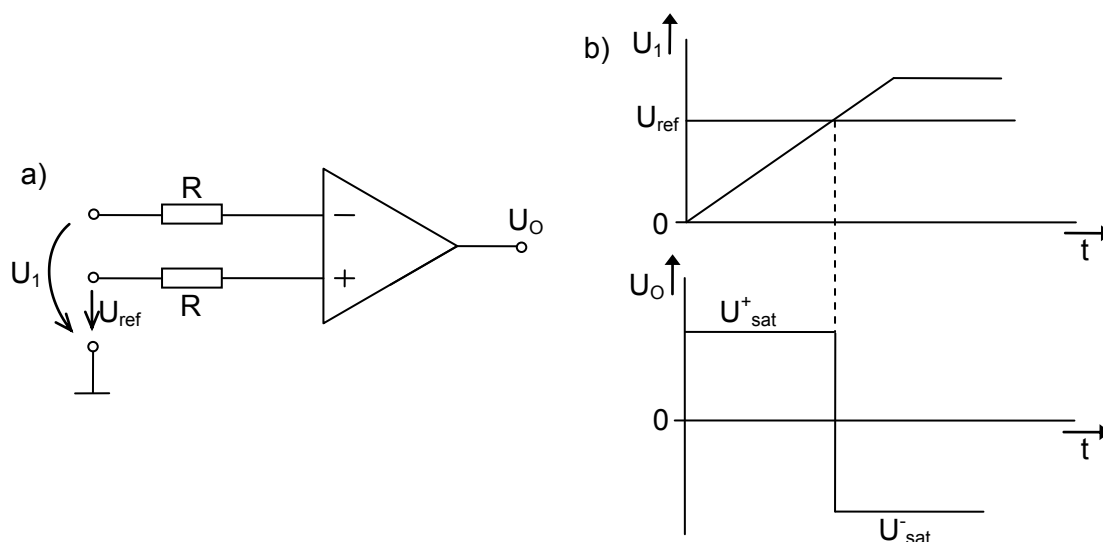
V blokovém zobrazení na obr. 1.2 má komparátor na vstupu obvod diferenciálního (rozdílového) zesilovače, ten zesiluje rozdílové a potlačuje souhlasné signály - to jsou takové signály, které přichází na invertující a neinvertující vstup zesilovače současně a mají stejnou velikost a fázi. Za rozdílovým zesilovačem následují obvody rozhodování (Latch), to jsou obvody zajišťující ostrý přechod z jedné logické úrovně na druhou. Před výstupem signál ještě prochází oddělovacími obvody, ty jsou zde kvůli zvládnutí velkých kapacitních zátěží.^[3]



Obr. 1.2 Vnitřní blokové schéma komparátoru (upraveno [3])

Nejjednodušší komparátor, porovnávající dvě napětí, získáme zapojením operačního zesilovače podle obr. 1.3a. Bude-li napětí U_{ref} větší než U_1 , bude na výstupu OZ kladné saturační napětí U_{sat}^+ (viz obr. 1.3b). Při zmenšování referenčního napětí U_{ref} nebo zvětšování U_1 , přejde výstup OZ prakticky skokem z kladné do záporné saturace v okamžiku, kdy bude U_1 větší než U_{ref} a na výstupu pak bude záporné saturační napětí U_{sat}^- . Protože zesílení OZ je velké (teoreticky nekonečné), není důležité, jak velký rozdíl je mezi napětími. U reálného operačního zesilovače je nutné, aby vstupní napětí U_1 a U_{ref} byla v rozsahu povolených vstupních napětí pro daný typ OZ. Výstupní napětí komparátoru U_O tedy bude měnit svou hodnotu v rozmezí kladné a záporné hodnoty saturačního napětí. Velikost saturace je dána velikostmi napájecích napětí OZ V_+ a V_- .

Doba přepnutí výstupního napětí OZ z jedné meze na druhou je omezena rychlostí přeběhu SR (Slew Rate) použitého zesilovače, která charakterizuje, jak rychle zesilovač reaguje na změny vstupního signálu.^[1]



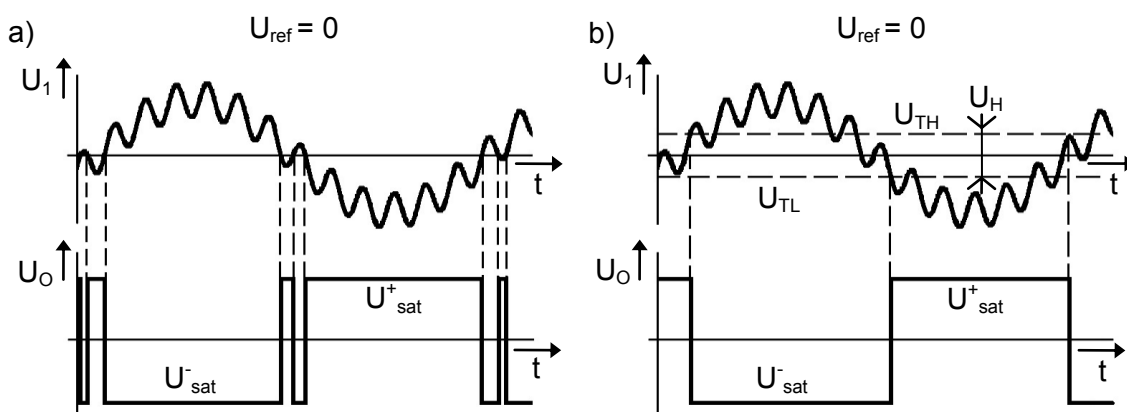
Obr. 1.3

a) Komparátor s operačním zesilovačem, b) Ideální průběh při komparaci

1.1.1 Hystereze

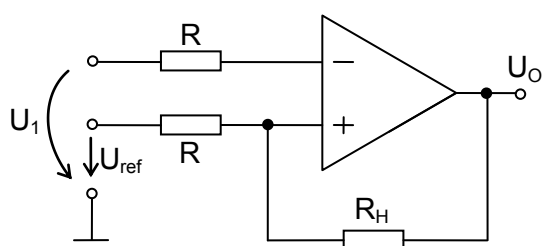
Hystereze či zpětná vazba je označení skutečnosti, kdy je vstup nějakého systému zpětně ovlivňován jeho výstupem. To znamená, že výstup takového systému nezávisí jen na hodnotě vstupního signálu, ale i na hodnotě signálu předchozího stavu. Podle efektu, jaký má zpětnovazební smyčka na změnu výchozího stavu, hovoříme o kladné zpětné vazbě nebo o záporné zpětné vazbě. Pro potřeby napětíového komparátoru zavádíme kladnou zpětnou vazbu z výstupu na neinverující vstup, čímž vznikne takzvaný komparátor s hysterezí.^[4]

Na vstupní signál komparátoru jsou ve většině případů superponovány šумы a rušivá napětí a právě v těchto případech se zavádí hystereze. Vlivem rušivého signálu dochází k tomu, že vstupní signál několikrát překročí a následně klesne pod komparační úroveň, následkem čehož dochází v blízkosti komparační úrovně dané velikostí U_{ref} k několikanásobnému překlopení komparátoru z jedné úrovně na druhou a zpět, jak je to ilustrováno na obr. 1.4a.



Obr. 1.4 Vstupní a výstupní napětí komparátoru: a) bez hystereze, b) s hysterezí

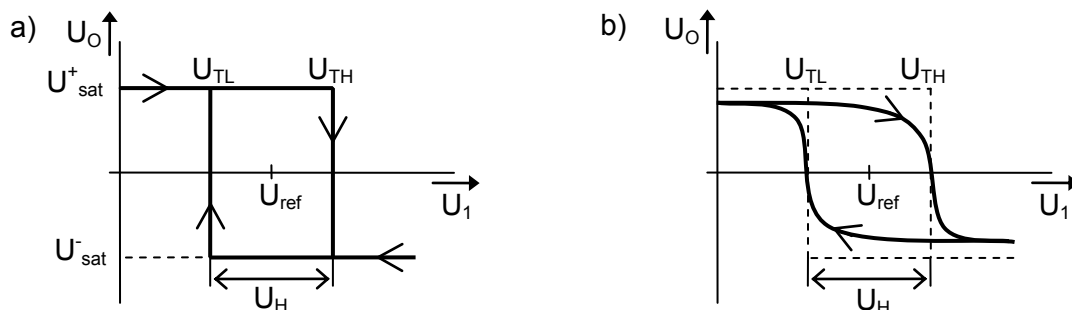
Po zavedení hystereze se v okolí komparační úrovně vytvoří dvě meze U_{TH} a U_{TL} , jak je naznačeno na obr. 1.4b, které slouží jako nové komparační úrovně. Velikost hysterezního napětí U_H je nutné zvolit větší, než je mezivrcholový rozkmit (U_{pp}) rušivého napětí.^[4] Jakmile je při zvětšování napětí překročena mez U_{TH} , komparátor se přeplojí a na výstupu bude záporné napětí U_{sat}^- . I když se velikost vstupního signálu vlivem působení rušivého signálu zmenší pod úroveň U_{TH} , k přeplovení výstupu již nedojde. Kladné napětí U_{sat}^+ se na výstupu objeví až v momentě, kdy vstupní signál klesne pod úroveň U_{TL} . K dalšímu přeplovení výstupu dojde opět s následujícím překročením U_{TH} . Velikost hysterezního napětí U_H tedy určuje pásmo necitlivosti komparátoru vůči změnám vstupního signálu.



Obr. 1.5 Komparátor s hysterezí

Nejjednodušší zapojení komparátoru s hysterezí je na obr. 1.5, přičemž obr. 1.6a znázorňuje ideální převodní charakteristiku tohoto komparátoru. Charakteristiku dostaneme, zavedeme-li na vstup stejnosměrné napětí, které budeme postupně zvyšovat od nízkých hodnot k vysokým – šipka zleva doprava – a poté v opačném pořadí od vysokých hodnot k nízkým – šipka zprava doleva. Tímto postupem lze určit hodnotu hystereze měřením. Reálná převodní charakteristika komparátoru s hysterezí však vypadá jinak, viz obr. 1.6b. Strmost reálné převodní charakteristiky je dána zesílením

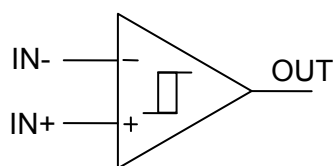
komparátoru a výstupní napětí nedosahuje ve svých maximech hodnot daných napájecím napětím komparátoru $V+$ a $V-$, ale jeho maxima jsou nižší.^[1]



Obr. 1.6

a) Ideální převodní charakteristika, b) reálná převodní charakteristika

Některé komparátory se však vyrábějí s již zabudovanou zpětnou vazbou. Schématický značka takového komparátoru je na obr. 1.7.



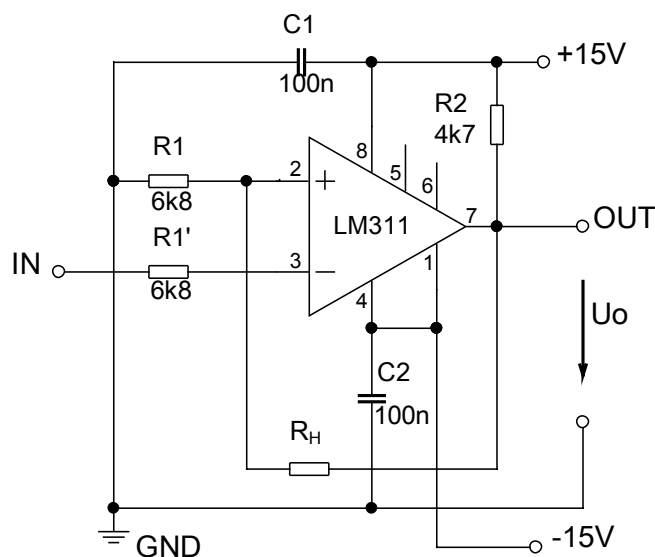
Obr. 1.7 Schématická značka komparátoru se zabudovanou hysterezí

1.2 Oblasti použití komparátorů^[1]

- A/D a D/A převodníky
- pulzně šířkové modulátory
- napájecí zdroje
- impulzní generátory
- regulátory
- úroňové detektory a jiné.

1.3 Realizované zapojení komparátoru

Na obr. 1.8 je zapojení komparátoru s hysterezí, kterého je použito k simulaci v prostředí OrCAD/PSpice a je i základem finálního přípravku. Zapojení vychází z klasického komparátoru s hysterezí – viz obr. 1.5 – a je doplněno jen o minimum součástek. Jádrem obvodu je napěťový komparátor LM311, jehož datasheet také posloužil při návrhu tohoto zapojení.



Obr. 1.8 Realizované zapojení komparátoru s hysterezí (upraveno [5])

2. Simulace v OrCAD/PSpice

K simulaci (měření) a ověření činnosti komparátoru bylo použito programu OrCAD, přičemž návrh zapojení se provádí v prostředí Capture a simulaci vykonává aplikace PSpice A/D.

