



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

TVAROVAČE A OMEZOVAČE SIGNÁLU PRO LABORATORNÍ VÝUKU

SHAPING NETWORKS AND LIMITERS FOR EDUCATIONAL LABORATORY PURPOSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Andrej Barč

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Roman Šotner, Ph.D.

BRNO 2019



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Andrej Barč

ID: 195267

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Tvarovače a omezovače signálu pro laboratorní výuku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte několik obvodů reprezentujících vybraná řešení pasivních a aktivních tvarovačů a omezovačů signálů v nízkofrekvenčním pásmu. Zaměřte se na 3 a 6ti segmentový pasivní tvarovač trojúhelníkového signálu na harmonický (po částech lineární převodní charakteristika) i aktivní obvody s operačními zesilovači (tvarovač, omezovače amplitudy), dle domluvy s vedoucím. Správnost návrhu ověřte simulacemi v PSpice. Obvody doplňte ochranami proti chybám z nepozornosti.

Zařízení zhotovte ve formě přípravku ukázkové laboratorní úlohy. Sestavte a připravte demonstrační ukázkou (jednotlivé úkoly a zadání: měření DC převodní charakteristiky, sledování odezvy v časové oblasti, vyhodnocení zkreslení signálu, určení max. kmitočtové použitelnosti, apod.), podklady pro měření (návod k úloze) a vypracování (standardní formulář). Cvičení koncipujte tak, aby v rámci domácí přípravy student provedl teoretický úvahový/početní návrh (poskytněte nutné vztahy) a experimentálně ověřil reálné vlastnosti obvodů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KOLOUCH, J. Impulzová a číslicová technika: přednášky. Vyd. 3. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2008. ISBN 978-80-214-3789-0.

[2] PUNČOCHÁŘ, J. Operační zesilovače v elektronice. 5. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-059-8.

[3] BELZA, J. Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-060-1.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 23.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Roman Šotner, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom a realizáciou tvarovacích diódových obvodov a obojstranného diódového obmedzovača sínusového signálu pre laboratórne účely v nízkofrekvenčnom pásme. Jedná sa o 3-segmentový a 6ti-segmentový tvarovací obvod s aktívnym prvkom a bez aktívneho prvku (bez operačného zosilňovača). Obvody tvarujú trojuholníkový signál na harmonický signál. Cieľom návrhu bolo dosiahnuť čo najmenšie skreslenie signálu na výstupe na čo najväčšom kmitočtovom pásme použiteľnosti. Funkčnosť obvodov bola overená meraním a z výsledkov merania bol zostavený laboratórny protokol. Výsledky merania boli porovnané s výsledkami ideálnych odsimulovaných priebehov.

Kľúčové slová

Prevodná charakteristika, obmedzovač, prahové napätie, operačný zosilňovač, simulácia

Abstract

This bachelor thesis deals with design and implementation of shaping diode circuits and double - sided diode limiter of sinusoidal signal for laboratory use in low frequency band. This is a 3-segments and 6-segments shaping circuit with and without active element (without operational amplifier). The circuits form a triangular signal to harmonic signal. The aim of the design was to achieve the least possible distortion of the output signal on the largest frequency range of usability. The functionality of the circuits was verified by measurement and a laboratory protocol was constructed from the measurement result. The measurement results were compared with the results of ideal simulated waveforms.

Keywords

Transmission characteristic, limiter, threshold voltage, operational amplifier, simulation

Bibliografická citácia:

BARČ, Andrej. *Tvarovače a omezovače signálu pro laboratorní výuku* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/118407>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Roman Šotner.

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Romanovi Šotnerovi Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brně dne: 23. května 2019

.....
podpis autora

Obsah

Úvod.....	11
1. Teoretický rozbor	12
2. Návrh tvarovacích obvodov	15
2.1 Tvarovací 6ti-segmentový obvod s nelineárnym deličom a operačným zosilňovačom	15
2.2 Tvarovací 6ti-segmentový obvod s nelineárnym deličom bez operačného zosilňovača.....	21
2.3 Tvarovací 3-segmentový obvod s pevne nastaveným deličom.....	23
3. Obojstranný obmedzovač	27
4. Realizácia a konštrukcia.....	29
5. Výsledky experimentov	31
Záver	34
Literatura.....	35
Zoznam príloh.....	36

Zoznam symbolov, veličín a skratiek

Skratky:

PCH	Prevodná charakteristika
OZ	Operačný zosilňovač
PN	Rozhranie polovodičov typu P a N
THD	Celkové harmonické skreslenie
FFT	Rýchla Fourierova transformácia

Symboly:

U	napätie	[V]
U_{cc}	napájacie napätie	[V]
U_{in}	vstupné napätie	[V]
U_{out}	výstupné napätie	[V]
I	prúd	[A]
R	odpor	[Ω]
U_P	prahové napätie diódy	[V]
U_Z	napätie pomocného zdroja	[V]
U_D	napätie na dióde	[V]
I_D	prúd diódou	[A]
U_{1m}	amplitúda sínusového signálu	[-]
A	napät'ové zosilnenie	[-]
k	deliaci pomer v jednotlivých úsekoch PCH	[-]
U_{pp}	špičkové napätie	[V]
i	počet aproximačných stupňov	[-]

Zoznam obrázkov

Obr. 1 Statická V-A charakteristika diódy v priepustnom smere a jej ideálna aproximácia.....	12
Obr. 2 Delič kladnej časti sínusového signálu	13
Obr. 3 Neinvertujúci zosilňovač	13
Obr. 4 Prevodná charakteristika tvarovacieho 6ti-segmentového tvarovacieho obvodu s nelineárnym deličom	16
Obr. 5 Zostavený 6ti-segmentový tvarovací obvod s nelineárnym deličom pre určenie prevodnej charakteristiky	19
Obr. 6 Simulácia prevodnej charakteristiky 6ti-segmentového tvarovacieho obvodu s nelineárnym deličom	20
Obr. 7 Vykreslená odchýlka 6ti-segmentového tvarovacieho obvodu s nelineárnym deličom.....	20
Obr. 8 Tvarovací 6ti-segmentový obvod s nelineárnym deličom pri odpojení OZ	21
Obr. 9 Prevodná charakteristika tvarovacieho 6ti-segmentového obvodu s nelineárnym deličom bez OZ	21
Obr. 10 Časový priebeh tvarovacieho 6ti-segmentového obvodu s nelineárnym deličom bez OZ.....	22
Obr. 11 Prevodná charakteristika tvarovacieho 3-segmentového tvarovacieho obvodu s pevne nastaveným deličom	23
Obr. 12 Zostavený 3 - segmentový tvarovací obvod	25
Obr. 13 Vykreslená odchýlka tvarovacieho 3-segmentového obvodu s pevne nastaveným deličom	26
Obr. 14 Simulácia prevodnej charakteristiky.....	26
Obr. 15 Obmedzovač zhora (neprepúšťa napätie vyššie ako je prahové napätie) [8]	27
Obr. 16 Obmedzovač zdola (neprepúšťa napätie nižšie ako je prahové napätie) [8]	27
Obr. 17 Obojstranný obmedzovač, ktorý prepúšťa len tie signály, ktorých napätie je v intervale dvoch napätí [8]	28
Obr. 18 Zostavené zapojenie obojsmerného obmedzovača	28

Obr. 19	Zapojenie jednej vetvy pre voľbu odporov.....	29
Obr. 20	Graf závislosti THD na kmitočte pre 6ti-segmentový tvarovač s nelineárnym deličom z (Obr. 5) s použitím hodnôt z A.1 a A.2 pri využití 3 segmentov a všetkých segmentov	31
Obr. 21	Graf závislosti THD na kmitočte pre 3-segmentový tvarovač s pevne nastaveným deličom z (Obr. 12) s použitím hodnôt z A.3	32
Obr. 22	Graf porovnávajúci výsledné prevodné charakteristiky (PCH).....	32
Obr. 23	Graf porovnávajúci výsledné prevodné charakteristiky (PCH) so simulovanými pre 3-segmentový tvarovač s pevne nastaveným deličom z (Obr. 12) s rôznymi veľkosťami odporov nastavených za pomoci potenciometru TP1.....	33

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 Porovnanie THD všetkých obvodov.....	33
--	----

ÚVOD

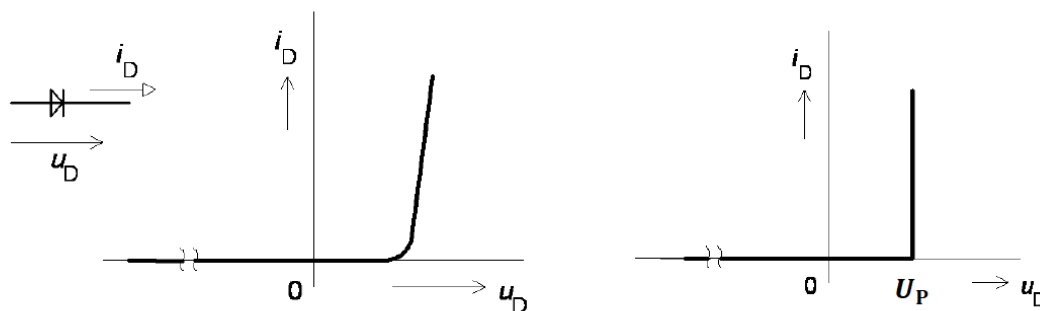
Táto bakalárska práca je zameraná na vytvorenie pasívnych a aktívnych tvarovacích obvodov pozostávajúcich z troch a šiestich segmentov a obojstranného obmedzovača sínusového signálu zhotovených z diskretných súčiastok. Pri zostavení daných obvodov a vypočítaním presných parametrov použitých súčiastok je potrebné navrhované obvody overiť pred výrobou, to znamená použiť nejaký simulačný software napríklad PSpice, vďaka ktorému môžeme zostavené obvody odsimulovať. Zo simulácií sme schopní zistiť reálne chovanie obvodov, čo nám umožňuje dané obvody pochopiť a hlavne nám uľahčuje a urýchľuje detekciu a následnú elimináciu chýb, ktoré sme schopní odstrániť (zmenou hodnôt súčiastok) ešte pred tým ako vytvoríme prototypy prípravkov, čo nám ušetrí finančné náklady.

Cieľom tejto práce je vytvoriť funkčný laboratórny prípravok, ktorý čo najpresnejšie reprezentuje vlastnosti navrhnutých odsimulovaných obvodov s použitím reálnych hodnôt súčiastok.

Hlavné časti tejto práce pozostávajú z návrhu jednotlivých obvodov a určením presných hodnôt všetkých súčiastok, z vytvorenia finálneho prípravku určeného pre laboratórne úlohy, z vypracovania návodu laboratórnej úlohy demonštrujúcej funkciu daných obvodov a odpovedajúceho formulára k vypracovaniu výsledkov úlohy.

1. TEORETICKÝ ROZBOR

Pri návrhu tvarovacích obvodov z trojuholníkového signálu na sínusový [1] a použitím diód je podstatné uvedomiť si funkciu diód. Takýto obvod využíva nelineárnu charakteristiku diódy respektíve skupiny diód k vytvoreniu potrebnej prevodnej charakteristiky.



Obr. 1 Statická V-A charakteristika diódy v priepustnom smere a jej ideálna aproximácia

Vplyv diódy v priepustnom smere sa začína uplatňovať po prekročení prahového napätia diódy U_P , ktoré sa pohybuje u kremíkových diód v rozmedzí od 0,5 – 0,7 V. Kým dióda nedosiahne hodnotu prahového napätia U_P , prúd ktorý preteká diódou I_D je nepatrný (takmer nulový). Po prekročení U_P (otvorenia diódy) začína prúd narastať exponenciálne. V-A charakteristika, vyjadruje závislosť prúdu I prechádzajúceho diódou na napätí, teda $I_D = f(U_D)$. Táto závislosť sa dá vyjadriť graficky alebo Schottkyho vzťahom [2]:

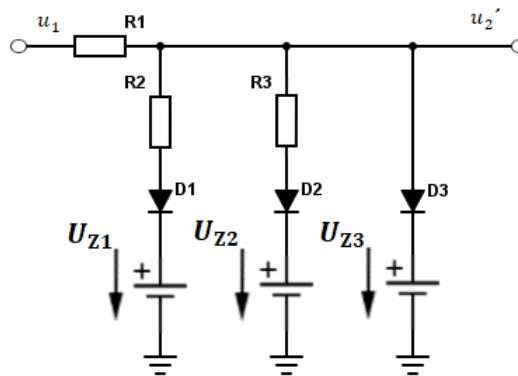
$$i_D = i_S \cdot \left(e^{\frac{u_D}{m \cdot U_T}} - 1 \right), \quad (1.1)$$

kde U_D je napätie na dióde, m je multiplikačný činiteľ, I_S je saturačný prúd, U_T je teplotné napätie $U_T = \frac{k \cdot T}{q}$ v ktorom: $k = 1,38e^{-23} \text{ J} \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ (Boltzmanova konštanta), T je teplota PN prechodu a q je elementárny náboj s hodnotou $q = 1,602 \cdot e^{-19} \text{ C}$.

Pri vyšších prúdoch sa okrem charakteristiky PN prechodu uplatňujú tiež odpory prívodov a závislosť je takmer lineárna. Zapojenie diódy za účelom tvarovania napätia spočíva v náhrade jedného či viacej rezistorov v jednoduchom napät'ovom deliči (Obr. 2). Do vetvy namiesto jedného rezistoru pripojím diódu s pomocným zdrojom (podľa potreby), kvôli upresneniu pozície bodu v ktorom má dôjsť k zmene strmosti prevodnej charakteristiky.

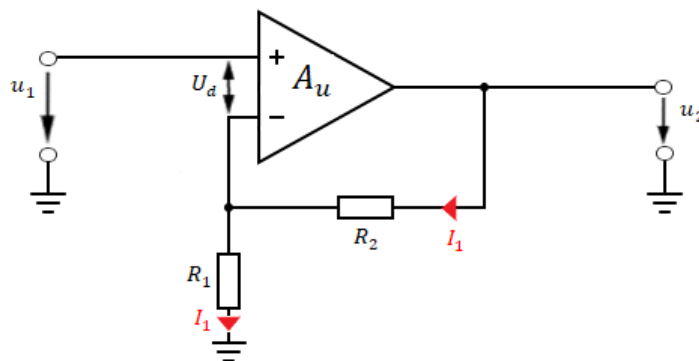
Pridaním pomocných zdrojov (Obr. 2) do príslušných segmentov dosiahnem posun hodnoty prahového napätia sériovej kombinácie diódy U_P a zdroja, teda skoršie alebo neskoršie otvorenie diódy vzhľadom ku vstupnému signálu. Docielim tým to, že vplyv diódy, ktorým je zmena strmosti prevodnej charakteristiky, sa začne prejavovať pri hodnotách iných (väčších/menších) ako je U_P . Hodnota napätia pomocných zdrojov je daná práve tým v akom bode má nastať zlom charakteristiky.

Po priechode signálu pasívnej časti tvarovacieho obvodu (deliča), dostávam zo vstupného trojuholníkového signálu už sínusový signál a zároveň dochádza k zníženiu úrovne napätia.



Obr. 2 Delič kladnej časti sínusového signálu

Preto ide, pri požadovaní konkrétnej veľkosti napätia na výstupe, za tvarovací obvod pripojiť operačný zosilňovač s rezistorov siete (nastavenie zosilnenia), vďaka ktorému pri správne zvolených hodnotách odporov (Obr. 3) je možné docieliť požadovanú výstupnú hodnotu napätia u_2 (výstupné napätie za OZ).



Obr. 3 Neinvertujúci zosilňovač

Vodorovnú súradnicu prevodnej charakteristiky tvarovacieho obvodu zvolím, tak aby bol na nej vykreslený priebeh štvrt' periódy sínusového signálu a rozdelím ho na niekoľko rovnako veľkých častí (úseky), ktoré určujú miesta zlomu. Miesta zlomu sú miesta v ktorých sa dióda otvorí a začne pôsobiť na priebeh prevodnej charakteristiky, tak že v danom bode dôjde k ohybu = nastane zlom.

V každej tejto časti uvažujem aproximáciu sínusového signálu úsečkou spojujúcou priľahlé body najbližších zlomov. Vďaka oblému tvaru charakteristiky diódy bude výsledný priebeh prevodnej charakteristiky deliča celkom hladký.

V rámci ochrany pred nežiadúcim pôsobením vplyvu tzv. hrotu vstupného napätia v štvrt' perióde, zvolím nepárny počet úsekov (7 v prípade 6ti – segmentového tvarovacieho obvodu), čím docielim toho, že v poslednej vetve deliča nebude pripojený žiadny rezistor. Dióda má teda v tejto vetve za cieľ odseknúť hrot, preto nie je vo vetve zapojený rezistor[1]. K vplyvu hrotu nedôjde pri ideálnom priebehu diódovej charakteristiky.

Docielením čo najpresnejšej prevodnej charakteristiky (aproximácie harmonického priebehu signálu) dôjde k výraznému zníženiu skreslenia výstupného signálu. Preto platí, že čím väčší počet diódových stupňov zvolím, tým viac by sa mal výstupný signál približovať k ideálnemu priebehu sínusového signálu. Pri použití viac než 6tich aproximačných stupňov však môže dôjsť k nepresnostiam, kedy už aj malá zmena hodnoty (odporu alebo pomocného zdroja diódy) spôsobí výrazne odchýlenie prevodnej charakteristiky = dôjde k väčšiemu skresleniu.

2. NÁVRH TVAROVACÍCH OBVODOV

2.1 Tvarovací 6ti-segmentový obvod s nelineárnym deličom a operačným zosilňovačom

Tvarovací 6ti-segmentový obvod s nelineárnym deličom je zložený zo 6 párov diód (12 diód). Každý pár pozostáva z dvoch diód, ktoré sú v antiparalelnom zapojení. (podľa toho či spôsobuje ohyb priebehu signálu v kladnej alebo v zápornej časti). Dióda zapojená v priepustnom smere spôsobuje ohyb v kladnej časti signálu, zatiaľ čo v závernom zapojení je to práve naopak. Pojem 6ti-segmentový tvarovací obvod s nelineárnym deličom napovedá, že obsahuje nelineárne prvky (diódy), ktoré spôsobujú ohyb vstupného signálu v určitých bodoch (6 zlomových bodov v kladnej a 6 zlomových bodov v zápornej časti signálu). Pri použití viacerých segmentov očakávam výstupnú hodnotu signálu s menším skreslením, teda presnejšiu zhodu výstupu s ideálnym sínusovým signálom ako pri použití menšieho počtu segmentov. Vzťah pre určenie vodorovných súradníc zlomových bodov [1] dáva do súvislosti amplitúdu vstupného napätia a poradie segmentov:

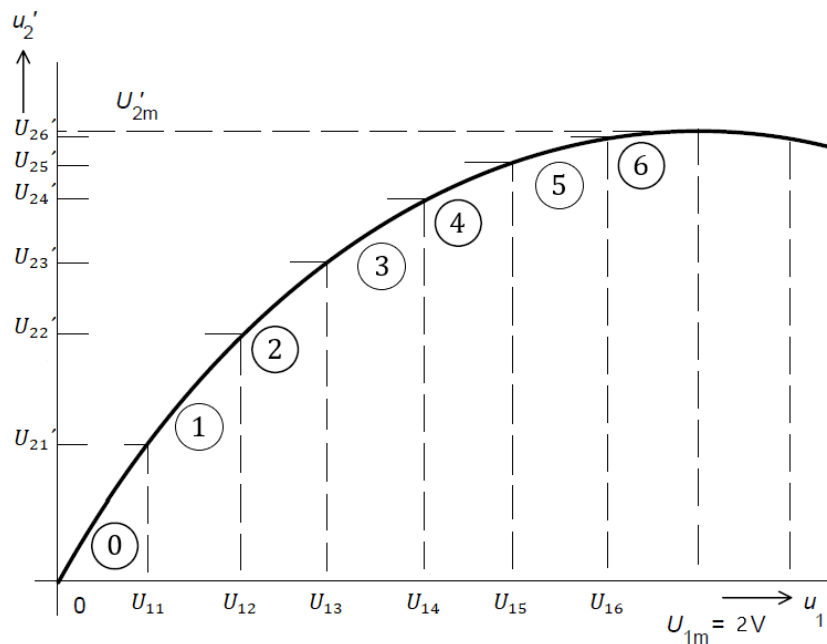
$$U_{1i} = (2 \cdot i / 7) \cdot U_{1m}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (2.1)$$

kde U_{1i} je hodnota vstupného napätia na vodorovnej súradnici, U_{1m} je hodnota amplitúdy a i počet aproximačných stupňov. Maximálna hodnota sínusového signálu v tomto obvode je zvolená: $U_{1m} = 2 \text{ V}$. Hodnota konštanty (7) súvisí s počtom úsekov vytvorených aproximačnými bodmi v $\frac{1}{2}$ sínusového priebehu.

