

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Speciální funkční generátor

vedoucí práce: Ing. Martin Pittermann, Ph.D.
autor: Tomáš Svoboda

2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš SVOBODA**
Osobní číslo: **E09B0053K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Speciální funkční generátor**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Sestavte speciální funkční generátor pro výukové účely v laboratoři KEV. Práce bude obsahovat tyto body :

1. Přehled typických laboratorních úloh pro využití zamýšleného funkčního generátoru a rozvaha možnosti použití funkčních generátorů dostupných na trhu.
2. Stručný popis variant realizace funkčního generátoru a bližší popis zvolené varianty funkčního generátoru.
3. Stavba a oživení zvolené varianty funkčního generátoru.
4. Ověření vlastností postaveného funkčního generátoru (naměřené průběhy, popis dosažených parametrů).
5. Stručný návod pro uživatele.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Pittermann, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Křís, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předkládaná bakalářská práce se věnuje problematice speciálních funkčních generátorů a to konkrétně generátoru pulzně šířkové modulace – PWM. Úvodní část je zaměřena na přehled dostupných generátorů na našem trhu a seznámení s danou problematikou. Dále se práce zabývá konstrukcí takových generátorů, k čemu se používají a popisem samotné realizace návrhu a stavby PWM generátoru pro školní účely s rozбором jeho jednotlivých částí a popisem jejich funkce. V závěru je shrnutí všech výsledků ke kterým autor dospěl.

Klíčová slova

PWM pulzně šířková modulace, střída, generátor funkcí, relaxační generátor, operační zesilovač

Abstract

The submitted Bachelor's thesis deals with the problems of the special function generators, namely of the generator of the pulse width modulation - PWM. The introductory part is focused on the overview of generators available at our market and on familiarization with the given problems. After that the thesis deals with the construction of these generators, purposes of their use and a description of the design and construction of a PWM generator for teaching, studying and laboratory purposes including an analysis of the individual parts and a description of their function. At the end there is a summary of all the results that the author has come to.

Key words

PWM - Pulse width modulation, Duty cycle, Relaxation oscillator, Operational amplifier

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, který byl použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 14. června 2013

.....

Tomáš Svoboda

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat všem, kteří mi byli přímo či nepřímo nápomocni při přípravě a realizaci této bakalářské práce. Vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinovi Pittermannovi, Ph.D. děkuji za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 POŽADAVEK NA GENERÁTOR.....	11
1.1 PŘEHLED TYPICKÝCH ÚLOH PRO POUŽITÍ GENERÁTORU	11
1.2 DOSTUPNÉ GENERÁTORY NA TRHU.....	12
1.2.1 <i>Goodwill Instek AFG3051</i>	13
1.2.2 <i>Goodwill Instek SFG-2120</i>	13
1.2.3 <i>HAMEG HM 8030-6</i>	14
1.2.4 <i>HAMEG MHF2525</i>	14
1.2.5 <i>METEX MXG-9810</i>	15
1.2.6 <i>OWON 4151</i>	15
1.2.7 <i>Rigol DG2041A</i>	16
1.2.8 <i>Tektronix AFG3022B</i>	16
1.2.9 <i>Sigenol DDS7</i>	17
2 POPIS VARIANTY REALIZACE GENERÁTORU	18
2.1 MOŽNÁ ŘEŠENÍ PWM.....	18
2.2 PRINCIP PWM	19
2.3 POUŽITÍ PWM.....	21
2.4 NEVÝHODY PWM	21
2.5 VÝHODY PWM	22
2.6 OPERAČNÍ ZESILOVAČ	22
2.6.1 <i>Invertující zesilovač</i>	23
2.6.2 <i>Neinvertující zesilovač</i>	23
2.6.3 <i>Sledovač napětí</i>	23
2.6.4 <i>Komparátor</i>	24
2.6.5 <i>Integrační zesilovač</i>	24
2.6.6 <i>Derivační zesilovač</i>	24
3 STAVBA VLASTNÍHO GENERÁTORU	25
3.1 NAPÁJECÍ ZDROJ	25
3.2 SCHÉMA ZAPOJENÍ GENERÁTORU	26
3.3 PRINCIP ČINNOSTI GENERÁTORU.....	27
3.4 DALŠÍ FUNKCE ZAPOJENÍ	29
3.5 STAVBA PROTOTYPU	30
4 OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ GENERÁTORU.....	32
4.1 NAMĚŘENÉ PARAMETRY.....	32
5 NÁVOD K POUŽITÍ.....	36
ZÁVĚR	37
POUŽITÁ LITERATURA.....	38
SEZNAM OBRÁZKŮ	40
SEZNAM PŘÍLOH.....	41
PŘÍLOHA A – SCHÉMA ZAPOJENÍ	I
PŘÍLOHA B – SEZNAM SOUČÁSTEK.....	II