Podle typu zvolené analýzy budiž rozděleny simulace následovně:

- 1) Simulace v časové oblasti – analýza Time Domain (Transient)
- 2) Simulace převodní charakteristiky – analýza DC Sweep

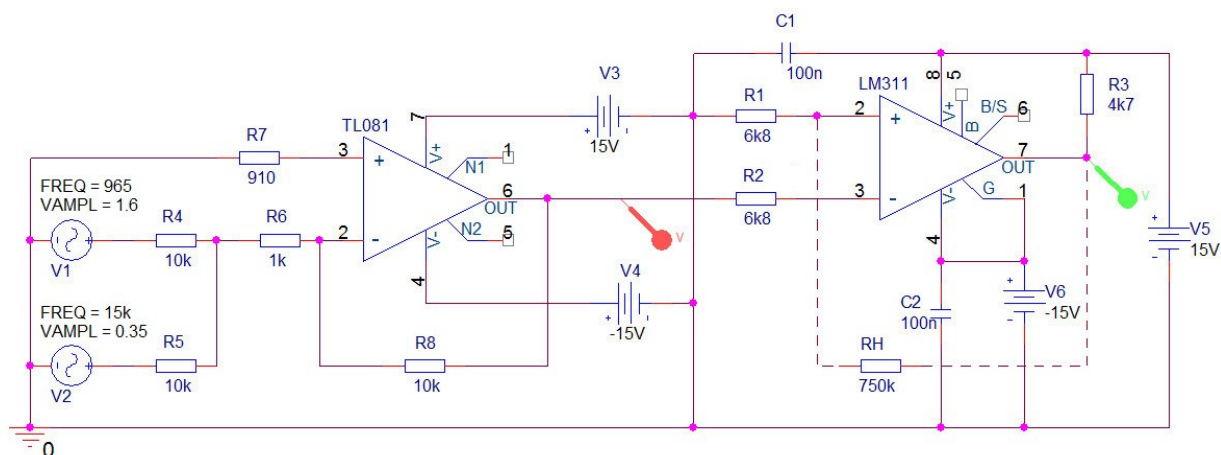
2.1 Simulace v časové oblasti

Cílem těchto simulací je ověřit správnou činnost komparátoru v zapojení se zavedenou hysterezí, bez hystereze a se špatně pracující hysterezí v závislosti na vstupním signálu na němž je superponováno rušivé napětí. A také poslouží k porovnání výstupů ze simulace s výstupy s reálného měření.

2.1.1 Simulované zapojení

Zapojení pro simulaci komparátoru s hysterezí je totožné se zapojením bez hystereze, s tím jediným rozdílem, že je obohaceno o zavedenou kladnou zpětnou vazbu s odporem R_H – na obr. 2.1 zobrazeno čárkovanou čarou. Správná velikost odporu R_H zajišťuje žádoucí funkci hystereze. K simulaci byly zvoleny tyto velikosti: $R_H = 240\text{k}\Omega$ – správná funkce hystereze; $R_H = 750\text{k}\Omega$ – špatně pracující hystereze a bez R_H , tedy bez zavedené kladné zpětné vazby.

Zdrojem signálu jsou zde dva generátory, jejichž nastavení odpovídá výstupním hodnotám realizovaných zapojení. Signál je před vstupem do komparátoru zesílen invertujícím zapojením operačního zesilovače TL081, jehož je použito i při realizaci.

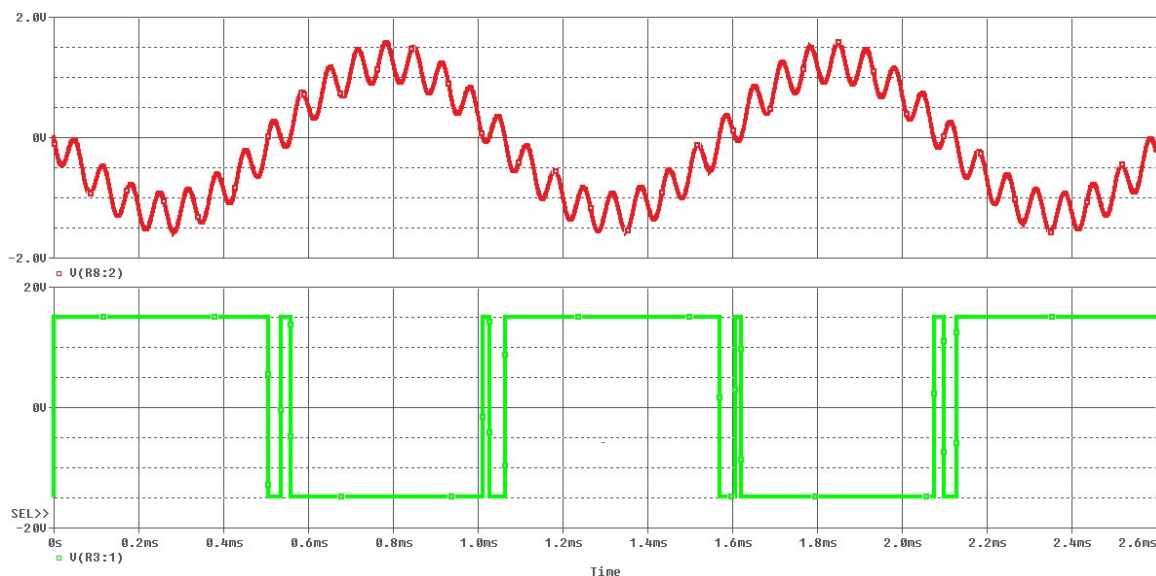


Obr. 2.1 Zapojení pro simulaci v časové oblasti

2.1.2 Výstupy ze simulace

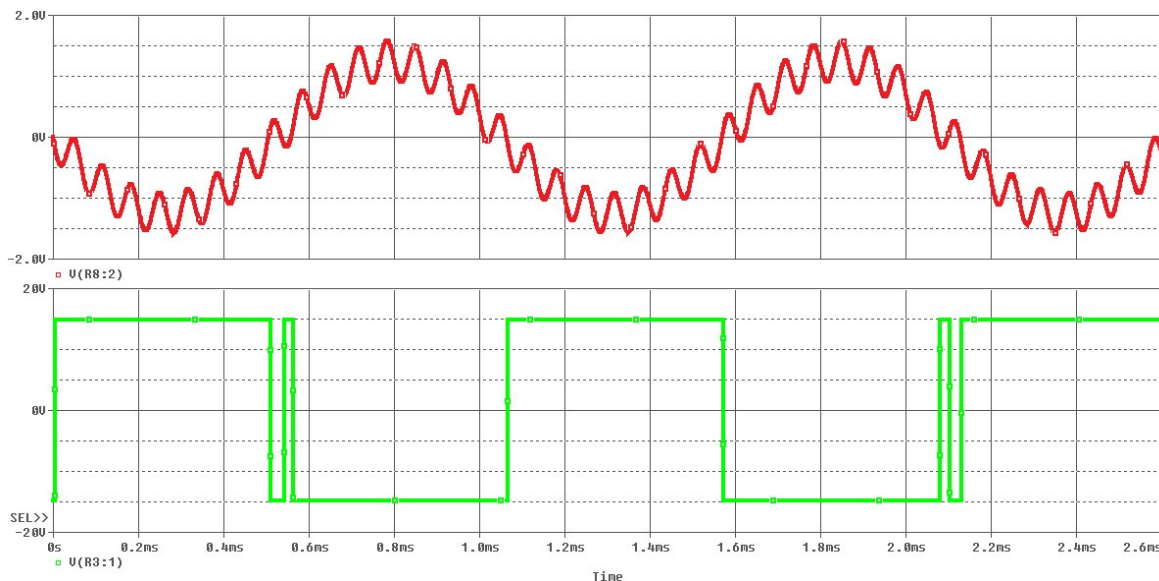
Na nosnou sinusovou vlnu (na obr. 2.1 interpretován zdrojem V1) je superponován taktéž sinusový rušivý signál (V2). Amplitudy nastavené na generátoru jsou sraženy odpory R4 a R5 na vstupu sumátoru, ale po průchodu invertujícím zesilovačem, kde je signál zesílen a jeho fáze je

posunuta o 180° , nabudou opět téměř totožných hodnot. Tento signál je vstupním signálem komparátoru, viz obr. 2.2 (červený). Z obr. 2.2 je patrné, že komparátor reaguje na každý překmit vstupního signálu nad či pod hodnotu referenčního napětí, které má nulovou hodnotu. Tento graf tedy zachycuje situaci při zapojení bez hystereze.



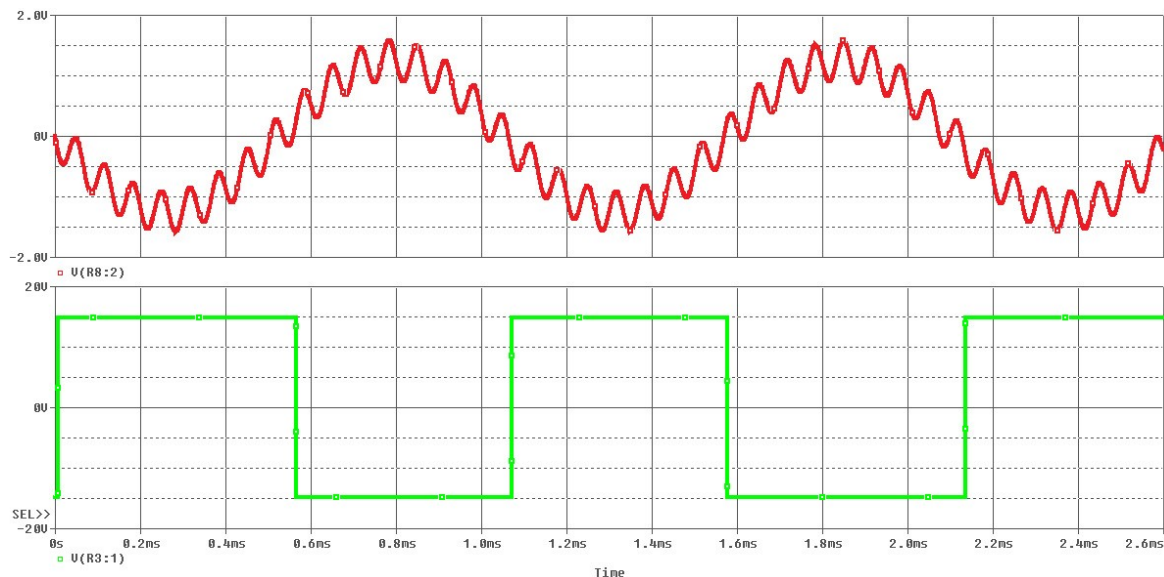
Obr. 2.2 Vstupní signál a odezva komparátoru bez hystereze

Graf na obr. 2.3 je platný pro komparátor s hystezí při $R_H = 750k\Omega$. V tomto případě je hystereze sice zavedna, ale velikost hysterezního napětí U_H (šířka pásma hystereze) není dostatečně velká na to, aby pokryla rozkmit rušivého napětí.



Obr. 2.3 Vstupní signál a odezva komparátoru při $R_H = 750k\Omega$

Graf správně pracujícího komparátoru s hysterezí s $R_H = 240\text{k}\Omega$ je na obr. 2.4 a jako jediný ze zmíněných tří stavů je pouze tento pro naprostou většinu aplikací žádoucí.



Obr. 2.4 Vstupní signál a odezva komparátoru při $R_H = 240\text{k}\Omega$

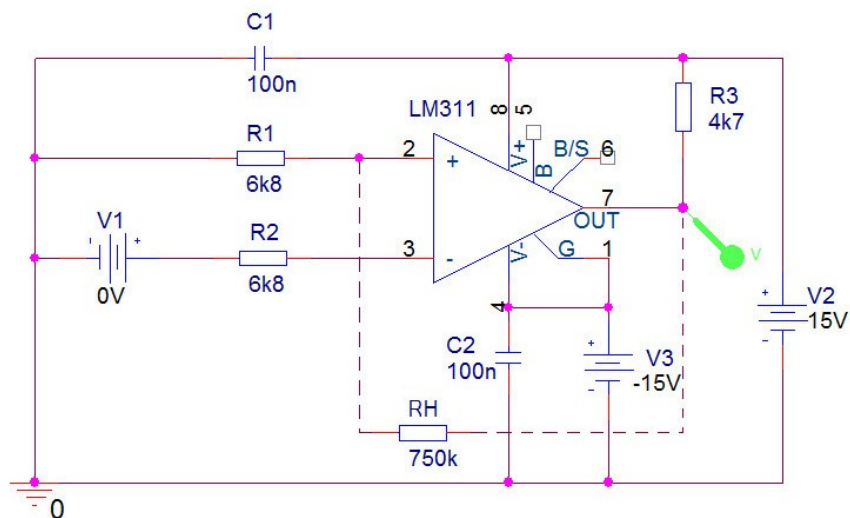
2.2 Simulace převodní charakteristiky

Primárním cílem těchto simulací je změřit převodní charakteristiku – tedy velikost U_H – v zapojení komparátoru s hysterezí, bez hystereze a se špatně nastavenou hysterezí a dále výstupy z těchto simulací, jakožto idealizované, porovnat s výstupy z reálného měření.

2.2.1 Simulované zapojení

Pro zapojení na obr. 2.5 platí, ohledně velikosti odporů R_H to samé, jako při simulaci v časové oblasti.