Vzťah (2.1) je použiteľný pre výpočet 3 - segmentového obvodu, kde počet úsekov vytvorenými zlomovými bodmi v $\frac{1}{2}$ sínusového priebehu je 7. Dosadzovaním hodnôt za i väčších ako 3 ($i = 4, 5, 6$) by došlo k dosiahnutiu tých istých výsledkov (hodnôt napätí) ako pri $i = 1, 2, 3$. Výsledkom čoho by bola aproximácia tých istých bodov zlomu v druhej štvrt'vlnne priebehu. Z toho dôvodu je aproximácia prevádzaná v prvej štvrtine priebehu. Pri použití 6 segmentov sa počet úsekov zdvojnásobí a preto konštantu zo vzťahu (2.1) sa z pôvodnej hodnoty 7 (počet úsekov v $\frac{1}{2}$ sínusového priebehu) nahradí hodnotou 14. Hodnota konštanty je teda závislá od počtu použitých segmentov.

Vzťah určený pre výpočet vodorovných súradníc bodov zlomu pre 6ti-segmentový tvarovací obvod s nelineárnym deličom je teda:

$$U_{1i} = (2 \cdot i / 14) \cdot U_{1m}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (2.2)$$



Obr. 4 Prevodná charakteristika tvarovacieho 6ti-segmentového tvarovacieho obvodu s nelineárnym deličom

Použitím vzťahu (2.2) pre $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ dostávam výsledné hodnoty napätí: $U_{11} = (2 \cdot 1/14) \cdot 2 = 0,286 \text{ V}$, $U_{12} = 0,571 \text{ V}$, $U_{13} = 0,857 \text{ V}$, $U_{14} = 1,143 \text{ V}$, $U_{15} = 1,429 \text{ V}$ a $U_{16} = 1,714 \text{ V}$ - vypočítal som všetky hodnoty vstupných napätí na vodorovnej ose, ktoré budem potrebovať.

Rovnica prevodnej charakteristiky je sínusový signál určený vzťahom [1]:

$$u_2' \cong U_{2m}' \cdot \sin((u_1 / U_{1m}) \cdot (\pi / 2)), \quad (2.3)$$

kde u_2' predstavuje aktuálnu hodnotu výstupného napätia deliča, U_{2m}' je hodnota maximálneho výstupného napätia na zvislej ose, u_1 je hodnota vstupného napätia a U_{1m} je hodnota amplitúdy vstupného napätia.

Pred použitím vzťahu (2.3) je dobré si uvedomiť, že prahové napätie kremíkovej diódy je $U_p = 0,6 \text{ V}$ teda, vplyv diódy začne pôsobiť až po prekročení tohto napätia. Zo vzťahu (2.2) som pre prvú vodorovnú súradnicu vypočítal napätie ($U_{11} = 0,286 \text{ V}$) menšie ako $0,6 \text{ V}$, teda dióda nie je otvorená, tým pádom prenos tvarovacieho obvodu v tomto úseku bude rovný jednej, čo znamená, že dióda v tomto úseku netvaruje priebeh. Jedná sa o úsek 0-1 prevodnej charakteristiky. Napätie druhej vodorovnej súradnice ($U_{12} = 0,571 \text{ V}$) už nemôžem považovať za menšie ako $0,6 \text{ V}$ ale za hodnotu $\approx 0,6 \text{ V}$. Platí teda, že ak vo vzťahu (2.3) dosadíme namiesto okamžitej hodnoty vstupného napätia u_1 hodnotu zlomu U_{11} , potom musím ako hodnotu výstupného napätia deliča dostať tú istú hodnotu napätia. Teda platí: $U_{11} = U_{21}' =$

0,286 V. Pri znalosti vrcholovej hodnoty, ktorá odpovedá hodnote amplitúdy U_{1m} ($U_{1m} = 2V$) viem určiť hodnotu U_{2m}' , ktorú vypočítam nasledovne [1]:

$$U_{2m}' = U_{11} / \sin ((U_{11} / U_{1m}) \cdot (\pi / 2)) . \quad (2.4)$$

Dosadením hodnôt do vzorca (2.4), z ktorého vyplýva, že veľkosť výstupného napätia je úplne určená veľkosťou vstupného napätia dostávam hodnotu $U_{2m}' = 1,28 V$. Zvyšné hodnoty výstupných napätí na zvislej ose prevodnej charakteristiky som schopný vypočítať zo znalosti U_{2m}' a náhradou u_1 za vstupné hodnoty napätí na vodorovnej ose zo vzťahu (2.2) použitím rovnice prevodnej charakteristiky tvarovacieho obvodu (2.3). Získané hodnoty napätí na zvislej ose prevodnej charakteristiky: $U_{22}' = 0,557 V$, $U_{23}' = 0,800 V$, $U_{24}' = 1,00 V$, $U_{25}' = 1,157 V$, $U_{26}' = 1,252 V$.

V nasledujúcom kroku návrhu hodnôt súčiastok, vypočítam veľkosti napätí pomocných zdrojov napätí v jednotlivých segmentoch pomocou vzorca [1]:

$$U_{zi} = U_{2i}' - U_p , \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 . \quad (2.5)$$

Prahové napätie diódy je $U_p = 0,6 V$. Výsledné hodnoty vzťahu (2.5) sú:

$$U_{z1} = -0,314 V, U_{z2} \cong 0 V, U_{z3} = 0,2 V, U_{z4} = 0,4 V, U_{z5} = 0,557 V$$

a $U_{z6} = 0,652 V$.

Za zmienku tu stojí hodnota, $U_{z2} \cong 0 V$, ktorá súvisí s výsledkom napätia druhej diódy na zvislej ose $U_{22}' = 0,557 V$. Toto napätie je napätie takmer rovné prahovému napätiu diódy, teda napätiu kedy sa dióda už začína otvárať. Použitím vzorca (2.5) je vidieť že hodnoty pomocných zdrojov napätí pre jednotlivé segmenty získam odčítaním prahových napätí diódy. Pri odčítaní prahového napätia od U_{22}' dostávam hodnotu tak malú, že som ju schopný zanedbať a prehlásiť, že $U_{z2} \cong 0 V$. Z toho vyplýva že pre 2. segment nie je potrebné použiť žiadny pomocný zdroj, obvod bude fungovať aj bez neho.

Nakoniec určím hodnoty odporov R_1 - R_6 , ktoré vypočítam pomocou jednoduchých deliacich pomerov napätí v daných úsekoch prevodnej charakteristiky. Najprv si zvolím hodnotu pozdĺžneho odporu $R_1 = 1 k\Omega$. Hodnotu prvého priečného odporu R_2 určím dosadením $R_1 = 1 k\Omega$ do vzťahu pre určenie deliaceho pomeru v úseku 1-2 [1]:

$$k_2 = \frac{(U_{22}' - U_{21}')}{(U_{12} - U_{11})} = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} \quad (2.6)$$

Hodnota deliaceho pomeru po dosadení jednotlivých napätí je $k_2 = 0,95$ a hodnota odporu je $R_2 = 18,4 k\Omega$.

Pre výpočet nasledujúceho deliaceho pomeru v úseku 2-3 prevodnej charakteristiky musím brať do úvahy fakt, že odpory R_2 a R_3 sú v paralelnom zapojení, teda dôjde k malej zmene vzťahu (2.6) :

$$k_3 = \frac{(U_{23}' - U_{22}')}{(U_{13} - U_{12})} = \frac{R_2 || R_3}{(R_1 + R_2 || R_3)} \quad (2.7)$$

Vďaka čomu dostávam výsledné hodnoty $k_3 = 0,85$ a $R_3 = 8,2 \text{ k}\Omega$. Pri výpočtoch zvyšných deliacich pomerov musím vždy upraviť vzťah (2.7) týmto spôsobom a tým získam hodnoty: $R_4 = 4 \text{ k}\Omega$, $R_5 = 2,6 \text{ k}\Omega$ a $R_6 = 820 \Omega$.

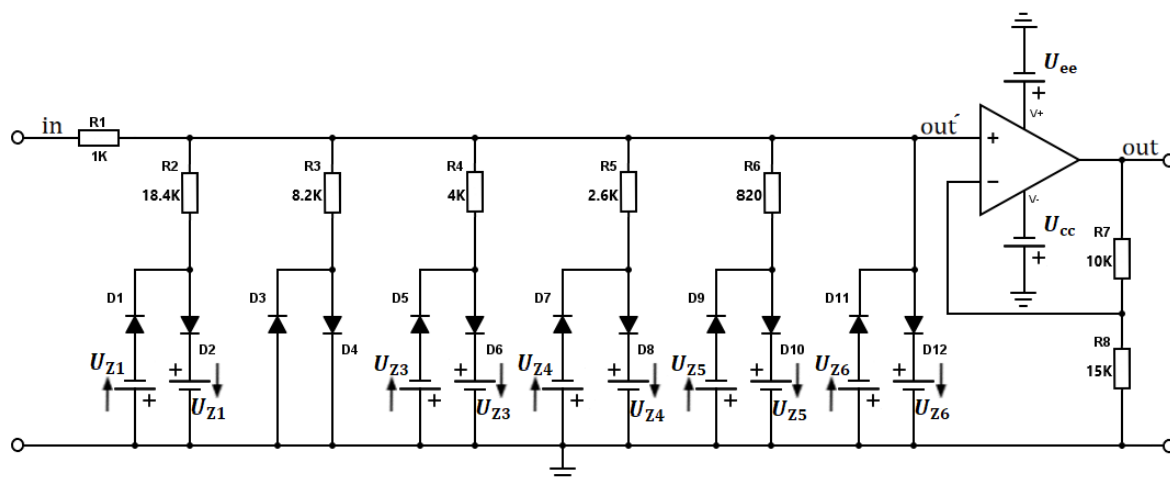
Prechodom signálu cez tvarovaciu časť obvodu, dochádza k poklesu úrovne napätia signálu. Ak je rozkmit vstupného napätia $\pm 2 \text{ V}$, potom hodnota amplitúdy výstupného napätia po tvarovacej časti sa dá približne vyjadriť vzťahom:

$$U_{\text{out}}' = \frac{2}{\pi} \cdot U_{1m}, \quad (2.8)$$

kde hodnota U_{out}' predstavuje výstupné napätie po tvarovacej časti a U_{1m} hodnotu amplitúdy vstupného napätia ($U_{1m} = 2 \text{ V}$). Po dosadení do rovnice (2.8) dostávam $U_{\text{out}}' = 1,273 \text{ V}$. Pri požiadavke rovnosti vstupného a výstupného napätia je potrebné na výstup pripojiť operačný zosilňovač, ktorého hodnoty odporov je potrebné zvoliť tak, aby bola táto podmienka splnená. Hodnota zosilnenia je nastaviteľná pomocou odporov použitím vzťahu pre zosilnenie neinvertujúceho OZ [4]:

$$A = \frac{U_2}{U_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.9)$$

Výsledné hodnoty odporov pre splnenie rovnosti vstupného a výstupného napätia sú: $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$ a $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$. Zapojený neinvertujúci OZ má okrem funkcie zosilnenia vstupného signálu, ktorý prejde tvarovacou (pasívnou) časťou obvodu na určitú hodnotu výstupného napätia aj iný vplyv na obvod. OZ slúži v tomto obvode prioritne na zosilnenie signálu ale aj na oddelenie pasívnej časti tvarovacieho obvodu od rezistorov zapojených v pravej časti obvodu. Zapojený OZ vlastne zaisťuje, že pri vykresľovaní prevodnej charakteristiky dôjde k čo najpresnejšiemu prekrytiu výstupu tvarovacieho obvodu s ideálnym sínusovým signálom čo sa týka úrovne. Čo bolo hlavným bodom v návrhu tohto obvodu. Po vypočítaní všetkých hodnôt jednotlivých prvkov tvarovacieho obvodu, môžem nakresliť schému obvodu v programe PSpice [3] (Obr. 5).

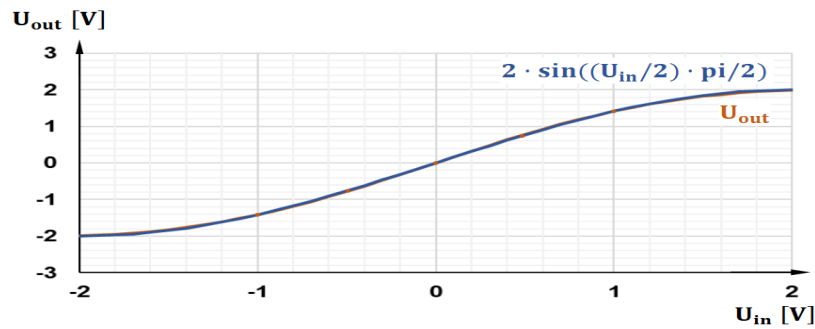


Obr. 5 Zostavený 6ti-segmentový tvarovací obvod s nelineárnym deličom pre určenie prevodnej charakteristiky

Následne vykreslím prevodnú charakteristiku (závislosť výstupného napätia u_2 na vstupnom napätí u_1) v rozsahu od -2 V do 2 V (závisí od zvolenej hodnoty amplitúdy $U_{1m} = 2$ V). Prevodná charakteristika (PCH) by v ideálnom prípade mala mať tvar sínusového signálu ale v skutočnosti ju bude len aproximovať. Pri použití simulačného programu Pspice očakávam, že výsledná PCH bude lepšie odpovedať skutočnosti, lebo na rozdiel od výpočtu program vychádza z presnejšej aproximácie charakteristiky diód.

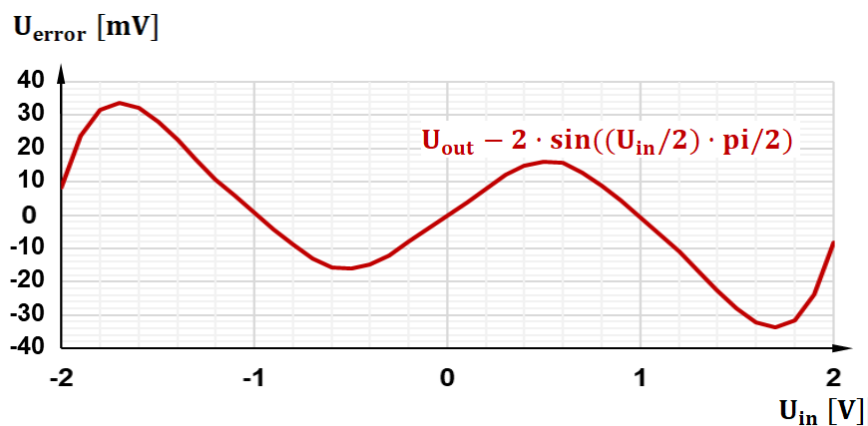
V grafe zobrazujem priebeh výstupného napätia obvodu u_2 (napätie až na výstupe OZ) a priebeh ideálneho sínusového signálu $U_{out}(t) = 2 \cdot \sin((U_{in}/2) \cdot \pi/2)$. Vykreslením oboch priebehov je jasne viditeľné, že sa takmer dokonale prekrývajú. Z toho usudzujem že hodnoty daných súčiastok vyšli správne, podarilo sa mi dosiahnuť celkom presnú aproximáciu [3].

Hľadanie správnych hodnôt súčiastok s ohľadom na zanedbané skutočnosti v ideálnom návrhu môže chvíľu trvať, ale pri pevnej vôli a kvapke trpezlivosti, je možné dosiahnuť výsledok s maximálnou presnosťou (úplným prekrytím prevodnej charakteristiky s ideálnym sínusovým signálom).



Obr. 6 Simulácia prevodnej charakteristiky 6ti-segmentového tvarovacieho obvodu s nelineárnym deličom

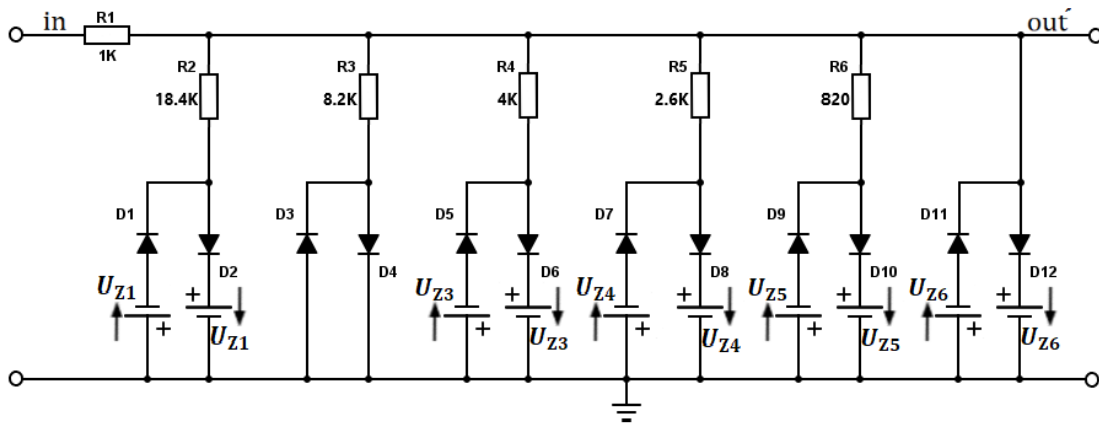
Vykreslením výrazu: $U_{\text{error}} = U_{\text{out}} - 2 \cdot \sin((U_{\text{in}}/2) \cdot \pi/2)$ dôjde k zobrazeniu odchýlky. Veľkosť odchýlky by ideálne mala byť čo najmenšia. Priebeg odchýlky pri správnej aproximácii by mal mať tvar vlnovky, ktorej vrcholy by boli približne v rovnakej výške v kladnej aj zápornej časti [1]. Odchýlka v kladnej aj v zápornej časti neprekračuje hodnotu ± 30 mV. Z testovania obvodu FFT analýzou vyplýva, že tvarovací obvod vykazuje skreslenie harmonického signálu (THD) s presnosťou 1,5 %.