Seznam symbolů a zkratek

A/D	analogově digitální převodník
ADC	Analog to Digital Converter – analogově digitální převodník
AGND	Analog Ground – analogová zem
AM	Amplitudová modulace
AVDD	Analog Voltage Drain Drain – analogové kladné napájecí napětí
D/A	Digitálně Analogový převodník
DAC	Digital to Analog Converter – digitálně analogový převodník
DGND	Digital Ground – digitální zem
DVDD	Digital Voltage Drain Drain – digitální kladné napájecí napětí
Driver	Výkonový spínací prvek Central Processing Unit – centrální procesorová jednotka
Duty Cycle	Střída – poměr času sepnutí „log 1“ a rozepnutí „log 0“ v jedné periodě
EAGLE	software pro návrh plošných spojů
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory – elektricky mazatelná paměť typu ROM
EPROM	Electrically Programmable Read-Only Memory – elektricky programovatelná paměť typu ROM
Flash/EE	Obdobu EEPROM
FM	Frekvenční modulace
FSK	Frequency Shift Keying – klíčování frekvenčním posuvem
GND	Ground – zem
IGBT	Insulated Gate Bipolar Tranzistor – bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
LED	Light-Emitting Diode – dioda emitující světlo
OFF	vypnuto
ON	zapnuto
PWM	Pulse Width Modulation – pulzně šířková modulace
polling	Obsluha přerušování programu operačním systémem
ROM	Read Only Memory – paměť s přístupem jen pro čtení
SMD	surface mount device – součástka pro povrchovou montáž plošných spojů
SMT	surface mount technology – technologie pro povrchovou montáž součástek na plošné spoje
$\pm u_{sat}$	Saturační napětí
OZ	Operační zesilovač
VDD	
PM	Phase Modulation – fázová modulace
VDD	Voltage Drain Drain – kladné napájecí napětí pro polem řízené tranzistory
VSS	Voltage Substrate Sources – záporné napájecí napětí pro polem řízené tranzistory
VCC	Voltage Common Collector – kladné napájecí napětí pro bipolární tranzistory
VEE	Voltage Emitter Emitter – záporné napájecí napětí pro bipolární tranzistory
C [F]	Kapacita [farad]
R [Ω]	Odpor [ohm]
L [H]	Indukčnost [henry]
U [V]	Napětí [volt]
I [A]	Proud [ampér]

Úvod

Pro měření laboratorních úloh předmětu KEV/SOV – Spínací obvody výkonových součástek na KEV - Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky na FEL - Fakulta elektrotechnická, ZČU- Západočeská univerzita v Plzni, vyvstal požadavek pro měření na pulzních měničích a jejich driverech (výkonový spínací prvek) při aplikacích regulace výkonu pomocí pulzně šířkové modulace - PWM. Generátor PWM je zařízení, které generuje pulzy PWM například jako spínací impulzy pro IGBT tranzistory.

Cílem této práce je seznámení s danou problematikou, přehledem dostupných funkčních generátorů na našem trhu s využitím internetových obchodů s elektronickými součástkami.

Hlavním cílem je návrh takového jednoduchého generátoru, který by splnil nároky na něj kladené s potřebnými funkcemi a parametry.

Při realizaci návrhu a stavbě tohoto generátoru v této práci, jsem využil své dlouholeté zkušenosti se stavbou oživování či opravou různých jednoduchých či složitějších konstrukcí, jelikož je elektronika, stejně jako historické počítače mým koníčkem.

Stavba je proto zaměřena na výrobu funkčního vzorku takového PWM generátoru z běžně dostupných součástek.

1 Požadavek na generátor

Při měření v laboratořích KEV - Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky na FEL/ZČU bylo požadováno pro měření školních úloh při oživování konstrukcí pulzních měničů, jejich driverů (výkonový spínací prvek) a pro regulaci výkonu motorů, realizovat toto pomocí jednoduchého generátoru PWM.

PWM (Pulse Width Modulation) je pulzně šířková modulace, která slouží pro přenos analogového signálu pomocí binárního tedy dvouhodnotového signálu, kdy pro přenos je možno použít pulzy napětí, proudu či světelného toku a užitečný signál je modulovaný pomocí změny střídy, což je poměr doby sepnutí vůči době rozepnutí v jednom časovém úseku. [2]

Například při použití řízení motoru napájeného pulzním měničem dochází k zachování kroutícího (točivého) momentu motoru, což umožňuje provoz takového stroje od velmi nízkých otáček a hlavně narozdíl od řízení úbytkem napětí na lineárním prvku, je snížení výkonové ztráty na regulačním prvku (typicky tranzistor) a tím snížení výkonové ztráty celého regulátoru na minimum.

Hlavním požadavkem je tedy rozsah střídy generované PWM modulace od 0 do 100% šířky pulzů v jedné periodě.

1.1 Přehled typických úloh pro použití generátoru

PWM generátor lze využít například:

- použití pro řízení tranzistorů ve snižovacím nebo zvyšovacím pulzním měniči
- pro řízení výkonových prvků napěťových střídačů
- použití pro řízení tranzistorů ve snižovacím nebo zvyšovacím pulzním měniči
- v automobilovém průmyslu viz kapitola 2.3

Pro realizaci a praktické použití takových generátorů se užívají jednoúčelové obvody například speciální periferie mikropočítačů určených pro řízení PWM.

Cílem této práce je vyvinout speciální blok pro generování řídicích signálů PWM modulace pro laboratorní využití, u kterého je možno nastavovat různé parametry.

1.2 Dostupné generátory na trhu

Při požadavku na zakoupení vhodného přístroje byly zohledněny parametry takového přístroje, jeho dostupnost od dodavatelů, kteří mají zastoupení České Republiky a v neposlední řadě i dostupnost cenová s ohledem na potřebu vybavit laboratoře více kusy takových přístrojů.

Většina generátorů disponuje stejnými nebo více méně podobnými parametry, a pokud nějakým parametrem vybočuje, tak je to na úkor absence některých funkcí nebo horších parametrů těchto funkcí.