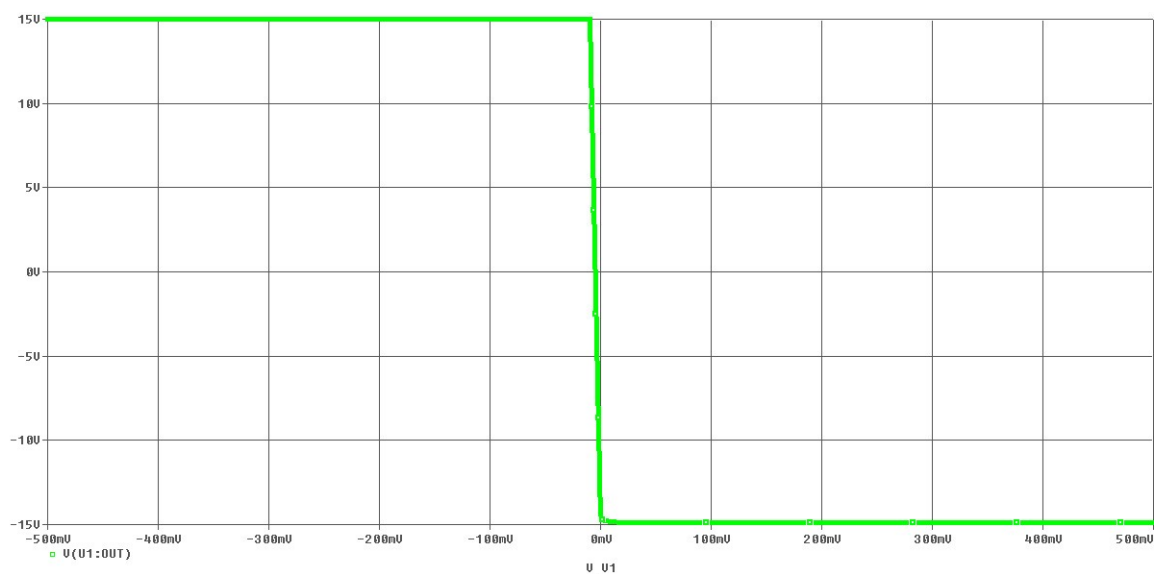
Při simulaci převodní charakteristiky odpadají, jako zdroje vstupního signálu, generátory i nepotřebný zesilovač. Zde je na vstup komparátu připojen stejnosměrný zdroj, jehož správným postupným nastavováním se měří převodní charakteristika, viz vysvětlení v kapitole 1.1.1 Hystereze.



Obr. 2.5 Zapojení pro simulaci převodní charakteristiky

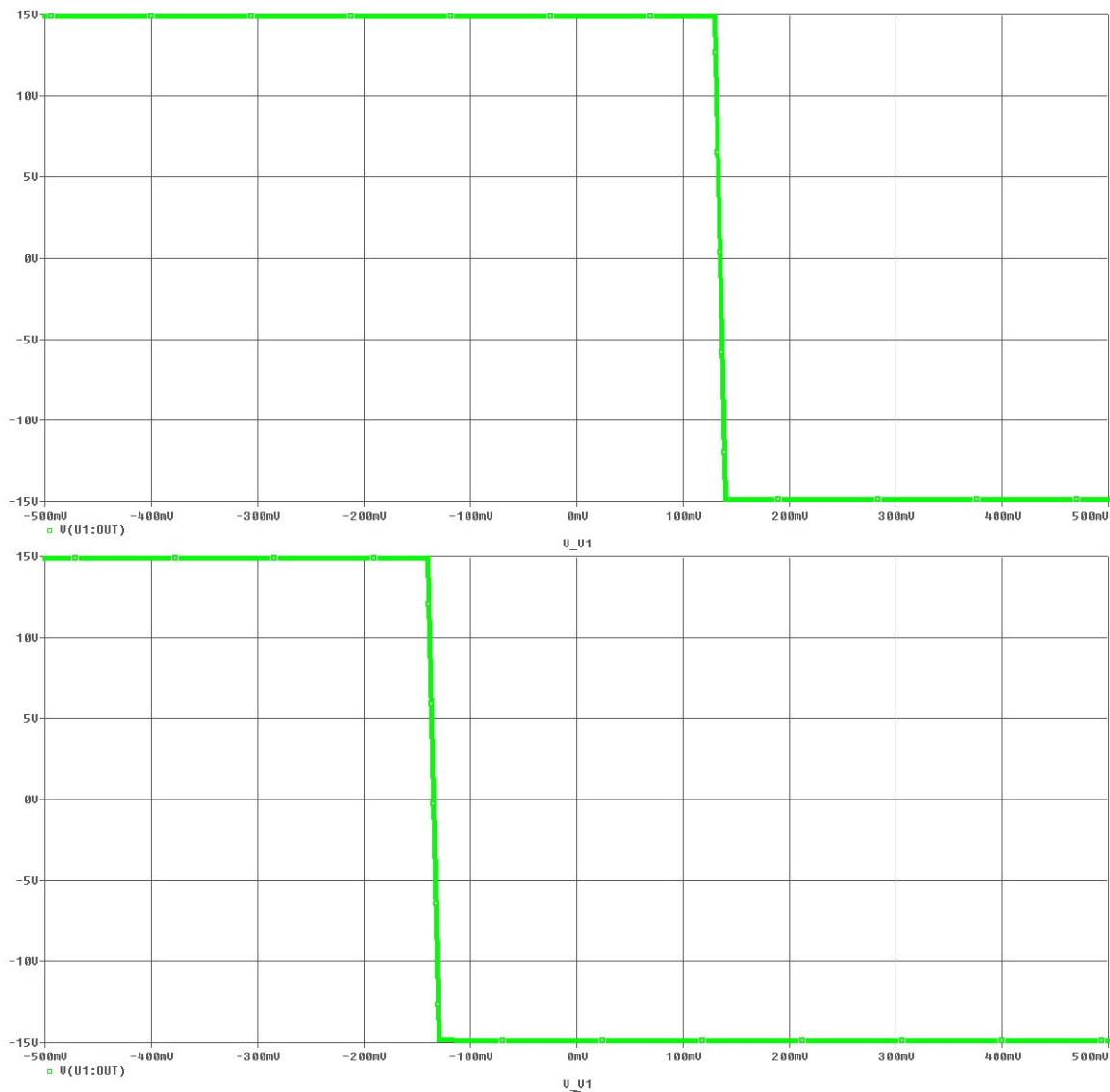
2.2.2 Výstupy ze simulace

Na následujících obrázcích jsou vyobrazeny převodní charakteristiky s rozdílnými velikostmi hysterezního napětí U_H . Avšak pouze charakteristika na obr. 2.8 platí pro správně pracující komparátor s hysterezí a jako takový odpovídá stavu zachycenému na obr. 2.4. Opět zde platí, že je-li velikost hysterezního napětí U_H větší než rozkmit (U_{pp}) rušivého napětí, hystereze je dostatečně velká a výstup komparátoru je necitlivý vůči nežádoucímu působení rušivého signálu v okolí referenčního napětí a komparátor tedy pracuje správně.



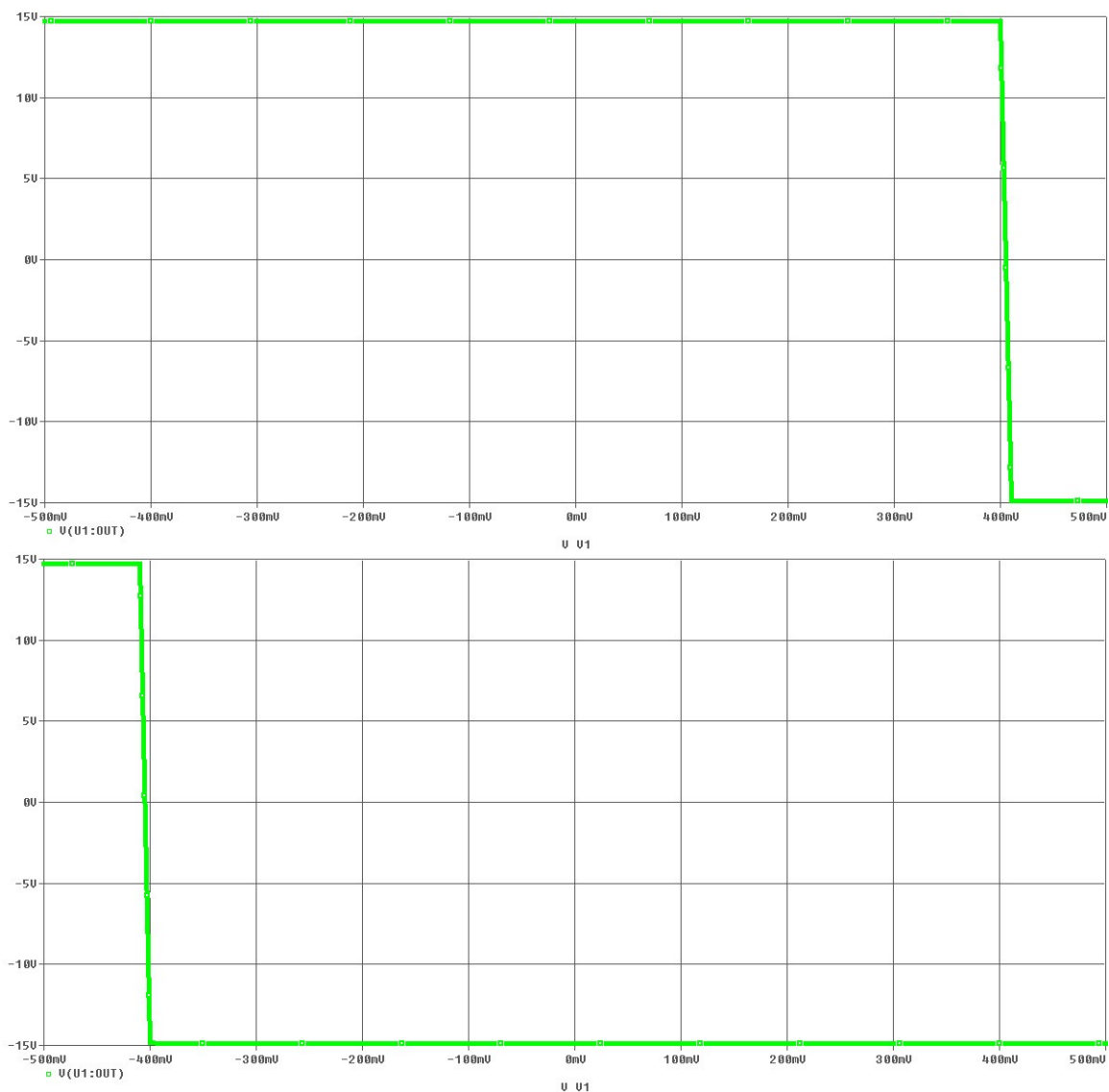
Obr. 2.6 Převodní charakteristika komparátoru bez hystereze

Obr. 2.6 zachycuje situaci bez zavedené zpětné vazby. Při měření (simulaci) převodní charakteristiky postupným zvyšováním a následným snižováním napětí (V_1) lze dostat dvě totožné křivky, poněvadž velikost hystereze je nulová.



Obr. 2.7 Převodní charakteristika komparátoru při $R_H = 750k\Omega$

Při $R_H = 750k\Omega$ lze z obr. 2.7 odečíst velikost hysterezního napětí $U_H = 270mV$, což je příliš malá hodnota – špatně pracující hystereze.



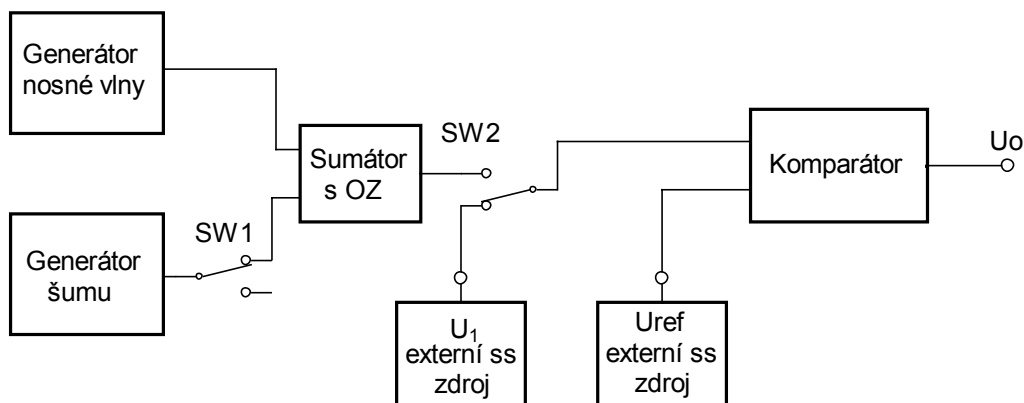
Obr. 2.8 Převodní charakteristika komparátoru při $R_H = 240k\Omega$

Při velikosti $R_H = 240k\Omega$ ze simulace měření na obr. 2.8 vyplývá, že $U_H = 810mV$. Zdroj rušivého signálu (V2) na obr. 2.5 má amplitudu nastavenou na 350mV ($U_{pp} = 700mV$) – správně pracující hystereze.

3. Návrh zapojení a konstrukční řešení

3.1 Celkové blokové schéma zapojení

Rozkreslené celkové zapojení obsahuje příloha A.