Obr. 7 Vykreslená odchýlka 6ti-segmentového tvarovacieho obvodu s nelineárnym deličom

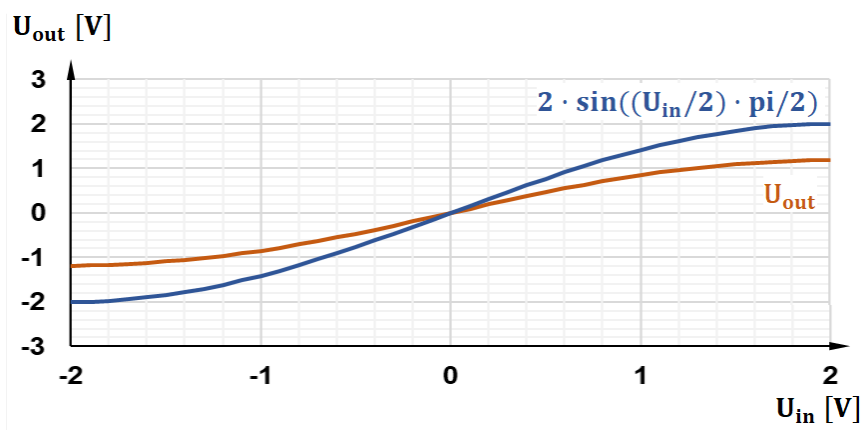
2.2 Tvarovací 6ti-segmentový obvod s nelineárnym deličom bez operačného zosilňovača

Táto časť bude zameraná na teoretický rozbor tvarovacieho 6ti-segmentového obvodu s nelineárnym deličom pri situácii odstránenia operačného zosilňovača. Takýto obvod slúži na demonštráciu respektíve na poukázanie funkcie operačného zosilňovača v obvode. Odstránením OZ (Obr. 8) z obvodu nastane to, že obvod už nebude oddelený od ďalších častí a zátáže, čím dôjde k rozhodnutiu PCH. Pre počítačové testovanie je koniec (výstup) obvodu zapojený naprázdno, (v simulácii to korešponduje so zapojením rezistoru s veľkou hodnotou odporu na výstupe obvodu). Použitím čím nižšej hodnoty odporu by došlo k tým väčšiemu ovplyvneniu PCH a výstup by sa približoval k nulovej hodnote (zaťažujeme delič).



Obr. 8 Tvarovací 6ti-segmentový obvod s nelineárnym deličom pri odpojení OZ

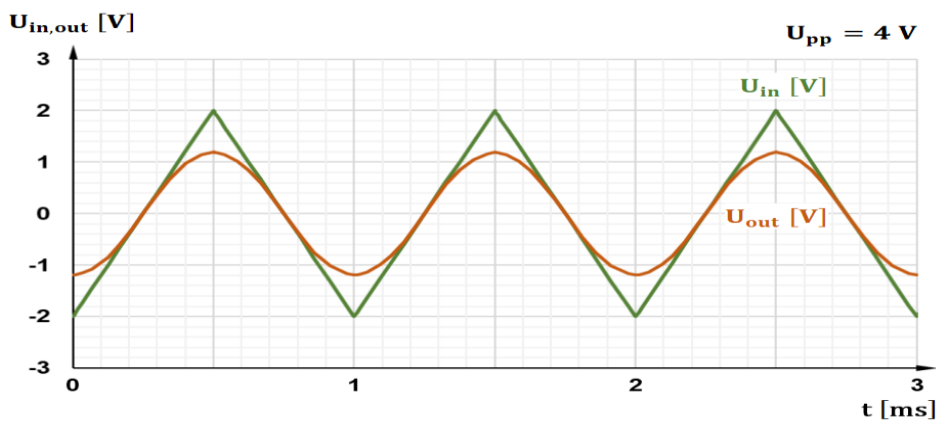
K názornej ukážke prevodnej charakteristiky slúži obrázok (Obr. 9). Pôvodne pomerne dokonale prekrytý výstup s ideálnym sínusovým signálom na celom priebehu PCH sa teraz značne odchýlil.



Obr. 9 Prevodná charakteristika tvarovacieho 6ti-segmentového obvodu s nelineárnym deličom bez OZ

Samozrejme pri odstránení OZ z obvodu nedochádza k žiadnemu zosilneniu signálu. Z toho dôvodu došlo k poklesu úrovne výstupného signálu z pôvodných $u_2 = 2 \text{ V}$ na hodnotu $u_2' = 1,2 \text{ V}$, čo je vlastne hodnota napätia po priechode pasívnej časti, ktorá sa dá vypočítať vzťahom [5]:

$$u_2' = \frac{2}{\pi} \cdot U_{1m} \quad (2.10)$$



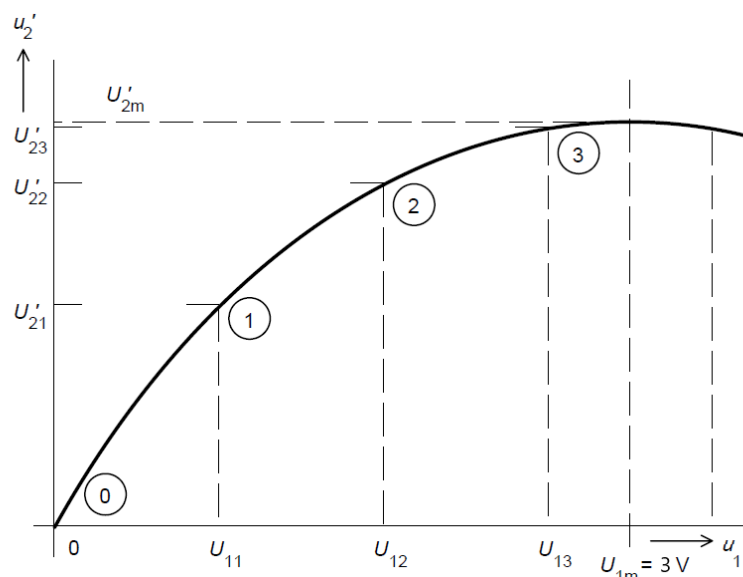
Obr. 10 Časový priebeh tvarovacieho 6ti-segmentového obvodu s nelineárnym deličom bez OZ

2.3 Tvarovací 3-segmentový obvod s pevne nastaveným deličom

Návrh 3-segmentového tvarovacieho obvodu s pevne nastaveným deličom je veľmi podobný s predchádzajúcim návrhom 6ti-segmentového obvodu s nelineárnym deličom. Hlavná zmena ktorá nastáva je počet segmentov, čo má za následok zníženie počtu zlomových bodov a tým pádom i presnosti aproximácie (Obr. 11). V tomto obvode dôjde k vynechaniu pomocných zdrojov diód respktíve ich nahradením za odpory. Zapojenie obvodu (Obr. 13) [6] sa bude mierne odlišovať od zapojenia vyššie navrhovaného 6ti-segmentového tvarovacieho obvodu s nelineárnym deličom ale ich funkcie budú úplne rovnaké. Aj v tomto obvode bude dochádzať k ohybu vstupného trojuholníkového signálu použitím 3 zlomových bodov na vytvorenie sínusového signálu (Obr. 11).

Najväčšia odlišnosť tohto obvodu (Obr. 12) s predchádzajúcim je vytvorenie napätia pre nastavenie zlomových bodov z napájacieho napätia pomocou pridaných deličov. Jednotlivé segmenty, sú rozdelené na 2 vetvy, podľa toho či sa jedná o ohyb kladnej alebo zápornej časti signálu. Každá vetva obsahuje napäťový delič a diódu. Tento obvod je priamo vhodný pre využitie do spätnej väzby invertujúceho zosilňovača s OZ.

Použitím rovnakých vzťahov (2.1) - (2.5) ako v predošlom návrhu vypočítam hodnoty napätí na zvislej aj na vodorovnej ose. Opäť budem počítať s hodnotou prahového napätia $U_P = 0,6 \text{ V}$. Pre návrh tohto obvodu si zvolím amplitúdu signálu $U_{1m} = 3 \text{ V}$ na rozdiel od predošlého návrhu, kde hodnota amplitúdy bola $U_{1m} = 2 \text{ V}$.



Obr. 11 Prevodná charakteristika tvarovacieho 3-segmentového tvarovacieho obvodu s pevne nastaveným deličom

Použitím vzťahu (2.1) pre $i = 1, 2, 3$ dostávam výsledné hodnoty napätí: $U_{11} = 0,857 \text{ V}$, $U_{12} = 1,714 \text{ V}$, $U_{13} = 2,571 \text{ V}$. Tým som vypočítal všetky hodnoty vstupných napätí na vodorovnej ose PCH.

V úseku 0-1 prevodnej charakteristiky nie je otvorená žiadna dióda, teda v ňom bude prenos tvarovacieho obvodu rovný jednej. Z toho vyplýva, že bude platiť:

$U_{21}' = U_{11}$. Rovnica prevodnej charakteristiky je sínusový signál určený vzťahom (2.3): $u_2' \cong U_{2m}' \cdot \sin((u_1 / U_{1m}) \cdot (\pi / 2))$. Dosadením hodnoty amplitúdy U_{1m} a hodnoty U_{11} do vzťahu rovnice prevodnej charakteristiky (2.3) za vstupné napätie, získam vzťah pre výpočet U_{2m}' : $U_{2m}' = U_{11} / \sin((U_{11} / U_{1m}) \cdot (\pi / 2))$. Hodnota U_{2m}' udáva maximálnu veľkosť výstupného napätia na zvislej ose. Po výpočte pomocou vzťahu (2.4), mi vyšla hodnota $U_{2m}' = 1,975 \text{ V}$.

Po znalosti U_{2m}' som schopný dopočítať zvyšné súradnice zlomových bodov na zvislej ose U_{22}' a U_{23}' prevodnej charakteristiky, dosadením hodnôt napätí zlomových bodov na vodorovnej ose U_{12} a U_{13} za vstupné napätie na vodorovnej ose u_1 . Získané hodnoty zvislých zlomových bodov: $U_{22}' = 1,544 \text{ V}$, $U_{23}' = 1,926 \text{ V}$.

Týmto výpočtom, došlo k úplnému určeniu presných súradníc aproximačných bodov v štvrt' perióde sínusového signálu. Pomocné zdroje sa v tomto obvode nenachádzajú, ale bez znalosti veľkostí napätí pomocných zdrojov, by som nebol schopný dopočítať hodnoty odporov. Z toho dôvodu vypočítam veľkosti napätí pomocných zdrojov v jednotlivých segmentoch pomocou vzorca (2.5): $U_{Zi} = U_{Zi}' - U_p$, $i = 1, 2, 3$.

Výsledné hodnoty vzťahu (2.5) sú: $U_{Z1} = 0,257 \text{ V}$, $U_{Z2} = 0,944 \text{ V}$, $U_{Z3} = 1,326 \text{ V}$. Prevediem náhradu pomocných zdrojov za rezistory. V každej vetve budem uvažovať odporový delič. Voľbou veľkosti odporu jedného rezistoru v deliči a dosadením hodnoty napätia pomocného zdroja som schopný dopočítať veľkosť druhého odporu.

Vzťah pre výpočet odporového deliča v jednej vetve:

$$U_{Zi} = U_{ee} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.11)$$

kde U_{Zi} je hodnota napätia pomocného zdroja, U_{ee} je napájacie napätie privádzané priamo do vetvy ($U_{ee} = 15 \text{ V}$), R_1 a R_2 sú hodnoty odporov v odporovom deliči.

Jednoduchou úpravou tohto vzťahu dostanem rovnicu pre výpočet neznámej veľkosti odporu.

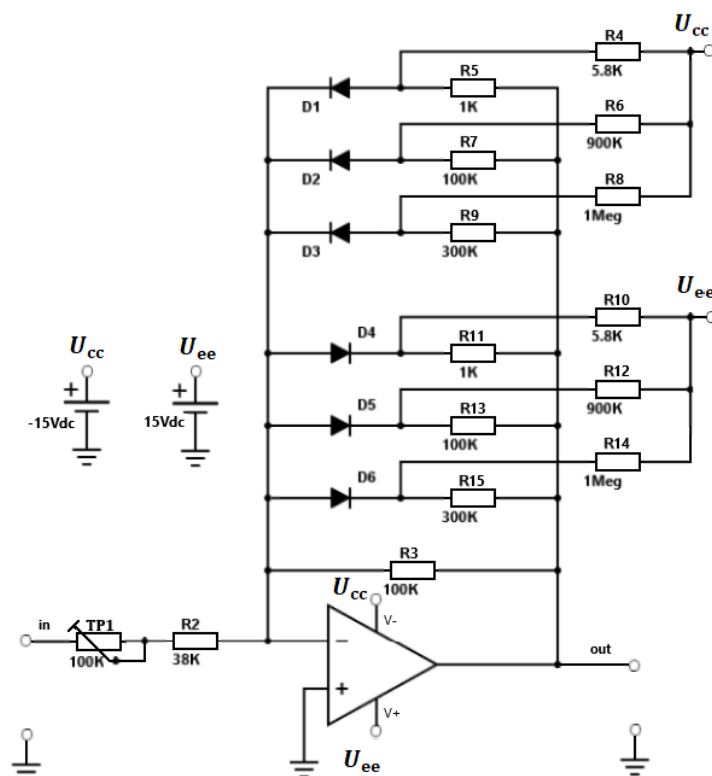
$$R_2 = \frac{U_{Zi} \cdot R_1}{U_{ee} - U_{Zi}} \quad (2.12)$$

Aplikovaním vzťahu (2.12) dopočítam zvyšné hodnoty odporov v deliči. Výpočet prevediem podľa počtu segmentov v tomto prípade tri krát. Pre každý segment si stále zvolím hodnotu jedného rezistoru R_1 a dopočítam neznámu veľkosť odporu R_2 . Zvolené hodnoty R_1 v jednotlivých vetvách: $R_1 = 5.8 \text{ k}\Omega$, $R_1' = 900 \text{ k}\Omega$ a $R_1'' = 1 \text{ M}\Omega$. Vypočítané neznáme hodnoty rezistorov v odporovom deliči pre jednotlivé vetvy: $R_2 = 560 \Omega$, $R_2' = 60.5 \text{ k}\Omega$ a $R_2'' = 175 \text{ k}\Omega$.

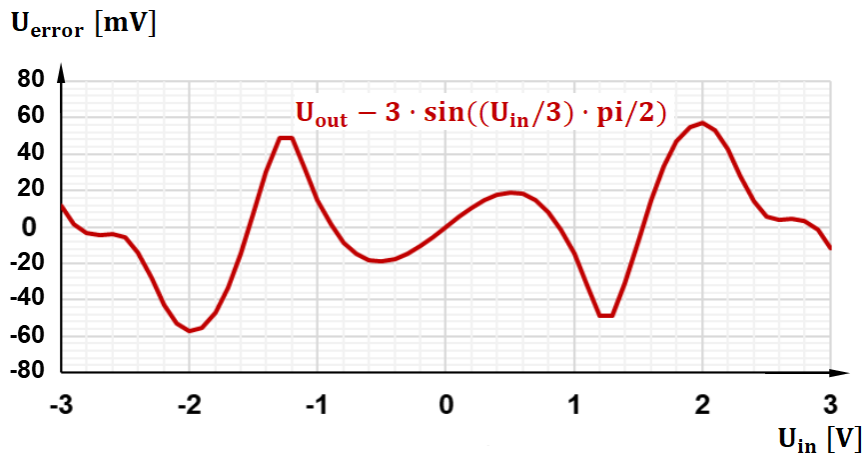
Rozdelením segmentov na dve vetvy dostávam pre tento návrh obvodu dvakrát viac rezistorov ako pri návrhu 6ti-segmentového tvarovacieho obvodu s nelineárnym deličo. Po vypočítaní všetkých hodnôt jednotlivých prvkov tvarovacieho obvodu, môžem nakresliť schému obvodu v programe PSpice.

Spustením simulácie a následným vykreslením prevodnej charakteristiky zistím, či boli moje výpočty jednotlivých súčiastok správne. Pri neúplnom prekrytí výstupného signálu s ideálnym harmonickým signálom v tomto prípade:

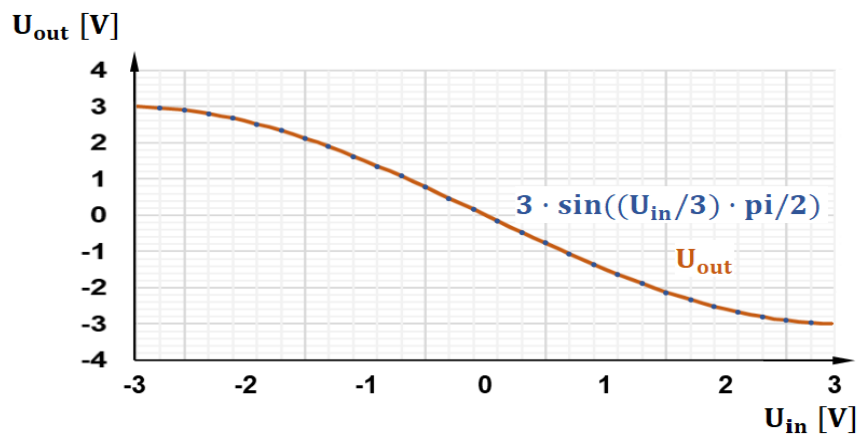
$U_{\text{out}}(t) = -3 \cdot \sin((U_{\text{in}}/3) \cdot \pi/2)$, musím veľkosti odporov v jednotlivých vetvách dostaviť aby som dosiahol čo najpresnejšie prekrytie. Miernym zvýšením hodnoty odporov z pôvodných $R_2 = 560 \Omega$, $R_2' = 60.5 \text{ k}\Omega$ na hodnoty $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2' = 100 \text{ k}\Omega$ dosahujem spresnenie prekrytia. PCH výstupu tvarovacieho obvodu stále nie je úplne prekrytá s ideálnym harmonickým priebehom. Zvýšenie hodnoty odporu v poslednom rezistore z $R_2'' = 175 \text{ k}\Omega$ na $R_2'' = 300 \text{ k}\Omega$ spôsobí úplne prekrytie prevodnej charakteristiky.



Obr. 12 Zostavený 3 - segmentový tvarovací obvod



Obr. 13 Vykreslená odchýlka tvarovacieho 3-segmentového obvodu s pevne nastaveným deličom



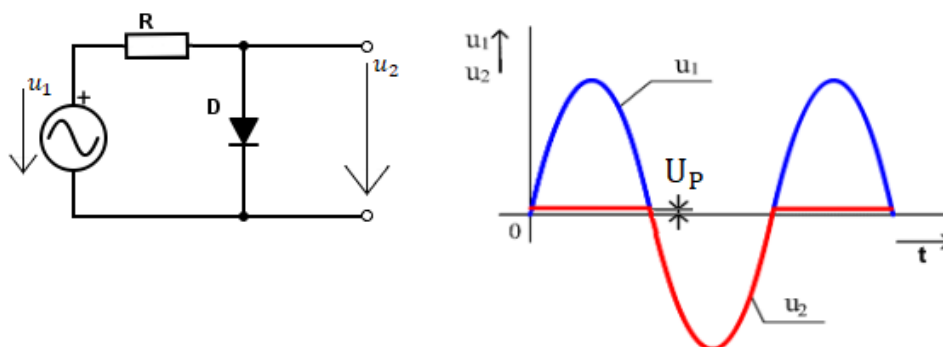
Obr. 14 Simulácia prevodnej charakteristiky

K správne mu zostaveniu finálneho návrhu dôjde doladením jednotlivých hodnôt odporov s čo najmenšou odchýlkou. Z obrázku (Obr. 14) je viditeľné, že odchýlka kladnej aj zápornej časti neprekračuje hodnotu ± 60 mV. Z testovania obvodu FFT analýzou vyplýva, že tvarovací obvod vykazuje skreslenie harmonického signálu (THD) s presnosťou 2 %.