Popisované generátory jsou koncipovány jako stolní nebo přenosné přístroje středních rozměrů a podobné hmotnosti kolem 3kg, proto budou popisovány respektive porovnávány jen jejich elektrické parametry, které jsou požadovány. Zmíněné přístroje jsou seřazeny abecedně a současně jsou u nich stručně uvedeny jejich hlavní parametry, dále pak cena, dostupnost a také jejich obrázky. Z původně objemného seznamu pak byly vyřazeny generátory, které již nejsou dostupné na našem trhu, buďto z důvodu že se již nevyrábí a nebo že je dovozce již vyřadil z nabídky, protože jej nahradil jiný, novější model nebo zásadně nesplňovaly žádané parametry.

Hlavním kritériem pro výběr byla tedy funkce generování PWM a parametr Duty cycle.

1.2.1 Goodwill Instek AFG3051

Obchodní značka GW Instek (GoodWill) cena 42.450,-Kč vč.DPH[20]

Frekvenční rozsah 1 μ Hz - 50MHz

rozlišení 1 μ Hz

modulace AM, FM, PWM, FSK, vestavěný Arbitrární generátor s parametry 16bit, 200MSa/s.

Parametr Duty cycle – střída obdélníkového signálu je v rozsahu 20% - 80% periody.[4]



Obr. 1.1 Generátor Goodwill Instek AFG3051

Tento generátor je nevhodný díky nedostatečnému rozsahu střídání, který je jen 20-80% periody a vysokou cenou 42.450,-Kč.

1.2.2 Goodwill Instek SFG-2120

Obchodní značka GW Instek (GoodWill) cena 16.690,-Kč vč.DPH[21]

Frekvenční rozsah 1Hz - 20MHz

rozlišení 1Hz

modulace AM, FM, PWM, FSK, sweep

Vestavěný čítač kmitočtu až 150 MHz

Parametr Duty cycle – střída obdélníkového signálu je v rozsahu 20% - 80% periody.[5]



Obr. 1.2 Generátor Goodwill Instek SFG-2120

Tento generátor je nevhodný díky nedostatečnému rozsahu střídání, který je jen 20-80% periody.

1.2.3 HAMEG HM 8030-6

Obchodní značka HAMEG cena 16.690,-Kč vč.DPH[22]

Frekvenční rozsah 50mHz - 10MHz

Zkreslení <0,5% nad 1MHz

modulace FM, sweep

Parametr Duty cycle – střída obdélníkového signálu je v rozsahu 10% - 90% periody.[6]



Obr. 1.3 Generátor HAMEG HM 8030-6

Také tento generátor má nedostatečný rozsah střídání, který je vyšší než u předchozích a to 10-90% periody, ale stále nedostatečný.

1.2.4 HAMEG MHF2525

Obchodní značka HAMEG cena 28.222,-Kč bez.DPH[23]

Frekvenční rozsah 10 μ Hz - 25MHz

rozlišení 1 μ Hz

modulace AM, FM, PM, PWM, FSK, sweep, Vestavěný Arbitrární generátor 250 MS/s

Možnost řízení z nadřazeného počítače přes rozhraní RS232/USB, IEEE-488, USB/LAN

Parametr Duty cycle – střída obdélníkového signálu je v rozsahu: 0,01 - 99,99 % [9]



Obr. 1.4 Generátor HAMEG MHF2525

Tento generátor by byl vhodný pro parametry střídání, nikoliv však cenově.

1.2.5 METEX MXG-9810

Obchodní značka METEX cena 12.150,-Kč vč.DPH[10]

Frekvenční rozsah 1Hz - 10MHz

modulace sweep

Parametr Duty cycle – střída obdélníkového uvedena jako 1:3-3:1 to odpovídá 30-70% [10]



Obr. 1.5 Generátor METEX MXG-9810

Tento generátor je nevhodný díky nedostatečnému rozsahu střídání, který je jen 30-70% periody.

1.2.6 OWON 4151

Obchodní značka OWON cena 25.110,-Kč vč.DPH[11]

Frekvenční rozsah 1 μ Hz - 150MHz

Frekvenční rozlišení 32bitů

modulace AM, FM, PM, PWM, FSK, Sweep, Burst, Vestavěný Arbitrární generátor 1 μ Hz - 10MHz

Možnost řízení z nadřazeného počítače přes rozhraní RS232/USB, IEEE-488, USB/LAN

Parametr Duty cycle – střída obdélníkového signálu je v rozsahu 20% - 80% periody. [11]



Obr. 1.6 Generátor OWON 4151

Tento generátor je nevhodný díky nedostatečnému rozsahu střídání, který je jen 20-80% periody.

1.2.7 Rigol DG2041A

Obchodní značka Rigol cena 24.890,-Kč vč.DPH[12]

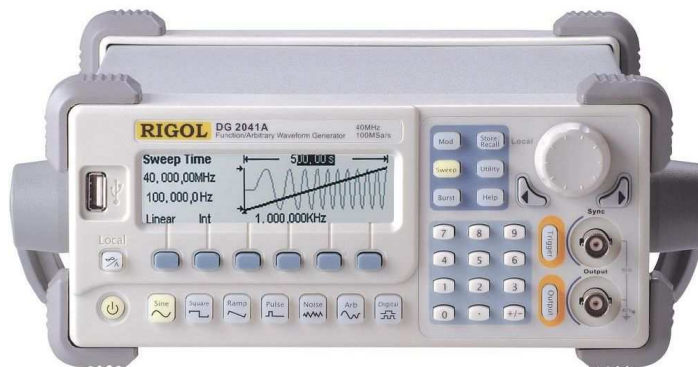
Frekvenční rozsah 1 μ Hz - 40MHz

Frekvenční rozlišení 1 μ Hz

modulace AM, FM, PM, PWM, FSK, Sweep, Burst, Vestavěný Arbitrární generátor 100 MS/s

Možnost řízení z nadřazeného počítače přes rozhaní RS232,USB, IEEE-488, LAN

Parametr Duty cycle – střída obdélníkového signálu je v rozsahu 20% - 80% periody. [12]



Obr. 1.7 Generátor Rigol DG2041A

Tento generátor je nevhodný díky nedostatečnému rozsahu střídání, který je jen 20-80% periody.