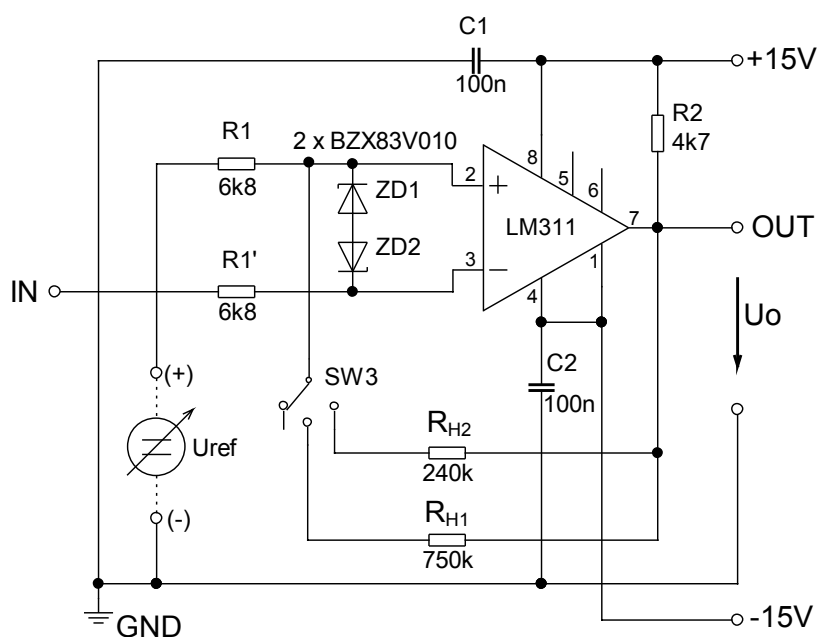
Obr. 3.1 Blokové schéma zařízení

Blokové schéma celého zařízení se skládá z následujících částí:

- 1) Generátor nosné vlny – vytváří sinusový signál. Z obou použitých generátorů má větší amplitudu a menší frekvenci.
- 2) Generátor šumu – výstupem je také sinusový signál, avšak mnohem vyšší frekvence a menší amplitudy.
- 3) Sumátor s OZ – superponuje signál z generátoru šumu na nosnou vlnu druhého generátoru a zesiluje vstupní signál.
- 4) Komparátor – v závislosti na vstupním signálu a na správnosti zavedení hystereze nabývá na výstupu pouze dvě možné hodnoty.
- 5) U_1 , U_{ref} -externí ss zdroje – nejsou součástí výrobku. U_1 slouží k eventuálnímu nastavování stejnosměrného napětí při měření převodní charakteristiky. Zdrojem U_{ref} je možno nastavovat referenční napětí komparátoru.

3.2 Komparátor

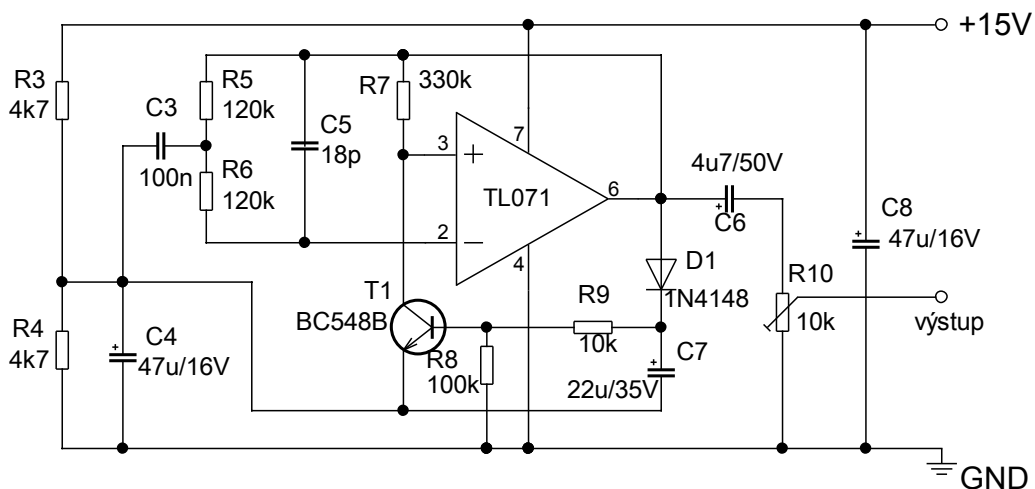
Obvod komparátoru se odlišuje od simulovaného zapojení pouze pár změnami. Mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem komparátoru LM311 jsou zapojeny ochranné zenerovy diody se stabilizačním napětím 10V. Vzhledem k maximálnímu rozdílovému napětí komparátoru, které je $\pm 30V$, je stabilizace dostatečná a naopak, použitá zapojení generátorů i se zapojeným zesilovačem signálu nejsou schopny takovéto hodnoty napětí vyrobit. Dalším doplňkem v obvodu je přepínač SW3, sloužící ke změně zpětnovazebního odporu R_{H2} , tedy k volbě velikosti hystereze.



Obr. 3.2 Schéma obvodu komparátoru

3.3 Generátor nosné vlny

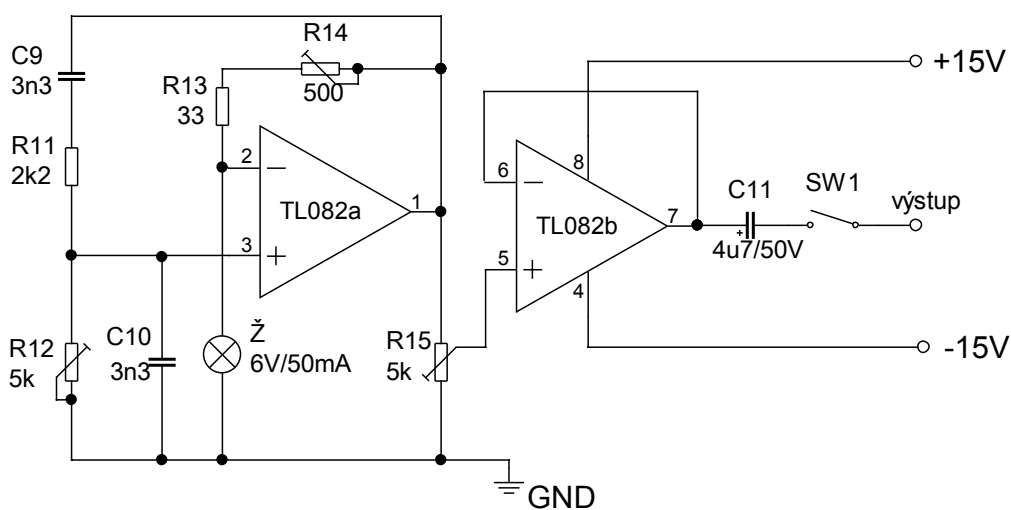
Převzato z [6]. Generátor nosné vlny je zdrojem sinusového signálu a frekvenci maximálně 1kHz. Kmitočet oscilací je určován přemostěným článkem T se součástkami R5, R6, C3 a C5, který je zapojen ve smyčce záporné zpětné vazby OZ. Harmonické (sinusové) kmitání oscilátoru je zajištěno obvodem stabilizace amplitudy tvořeného řízeným odporovým děličem napětí s rezistorem R7 a bipolárním tranzistorem T1, který je u OZ zapojen ve smyčce záporné zpětné vazby a usměrňovačem se součástkami D1, C7, R8 a R9, na který je přiváděn nízkofrekvenční signál z výstupu OZ. Odporovým trimrem R10 lze ovlivňovat úroveň výstupního signálu.



Obr. 3.3 Schéma generátoru nosné vlny

3.4 Generátor šumu

Převzato a upraveno z [7]. Tento generátor je zdrojem sinusového signálu o frekvenci 15kHz. Jádrem generátoru je dvojitý operační zesilovač TL082 a kmitočet oscilací určuje Wienův člunek se součástkami R11, C9 a R12, C10. Stabilizaci výstupního napětí zde zajišťuje žárovka 6V/50mA. Na výstupu generátoru je spínač SW1, který je-li sepnut, přivádí generovaný šum na vstup sumátoru, kde je superponován na sinusovou nosnou vlnu a jako takový je vstupním signálem komparátoru.

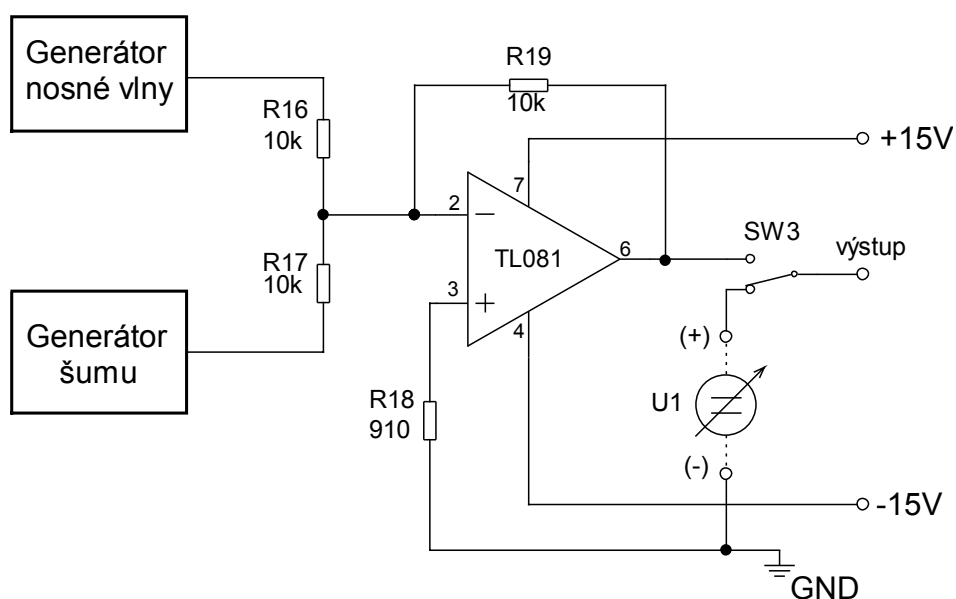


Obr. 3.4 Schéma generátoru šumu

3.5 Sumátor s OZ

Na vstup tohoto obvodu jsou přivedeny signály z generátorů, které jsou sečteny a následně zesíleny invertujícím zapojením operačního zesilovače TL081. Jedná se o nejzákladnější zapojení.

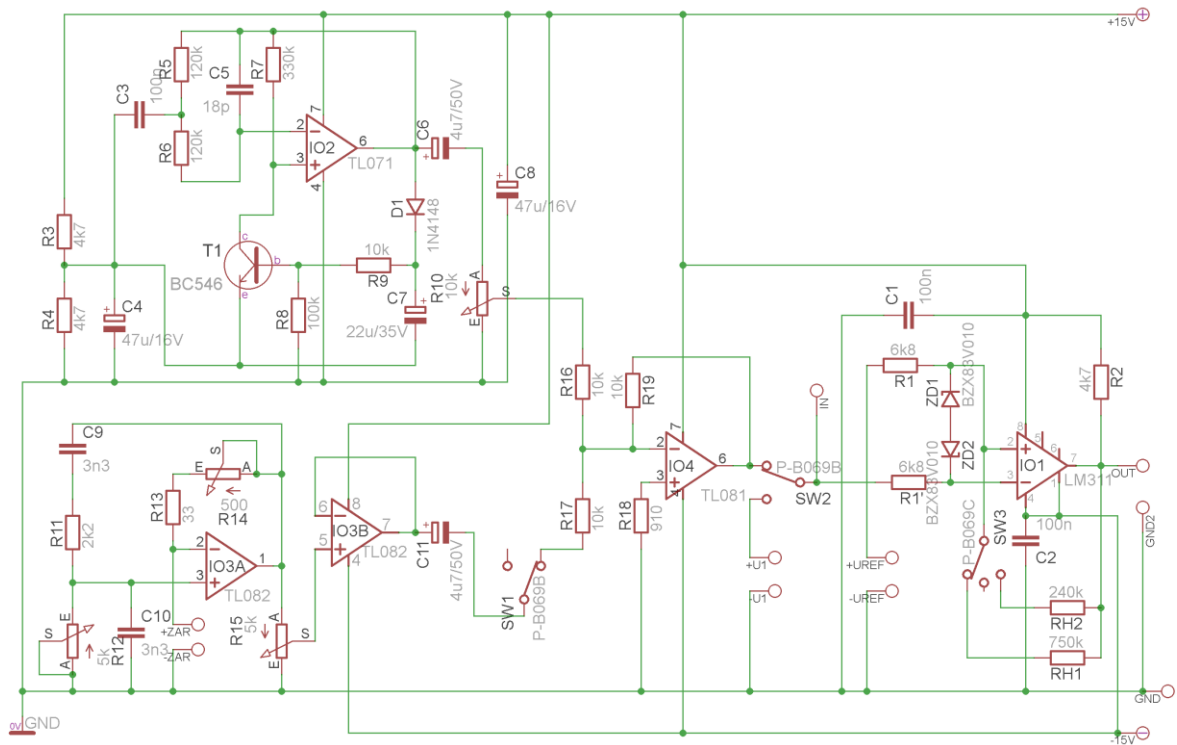
Na výstupu zapojený přepínač SW2 slouží k volbě vstupní hodnoty komparátoru, podle toho co má být měřeno. Za účelem zjišťování chování komparátoru v časové oblasti, se vstupním rušeným signálem, se připojují generátory a pro změření převodní charakteristiky se připojuje externí zdroj U_1 .