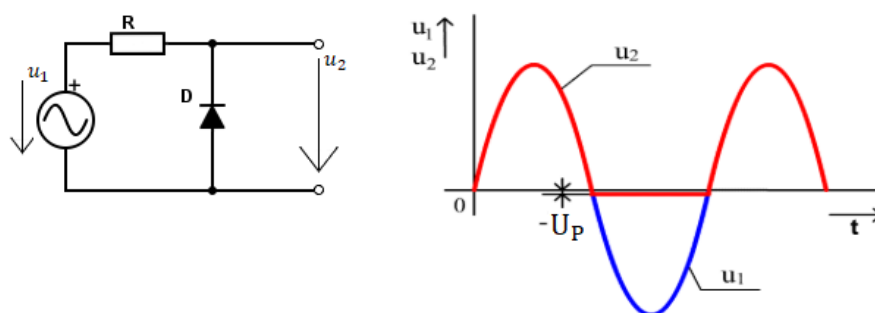
3. OBOJSTRANNÝ OBMEDZOVAČ

Obmedzovače [7] slúžia na obmedzenie amplitúdy vstupného signálu, tak aby výstupné napätie neprekročilo určitú, nami vopred stanovenú úroveň. Z toho dôvodu je ich najväčšie využitie v ochranných obvodoch. Ďalšie využitie obmedzovačov je obmedzenie tvarových defektov (špičiek signálov) ale využívajú sa aj ako ochrana napätového obmedzenia pred vstupom do blokov zapracovania signálu. Veľa elektronických obvodov má určité vstupné napätové obmedzenie. Prekročením dovolenej hranice vstupného napätia by mohlo dôjsť k poškodeniu obvodu. Z toho dôvodu je jedno z možných aplikácií, práve použitie napätového obmedzovača pred citlivé vstupy [7]. Napätové obmedzovače majú využitie napríklad pri jednocestnom usmernení signálu, kedy dochádza k prepusteniu iba jednej polovice periódy sínusového signálu [6].

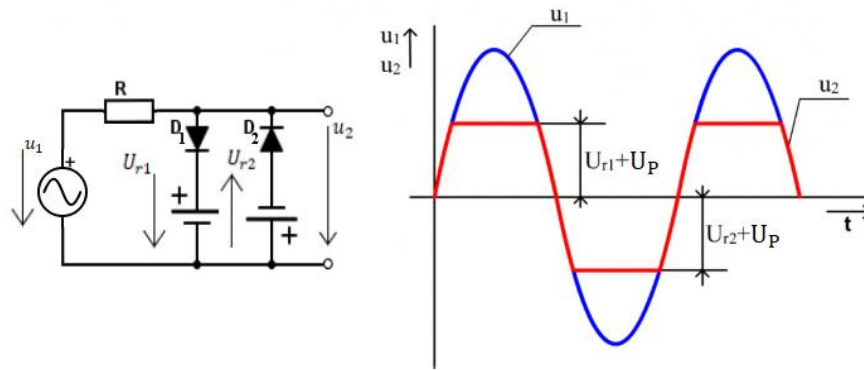
Podľa toho či vyžadujeme obmedzenie amplitúdy v jednej časti alebo oboch častiach priebehu sínusového signálu rozdeľujeme obmedzovače do troch základných kategórií: obmedzovač zhora, zdola a obojstranný obmedzovač [6]. Ak vstupný signál prekročí veľkosť referenčného (prahového) napätia, jeho ďalšie zmeny sú ignorované a na výstupe je referenčné napätie, kým vstupné napätie neklesne pod jeho veľkosť.



Obr. 15 Obmedzovač zhora (neprepúšťa napätie vyššie ako je prahové napätie) [8]

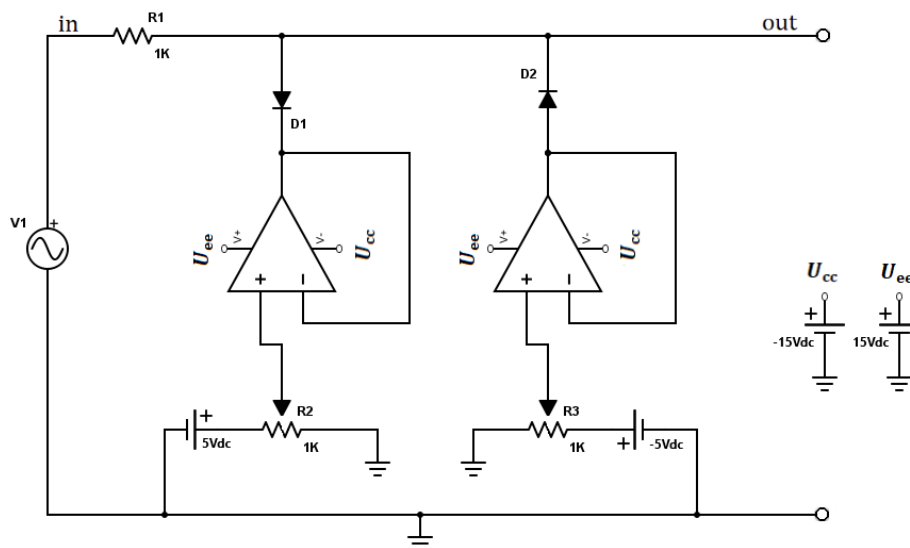


Obr. 16 Obmedzovač zdola (neprepúšťa napätie nižšie ako je prahové napätie) [8]



Obr. 17 Obojstranný obmedzovač, ktorý prepúšťa len tie signály, ktorých napätie je v intervale dvoch napätí [8]

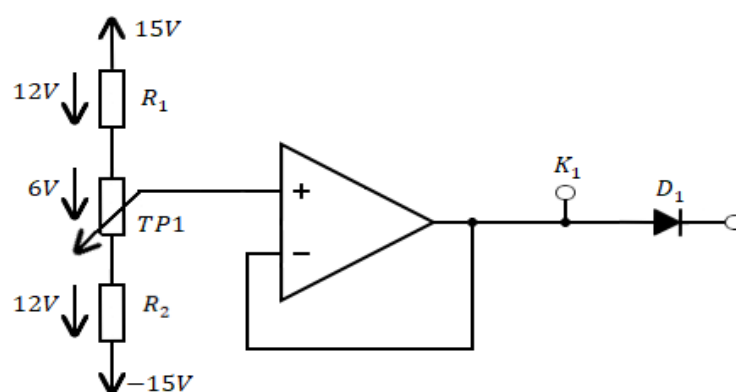
Pre konštrukciu napät'ových obmedzovačov sa najviac využívajú diódy, rezistory a tranzistory [8]. Konštrukcia obojstranného obmedzovača si nevyžaduje žiadne zdĺhavé výpočty a hľadanie čo najpresnejších hodnôt rezistorov ako to bolo pri návrhoch tvarovacích obvodoch. Jedná sa o obvod veľmi jednoduchý ale zato v praxi dosť využívaný s minimálnym počtom použitých súčiastok. Pre výrez amplitúdy sínusového signálu v hornej aj dolnej časti sa používajú dve diódy v antiparalelnom zapojení. Jednoduchým spojením dvoch typov obmedzovačov a to konkrétne obmedzovač zhora a zdola vznikne zapojenie obojstranného obmedzovača. Do obidvoch vetví pripojíme k diódam operačný zosilňovač (ako sledovač), potenciometer a pomocný zdroj napätia. Operačný zosilňovač slúži k oddeleniu potenciometru a diódy (respektíve vytvorenie regulovateľného zdroja napätia). Pozícia jazdca (delič) na potenciometri nastavíme požadovanú veľkosť napätia na vstup zosilňovača, čím určíme v ktorej časti priebehu dôjde k orezaniu signálu. Výška hladiny výrezu signálu sa rovná súčtu veľkosti napätí z výstupu OZ a prahového napätia diódy. Vynechaním pomocného zdroja napätia, by došlo k orezaniu signálu pri veľkosti 0,5 - 0,7 V, teda pri hodnote prahového napätia diódy.



Obr. 18 Zostavené zapojenie obojsmerného obmedzovača

4. REALIZÁCIA A KONŠTRUKCIA

Všetky tri navrhnuté obvody som pomocou programu Eagle [9] zostavil do jednej dosky plošného spoja. Obvody majú spoločné napájanie o hodnote $\pm 15\text{ V}$ a spoločnú zem. Na napájanie som paralelne zapojil blokovacie kondenzátory s hodnotou 100 nF , ktorých úlohou je zabrániť vzniku rušivých napätí v obvode (kmitanie). V rámci náhrady pomocných zdrojov som zapojil potenciometer cez operačný zosilňovač (ktorý je zapojený ako sledovač) kvôli impedančnému oddeleniu od obvodu potenciometru. Napätie oboch polarít som zapojil na piny potenciometru cez rezistory, aby som dosiahol zníženie napätia na dostačujúci mnou vopred zvolený rozsah.



Obr. 19 Zapojenie jednej vetvy pre voľbu odporov

Takéto zapojenie (Obr. 20) nahrádza pomocný zdroj v každej vetve tvarovacieho obvodu. Pre jednoduchosť a pre ušetrenie priestoru na prípravku je v každom segmente (segment = dve vetvy) použitý jeden stereo potenciometer, ktorý umožňuje ladenie hodnôt napätí opačných polarít na oboch vetvách súčasne. K_1 reprezentuje konektor pre pripojenie voltmetru. Umožňuje teda zobrazenie hodnoty napätia v danej vetve, čo uľahčí ladenie napätí pre jednotlivé segmenty. Prepínaním voltmetra z jednej vetvy do druhej je možné uistiť sa že je vo vetvách nastavená rovnaká veľkosť napätia ale opačnej polarity.

Pre vhodné nastavenie napätového rozsahu vytáčaním potenciometru z jednej strany na druhú som sa snažil v dostatočne rezervnej miere zvoliť vhodný rozsah, ktorý by umožňoval nastavenie napätia v kladnej aj zápornej polarite. Veľkosť tohto rozsahu som zvolil 6 V , čo zodpovedá $\pm 3\text{ V}$. Určil som hodnotu potenciometra $R_{TP1} = 10\text{ k}\Omega$. Na nožičky potenciometru je privedené napájanie o veľkosti $\pm 15\text{ V}$, čo zodpovedá rozsahu 30 V . Keďže celkové napätie sa musí rovnať súčtu napätí na jednotlivých súčiastkach, potom platí že napätia na rezistoroch a potenciometri musia dokopy dávať hodnotu 30 V . $30\text{ V} - 6\text{ V} = 24\text{ V}$, $24 / 2 = 12\text{ V}$.

Odčítaním celkového rozsahu od nastaviteľného rozsahu na potenciometri získam hodnotu napätia na oboch rezistoroch. Vydelením tejto hodnoty dostanem napätie na jednom rezistore:

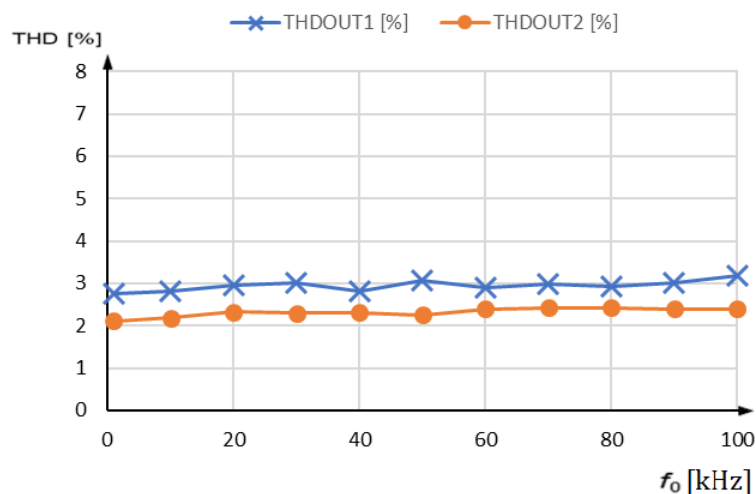
$$I = \frac{U}{R} = \frac{6\text{ V}}{10\text{ k}\Omega} = 0,6\text{ mA}, \quad R = \frac{U}{I} = \frac{12\text{ V}}{0,6\text{ mA}}, \quad R = R_1 = R_2.$$

Vďaka aplikovaniu Ohmovho zákona som dopočítal hodnoty obidvoch rezistorov: $R_1 = R_2 = 20 \text{ k}\Omega$. Týmto spôsobom som previedol náhradu pomocných zdrojov za zapojenie (Obr. 20) vo všetkých vetvách 6ti - segmentového tvarovacieho obvodu. Obdobným spôsobom som postupoval pri obojstrannom obmedzovači, kde som si ale nastaviteľnú hodnotu napätia pomocou potenciometra zvolil v rozsahu 10 V čo zodpovedá $\pm 5 \text{ V}$:
$$I = \frac{U}{R} = \frac{10 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega} = 1 \text{ mA} , \quad R = \frac{U}{I} = \frac{10 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 10 \text{ k}\Omega , \quad R = R_1 = R_2.$$

Na takto zostavenú dosku som prispájkoval všetky súčiastky. Zhotovil som čelnú dosku na ktorej sú zobrazené schémy jednotlivých obvodov, vyvŕtané potrebné diery na závit potenciometrov, panelové diery (banániky) a diery potrebné na pripojenie voltmetra (mini-banániky). Tým som vytvoril zariadenie v podobe prípravku vhodného na meranie laboratórnej úlohy, pomocou ktorého som prevádzal merania jednotlivých obvodov a následne v rámci výsledkov meraní som zhotovil adekvátne demonštrujúci laboratórny protokol.

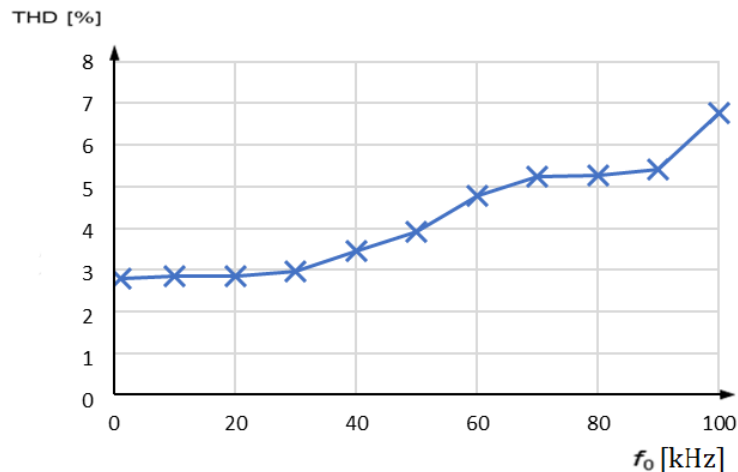
5. VÝSLEDKY EXPERIMENTOV

Meraný 6ti-segmentový tvarovací obvod s použitím všetkých segmentov vykazoval hodnoty THD_{out2} (oranžový priebeh) v intervale od 2 do 2,5 % v kmitočtovom pásme do 100 kHz. Použitím len 3 segmentov došlo k zhoršeniu hodnôt THD_{out1} (modrý priebeh) približne o 0,5 % na celom kmitočtovom rozsahu. Rozdielnosť týchto hodnôt poukazuje na počet použitých tvarovacích segmentov, kde sa vlastne potvrdil teoretický predpoklad, ktorý poukazuje na to, že pri použití väčšieho počtu segmentov dôjde k presnejšej aproximácii sínusového signálu, čo zodpovedá zníženiu hodnoty THD.



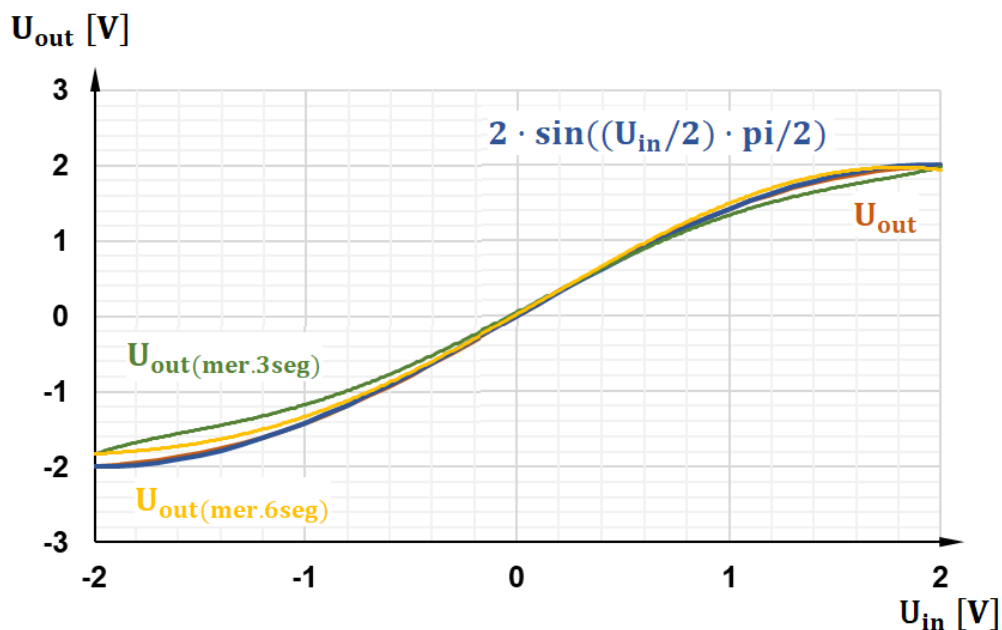
Obr. 20 Graf závislosti THD na kmitočte pre 6ti-segmentový tvarovač s nelineárnym deličom z (Obr. 5) s použitím hodnôt z A.1 a A.2 pri využití 3 segmentov a všetkých segmentov

Graf na obrázku (Obr. 21) zodpovedá vykresleniu meraných hodnôt THD 3-segmentového tvarovača s pevne nastaveným deličom z (Obr. 12). Jeho závislosť pri narastajúcom kmitočte je dosť výrazná oproti 6ti-segmentovému tvarovaciemu obvodu s nelineárnym prvkom. Merané hodnoty THD sa pohybujú v intervale od 3 do 5 % do kmitočtového rozsahu 90 kHz. Od tejto hodnoty sa s narastajúcim kmitočtom takmer lineárne mení hodnota THD. Súvisí to s tým, že hodnota 90 kHz tvorí hranicu kmitočtového pásma použiteľnosti (pokles úrovne signálu o polovicu).



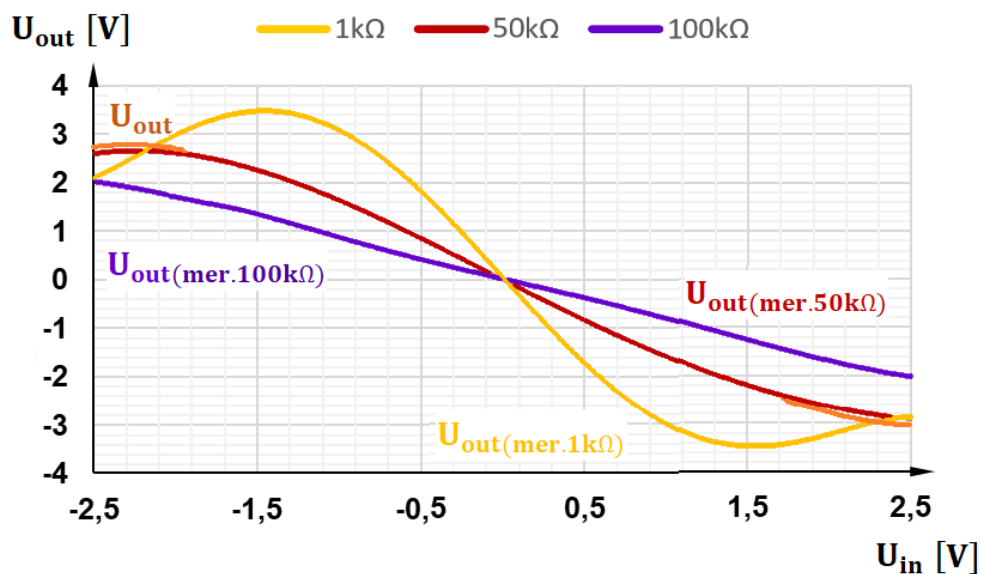
Obr. 21 Graf závislosti THD na kmitočte pre 3-segmentový tvarovač s pevne nastaveným deličom z (Obr. 12) s použitím hodnôt z A.3

Zobrazené prevodné charakteristiky v XY režime 6ti-segmentového tvarovacieho obvodu s nelineárnym prvkom pre obidve zapojenia s použitím všetkých segmentov a 3 segmentov som vyniesol do grafu na obrázku (Obr. 22). Graf poukazuje na rozdielnosť priebehov simulovanej, ideálnej a meraných prevodných charakteristík. Priebehy sa z veľkej časti takmer úplne prekrývajú s miernym rozvetvením na koncoch.