1.2.8 Tektronix AFG3022B

Obchodní značka Tektronix cena 66.600,-Kč bez.DPH [24]

Frekvenční rozsah 1 μ Hz - 25MHz

Frekvenční rozlišení 1 μ Hz

modulace AM, FM, PM, PWM, FSK, Sweep, Burst

Možnost řízení z nadřazeného počítače přes rozhaní RS232,USB, IEEE-488, LAN

Parametr Duty cycle – střída obdélníkového signálu je v rozsahu 0.001% to 99.999% periody. [13]



Obr. 1.8 Generátor Tektronix AFG3022B

Tento generátor by byl vhodný svými parametry střídání, nikoliv však cenově.

1.2.9 Sigenol DDS7

Obchodní značka Sigenol cena 6.149,-Kč bez.DPH [25]

Frekvenční rozsah 0Hz - 23MHz

Frekvenční rozlišení ± 50 ppm

modulace AM, FM, PWM, FSK, Sweep, Burst

Parametr Duty cycle – střída obdélníkového signálu uvedeno:Rozsah modulace střídá 0% - 100% [14]



Obr. 1.9 Generátor Sigenol DDS7

Na tento model jsem narazil až po realizaci mého PWM generátoru na doporučení.

Tento generátor by byl vhodný svými parametry díky dostatečnému rozsahu střídá, který je uveden 0-100% periody a také díky nízké ceně (v dokumentaci výrobce není uvedeno zda rozsah 0-100% je skutečně od úplné nuly až do 100% nebo se jedná o jinou minimální a maximální hodnotu).

Protože jde o český výrobek a je možné dodat i samotný modul k zástavbě do panelu za nižší cenu, zdá se jako vhodný kandidát, bohužel má malou reklamu.

2 Popis varianty realizace generátoru

2.1 Možná řešení PWM

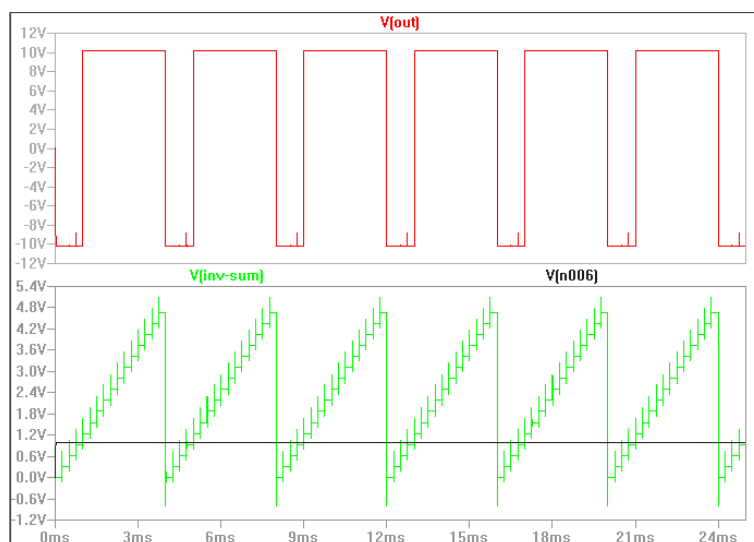
Generování signálu PWM je možno realizovat několika způsoby, základem je generátor pilového nebo trojúhelníkového průběhu

Samotný generátor pilového nebo trojúhelníkového průběhu lze realizovat několika způsoby a to :

Pomocí relaxačního generátoru tvořeného operačními zesilovači, tato varianta je použita při samotné realizaci funkčního generátoru PWM.

Astabilním klopným obvodem s tranzistory klasickým zapojením s integračním RC článkem. Nevýhodou je nestabilita a nelinearita při požadovaném frekvenčním rozsahu.

Pomocí čítače který je napájen hodinovými impulzy a na výstupu takového čítače je jednoduchý D/A převodník například tvořený rezistorovou sítí R2R s integračním OZ. Čítač inkrementuje vnitřní registr jenž odpovídá binární hodnotě na jeho výstupech. Při dosažení maximální hodnoty se čítač automaticky vynuluje a znovu načítá od nuly. Výstupem je pak pilovitý průběh napětí na výstupu integračního OZ. Nevýhodou je nedokonalost takového D/A převodu kdy průběh je schodovitý a vzniká aliasing, co se pak projevuje i na vstupu komparátoru a v extrémních případech dochází k překmitu a tedy do i PWM jak je vidět na Obr. 2.1. S použitím čítače a D/A převodníku s vyšším rozlišením jsou zase o to vyšší nároky na hodinové impulzy.



Obr. 2.1 Pilový průběh generovaný čítačem - obrázek převzat z [16]

Pomocí dvou digitálních registrů, kdy v jednom je požadovaná hodnota a druhý se s hodinovým signálem inkrementuje a jejich číslicové porovnávání. Nevýhoda je stejná jako v předchozí variantě.