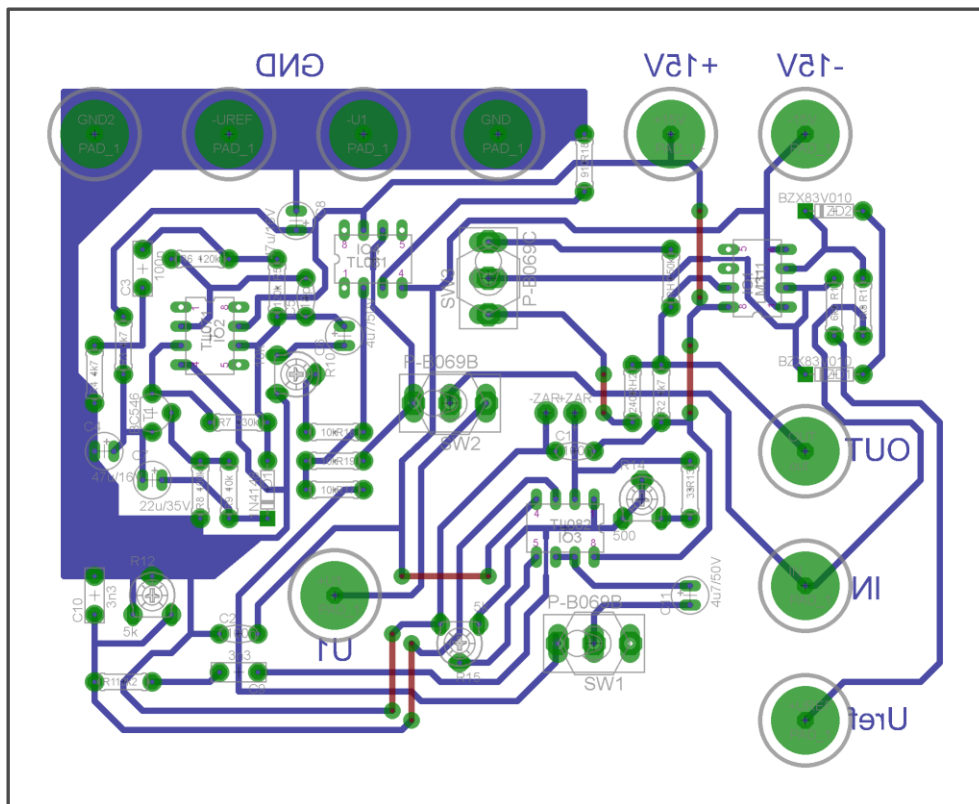
Obr. 3.5 Schéma sumátoru s OZ

3.6 Návrh DPS

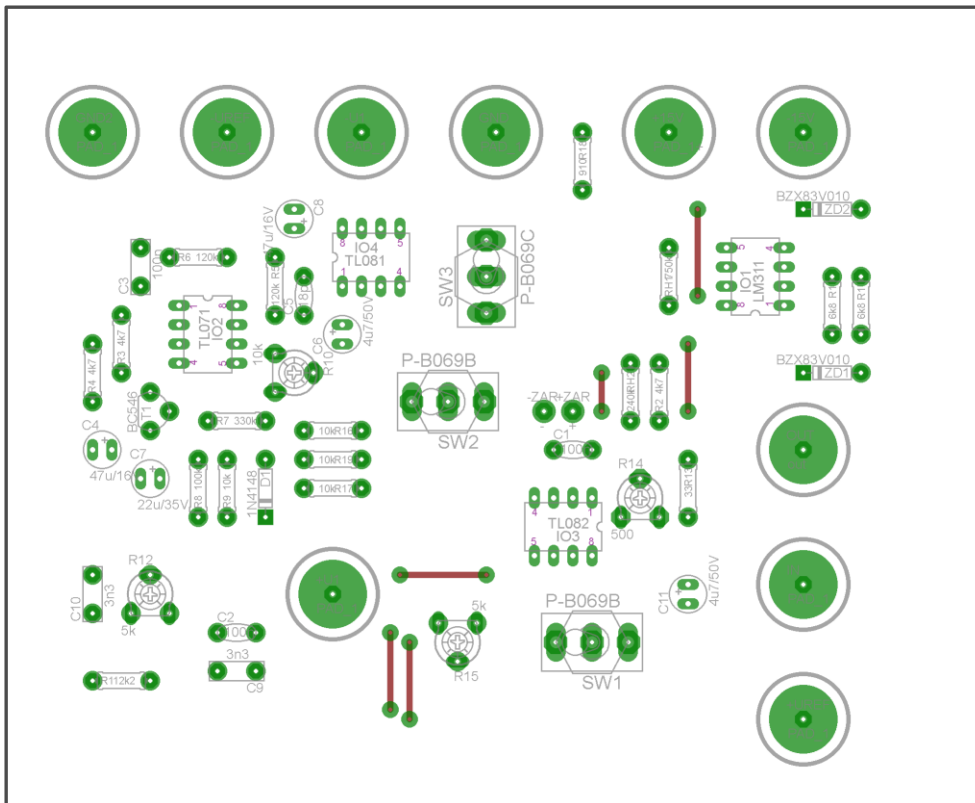
K návrhu desky plošných spojů bylo použito programu Eagle 5.11.0. Modul komparátoru je umístěn na jednostranném plošném spoji o rozměrech 129,54 x 105,41 mm. Na níže uvedených obrázcích je DPS v měřítku 1:1.



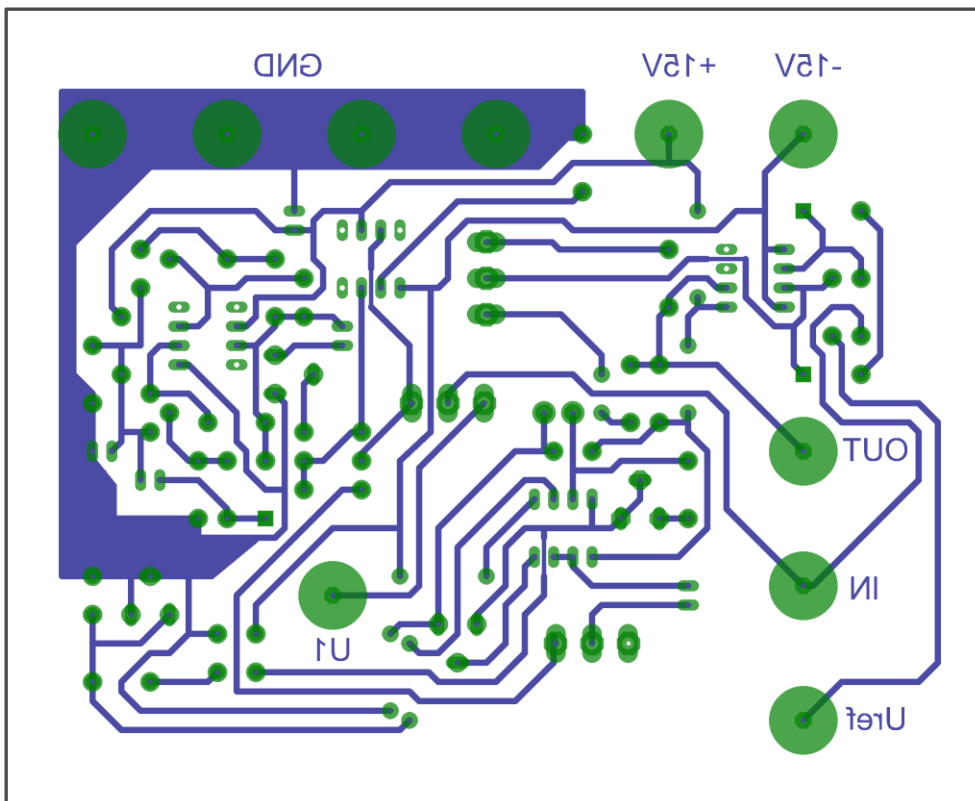
Obr. 3.6 Schéma zapojení v programu Eagle



Obr. 3.7 DPS při pohledu shora



Obr. 3.8 DPS při pohledu shora – rozmístění součástek



Obr. 3.9 DPS při pohledu shora – spoje

4. Zadání laboratorní úlohy

Laboratorní úloha - Komparátory

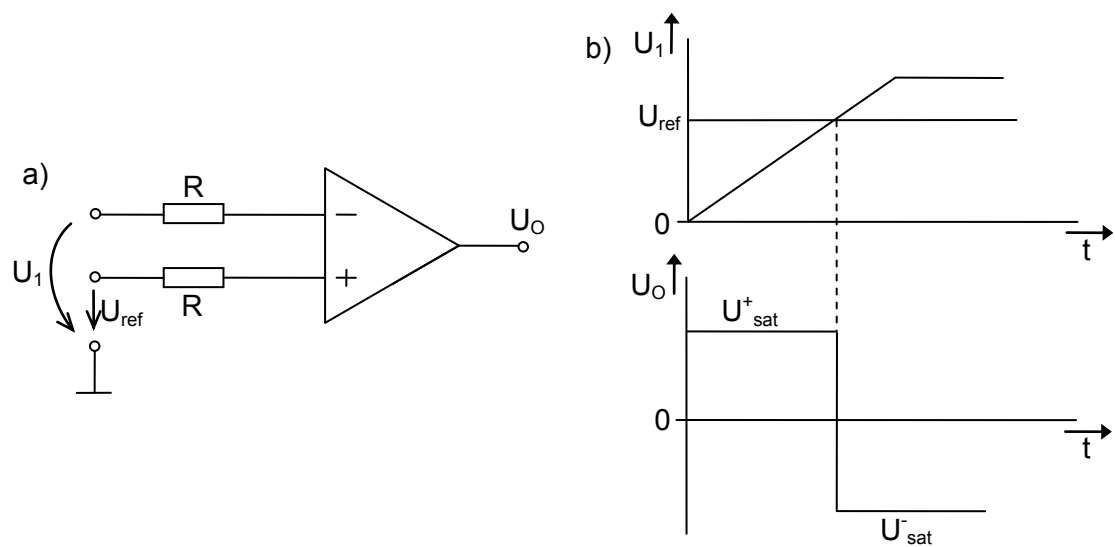
4.1 Zadání

- 1) Změte převodní charakteristiku komparátoru bez hystereze pro dvě různá referenční napětí U_{ref} (např. $U_{ref} = 0V$ a $U_{ref} = 5V$).
- 2) Změřte převodní charakteristiku komparátoru s 1. hysterezí pro dvě různá U_{ref} , dále určete velikost hystereze měřením i výpočtem.
- 3) Změřte převodní charakteristiku komparátoru s 2. hysterezí pro dvě různá U_{ref} , dále určete velikost hystereze měřením i výpočtem.
- 4) Na vstup komparátoru bez hystereze přiveďte napětí z generátoru (bez šumu) a zobrazte výstupní napětí pro dvě různé velikosti U_{ref} .
- 5) Na vstup komparátoru bez hystereze přiveďte napětí z generátorů včetně šumu, zobrazte výstupní napětí, vysvětlete průběh.
- 6) Měření z bodu 5 opakujte pro zapojení s 1. a 2. hysterezí, vysvětlete průběhy a doložte je výpočtem.

4.2 Výklad

Napěťový komparátor je zařízení, které porovnává dvě napětí nebo proudy a nastavuje výstup tak, aby indikoval, které z nich je větší. Proto mohou jejich výstupy v aktivním stavu nabývat pouze dvě hodnoty napětí, nízkou a vysokou, z hlediska terminologie používané v oblasti logických obvodů nabývá komparátor hodnoty log 0 nebo log 1, případně H (high) a L (low).^[1]

Nejjednodušší komparátor, porovnávající dvě napětí, získáme zapojením operačního zesilovače podle obr. 4.1a.

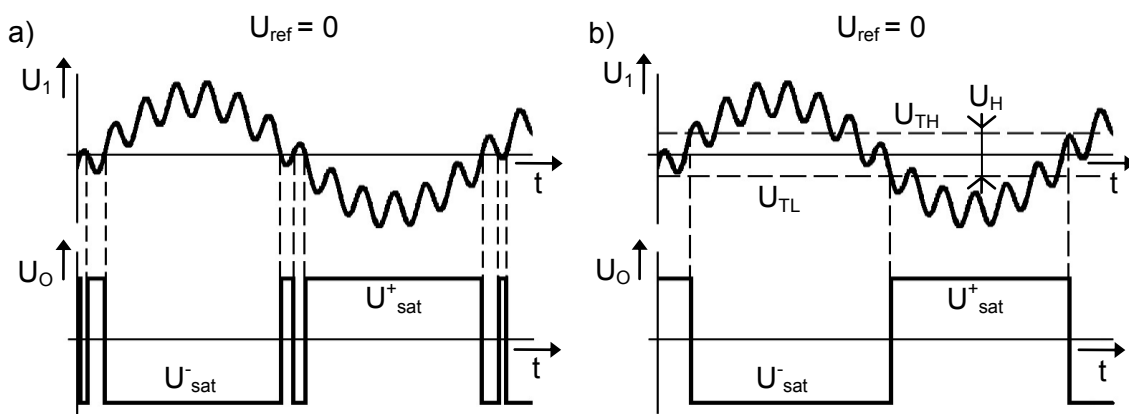


Obr. 4.1
a) Komparátor bez hystereze, b) Ideální průběh při komparaci

4.2.1 Hystereze

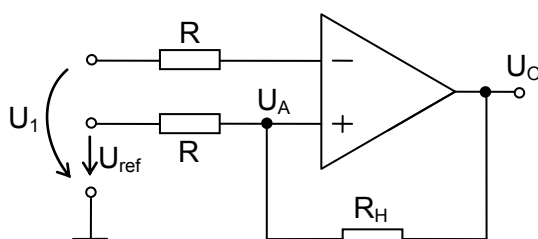
Hystereze či zpětná vazba je označení skutečnosti, kdy je vstup nějakého systému zpětně ovlivňován jeho výstupem. Pro potřeby napěťového komparátoru zavádíme výhradně kladnou zpětnou vazbu z výstupu na neinvertující vstup, čímž vznikne takzvaný komparátor s hysterezi.^[4]

Na vstupní signál komparátoru jsou ve většině případů superponovány šумы a rušivá napětí a právě v těchto případech se zavádí hystereze.