Obr. 22 Graf porovnávajúci výsledné prevodné charakteristiky (PCH) so simulovanými pre 6ti-segmentový tvarovač s nelineárnym deličom z (Obr. 5) s využitím 3 a 6 segmentov

Obdobným spôsobom v XY zobrazení som vykreslil prevodné charakteristiky 3-segmentového tvarovača s pevne nastaveným deličom (Obr. 12) pre 3 rôzne hodnoty odporov $R = 1/50/100 \text{ k}\Omega$. Pre ukážku rozdielnosti priebehu s rôznymi hodnotami odporov som tieto priebehy zobrazil v jednom grafe spoločne so simulovanou prevodnou charakteristikou. Prekrytie simulovanej PCH a meranej PCH s hodnotou $R = 50 \text{ k}\Omega$ bolo takmer identické. Viditeľné zmeny nastali pri znížení hodnoty odporu na $R = 1 \text{ k}\Omega$, pri ktorom došlo k zvlneniu priebehu PCH. Naopak pri hodnote $R = 100 \text{ k}\Omega$ priebeh nadobúdala lineárny charakter.



Obr. 23 Graf porovnávajúci výsledné prevodné charakteristiky (PCH) so simulovanými pre 3-segmentový tvarovač s pevne nastaveným deličom z (Obr. 12) s rôznymi veľkosťami odporov nastavených za pomoci potenciometru TP1

Porovnávacia tabuľka (Tabuľka 1) zameraná na demonštráciu tvarovacích obvodov, slúži k prehľadnejšej ukážke rozdielných hodnôt THD na kmitočte $f = 1 \text{ kHz}$.

Obvod	6ti - segmentový tvarovač		3 - segmentový tvarovač
	využitie 3 - segmenty	využitie všetky segmenty	
f [kHz]	1	1	1
THD simulovaná [%]	2,10	1,50	2,00
THD meraná [%]	2,76	2,11	2,80

Tabuľka 1 Porovnanie THD všetkých obvodov

ZÁVER

Podarilo sa mi úspešne navrhnuť dva tvarovacie obvody 3-segmentový tvarovač s pevne nastaveným deličom a 6ti-segmentový tvarovač s nelineárnym deličom. U oboch sa mi podarilo docieľiť čo najpresnejšie prekrytie prevodnej charakteristiky s ideálnym harmonickým signálom aké som bol schopný dosiahnuť. Zvolením hodnôt amplitúd som bol schopný použitím vzorcov vypočítať jednotlivé aproximačné body prevodnej charakteristiky a tým dosiahnuť čo najpresnejšie prekrytie. Následným dopočítaním hodnôt pomocných zdrojov a hodnôt odporov, som bol schopný obvody zostaviť a odsimulovať, čím som si overil správnosť výpočtov jednotlivých súčiastok. Správnosť návrhov som si potvrdil vykreslením odchýlok. Obojstranný obmedzovač slúži ako názorná ukážka orezania vstupného signálu v kladnej aj zápornej časti, kedy pomocou zmeny odporu na potenciometri dôjde k posunu výšky hladiny výrezu.

Navrhnuté obvody som vykreslil pomocou programu Eagle a zhotovil dosku plošných spojov (DPS). Všetky obvody som vložil do jednej dosky so spoločnou zemou a dosku následne osadil. Zostrojil som aj čelný panel prípravku, na ktorý som vyviedol potenciometre a banánikové svorky určené na pripojenie potrebných zariadení. Tým som zhotovil finálny laboratórny prípravok. Meraním som si overil funkčnosť a presnosť obvodov. Z nameraných hodnôt som následne zostrojil tabuľky a grafy, v ktorých som sa snažil poukázať na rozdielnosť meraných a simulovaných obvodov. Zameral som sa hlavne na hodnoty THD tvarovacích obvodov na kmitočte $f = 1$ kHz. 6ti-segmentový tvarovač s použitím všetkých segmentov vykazoval najmenšiu hodnotu THD podľa predpokladu, kvôli väčšiemu počtu zlomových bodov, čím sa docielila presnejšia aproximácia sínusového signálu, a to konkrétne $THD = 2,11$ %. Obvody 6ti-segmentový tvarovač s využitím troch segmentov a 3-segmentový tvarovač s pevne nastaveným deličom mali hodnoty THD veľmi podobné s odlišnosťou len $0,02$ % a to konkrétne $THD = 2,78$ % a $THD = 2,8$ %. Hodnoty THD nameraných obvodov sa odlišovali od hodnôt simulovaných obvodov len o pár desatín percent. Z výsledkov merania som vytvoril laboratórny protokol s návodom a teoretickým rozborom určeným pre experimentálne overenie reálnych vlastností obvodov.

LITERATURA

- [1] KOLKA, Zdeněk a Jaromír KOLOUCH. *Impulzová a číslicová technika: počítačové cvičení*. Vyd. 2., dopl. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2005. ISBN 80-214-2865-1.
- [2] VŮJTEK, Milan, Pavel KRCHŇÁK, Michal DUDKA a Sandra DRUSOVÁ. *Praktikum z elektroniky*. Katedra experimentální fyziky, 2018.
- [3] KOLKA, Zdeněk. *Počítačové řešení elektronických obvodů: PSpice krátký návod*. Brno, 2007.
- [4] ŽATKOVIČ, Alexander. OPERAČNÍ ZESILOVAČE. ALZAT [online]. [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: <https://alzat.spseke.sk/zosil/Jednosmr/oz/oz.htm?fbclid=IwAR2vH6sRj8HVetiIo4a33AFfuC6AzPUElumLB97DDzb8oH7KZkceNHwyEJE>
- [5] VRBAK, K., VRBA, K. ml. *Technika analogových obvodů a systémů-Sbírka příkladů 1987*.
- [6] BELZA, Jaroslav. *Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-060-1.
- [7] ŽATKOVIČ, Alexandr. ALZAT [online]. [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: http://alzat.szm.com/selektory/amplitud/obmedzov/obmedz_sig.htm?fbclid=IwAR1af1LFC2SbFAs_RdNtm5I8HZQ4EIUodpVKDSF_22xhtZ-KT634mO4UDdM
- [8] DIÓDA A ZENEROVÁ DIÓDA V TVAROVACÍCH OBVODOCH. Tonko: Elektrotechnika [online]. Kysucké Nové Mesto, 2009 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <http://www.tonko.eu/ele/content/kapitola-8>
- [9] VRBA, Kamil a Pavel HANÁK. *Vybrané problémy konstrukce elektronických přístrojů pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Brno, 2014. Vysoké Učení Technické v Brně.
- [10] ŠOTNER, Roman, Jiří PETRŽELA Jiří, SLEZÁK Josef. *Laboratorní cvičení kurzu teorie elektronických obvodů*. Brno, 2018.

ZOZNAM PRÍLOH

A	Tabuľky nameraných hodnôt.....	37
A.1	Závislosť THD na kmitočte s amplitúdou $U_m = 2\text{ V}$ pre 3 segmentové zapojenie.....	37
A.2	Závislosť THD na kmitočte s amplitúdou $U_m = 2\text{ V}$ pre 6 segmentové zapojenie.....	37
A.3	Závislosť THD na kmitočte s amplitúdou $U_m = 3\text{ V}$ pre 3-segmentový tvarovač s pevne nastaveným deličom.....	38
B	Návrh zariadení	39
B.1	Schéma 6ti-segmentového tvarovača s nelineárnym deličom.....	39
B.2	Schéma 3-segmentového tvarovača s pevne nastaveným deličom.....	40
B.3	Schéma obvodu obojstranného obmedzovača.....	40
B.4	Doska plošného spoja – BOT [Rozmery 122 x 113 mm].....	41
B.5	Doska plošného spoja pohľad zdola.....	41
B.6	Doska plošného spoja pohľad zhora.....	42
B.7	Laboratórny prípravok pohľad zhora.....	42
C	Zoznam súčiastok.....	46
D	Teoretický rozbor a laboratórny protokol	46

A Tabuľky nameraných hodnôt

A.1 Závislosť THD na kmitočte s amplitúdou $U_m = 2\text{ V}$ pre 3 segmentové zapojenie

f [kHz]	$\Delta Y(M1)$ [dB]	$\Delta Y(M2)$ [dB]	$\Delta Y(M3)$ [dB]	$\Delta Y(M4)$ [dB]	$\Delta Y(M5)$ [dB]	$\Delta Y(M6)$ [dB]	THD _{OUT1} [%]
1	70,3	29,4	37,8	25,0	29,7	15,0	2,76
10	70,0	28,8	37,8	25,0	29,1	16,0	2,82
20	70,0	29,4	38,4	23,1	27,8	19,1	2,95
30	70,0	30,0	38,4	23,4	29,4	19,4	3,02
40	70,0	26,6	37,5	22,5	32,0	18,1	2,81
50	69,7	29,4	38,4	20,9	29,1	17,8	3,07
60	69,7	29,1	37,5	21,6	19,1	30,6	2,89
70	69,7	30,0	37,5	24,1	31,3	20,9	2,99
80	69,7	25,9	37,5	24,1	31,6	23,1	2,92
90	69,7	29,1	37,8	22,5	31,3	17,2	3,00
100	69,7	28,4	38,8	23,8	28,4	23,1	3,18
f = 1 kHz							
THD = 2,76 %							

A.2 Závislosť THD na kmitočte s amplitúdou $U_m = 2\text{ V}$ pre 6 segmentové zapojenie

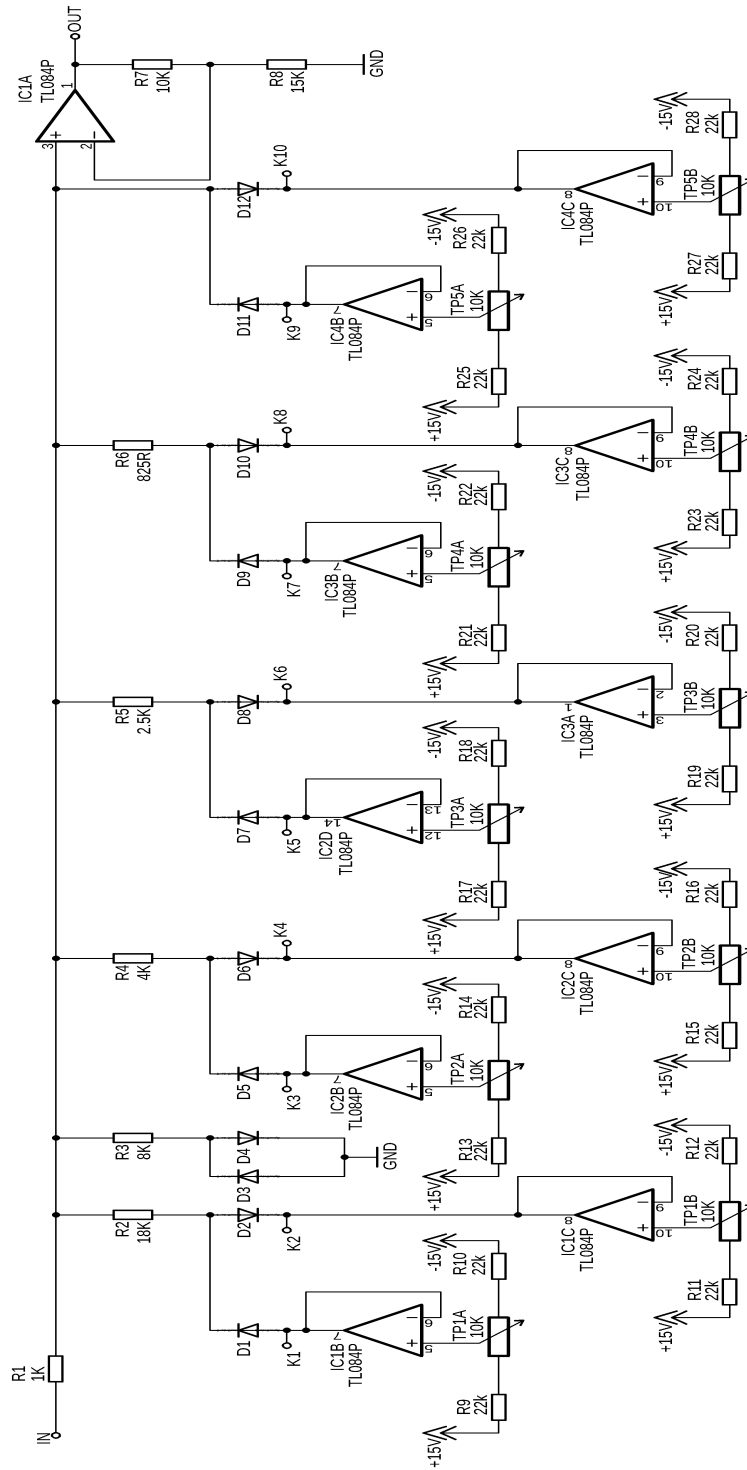
f [kHz]	$\Delta Y(M1)$ [dB]	$\Delta Y(M2)$ [dB]	$\Delta Y(M3)$ [dB]	$\Delta Y(M4)$ [dB]	$\Delta Y(M5)$ [dB]	$\Delta Y(M6)$ [dB]	THD _{OUT2} [%]
1	70,6	36,6	19,1	22,5	18,8	23,1	2,11
10	70,6	36,6	22,5	18,4	19,7	27,2	2,18
20	70,3	36,9	18,1	20,6	21,2	27,5	2,32
30	70,3	36,9	20,3	18,1	20,0	26,9	2,30
40	70,3	36,9	17,8	15,6	22,2	27,5	2,31
50	70,3	36,6	19,1	21,6	21,6	27,2	2,26
60	70,3	37,2	22,5	19,1	21,6	26,9	2,39
70	70,3	37,2	23,1	18,8	20,9	27,8	2,42
80	70,3	37,2	23,8	17,2	21,9	27,8	2,42
90	70,3	36,9	25,0	19,7	22,2	27,1	2,39
100	70,3	36,9	25,9	21,6	21,6	27,8	2,40
f = 1 kHz							
THD = 2,11 %							

A.3 Závislosť THD na kmitočte s amplitúdou $U_m = 3\text{ V}$ pre 3-segmentový tvarovač s pevne nastaveným deličom

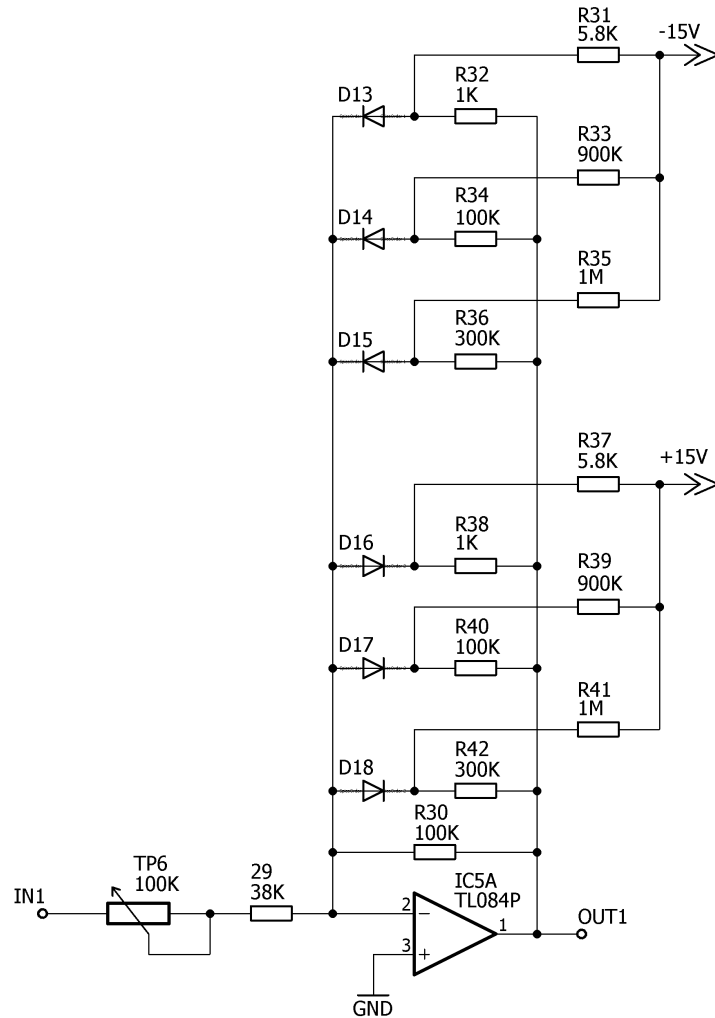
f [kHz]	$\Delta Y(M1)$ [dB]	$\Delta Y(M2)$ [dB]	$\Delta Y(M3)$ [dB]	$\Delta Y(M4)$ [dB]	$\Delta Y(M5)$ [dB]	$\Delta Y(M6)$ [dB]	THD _{OUT} [%]
1	72,8	25,0	38,4	17,2	38,8	12,2	2,80
10	72,5	21,6	41,3	16,0	28,4	15,3	2,85
20	72,5	20,8	41,3	19,4	28,6	15,0	2,85
30	72,8	21,6	41,6	30,3	28,4	25,6	2,96
40	73,4	21,9	43,8	31,9	27,5	13,1	3,46
50	72,8	21,9	44,1	34,4	16,3	28,1	3,92
60	72,2	22,2	45,3	34,4	30,0	22,8	4,78
70	73,1	20,0	47,2	35,0	14,1	27,1	5,25
80	73,1	22,5	47,2	17,2	36,0	17,2	5,27
90	73,1	20,9	47,2	37,2	31,6	26,0	5,40
100	72,2	21,9	48,4	15,0	38,4	15,0	6,78
f = 1 kHz							
THD = 2,80 %							

B Návrh zariadení a zoznam súčiastok

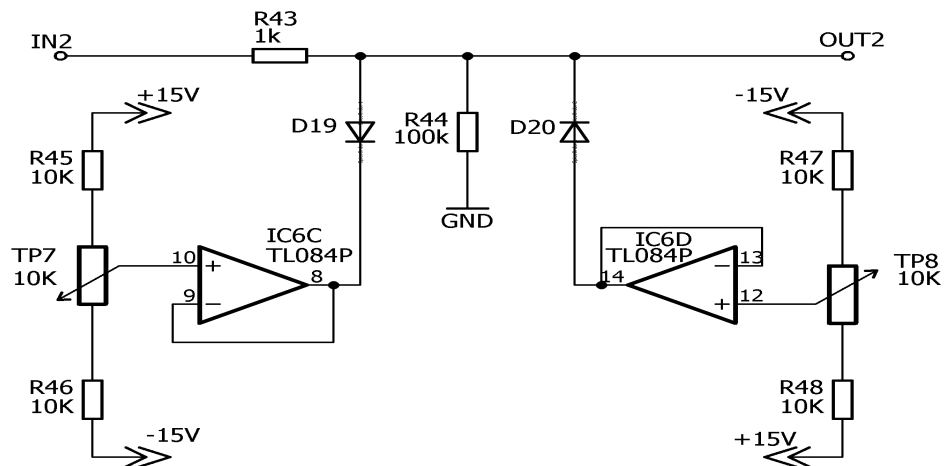
B.1 Schéma 6ti-segmentového tvarovača s nelineárnym deličom