Generování pomocí mikroprocesoru který má integrované periferie s podporou PWM, kde je nevýhodou potřeba použití celého vývojového prostředí a nutnost takový procesor naprogramovat nemluvě o sestavení samotného programu.

Pomocí známého obvodu NE555 jímž jde realizovat celý PWM generátor, ale nelze u něj uspokojivě měnit spínací frekvenci a také střidu od 0 do 100%.

Pomocí jednoúčelových integrovaných obvodů např.

SG3525A [26] – nevýhodou použití je střída jen 0-45%

SG1524 [27]– nevýhodou použití je střída jen 0-45%

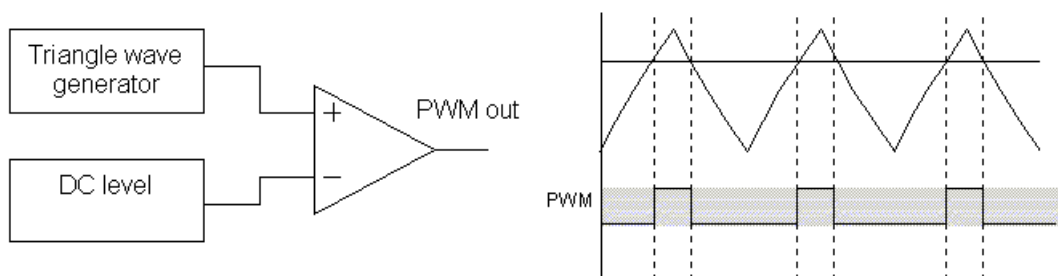
TL494 [28]– nevýhodou použití je střída 10-90%

MAX038 [29] – nevýhodou použití je střída jen 15-85%

2.2 Princip PWM

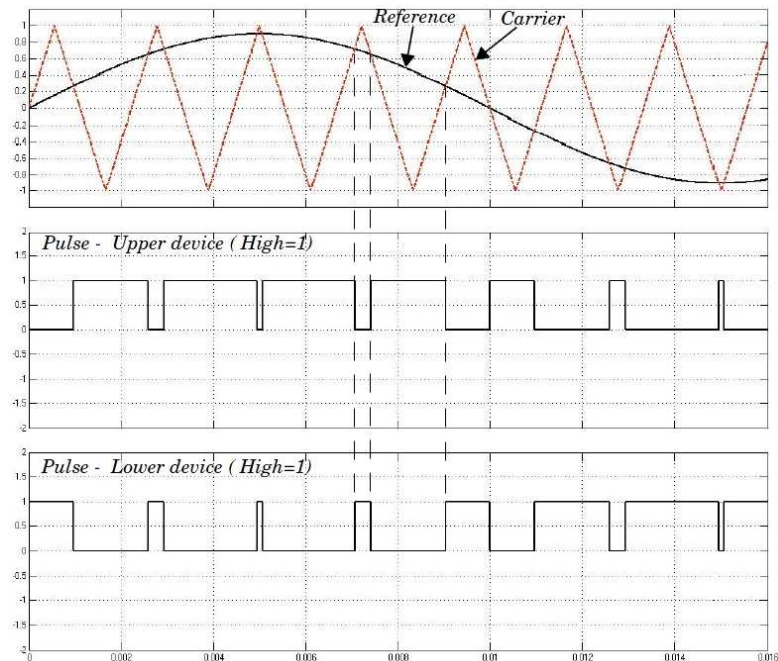
Základem pro generování PWM (Pulse Width Modulation) modulace neboli pulzně šířková modulace, je pilovitý nebo trojúhelníkový signál o spínací (nosné) frekvenci, který se přivede na vstup komparátoru a na jeho druhý vstup se přivede požadovaná napěťová úroveň jenž určí hloubku modulace. Při porovnávání těchto dvou signálů komparátor překlápí jeho výstup a dochází ke změně střidy nosného signálu.

Výsledkem je pak obdélníkový signál s konstantní frekvencí a různou střídou odpovídající modulovanému signálu jak je vidět na obrázku č.16.



Obr. 2.2 Princip tvorby PWM - obrázek převzat z [16]

Tato pevná frekvence se označuje jako spínací (nosná) a střída je poměr mezi dobou periody a dobou kdy je daný dvoustavový signál ve stavu logické jedničky a logické nuly. V případě přivedení na porovnávací vstup komparátoru nějaký modulační signál, například sinusový signál je změna střídny generována periodicky jak je vidět na obrázku 2.2.



Obr. 2.3 Modulování PWM sinusovým signálem - obrázek převzat z [17]

Například když je doba těchto napěťových úrovní stejná jde o signál s plněním 50% a při regulaci výkonu stejnosměrného motoru signálem PWM se střídou 50% o amplitudě 50V se výsledné napětí na motoru jeví jako by byl napájen stejnosměrným napětím o velikosti průměrné střední hodnoty a ta je dána poměrem doby zapnutí a vypnutí, v tomto případě tedy 25V.

Při tomto řízení tedy platí, že čím větší amplitudu má PWM signál respektive pulzy, tím větší je pak velikost proudu který teče motorem a tato velikost proudu v důsledku určuje velikost točivého momentu. Čím vyšší je četnost těchto pulzů respektive spínací frekvence, tím vytváří hladší průběh a je generováno menší elektromagnetické rušení a také menší ztráty v magnetickém obvodu motoru. Rozptylová indukčnost motoru se při napájení PWM chová jako filtr dolní propusti, takže protékající proud a tedy i moment motoru je spojitý.