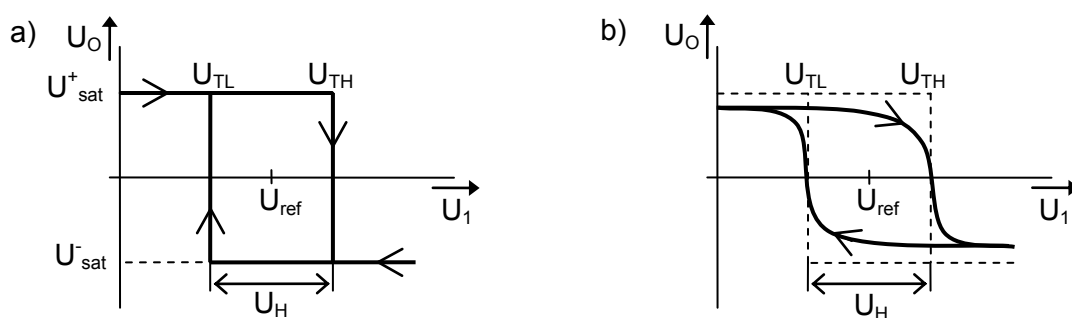
Obr. 4.2 Vstupní a výstupní napětí komparátoru: a) bez hystereze, b) s hysterezi

Po zavedení hystereze se v okolí komparační úrovně vytvoří dvě meze U_{TH} a U_{TL} , jak je naznačeno na obr. 4.2b, které slouží jako nové komparační úrovně. Velikost hysterezního napětí U_H musí být větší, než je mezivrcholový rozkmit (U_{pp}) rušivého napětí.^[4] Velikost hysterezního napětí U_H tedy určuje pásmo necitlivosti komparátoru vůči změnám vstupního signálu.



Obr. 4.3 Komparátor s hysterezí

Nejjednodušší zapojení komparátoru s hysterezí je na obr. 4.3, přičemž obr. 4.4 znázorňuje ideální a reálnou převodní charakteristiku tohoto komparátoru. Charakteristiku dostaneme, zavedeme-li na vstup stejnosměrné napětí (U_1), které budeme postupně zvyšovat od nízkých hodnot k vysokým – šipka zleva doprava – a poté v opačném pořadí od vysokých hodnot k nízkým – šipka zprava doleva. Tímto postupem lze určit hodnotu hystereze měřením. Strmost reálné převodní charakteristiky je dána zesílením komparátoru.^[1]



Obr. 4.4

a) Idealizovaný průběh převodní charakteristiky, b) reálný průběh převodní charakteristiky

Velikost hystereze lze také odvodit z obr. 4.3 pomocí metody superpozice. V případě, že na výstupu komparátoru je napětí U_{sat}^+ , napětí na neinvertujícím vstupu lze vztáhnout takto: ^[4]

$$U_O = U_{sat}^+$$

$$U_A = \frac{R}{R + R_H} \cdot U_{sat}^+ + \frac{R_H}{R + R_H} \cdot U_{ref}$$

$$U_A = \frac{R}{R + R_H} \cdot U_{sat}^- + \frac{R_H}{R + R_H} \cdot U_{ref}$$

Hysterezní napětí je tedy určeno vztahem:

$$U_H = U_A^- \cdot U_A = \frac{R}{R + R_H} \cdot (U_{sat}^+ - U_{sat}^-) \cong \frac{2 \cdot R}{R + R_H} \cdot U_{sat}$$

Který platí za předpokladu, že $|U_{sat}^+| \cong |U_{sat}^-| = U_{sat}$

4.3 Vysvětlivky k modulu komparátoru

Modul se skládá z těchto částí:

- 1) Generátor nosné vlny – vytváří sinusový signál. Z obou použitých generátorů má větší amplitudu a menší frekvenci.

Parametry:

- výstupní napětí: 1,6V (na výstupu sumátoru)
- frekvence: 965Hz

- 2) Generátor šumu – výstupem je také sinusový signál, avšak mnohem vyšší frekvence a menší amplitudy.

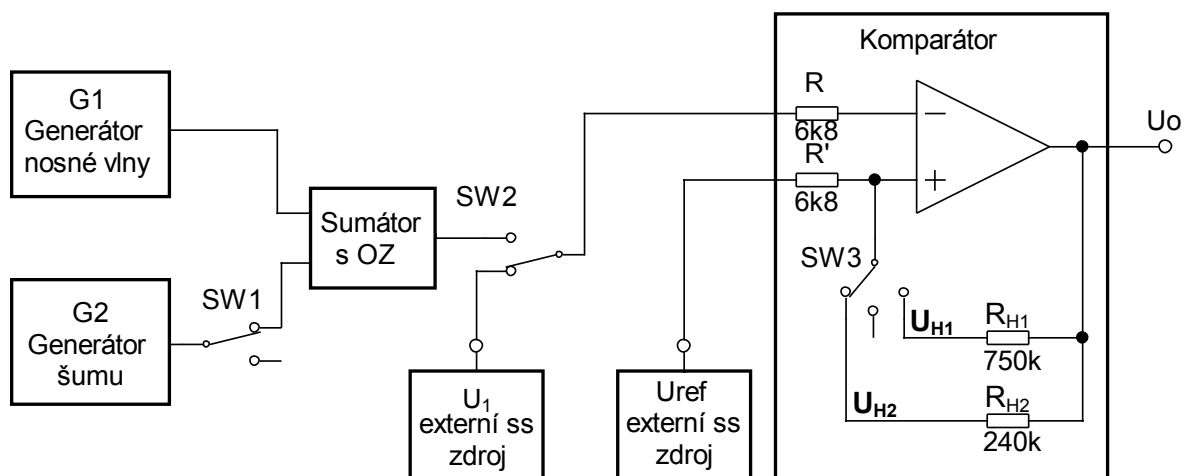
Parametry:

- výstupní napětí: 0,35V (na výstupu sumátoru)
- frekvence: 15kHz

- 3) Sumátor s OZ – superponuje signál z generátoru šumu na nosnou vlnu druhého generátoru a zesiluje vstupní signál.

- 4) Komparátor – v závislosti na vstupním signálu a na správnosti zavedení hystereze nabývá na výstupu pouze dvě možné hodnoty.

- 5) U₁, U_{ref}-externí ss zdroje – nejsou součástí výrobku. U₁ slouží k eventuálnímu nastavování stejnosměrného napětí při měření převodní charakteristiky. Zdrojem U_{ref} je možno nastavovat referenční napětí komparátoru.

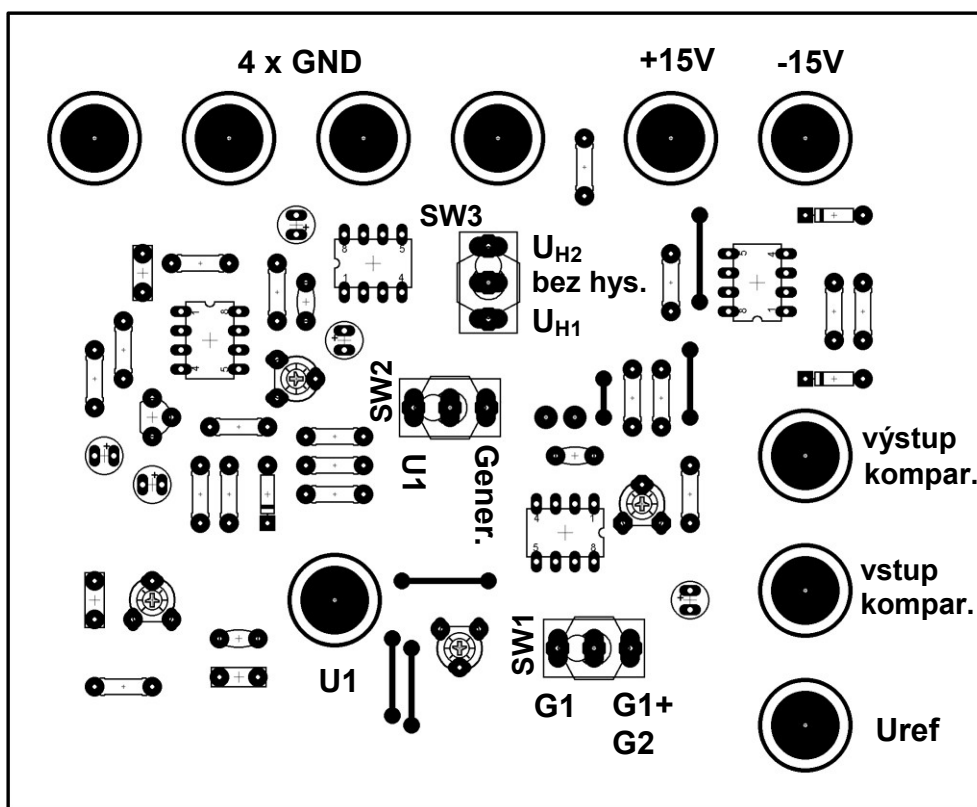


Obr. 4.5 Blokové schéma zařízení

Páčkové přepínače:

Označení	Popis na modulu	Vysvětlení
SW1 (ON-ON)	G1+G2	jsou zapojeny oba generátory, výstupem sumátoru je sinusový signál se superponovaným šumem
	G1	je zapojen pouze generátor nosné vlny; výstupem sumátoru je čistá sinusovka
SW2 (ON-ON)	U1	na vstup komparátoru je přes svorku U1 připojeno stejnosměrné napětí pro měření převodní charakteristiky
	Gener.	na vstup komparátoru jsou přes sumátor připojeny generátory G1 a G2
SW3 (ON-OFF-ON)	U_{H1}	1.hystereze se zpětnovazebním odporem $R_{H1} = 750k\Omega$
	bez hys.	komparátor nemá zapojenou hysterezi
	U_{H2}	2.hystereze se zpětnovazebním odporem $R_{H2} = 240k\Omega$

Tab. 4.1 Značení přepínačů na modulu komparátoru



Obr. 4.6 Značení modulu komparátoru

4.4 Doporučený postup měření

- 1) Na výstup komparátoru připojte multimetr. Připojte zdroj stejnosměrného napětí mezi Uref a GND. Na svorky U1 a GND připojte přes napěťový dělič z odporových dekád multimetr a stejnosměrný zdroj. Přepínač SW2 přepněte do polohy "U1". Přepínač SW3 přepněte do polohy "bez hys.". Změřte převodní charakteristiku dvě různé hodnoty Uref.
- 2) Obdobně jako v bodě 1. Přepínač SW3 přepněte do polohy "UH1".
- 3) Obdobně jako v bodě 1. Přepínač SW3 přepněte do polohy "UH2".
- 4) Na vstup a výstup komparátoru připojte osciloskop. Přepínač SW1 nastavte do polohy "G1", SW2 do polohy "Gener." a SW3 do polohy "bez hys.". Zobrazte na osciloskopu výstupní napětí na komparátoru pro dvě různé hodnoty Uref.
- 5) Obdobně jako v bodě 4. Přepínač SW1 nastavte do polohy "G1+G2".
- 6) Obdobně jako v bodě 5. Přepínačem SW3 měňte velikosti hystereze.

Poznámky: V případě měření bez zdroje referenčního napětí, je nutné připojit svorku Uref na GND nebo zdroj ponechat a nastavit na něm nulové napětí.

5. Kontrolní měření laboratorní úlohy

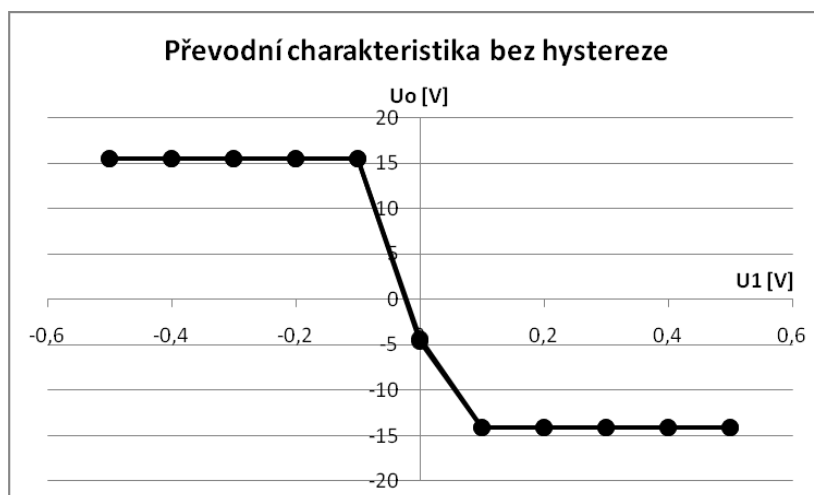
- 1) Změte převodní charakteristiku komparátoru bez hystereze pro dvě různá referenční napětí U_{ref} (např. $U_{ref} = 0V$ a $U_{ref} = 5V$).