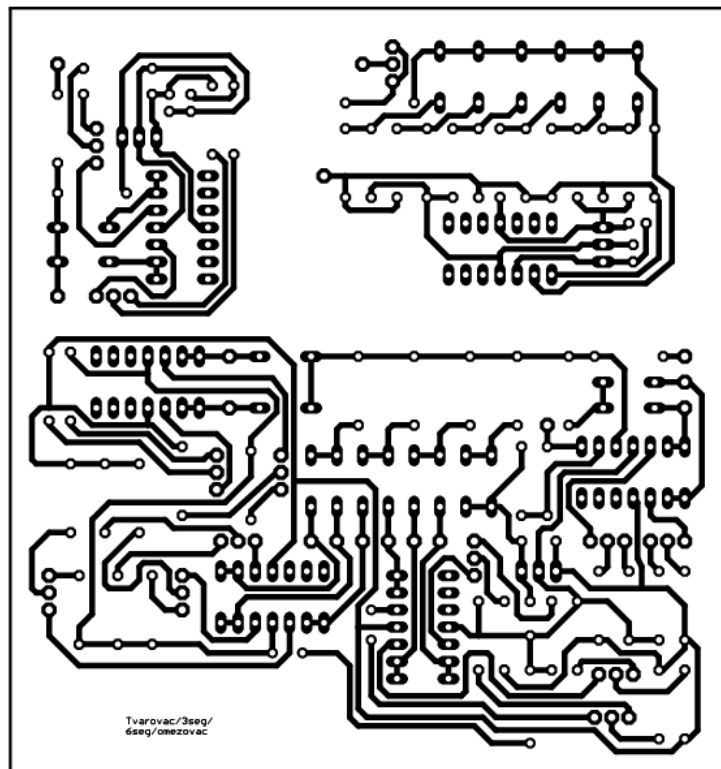
B.2 Schéma 3-segmentového tvarovača s pevne nastaveným deličom



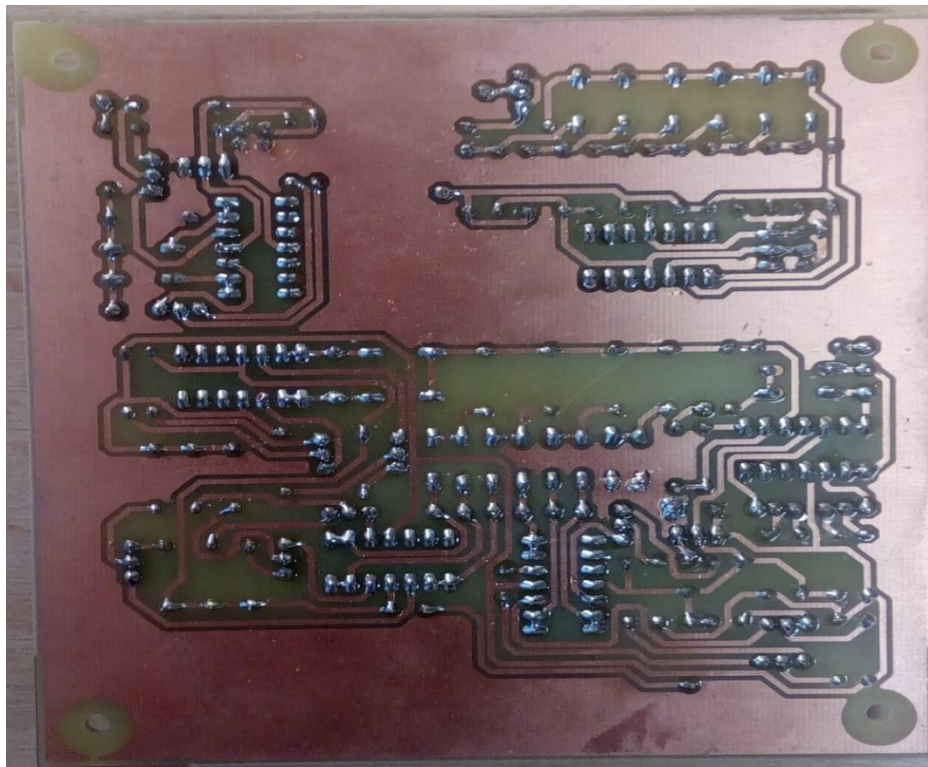
B.3 Schéma obvodu obojstranného obmedzovača



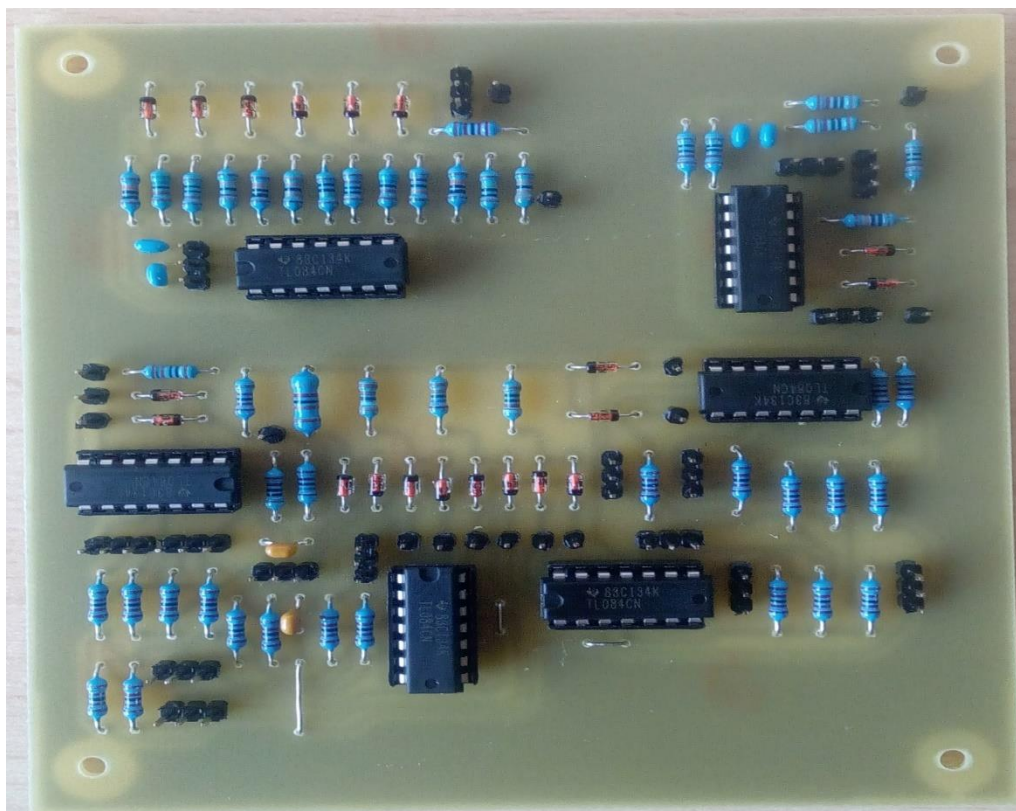
B.4 Doska plošného spoja – BOT [Rozmery 122 x 113 mm]



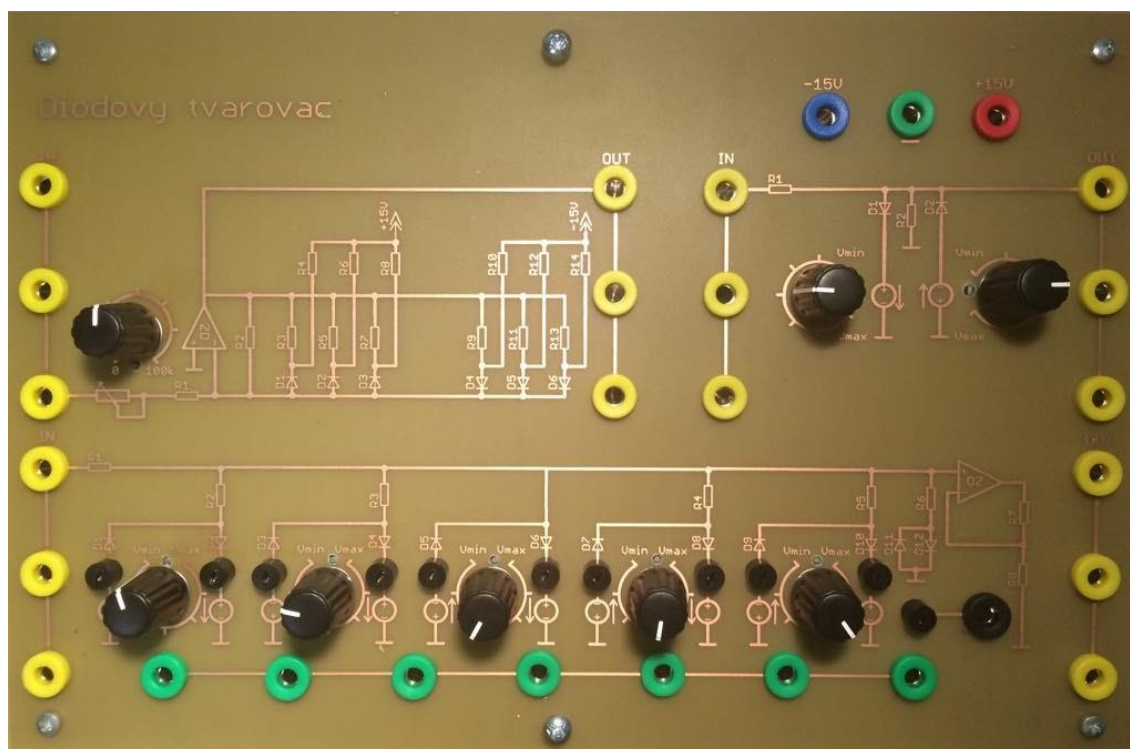
B.5 Doska plošného spoja pohľad zdola



B.6 Doska plošného spoja pohľad zhora



B.7 Laboratórny prípravok pohľad zhora



C Zoznam použitých súčiastok

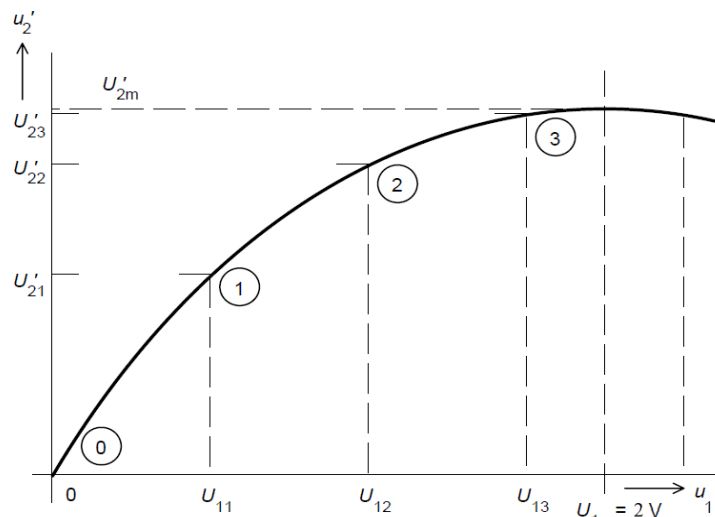
Part	Value	Device	Package	Description
C1	100n	C-EU025-025X050	C025-025X050	CAPACITOR, European symbol
C2	100n	C-EU025-025X050	C025-025X050	CAPACITOR, European symbol
C3	100n	C-EU025-025X050	C025-025X050	CAPACITOR, European symbol
C4	100n	C-EU025-025X050	C025-025X050	CAPACITOR, European symbol
C5	100n	C-EU025-025X050	C025-025X050	CAPACITOR, European symbol
C6	100n	C-EU025-025X050	C025-025X050	CAPACITOR, European symbol
D1	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D2	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D3	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D4	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D5	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D6	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D7	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D8	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D9	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D10	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D11	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D12	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D13	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D14	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D15	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D16	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D17	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D18	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D19	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
D20	1N4148	1N4148	DO35-7	DIODE
IC1	TL084P	TL084P	DIL14	OP AMP
IC2	TL084P	TL084P	DIL14	OP AMP
IC3	TL084P	TL084P	DIL14	OP AMP
IC4	TL084P	TL084P	DIL14	OP AMP
IC5	TL084P	TL084P	DIL14	OP AMP
IC6	TL084P	TL084P	DIL14	OP AMP
IN		BOD	KON_1	
IN1		BOD	KON_1	
IN2		BOD	KON_1	
K1		BOD	KON_1	
K2		BOD	KON_1	
K3		BOD	KON_1	
K4		BOD	KON_1	
K5		BOD	KON_1	
K6		BOD	KON_1	
K7		BOD	KON_1	

K8		BOD	KON_1	
K9		BOD	KON_1	
K10		BOD	KON_1	
OUT		BOD	KON_1	
OUT1		BOD	KON_1	
OUT2		BOD	KON_1	
R1	1K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R2	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R3	8k2	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R4	3k9	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R5	2k7	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R6	820R	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R7	10K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R8	15K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R9	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R10	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R11	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R12	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R13	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R14	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R15	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R16	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R17	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R18	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R19	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R20	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R21	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R22	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R23	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R24	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R25	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R26	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R27	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R28	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R29	22K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R30	100K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R31	5k6	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R32	1K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R33	820K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R34	100K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R35	1M	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R36	330K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R37	5k6	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R38	1K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R39	820K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R40	100K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol

R41	1M	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R42	330K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R43	1K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R44	100K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R45	10K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R46	10K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R47	10K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
R48	10K	R-EU_0207/10	0207/10	RESISTOR, European symbol
SL1		M03	03P	AMP QUICK CONNECTOR
SL2		M03	03P	AMP QUICK CONNECTOR
SL3		M03	03P	AMP QUICK CONNECTOR
TP1A	10K	POT_PC1621	KON_3	POTENCIOMETER
TP1B	10K	POT_PC1621	KON_3	POTENCIOMETER
TP2A	10K	POT_PC1621	KON_3	POTENCIOMETER
TP2B	10K	POT_PC1621	KON_3	POTENCIOMETER
TP3A	10K	POT_PC1621	KON_3	POTENCIOMETER
TP3B	10K	POT_PC1621	KON_3	POTENCIOMETER
TP4A	10K	POT_PC1621	KON_3	POTENCIOMETER
TP4B	10K	POT_PC1621	KON_3	POTENCIOMETER
TP5A	10K	POT_PC1621	KON_3	POTENCIOMETER
TP5B	10K	POT_PC1621	KON_3	POTENCIOMETER
TP6	100K	POT_PC1621	KON_3	POTENCIOMETER
TP7	10K	POT_PC1621	KON_3	POTENCIOMETER
TP8	10K	POT_PC1621	KON_3	POTENCIOMETER

D Teoretický rozbor a laboratórny protokol

Diódový tvarovací obvod tvaruje trojuholníkový signál na sínusový. K tvarovaniu signálu využíva nelineárnu charakteristiku diód. Otvorenie diódy spôsobuje zlom (ohyb) tvaru priebehu prevodnej charakteristiky [10]. Zlomové body rozdeľujú pol periódu sínusového signálu na niekoľko rovnakých úsekov. V každom tomto úseku budeme uvažovať aproximáciu sínusového signálu úsečkou spojujúcou príslušné body zlomu. Vplyv oblého tvaru charakteristiky diódy spôsobí, že výsledný priebeh prevodnej charakteristiky bude hladký. Poloha zlomových bodov je určená hodnotou pomocných zdrojov. Platí, že čím je počet zlomových bodov väčší, tým je aproximácia úsečkou v jednotlivých úsekoch presnejšia a výsledný sínusový signál vykazuje menšie skreslenie. Kvôli potlačeniu možného výskytu hrotu (špičky) je volený nepárny počet úsekov v pol perióde sínusového signálu. Pre 3-segmentový tvarovací obvod s nelineárnym deličom, ktorý obsahuje 3 zlomové body je počet úsekov v pol perióde sínusového signálu 7. Pri 6ti-segmentovom tvarovači s nelineárnym deličom by sa tento počet úsekov zvýšil na 14, kvôli väčšiemu (dvojnásobnému) počtu zlomových bodov.



Obr. 1 Prevodná charakteristika tvarovacieho obvodu

Vzťah pre určenie vodorovných súradníc zlomových bodov:

$$U_{1i} = (2 \cdot i / 7) \cdot U_{1m} \quad i = 1, 2, 3, \dots n \quad (1.1)$$

Rovnica prevodnej charakteristiky je sínusový signál určený vzťahom:

$$u_2' \cong U_{2m}' \cdot \sin((u_1 / U_{1m}) \cdot (\pi / 2)) \quad (1.2)$$

Úpravou vzťahu (1.2) pri znalosti vrcholovej hodnoty, ktorá odpovedá hodnote amplitúdy U_{1m} (zvolená hodnota) je možné určiť hodnotu U_{2m}' nasledovne:

$$U_{2m}' = U_{11} / \sin ((U_{11} / U_{1m}) \cdot (\pi / 2)) \quad (1.3)$$

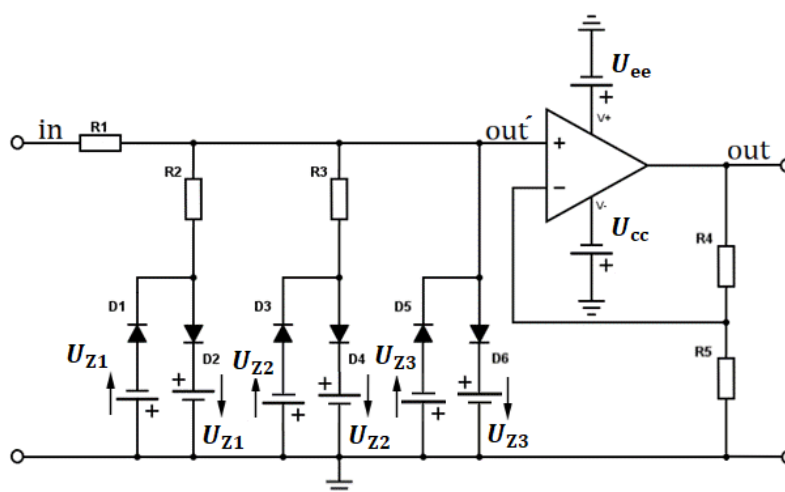
Hodnota U_{2m}' udáva maximálnu veľkosť výstupného napätia na zvislej ose. Dosadzovaním hodnôt vodorovných súradníc a vypočítanej hodnoty U_{2m}' do vzorca (1.2), dopočítame zvislé hodnoty súradníc a tým úplne určíme polohu zlomových bodov.

Veľkosti napätí pomocných zdrojov získame odčítaním prahového napätia $U_P = 0,6$ V (hodnota pri ktorej dôjde k otvoreniu diódy) od zvislých súradníc zlomových bodov:

$$U_{Zi} = U_{2i}' - U_P \quad i = 1, 2, 3 \quad (1.4)$$

Veľkosti hodnôt odporov je možné určiť pomocou deliacich pomerov napätí v úsekoch prevodnej charakteristiky. Hodnota prvého pozdĺžneho odporu R_1 sa zvolí. Vďaka hodnote prvého odporu R_1 a znalosti deliacich pomerov napätí je možné dopočítať zvyšné odpory. Pomer v úseku 1-2:

$$k_2 = \frac{(U_{22}' - U_{21}')}{(U_{12} - U_{11})} = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} \quad (1.5)$$



Obr. 2 Zapojenie tvarovacieho obvodu

Vplyvom prechodu cez tvarovaciu časť, ktorá pozostáva z odporového deliča, dochádza k zníženiu napät'ovej úrovne na výstupe. Aby bola zaistená rovnaká veľkosť napätia na vstupe i na výstupe, je potrebné do obvodu zapojiť operačný zosilňovač, ktorý túto rovnosť zaistí.