2.3 Použití PWM

Generátor PWM je zařízení, které generuje pulzy PWM například jako spínací impulzy pro IGBT tranzistory.

PWM signály se používají v široké škále převážně řídicích aplikací. Hlavní použití PWM modulace je v regulační technice např. pro řízení otáček stejnosměrných motorů či regulaci pulzních měničů, ale může být také použit pro ovládání či řízení různých ventilů, čerpadel, hydraulických a dalších elektromechanických akčních členů v regulační technice.

Použití PWM v automobilovém průmyslu např. ve snímačích kdy signál PWM je generován samotným snímačem většinou stavových veličin například při měření teploty či tlaku. V automobilech není potřeba A/D převodník (který by musel být odolný vůči rušení a stále dostatečně citlivý), generuje PWM signál tedy přímo čidlo a přivedením PWM signálu na sériový vstup případně na vstup čítače nadřazeného procesoru nebo počítače a zaznamenáváním délky pulzů tohoto signálu tedy jeho středy, řídicí jednotka motoru vyhodnotí aktuální hodnotu dané veličiny - teploty, tlaku atd..

Ve spotřební elektronice je využití PWM u zesilovačů ve třídě D, kdy je hlavní výhodou nízké ztráty, což vede nepotřebě instalování rozměrných chladících prvků a tím k minimalizaci rozměrů zařízení a také k úspoře energie a to má samozřejmě pozitivní efekt u bateriových přístrojů.[2] Také je použito jako kódování infračerveného signálu v dálkových ovladačích spotřební elektroniky nebo jako řídicí signál u modelářských serv.

2.4 Nevýhody PWM

Nevhodně zvolenou frekvencí PWM (nosné) dochází ke generování mechanického kmitání magnetického obvodu motoru a tím k akustickému rušení okolí, které je charakteristické slyšitelným pískáním o nosné(spínací) frekvenci PWM.

Pokud je zaznamenáno toto akustické rušení v prostředí kde by to negativně ovlivňovalo okolí, je třeba zvolit takovou frekvenci kterou již lidské uši nejsou schopny zaznamenat což je nad hranicí 22kHz. Při zvolení příliš vysokých spínacích frekvencí dochází k nežádoucím ztrátám na spínacích výkonových tranzistorech a také se negativně projevují kapacity a indukčnosti vedení a může dojít až ke zkreslení výstupního signálu PWM pro řízení motoru.

Naopak při zvolení příliš nízkých frekvencí PWM dochází k zastavování hřídele motoru, které je způsobeno setrvačností rotoru když je PWM signál v nule.

2.5 Výhody PWM

Mezi hlavní výhody napájení motorů PWM signálem je využívání jmenovitého momentu motoru při rozběhu a při již velmi nízkých otáčkách. Při současné regulaci amplitudy napájecího napětí, dochází k regulaci vlivem snižování napětí současně ke snížení jmenovitého momentu i otáček motoru.

Další výhodou PWM regulace jsou nízké ztráty, protože výkonové regulační prvky, typicky FET nebo IGBT tranzistory pracují v spínacím režimu. Tyto tranzistory mají v sepnutém stavu velmi nízký odpor řádově [mΩ] a tím se minimalizují ztráty.

2.6 Operační zesilovač

Operační zesilovač (dále jen OZ) je univerzální analogová elektronická součástka, je to širokopásmový zesilovač s velkým zesílením, který pomocí vnějších obvodů, (typicky rezistory) jsou tvořena různá zapojení (tedy operační sítě) umožňuje vytvořit různé výstupní funkce na základě vstupních.

OZ jsou dnes již obsaženy v drtivé většině analogových obvodů, pro svoje výhody hlavně jednoduchost při konstruování analogových obvodů, proto se samotný OZ stal základním prvkem elektronických systémů v analogové elektronice.

Vnitřní struktura OZ se skládá ze tří hlavních stavebních bloků:

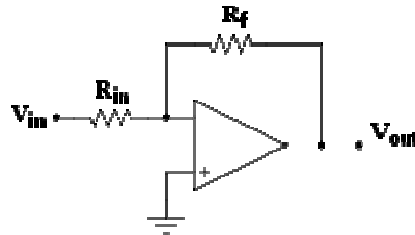
- vstupní zesilovač – sestaven z tranzistorů, je zapojen jako rozdílový zesilovač s vysokou vstupní impedancí
- zesilovací stupeň – vytváří velké napětíové zesílení, většinou je realizována Darlingtonovou dvojicí
- koncový stupeň – zajišťuje výkonové zesílení a oddělení výstupu OZ od zátěže

Historicky byly OZ vyvinuty pro matematické operace jako základní stavební kámen analogových počítačů, protože s nimi bylo možno realizovat velmi složité výpočty s velmi rychlou odezvou například výpočet derivace. První operační zesilovače byly vyráběny pomocí elektronek, později se přešlo na konstrukci z diskrétních součástek. Koncem 60. let 20.století byl vyvinut první integrovaný OZ a to konkrétně $\mu A709$ firmou Fairchild.[1] OZ umožňují konstruovat obvody pro matematické operace, vyrábět kvalitní zesilovače, modulátory, de/modulátory, směšovače, oscilátory, regulátory, A/D a D/A převodníky, klopné obvody atd.