$U_{ref} = 0V$

U_1 [V]	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5
U_o [V]	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-4,6	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5

U_1 [V]	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
U_o [V]	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	-4,3	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1

Graf převodní charakteristiky:



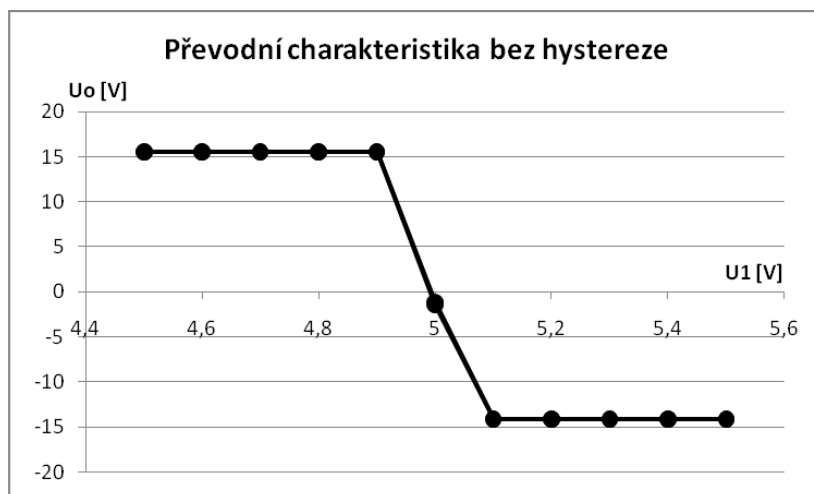
Obr. 5.1 Převodní charakteristika bez hystereze při $U_{ref} = 0V$

$U_{ref} = 5V$

U_1 [V]	5,5	5,4	5,3	5,2	5,1	5	4,9	4,8	4,7	4,6	4,5
U_o [V]	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-1,3	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5

U_1 [V]	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5
U_o [V]	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1

Graf převodní charakteristiky:



Obr. 5.2 Převodní charakteristika bez hystereze při $U_{ref} = 5V$

- 2) Změřte převodní charakteristiku komparátoru s 1. hysterezí pro dvě různá U_{ref} , dále určete velikost hystereze měřením i výpočtem.

U_{HI} ($R_{HI} = 750k\Omega$); $U_{ref} = 0V$

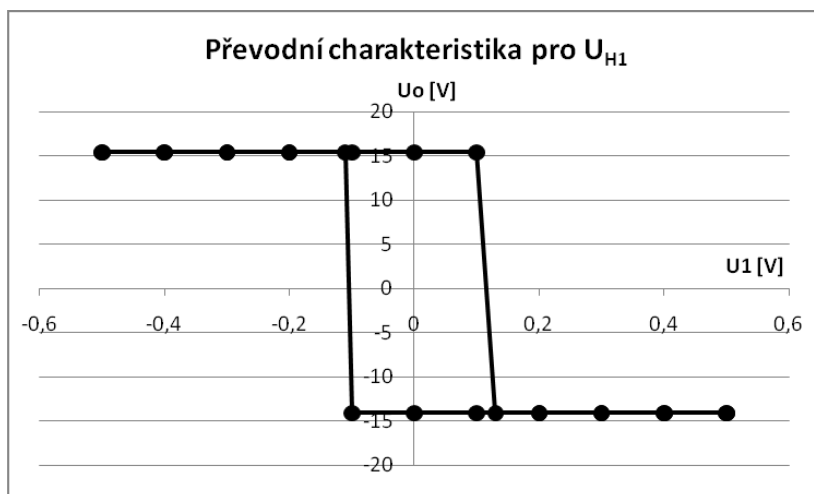
U1 [V]	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5
Uo [V]	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	15,4	15,4	15,4	15,4

Překlopení výstupu při: $-0,111V = U_{TL}$

U1 [V]	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Uo [V]	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1

Překlopení výstupu při: $0,130V = U_{TH}$

Graf převodní charakteristiky:



Obr. 5.3 Převodní charakteristika s hysterezí U_{H1} při $U_{ref} = 0V$

U_{H1} ($R_{H1} = 750k\Omega$); $U_{ref} = 5V$

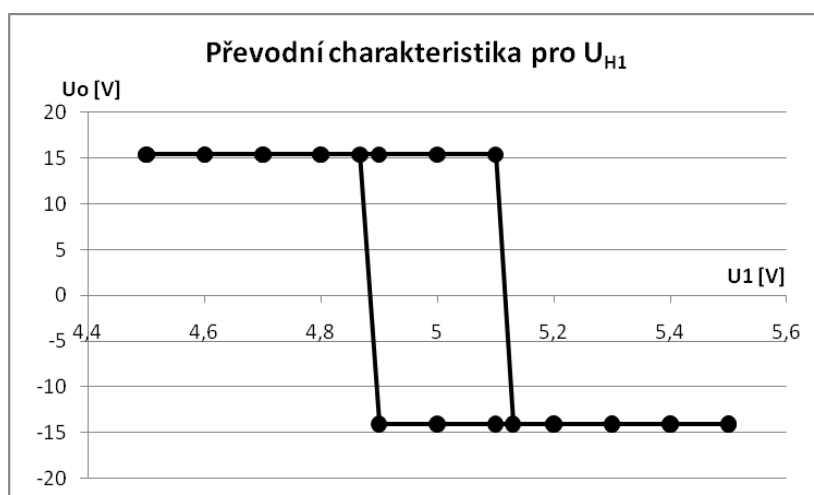
U1 [V]	5,5	5,4	5,3	5,2	5,1	5	4,9	4,8	4,7	4,6	4,5
Uo [V]	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	15,4	15,4	15,4

Překlopení výstupu při: $4,867V = U_{TL}$

U1 [V]	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5
Uo [V]	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	-14,1	-14,1	-14,1

Překlopení výstupu při: $5,130V = U_{TH}$

Graf převodní charakteristiky:



Obr. 5.4 Převodní charakteristika s hysterezí U_{H1} při $U_{ref} = 5V$

Hystereze změřená:

$$U_{ref} = 0V \rightarrow U_{H1} = U_{TH} - U_{TL} = 0,130 - (-0,111) = \underline{\underline{241mV}}$$

$$U_{ref} = 5V \rightarrow U_{H1} = U_{TH} - U_{TL} = 5,130 - 4,867 = \underline{\underline{263mV}}$$

Hystereze vypočtená:

$$U_{H1} \cong \frac{2 \cdot R}{R + R_{H1}} \cdot U_{sat} = \frac{2 \cdot 6,8}{6,8 + 750} \cdot 15 = 0,26956V = \underline{\underline{269,6mV}}$$

- 3) Změřte převodní charakteristiku komparátoru s 2. hysterezí pro dvě různá U_{ref} , dále určete velikost hystereze měřením i výpočtem.

U_{H2} ($R_{H2} = 240k\Omega$); $U_{ref} = 0V$

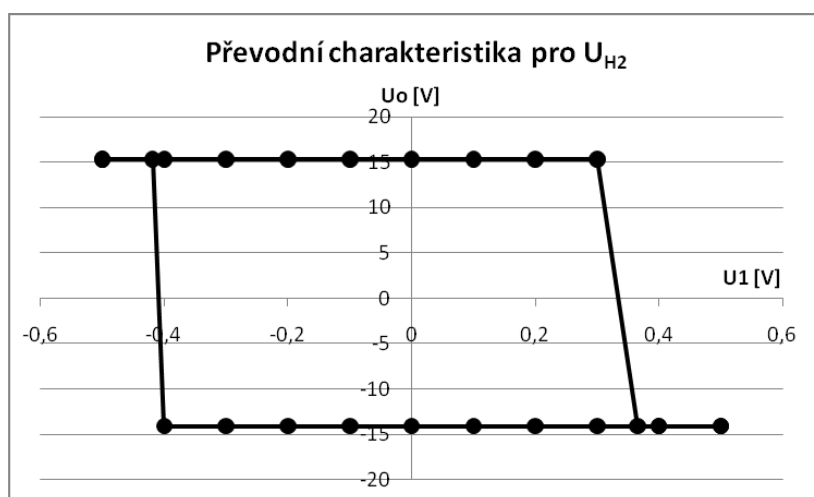
U1 [V]	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5
Uo [V]	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	15,3

Překlopení výstupu při: $-0,439V = U_{TL}$

U1 [V]	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Uo [V]	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	-14,1	-14,1

Překlopení výstupu při: $0,375V = U_{TH}$

Graf převodní charakteristiky:



Obr. 5.5 Převodní charakteristika s hysterezí U_{H2} při $U_{ref} = 0V$

U_{H2} ($R_{H2} = 240k\Omega$); $U_{ref} = 5V$

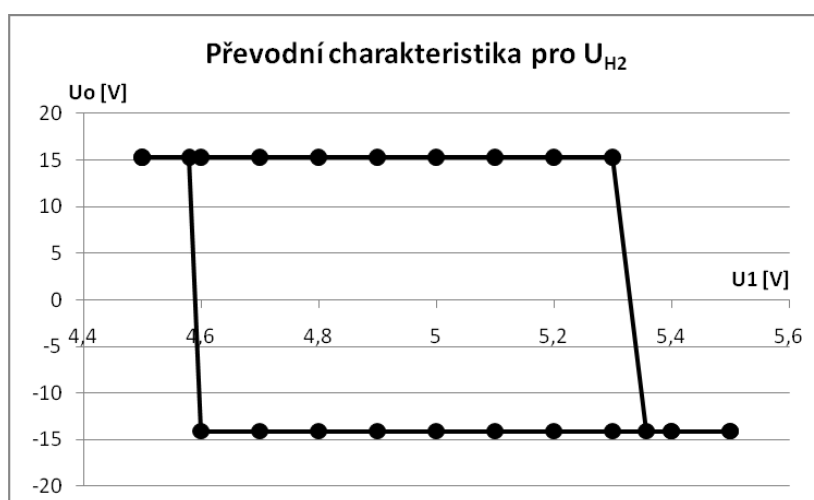
U1 [V]	5,5	5,4	5,3	5,2	5,1	5	4,9	4,8	4,7	4,6	4,5
Uo [V]	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	-14,1	15,3

Překlopení výstupu při: $4,560V = U_{TL}$

U1 [V]	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5
Uo [V]	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	-14,1	-14,1

Překlopení výstupu při: $5,367V = U_{TH}$

Graf převodní charakteristiky:



Obr. 5.6 Převodní charakteristika s hysterezí U_{H2} při $U_{ref} = 5V$

Hystereze změřená:

$$U_{ref} = 0V \rightarrow U_{H2} = U_{TH} - U_{TL} = 0,375 - (-0,419) = \underline{\underline{794mV}}$$

$$U_{ref} = 5V \rightarrow U_{H2} = U_{TH} - U_{TL} = 5,367 - 4,580 = \underline{\underline{787mV}}$$

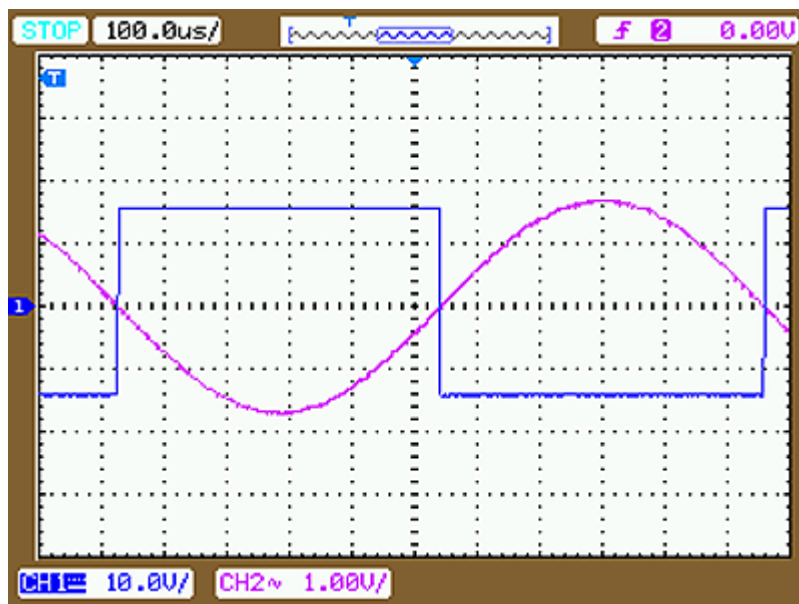
Hystereze vypočtená:

$$U_{H2} \cong \frac{2 \cdot R}{R + R_{H2}} \cdot U_{sat} = \frac{2 \cdot 6,8}{6,8 + 240} \cdot 15 = 0,82658V = \underline{\underline{826,6mV}}$$

- 4) Na vstup komparátoru bez hystereze přiveďte napětí z generátoru (bez šumu) a zobrazte výstupní napětí pro dvě různé velikosti U_{ref} .