 <p>BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY</p> <p>FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION</p>	<p>Název kurzu:</p>
<p>Laboratorní úloha číslo __ – návod k měření/protokol Diódové tvarovače a obmedzovače</p>	

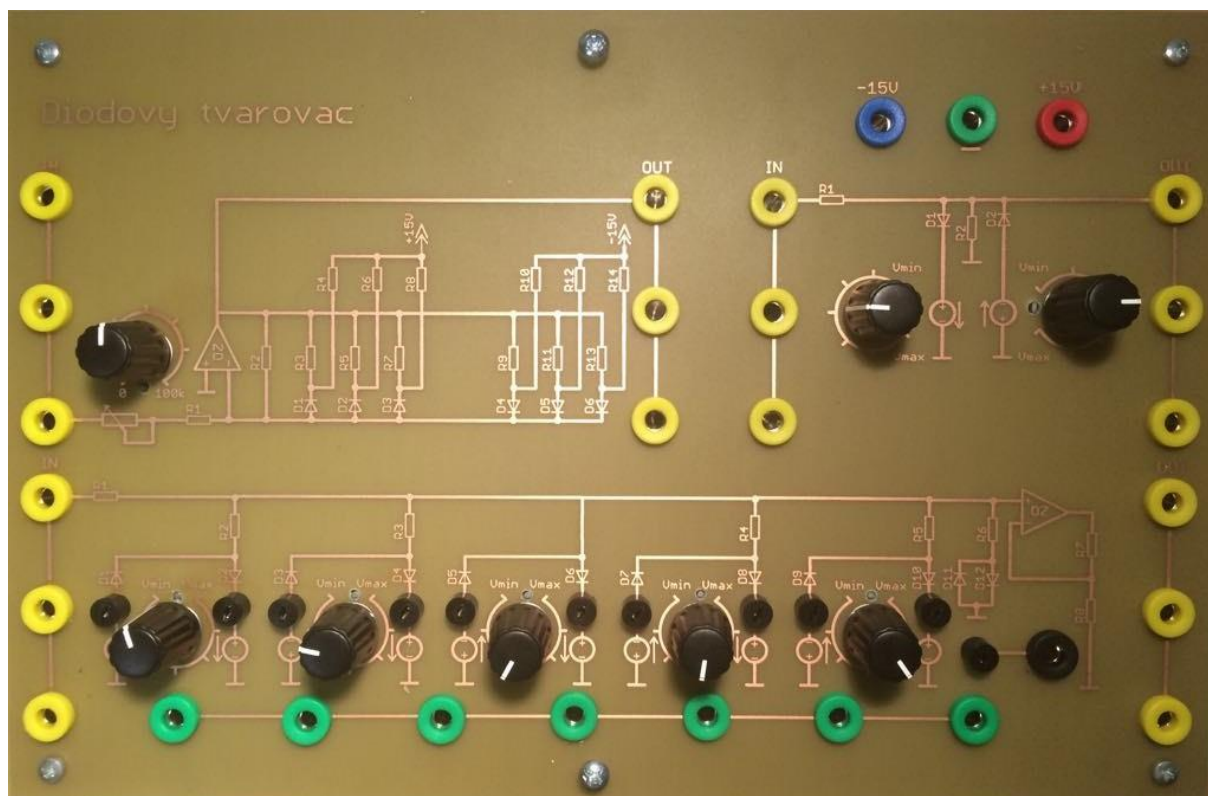
Jméno:

Skupina:

Datum a čas měření:

Popis přípravku

Na Obr. 1 je vyobrazený čelný panel přípravku tejto úlohy. Napájacie napätie sa pripojuje na tri dierky v pravom hornom rohu, ktoré sú označené podľa polaritu červená (+ 15 V), modrá (- 15 V) a zelená (0 V, GND). Prípravok je zložený z troch samostatných obvodov so spoločnou zemou (0 V, GND). Jednotlivé obvody majú samostatné vstupy a výstupy označené žltými dierkami pre pripojenie potrebných zariadení. Obvod umiestnený v spodnej časti prípravku (6ti-segmentový tvarovač s nelineárnym deličom) obsahuje prepojovacie svorky (mini-banániky), ktoré sú označené čiernou farbou a jednu prístrojovú svorku (tiež čiernej farby) určenú na pripojenie voltmetru. Postupným prepojaním je možné pomocou voltmetru sledovať veľkosť a polaritu napätí vo vetvách a tým obvod správne nastaviť. Potenciometre predstavujúce premenné odpory, slúžia pre správne nastavenie napätí vo vetvách. V tomto obvode sú použité stereo potenciometri umožňujúce nastaviť napätie pre obe vetvy súčasne. Zvyšné dva obvody umiestnené v hornej časti prípravku, obsahujú tiež premenné odpory umožňujúce ladenie hodnôt napätia. Potrebné hodnoty napätí pomocných zdrojov v každom segmente je nutné vypočítať v rámci domácej prípravy!



Obr. 1 Čelný panel prípravku

Prípravok prepojte s prístrojmi. Pre napájanie prípravku použite stabilný zdroj (DIAMETRAL P230R51D) so symetrickým napájaním ± 15 V, tj. vyžaduje tri vodiče. Pre všetky obvody je potrebné na vstup priviesť generátor (Agilent – 33120A) a jeden kanál osciloskopu (CH1). Na výstup prived'te druhý kanál osciloskopu (CH2). Použite osciloskop, ktorý bude dostupný na pracovisku.

Upozornenie! Je potrebné nastaviť napájacie napätie presne na hodnotu ± 15 V a v priebehu merania túto hodnotu stále kontrolovať a dodržiavať, kvôli tomu aby sa predišlo zbytočným odchýlkam pri meraní.

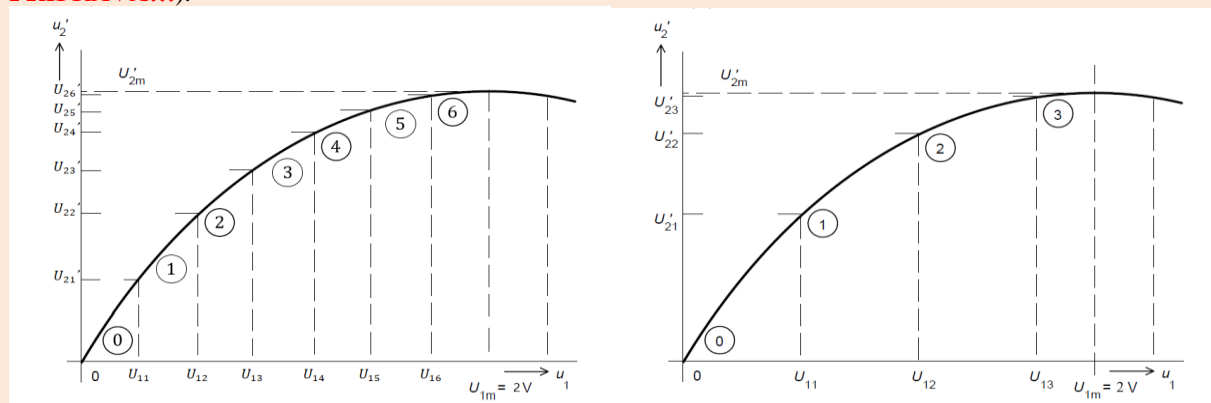
Na generátore (Agilent – 33120A) nastavte trojuholníkový signál o kmitočte 1 kHz. Nastavenie napätia U_{pp} na generátore závisí od hodnoty amplitúdy v oboch tvarovacích obvodoch. 6ti-segmentový tvarovač s nelineárnym deličom má amplitúdu $U_m = 2$ V a 3-segmentový tvarovač s pevne nastaveným deličom má zas hodnotu amplitúdy $U_m = 3$ V. Pomocou funkcie Quick Meas na osciloskope sa presvedčte, či špičkové napätia vstupu a výstupu zodpovedajú požadovanej hodnote ($U_{pp} = 2 \cdot U_m$).

Pri 6ti-segmentovom tvarovači s nelineárnym deličom je nutné použiť voltmeter k sledovaniu napätí vo vetvách, pričom výstup COM prived'te na zem prípravku (zelená dierka) a druhý výstup zapojte do čiernej prístrojovej dierky. Káblom následne prepojte voltmeter so svorkou jednej vetvy v segmente. Postupným prepojovaním nastavte správne napätia pomocných zdrojov vo všetkých segmentoch. Po zobrazení časovky a prevodnej charakteristiky stlačte tlačidlo Math (medzi CH1 a CH2), nastavte FFT (Fourierova transformácia) a vypnite oba kanály osciloskopu. Za pomoci kurzorov (Cursors) v časti Measure, odčítajte hodnoty harmonických zložiek pre určenie THD (veľičina definujúca skreslenie sínusového signálu). Kurzorom X postupne overujte frekvencie spektrálnych zložiek. Jeden z kurzorov Y_1 vytočte úplne na spodok obrazovky osciloskopu a druhý kurzor Y_2 nastavujte na jednotlivé úrovne spektrálnych zložiek. Výsledná hodnota $\Delta Y(M)$ bude zobrazená v pravom dolnom rohu obrazovky. Dbajte na to, aby ste na obrazovke mali stále zobrazené spektrum minimálne s dvojnásobkom základnej harmonickej zložky (prvá harmonickej zložka + minimálne dve vyššie harmonickej zložky). Šírku zobrazeného spektra je možné korigovať za pomoci funkcií Span a Center v časti matematickej funkcií Math.

Pozn. Vyššie harmonickej zložky sú násobkami prvej (základnej) harmonickej zložky.

1.) Stanovte polohy jednotlivých bodov zlomu prevodnej charakteristiky 6ti-segmentového tvarovacieho obvodu s nelineárnym deličom pre obe varianty zapojení (3-segmentové zapojenie = 3 aktívne segmenty a 6ti-segmentové zapojenie = všetkých 6 aktívnych segmentov).

Vypočítajte hodnoty súradníc zlomových bodov (miesta v ktorých sa dióda otvorí a spôsobí ohyb) na vodorovnej i na zvislej ose prevodnej charakteristiky tvarovača. V týchto bodoch uvažujte aproximáciu sínusového signálu úsečkou spájajúcou príslušné body zlomu. Aplikovaním vzťahov z teoretického rozboru vypočítajte hodnoty súradníc zlomových bodov, pomocou ktorých následne určíte hodnoty pomocných zdrojov v jednotlivých segmentoch tvarovacieho obvodu. Pri výpočtoch uvažujte hodnotou amplitúdy $U_{1m} = 2$ V a pre jednoduchosť a jednotnosť počítajte s hodnotou prahového napätia diódy $U_p = 0,6$ V. Výpočty hodnôt súradníc zlomových bodov a pomocných zdrojov súvisia len pre jeden obvod a to pre 6ti-segmentový tvarovač s nelineárnym deličom (umiestnený v dolnej časti prípravku). Z tohto obvodu je možné realizovať dva obvody a to obmedzením počtu tvarovacích segmentov. Zmenu 6ti-segmentového (všetky segmenty aktívne) na 3-segmentový tvarovač (aktívne 3 segmenty) dosiahnete odpojením (uvedením do nečinnosti) niektorých segmentov. Pomocou potenciometrov naladíte nežiadúce segmenty tak, aby v oboch vetvách bolo ideálne nulové napätie. Celý postup výpočtu zopakujte pre obe varianty zapojenia. **Vypočítané hodnoty využijete v poslednej úlohe zadania. (DOMÁCA PRÍPRAVA!!!).**



a) PCH 6ti-segmentového tvarovača

b) PCH 3-segmentového tvarovača

Obr. 2 Prevodné charakteristiky tvarovacích obvodov oboch variant

Poznámka: Pri výpočtoch hodnôt zvislých súradníc majte kalkulačku zapnutú v režime RAD (radiány).

a1.)

$$\begin{aligned}U_{1i} &= (2 \cdot i / 14) \cdot U_{1m} \\U_{11} &= (2 \cdot 1 / 14) \cdot 2 = 0,286 \text{ V} \\U_{12} &= (2 \cdot 2 / 14) \cdot 2 = 0,571 \text{ V} \\U_{13} &= (2 \cdot 3 / 14) \cdot 2 = 0,857 \text{ V} \\U_{14} &= (2 \cdot 4 / 14) \cdot 2 = 1,143 \text{ V} \\U_{15} &= (2 \cdot 5 / 14) \cdot 2 = 1,429 \text{ V} \\U_{16} &= (2 \cdot 6 / 14) \cdot 2 = 1,714 \text{ V}\end{aligned}$$

a2.)

$$\begin{aligned}U_{2m}' &= U_{11} / \sin((U_{11} / U_{1m}) \cdot (\pi / 2)) \\U_{2m}' &= 0,286 / \sin((0,286 / 2) \cdot (\pi / 2)) \\U_{2m}' &= 1,284 \text{ V}\end{aligned}$$

a3.)

$$\begin{aligned}u_2' &\cong U_{2m}' \cdot \sin((u_1 / U_{1m}) \cdot (\pi / 2)) \\U_{21}' &\cong U_{2m}' \cdot \sin((U_{11} / U_{1m}) \cdot (\pi / 2)) \\U_{21}' &\cong 1,284 \cdot \sin((0,286 / 2) \cdot (\pi / 2)) \\U_{21}' &\cong 0,286 \text{ V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_{22}' &\cong 1,284 \cdot \sin((0,571 / 2) \cdot (\pi / 2)) \\U_{22}' &\cong 0,557 \text{ V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_{23}' &\cong 1,284 \cdot \sin((0,857 / 2) \cdot (\pi / 2)) \\U_{23}' &\cong 0,800 \text{ V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_{24}' &\cong 1,284 \cdot \sin((1,143 / 2) \cdot (\pi / 2)) \\U_{24}' &\cong 1,004 \text{ V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_{25}' &\cong 1,284 \cdot \sin((1,429 / 2) \cdot (\pi / 2)) \\U_{25}' &\cong 1,157 \text{ V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_{26}' &\cong 1,284 \cdot \sin((1,714 / 2) \cdot (\pi / 2)) \\U_{26}' &\cong 1,252 \text{ V}\end{aligned}$$

a4.)

$$\begin{aligned}U_{Zi} &= U_{2i}' - U_P \\U_{Z1} &= U_{21}' - 0,6 \\U_{Z1} &= 0,286 - 0,6 \\U_{Z1} &= -0,31 \text{ V} \\U_{Z2} &\cong 0 \text{ V} \\U_{Z3} &= 0,20 \text{ V} \\U_{Z4} &= 0,40 \text{ V} \\U_{Z5} &= 0,56 \text{ V} \\U_{Z6} &= 0,65 \text{ V}\end{aligned}$$

b1.)

$$\begin{aligned}U_{1i} &= (2 \cdot i / 7) \cdot U_{1m} \\U_{11} &= (2 \cdot 1 / 7) \cdot 2 = 0,571 \text{ V} \\U_{12} &= (2 \cdot 2 / 7) \cdot 2 = 1,143 \text{ V} \\U_{13} &= (2 \cdot 3 / 7) \cdot 2 = 1,714 \text{ V}\end{aligned}$$

b2.)

$$\begin{aligned}U_{2m}' &= U_{11} / \sin((U_{11} / U_{1m}) \cdot (\pi / 2)) \\U_{2m}' &= 0,571 / \sin((0,571 / 2) \cdot (\pi / 2)) \\U_{2m}' &= 1,317 \text{ V}\end{aligned}$$

b3.)

$$\begin{aligned}u_2' &\cong U_{2m}' \cdot \sin((u_1 / U_{1m}) \cdot (\pi / 2)) \\U_{21}' &\cong U_{2m}' \cdot \sin((U_{11} / U_{1m}) \cdot (\pi / 2)) \\U_{21}' &\cong 1,317 \cdot \sin((0,571 / 2) \cdot (\pi / 2)) \\U_{21}' &\cong 0,571 \text{ V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_{22}' &\cong 1,317 \cdot \sin((1,143 / 2) \cdot (\pi / 2)) \\U_{22}' &\cong 1,030 \text{ V}\end{aligned}$$

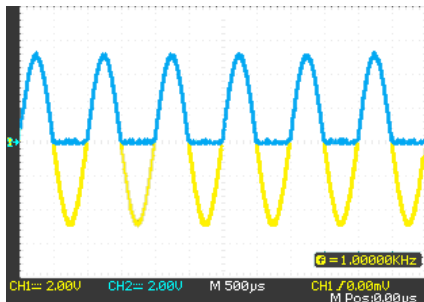
$$\begin{aligned}U_{23}' &\cong 1,317 \cdot \sin((1,714 / 2) \cdot (\pi / 2)) \\U_{23}' &\cong 1,284 \text{ V}\end{aligned}$$

b4.)

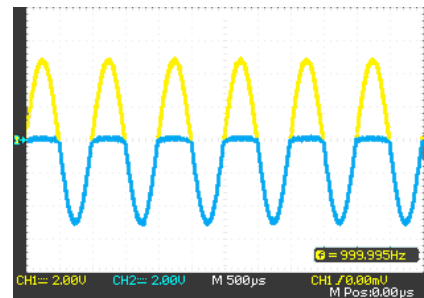
$$\begin{aligned}U_{Zi} &= U_{2i}' - U_P \\U_{Z1} &= U_{21}' - 0,6 \\U_{Z1} &= 0,571 - 0,6 \\U_{Z1} &\cong 0 \text{ V} \\U_{Z2} &= 0,43 \text{ V} \\U_{Z3} &= 0,69 \text{ V}\end{aligned}$$

⚡ Kvôli zdĺhavým a zložitým výpočtom hodnôt rezistorov v tvarovacích obvodoch, boli tieto výpočty vynechané. Jednotlivé segmenty sa od seba líšia práve v rôznych hodnotách rezistorov a pomocných zdrojov. Preto je potrebné nastaviť veľkosti napätí pomocných zdrojov vypočítané v rámci **(DOMÁCEJ PRÍPRAVY!!!)** na správne pozície. Na prípravku nie je vyznačené poradie segmentov, z toho dôvodu uvažujte poradie segmentov 1 až 6 v smere čítania (zľava => doprava). Hodnoty U_{Z1} , U_{Z2} a U_{Z3} pri 3-segmentovom zapojení nastavte na segmenty 1 až 3 a zvyšné deaktivujte (nastavte na nich nulové napätie). Zapojenie 6ti-segmentového tvarovača s nelineárnym deličom pri použití všetkých segmentov korešponduje s poradím: U_{Z3} , U_{Z5} , U_{Z6} , U_{Z1} , U_{Z4} a U_{Z2} . Toto poradie súvisí s hodnotami odporových deličov v jednotlivých segmentoch. Obidve zapojenia majú v prvých troch segmentoch rovnaké hodnoty odporov, zatiaľ čo v ostatných sú hodnoty odporových deličov rozdielne. Z toho dôvodu je usporiadanie pomocných zdrojov na prípravku v takomto poradí. Hodnota pomocného zdroja U_{Z2} je zanedbateľne malá hodnota (takmer nulová), preto nie je dôvod regulovať napätie na pomocných zdrojoch, tým pádom posledná vetva tvarovača neobsahuje potenciometer. V prípade nedokonalého tvaru sínusového signálu po nastavení hodnôt pomocných zdrojov z domácej prípravy je potrebné obvod mierne doladiť (jemne zvýšiť/znížiť napätia v niektorom zo segmentov).