2.6.1 Invertující zesilovač

Nejrozšířenější zapojení OZ je jako invertující zesilovač jehož výstupem je konstantně zesílené vstupní napětí s otočenou polaritou tedy invertované na následujícím Obr. 2.4. Výstupní zesílení je dáno poměrem rezistorů R_f a R_{in} viz výraz (1) za předpokladu, pokud je zdroj vstupního signálu obvod s nulovým vnitřním odporem (tedy obvod, chovající se jako ideální zdroj napětí).

$$U_{out} = -\left(\frac{R_f}{R_{in}}\right) \cdot U_{in} \quad (1)$$

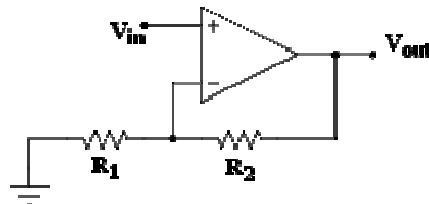


Obr. 2.4 OZ Invertující zapojení - obrázek převzat z [15]

2.6.2 Neinvertující zesilovač

Zapojení neinvertujícího zesilovače zesiluje vstupní napětí konstantou, která je vždy větší než 1. Narozdíl od zapojení OZ jako invertující zesilovač má neinvertující zapojení vysokou vstupní impedanci danou vstupní impedancí použitého OZ. Konstanta zesílení je dána vztahem(2). Zapojení je pak na Obr. 2.5.

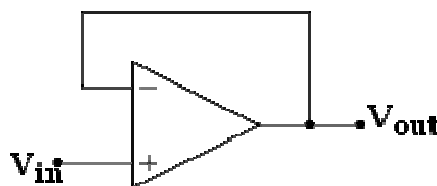
$$U_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{in} \quad (2)$$



Obr. 2.5 OZ Neinvertující zapojení - obrázek převzat z [15]

2.6.3 Sledovač napětí

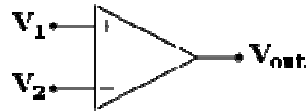
Velikost výstupního napětí je rovna jeho vstupu a to včetně polarity, U_{out} je tedy rovno U_{in} . Toto zapojení se používá jako oddělovač a impedanční přizpůsobení, protože má podobně jako neinvertující zapojení OZ vysokou vstupní a nízkou výstupní impedanci. Zapojení je na Obr. 2.6.



Obr. 2.6 OZ jako sledovač napětí - obrázek převzat z [15]

2.6.4 Komparátor

Komparátor vyhodnocuje dvě napětí přivedená na oba vstupy OZ. Když je vyšší napětí na V_1 neinvertujícího vstupu, výstupem je kladné saturační napětí OZ. Je-li vyšší napětí na V_2 invertujícího vstupu, výstupem je pak záporné saturační napětí OZ. Saturační napětí OZ na výstupu je o jeden či několik voltů nižší než napětí napájecí což je dané vnitřní strukturou OZ. Komparátor je na Obr. 2.7.



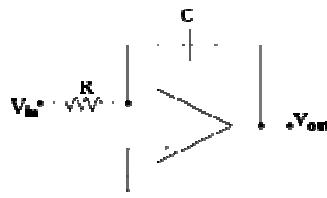
Obr. 2.7 OZ jako komparátor - obrázek převzat z [15]

2.6.5 Integrovační zesilovač

U zapojení OZ jako integrovačního zesilovače dochází k integraci vstupního signálu (který je invertovaný) podle času. Výstupní napětí se vypočítá podle vztahu (3) kde $U_{(0)}$ je počáteční napětí, které bylo na výstupu v čase $t=0$, schéma zapojení je na Obr. 2.8.

Vlastností integrovačního OZ se dá využít jako filtru dolní propusti nebo jako analogové paměti, kde informaci uchovává náboj na kondenzátoru po odpojení rezistoru R a závisí na jeho kvalitě.

$$U_{out} = \int_0^t -\frac{U_{in}}{RC} dt + U_{(0)} \quad (3)$$

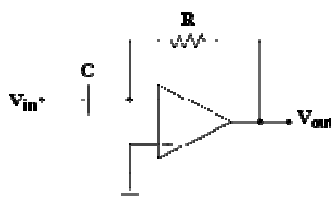


Obr. 2.8 OZ jako integrovační zesilovač - obrázek převzat z [15]

2.6.6 Derivační zesilovač

Při zapojení OZ jako derivačního zesilovače dochází k derivaci vstupního signálu (který je invertován) podle času. Tato derivace je dána vztahem (4). Kde U_{out} a U_{in} jsou funkcemi času. Vlastností derivačního OZ se dá využít jako filtru horní propusti. Zapojení je na obrázku č.15.

$$U_{out} = -RC \left(\frac{dU_{in}}{dt} \right) \quad (4)$$



Obr. 2.9 OZ jako derivační zesilovač - obrázek převzat z [15]

3 Stavba vlastního generátoru

3.1 Napájecí zdroj

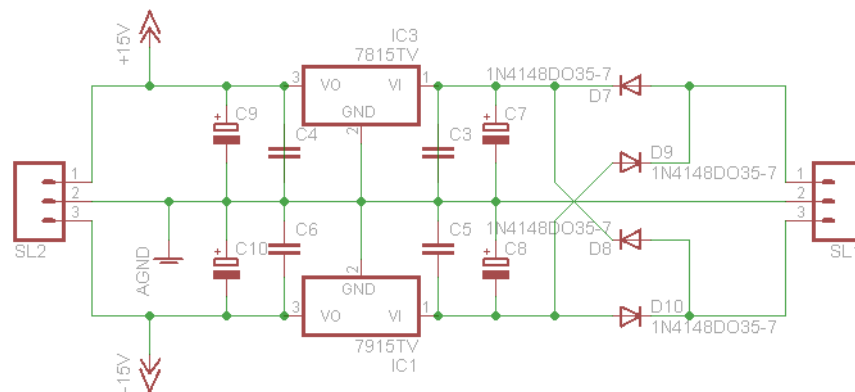
Funční generátor respektive operační zesilovače pro svoji funkci vyžadují symetrické stabilizované napájecí napětí.