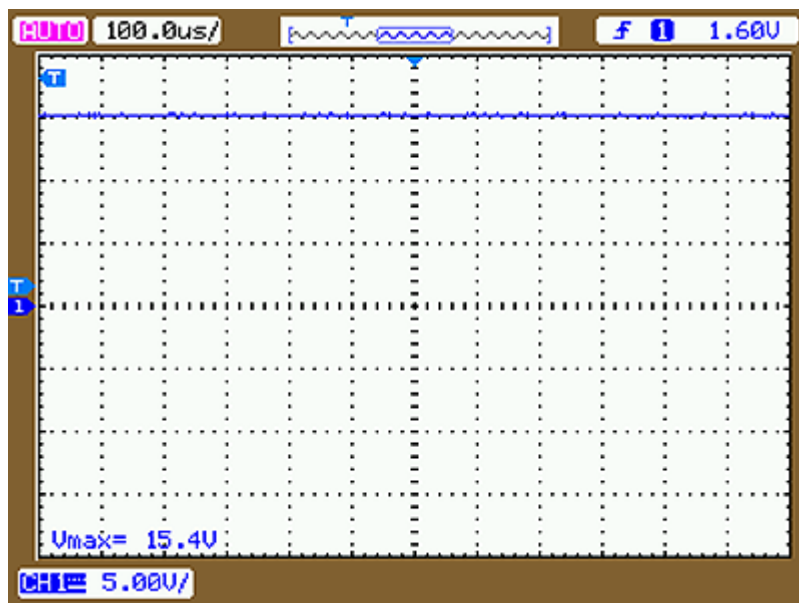
Výstupy z osciloskopu:

$U_{ref} = 0V$



Obr. 5.7 Vstupní (CH2) a výstupní (CH1) napětí komparátoru při $U_{ref} = 0V$

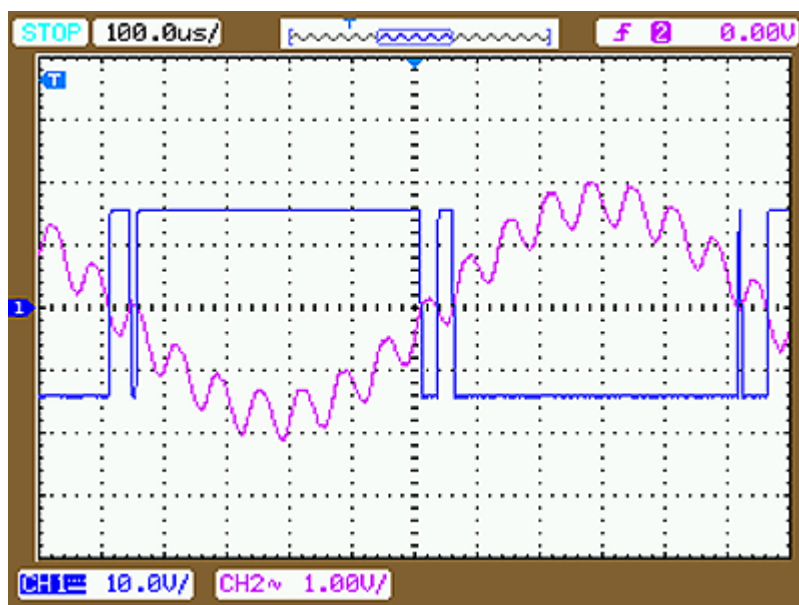
$U_{ref} = 5V$



Obr. 5.8 Výstupní (CH1) napětí komparátoru při $U_{ref} = 5V$

- 5) Na vstup komparátoru bez hystereze přiveďte napětí z generátoru včetně šumu, zobrazte výstupní napětí, vysvětlete průběh.

Výstupy z osciloskopu:



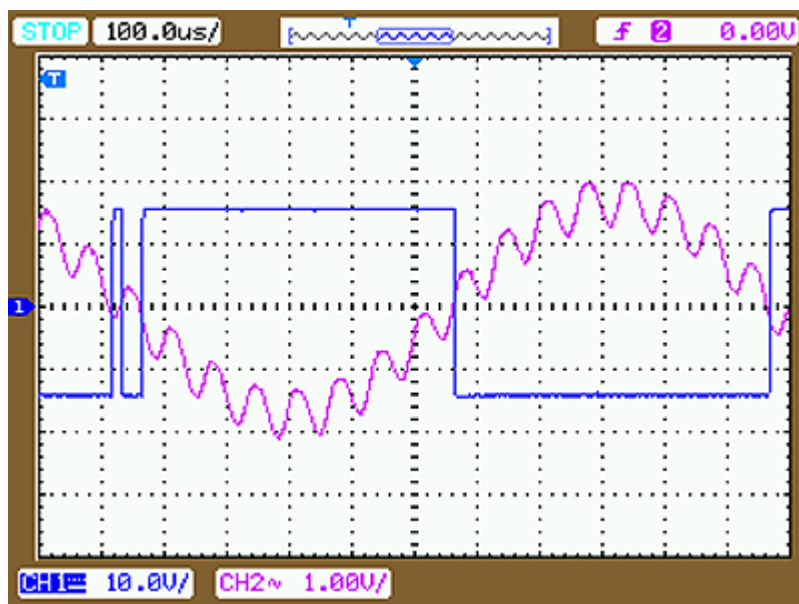
Obr. 5.9 Vstupní (CH2) a výstupní (CH1) napětí komparátoru při $U_{ref} = 0V$

V zapojení bez hysterze na obr. 5.9 dochází vlivem rušivého signálu k několikanásobnému překlopení výstupu komparátoru v blízkosti komparační úrovně dané referenčním napětím.

- 6) Měření z bodu 5 opakujte pro zapojení s 1. a 2. hysterzemi, vysvětlete průběhy a doložte je výpočtem.

Výstupy z osciloskopu:

1. hysterze U_{HI} ($R_{HI} = 750k\Omega$)



Obr. 5.10 Vstupní (CH2) a výstupní (CH1) napětí komparátoru pro 1.hysterzi U_{HI}

Výpočet:

$U_{G2} = 350\text{mV} \rightarrow$ amplituda generátoru šumu ($U_{pp} = 700\text{mV}$)

$U_{H1} = 241\text{mV} \rightarrow$ nejmenší změřená hystereze

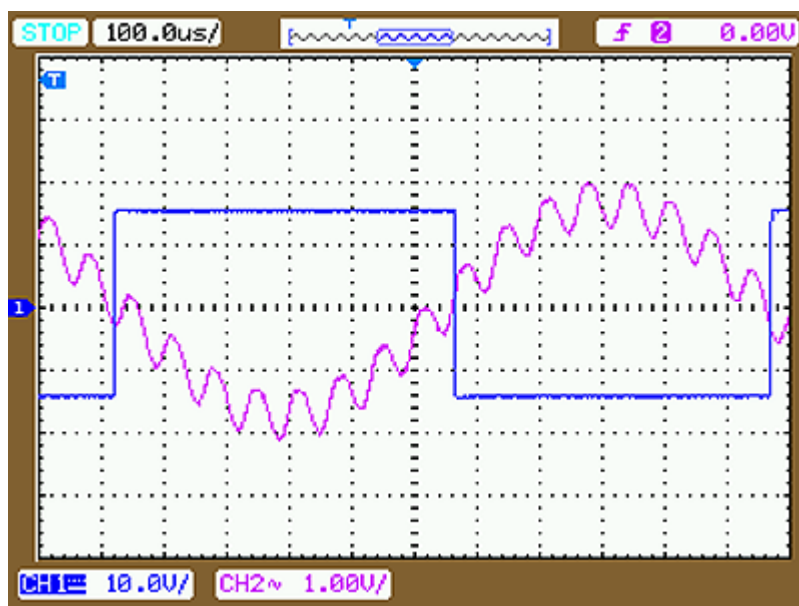
Pro správnou činnost hystereze musí být splněna tato podmínka: $U_{H1} > U_{G2}$

$$U_{H1} - U_{G2} = 241 - 700 = -459\text{mV}$$

Podmínka splněna není, velikost hystereze je pro správnou funkci nedostatečná.

V zapojení s první hysterezí U_{H1} kdy $R_{H1} = 750\text{k}\Omega$ se již v okolí komparační úrovně nastaví nové úrovně komparace U_{TL} a U_{TH} , které způsobují určitou míru odolnosti vůči rušivému signálu, ale velikost hysterezního napětí U_{H1} není ještě dostatečně velká na to, aby pokryla rozkmit tohoto šumu.

2. hystereze U_{H2} ($R_{H2} = 240\text{k}\Omega$)



Obr. 5.11 Vstupní (CH2) a výstupní (CH1) napětí komparátoru pro 2.hysterezi U_{H2}

Výpočet:

$U_{G2} = 350\text{mV} \rightarrow$ amplituda generátoru šumu ($U_{pp} = 700\text{mV}$)

$U_{H2} = 787\text{mV} \rightarrow$ nejmenší změřená hystereze

Pro správnou činnost hystereze musí být splněna tato podmínka: $U_{H2} > U_{G2}$

$$U_{H2} - U_{G2} = 787 - 700 = 87\text{mV}$$

Podmínka je splněna, velikost hystereze je pro správnou funkci dostačující.

V zapojení s druhou hysterezí při $R_{H2} = 240k\Omega$ jsou nově nastavené komparační úrovně tak velké, že pokryjí celé rušivé napětí a komparátor tak pracuje žádoucím způsobem.

Použité přístroje:

Osciloskop Agilent Technologies DSO1002A 60MHz

Stejnoseměrný zdroj STRATON TYP2229 2x40V 2x2,5A

Multimetry ERMIC DVM 6-1008

O odporové dekády

Závěr:

V prvních třech bodech měření byl ověřen posun hystereze v závislosti na nastaveném referenčním napětí v zapojení bez hystereze a s hysterezemi U_{H1} a U_{H2} . Velikosti těchto hysterezí odečtené z naměřených hodnot se téměř shodují s hodnotami vypočtenými.

Ve zbývajících měřeních byl zkoumán vliv vstupního střídavého signálu na výstup komparátoru. Z měření v bodě 4 vyplývá, že je-li referenční napětí větší než vstupní napětí komparátoru, výstup se již nepřeklápí a nabývá pouze jeden stav (15,4V). V bodech 5 a 6 je ověřen vliv velikosti hystereze na výstupní signál komparátoru. V těchto měřeních je potvrzeno, že má-li být výstup komparátoru bez nechtěných několikanásobných překlopení způsobených rušivým signálem, musí být hysterezní napětí větší než mezivrcholová hodnota tohoto šumu.

ZÁVĚR

Při porovnání převodní charakteristiky z výstupů ze simulace v programu OrCAD s hodnotami a grafy z kontrolního měření lze říci, že průběhy jsou téměř totožné. Hodnoty hysterezního napětí v jednotlivých zapojeních byly zjišťovány simulací, výpočtem a kontrolním měřením na finálním přípravku, přičemž v prvních dvou případech byly dosažené výsledky jen s minimální odchylkou stejné. V případě reálného kontrolního měření tomu již bylo jinak. Avšak hysterezní napětí se lišila o maximálně 40mV, což může být přičteno nepřesnostem použitých součástek a odporu cest na plošném spoji, což není v simulaci ani ve výpočtu zahrnuto. A dále, ve výpočtu i simulaci, se počítá s ideálním symetrickým napájením $\pm 15V$, jehož při kontrolním proměření laboratorního zdroje dosaženo nebylo.

Měřením v časové oblasti byla ověřena nutnost správného nastavení hystereze vedoucí k žádoucímu fungování komparátoru. Takovýmto stavem je myšlen výstup komparátoru bez nechtěných vícenásobných překlopeních způsobených šumem. Zde se však grafy ze simulací mírně odlišují od těch reálných. Odlišují se střídavým průběhem na kterém se superponován šum. Při simulaci je frekvence generátorů pevně nastavená a neměnná. Avšak z realizovaných generátoru je to především ten s vyšší frekvencí 15kHz, jehož výstupní frekvence není bezchybně stabilní. Z tohoto důvodu se mění i podoba signálu na vstupu a výstupu komparátoru a průběh se tedy ne vždy shoduje s idealizovanými výstupy ze simulace.

Nutno ještě říci, že ověřováním na nepájivém poli bylo zjištěno, že ke správně pracujícímu komparátoru nemusí být hystereze bezpodmínečně větší než rozkmit rušivého signálu. Je to dáno tím, že při přechodu vstupního signálu přes komparační úroveň má tento určitou strmost, klesá či stoupá. A proto superponovaný šum "nestihne" překmitnou svou maximální amplitudou nad a pod komparační úroveň v jedné své periodě. Avšak toto závisí především na tom, jaký je rozdíl mezi hodnotami amplitudy a frekvence nosné vlny a šumu. Čím bude amplituda a frekvence nosné vlny menší, tím více je pro správnou funkci komparátoru nutné, aby byla hystereze větší než mezivrcholový rozkmit šumu. V realizovaném modulu komparátoru byla pro tuto správnou funkci zvolena hystereze natolik velká, aby pokryla (přesahovala) rozkmit střídavého šumu a při laboratorních měřeních studentů bylo i z výpočtu a grafů zřejmé, že nastavená hystereze je větší.

Seznam zdrojů

- [1] DOLEČEK, J. *Moderní učebnice elektroniky 5. Díl – Operační zesilovače a komparátory*. Praha: BEN – technická literatura, 2007.
- [2] BELZA, J. *Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky*. Praha: BEN – technická literatura, 2004.
- [3] VTU Learning [online]. [cit 2011-3-29]. Dostupný z WWW:
<<http://elearning.vtu.ac.in/Programme12/E-Notes/AMMD/psbhat.pdf>>
- [4] BRANDŠTETTER, P. *Elektronika – pro kombinované a distanční studium*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2005.
- [5] National Semiconductor [online]. [cit 2011-3-29]. Dostupný z WWW:
<<http://www.national.com/ds/LM/LM111.pdf>>
- [6] MUNZAR, Z. Sinusový oscilátor s kmitočtem 1kHz. *Praktická elektronika A Radio*. 2008, č.01, s. 7-8.
- [7] JANČA, M. Jednoduchý nízkofrekvenční generátor. *Praktická elektronika A Radio*. 2001, č.11, s. 28-29.