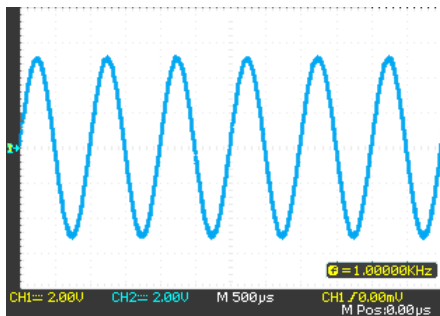
2.) Zobrazte časové priebehy obojstranného obmedzovača v konkrétnych polohách výrezu signálu. Zakreslite jednotlivé priebehy do príslušných grafov. V bodoch 1-4 privedte na vstup sínusový signál, v bode 5 trojuholníkový a v bode 6 obdĺžnikový signál o kmitočte $f = 1 \text{ kHz}$. Na generátore nastavte špičkové napätie $U_{pp} = 5 \text{ V}$. Nezabudnite na vyznačenie osí v obrázkoch!



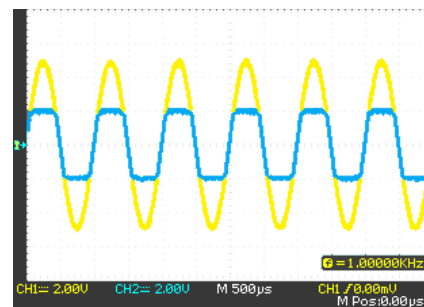
1. Výrez hornej časti



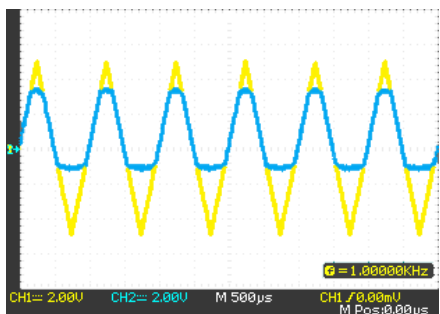
2. Výrez dolnej časti



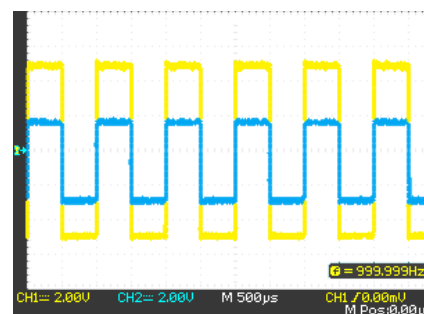
3. Bez výrezu



4. Obojstranný výrez v polovici priebehu



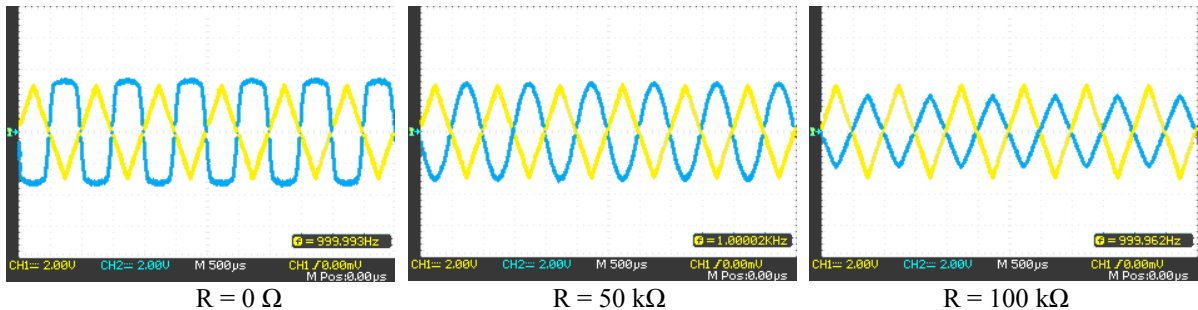
5. Ľubovoľný výrez



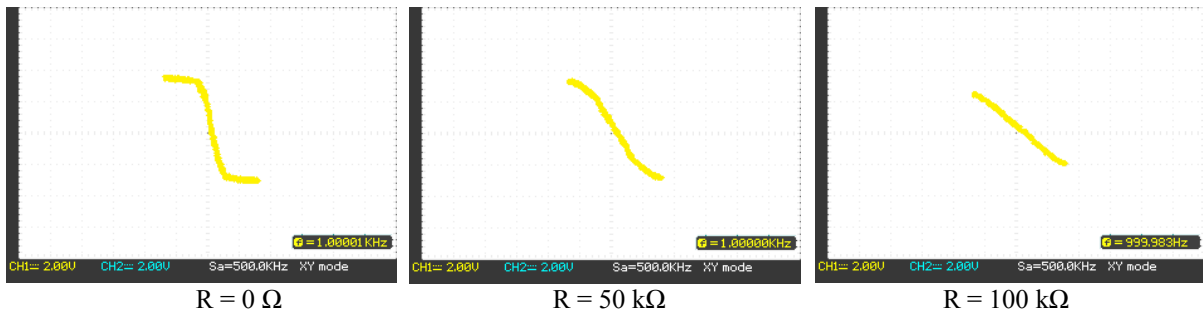
6. Ľubovoľný výrez

Obr. 3 Časové priebehy obojstranného obmedzovača

3.) Do príslušných grafov zakreslite časové priebehy a priebehy prevodných charakteristík 3-segmentového tvarovacieho obvodu s pevne nastaveným deličom pre rôzne hodnoty odporov, ktoré nastavíte pomocou potenciometra. Pre vykreslenie prevodnej charakteristiky (závislosť výstupného napätia na vstupnom) použite na osciloskope X-Y režim. Nezabudnite na vyznačenie osí v obrázkoch! Do tabuľky zaznamenajte hodnoty $\Delta Y(M)$ jednotlivých harmonických zložiek v spektrálnom zobrazení a určite THD (skreslenie sínusového signálu) pre rôzne kmitočty. V spodnej časti uveďte hodnoty frekvencie a THD pri ktorej bolo skreslenie najmenšie.



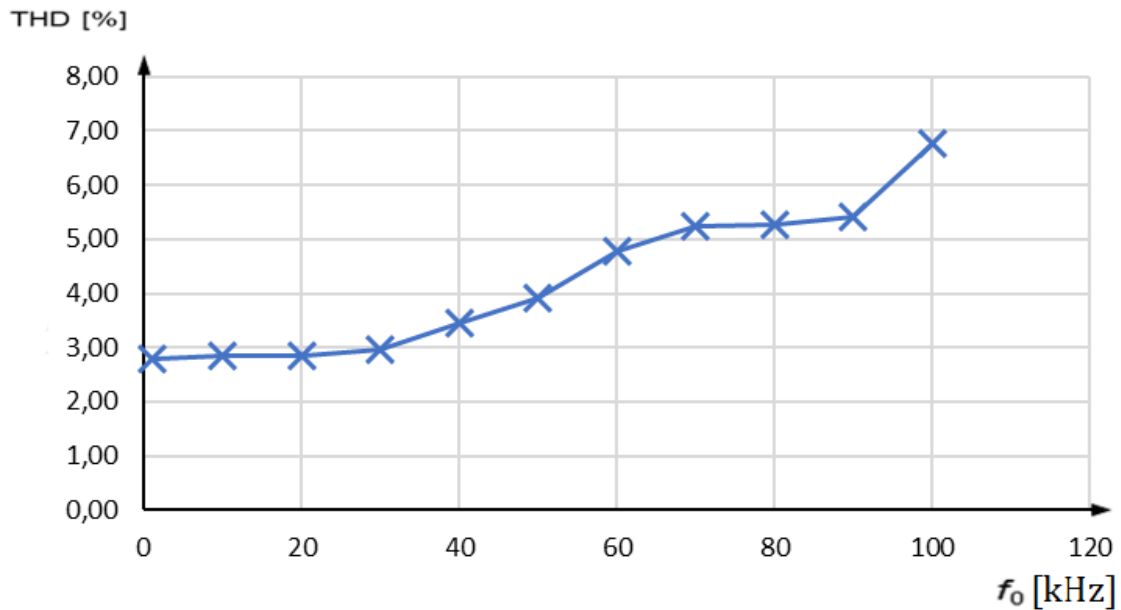
Obr. 4 Časové priebehy 3-segmentového tvarovača s pevne nastaveným deličom



Obr. 5 Prevodné charakteristiky 3-segmentového tvarovača s pevne nastaveným deličom

f [kHz]	$\Delta Y(M1)$ [dB]	$\Delta Y(M2)$ [dB]	$\Delta Y(M3)$ [dB]	$\Delta Y(M4)$ [dB]	$\Delta Y(M5)$ [dB]	$\Delta Y(M6)$ [dB]	THD _{OUT} [%]
1	72,8	25,0	38,4	17,2	38,8	12,2	2,80
10	72,5	21,6	41,3	16,0	28,4	15,3	2,85
20	72,5	20,8	41,3	19,4	28,6	15,0	2,85
30	72,8	21,6	41,6	30,3	28,4	25,6	2,96
40	73,4	21,9	43,8	31,9	27,5	13,1	3,46
50	72,8	21,9	44,1	34,4	16,3	28,1	3,92
60	72,2	22,2	45,3	34,4	30,0	22,8	4,78
70	73,1	20,0	47,2	35,0	14,1	27,1	5,25
80	73,1	22,5	47,2	17,2	36,0	17,2	5,27
90	73,1	20,9	47,2	37,2	31,6	26,0	5,40
100	72,2	21,9	48,4	15,0	38,4	15,0	6,78
f = 1 kHz							
THD = 2,80 %							

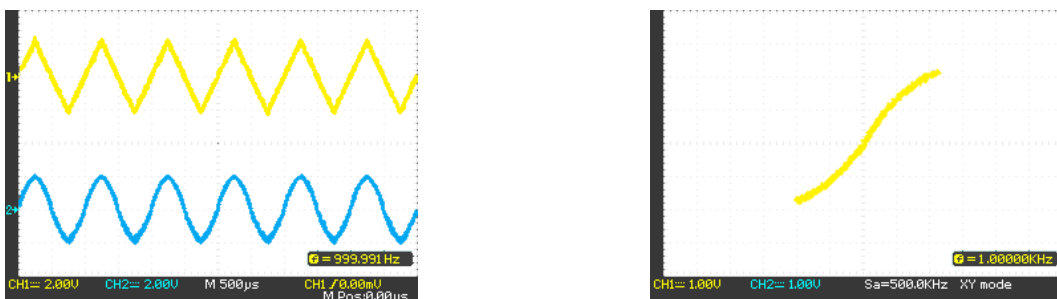
Tab. 1 Závislosť THD na kmitočte pre 3-segmentový tvarovač s pevne nastaveným deličom



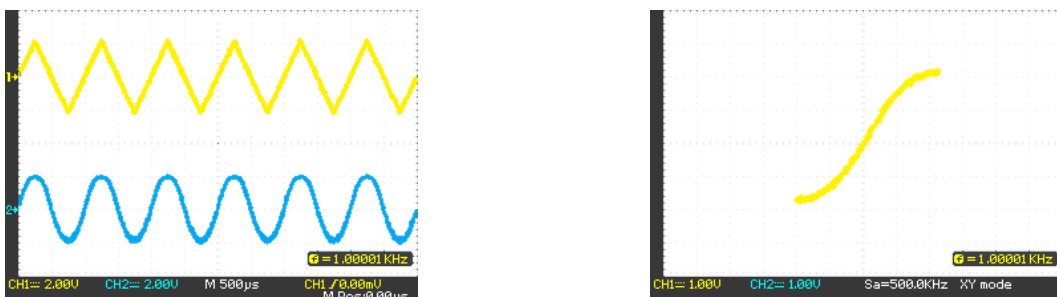
Obr. 6 Graf závislosti THD na kmitočte pre 3-segmentový tvarovač s pevne nastaveným deličom

Vzorec pre výpočet THD napätia:	Prepočet: $\Delta Y(M) [dB] \Rightarrow [V]$
$THD_u = \frac{\sqrt{v_2^2 + v_3^2 + v_4^2 + \dots + v_n^2}}{v_1} \cdot 100 [\%]$	$\Delta Y(M) = 10^{\frac{dB}{20}} [V]$
Keďže hodnoty spektrálnych zložiek $\Delta Y(M)$ sú zobrazované v dB je potrebné tieto hodnoty prepočítať na volty!	

4.) Obdobne ako v úlohe 3.) zakreslite do príslušných grafov časové priebehy a priebehy prevodných charakteristík 6ti-segmentového tvarovacieho obvodu s nelineárnym deličom pre obidve zapojenia (3-segmentové zapojenie = 3 aktívne segmenty a 6ti-segmentové zapojenie = všetkých 6 aktívnych segmentov). Tabuľky pre určenie hodnoty skreslenia THD vyplňte ako v predchádzajúcej úlohe pre obidve zapojenia. Závislosť THD na kmitočte pre obidve zapojenia vynesť do jedného grafu. Nezabudnite na vyznačenie osí v obrázkoch!



Obr. 7 Časový priebeh a prevodná charakteristika tvarovača v 3-segmentovom zapojení



Obr. 8 Časový priebeh a prevodná charakteristika tvarovača v 6-segmentovom zapojení

Popíšte zmeny priebehov pri:

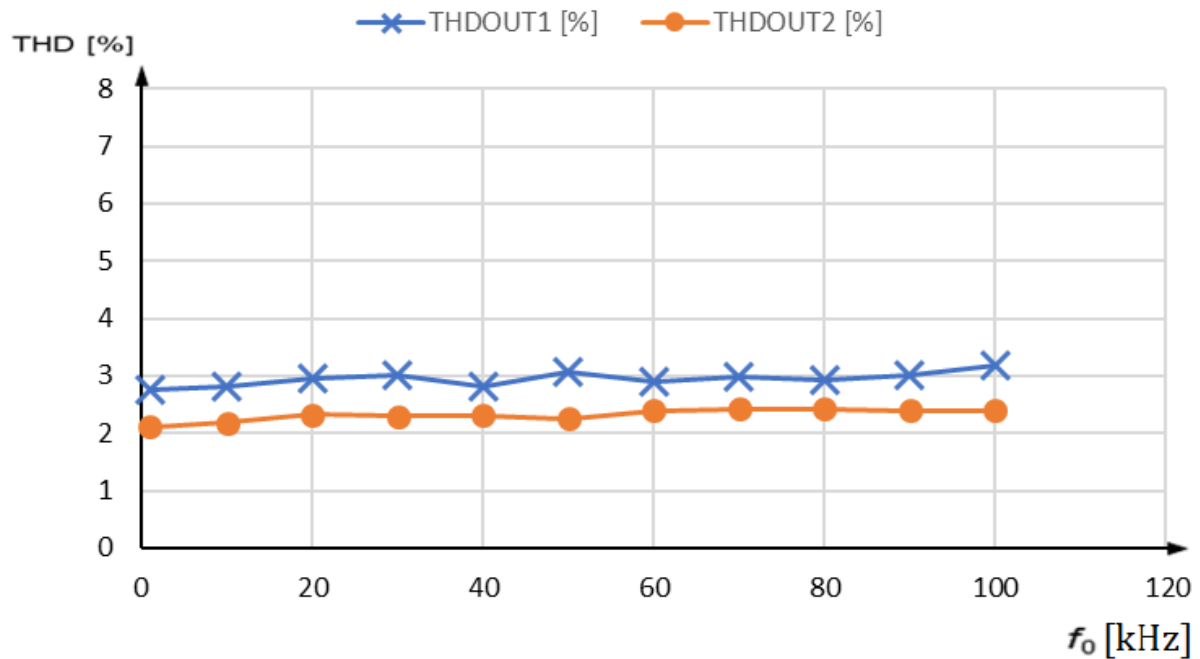
- a) Nastavovaní hodnôt vstupného napätia na generátore (U_{pp}) v rozsahu od 0-10 V.
 - pri zmenách hodnôt vstupného napätia dochádza k posunu zlomových bodov na pozície, ktoré neboli tomuto obvodu určené, čo má za následok zmenu tvaru priebehu
 - pri malých hodnotách napätia má priebeh trojuholníkový charakter a pri veľkých hodnotách obdĺžnikový
- b) Prelad'ovani hodnôt pomocných zdrojov napätí pomocou potenciometrov.
 - dochádza nie len k zmene tvaru priebehu ale spôsobuje aj zmenu offsetu signálu

f [kHz]	$\Delta Y(M1)$ [dB]	$\Delta Y(M2)$ [dB]	$\Delta Y(M3)$ [dB]	$\Delta Y(M4)$ [dB]	$\Delta Y(M5)$ [dB]	$\Delta Y(M6)$ [dB]	THD _{OUT1} [%]
1	70,3	29,4	37,8	25,0	29,7	15,0	2,76
10	70,0	28,8	37,8	25,0	29,1	16,0	2,82
20	70,0	29,4	38,4	23,1	27,8	19,1	2,95
30	70,0	30,0	38,4	23,4	29,4	19,4	3,02
40	70,0	26,6	37,5	22,5	32,0	18,1	2,81
50	69,7	29,4	38,4	20,9	29,1	17,8	3,07
60	69,7	29,1	37,5	21,6	19,1	30,6	2,89
70	69,7	30,0	37,5	24,1	31,3	20,9	2,99
80	69,7	25,9	37,5	24,1	31,6	23,1	2,92
90	69,7	29,1	37,8	22,5	31,3	17,2	3,00
100	69,7	28,4	38,8	23,8	28,4	23,1	3,18
f = 1 kHz							
THD = 2,76 %							

Tab. 2 Závislosť THD na kmitočte pre 3-segmentové zapojenie

f [kHz]	$\Delta Y(M1)$ [dB]	$\Delta Y(M2)$ [dB]	$\Delta Y(M3)$ [dB]	$\Delta Y(M4)$ [dB]	$\Delta Y(M5)$ [dB]	$\Delta Y(M6)$ [dB]	THD _{OUT2} [%]
1	70,6	36,6	19,1	22,5	18,8	23,1	2,11
10	70,6	36,6	22,5	18,4	19,7	27,2	2,18
20	70,3	36,9	18,1	20,6	21,2	27,5	2,32
30	70,3	36,9	20,3	18,1	20,0	26,9	2,30
40	70,3	36,9	17,8	15,6	22,2	27,5	2,31
50	70,3	36,6	19,1	21,6	21,6	27,2	2,26
60	70,3	37,2	22,5	19,1	21,6	26,9	2,39
70	70,3	37,2	23,1	18,8	20,9	27,8	2,42
80	70,3	37,2	23,8	17,2	21,9	27,8	2,42
90	70,3	36,9	25,0	19,7	22,2	27,1	2,39
100	70,3	36,9	25,9	21,6	21,6	27,8	2,40
f = 1 kHz							
THD = 2,11 %							

Tab. 3 Závislosť THD na kmitočte pre 6ti-segmentové zapojenie



Obr. 9 Graf závislosti THD na kmitočte pre 6ti-segmentový tvarovač s nelineárnym deličom

ZÁVER: Z nameraných hodnôt a zobrazených priebehov porovnajte tvarovacie obvody a uvážte, ktorý z nich je lepší a prečo. Uveďte hodnoty frekvencií a hodnoty THD pri najmenšom skreslení. Komentujte každý bod zadania.

Kontrolné otázky:

1. Ako musí byť zapojená dióda aby spôsobila ohyb v hornej časti sínusového signálu ?
2. Je aproximácia sínusového signálu u oboch tvarovacích obvodoch rovnako presná ?
3. Prečo nezáleží pri obojstrannom obmedzovači na tvare vstupného signálu ?