Proto jsou použity integrované stabilizátory napětí. Jde o tří-vývodové stabilizátory, které v sobě integrují zdroj referenčního napětí, pevně nastavené výstupní napětí, operační zesilovač regulační odchylky se zpětnou vazbou, teplotní a nadproudovou stabilizaci a ochranu.

Konkrétně jde o typy 7815 pro kladnou napájecí větev a typ 7915 pro zápornou napájecí větev oba v pouzdru TO220, které při velmi nízkém odběru 50mA který má generátor ani nepotřebují chladiče.

Schéma vychází z katalogového doporučeného zapojení [7] [8] a zapojení je na Obr. 3.1.

Ve schéma na Obr. 3.1 je na svorky svorky SL1 připojen transformátor a na svorkách SL2 je již stabilizované symetrické napětí 15V.



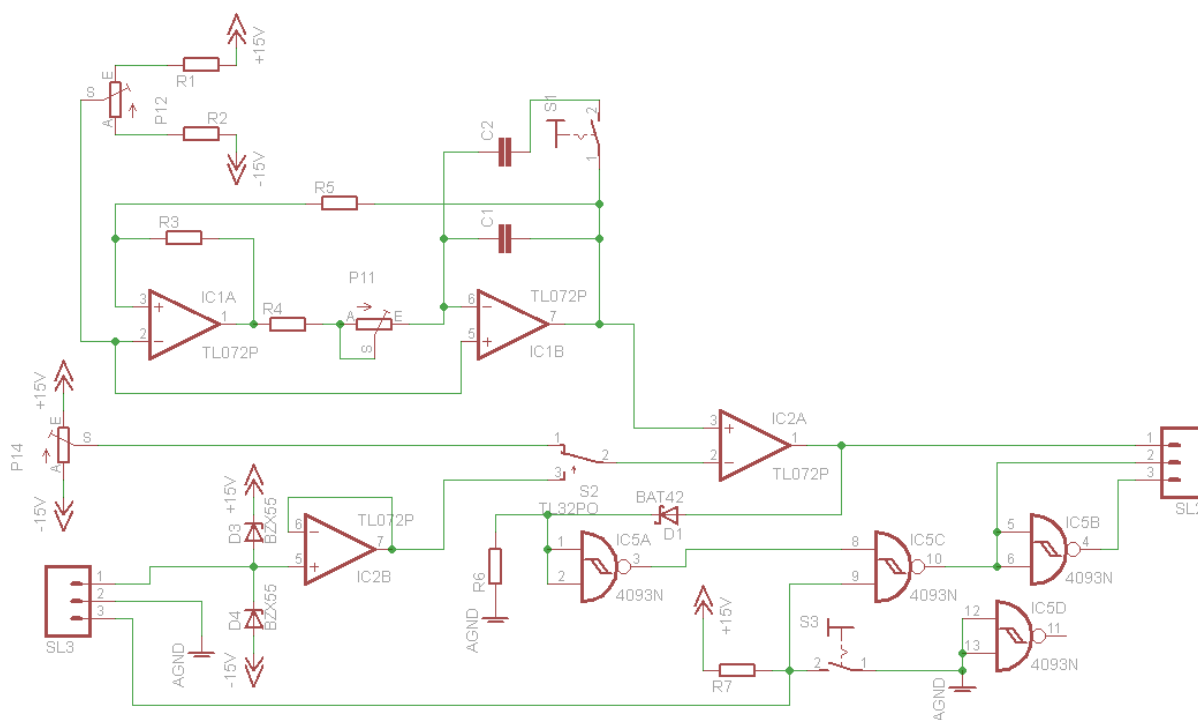
Obr. 3.1 Schéma zdroje

Při realizaci prototypu generátoru bylo místo zdroje na Obr. 3.1 použito laboratorního napájecího zdroje ARITMA TSZ75 a při konstrukci hotového výrobku bylo nakonec použito již hotové a odzkoušené konstrukce převzaté z webových stránek Pavla Růžičky [19].

3.2 Schéma zapojení generátoru

Schéma zapojení je na obrázku 5 a vychází ze známého zapojení relaxačního generátoru [3], který se skládá z operačních zesilovačů. První OZ (IC1A) je ve funkci integrátory, jenž integruje (akumuluje) vstupní napětí na prvku, buďto indukčnosti (cívka) a nebo kapacitě (kondenzátor), v tomto případě byl použit jako akumulací prvku kondenzátor C1.

Druhý OZ (IC1B) pracuje jako komparátor, jenž porovnává napětí na akumulacím prvku integračního členu s nastavitelnou hodnotou hystereze. Dalším obvodem je komparátor bez hystereze, který porovnává výstupní napětí trojúhelníkového průběhu s nastavitelnou hodnotou, při které dochází k jeho přepnutí do $\pm u_{sat}$ a tím ke změně střídy



Obr. 3.2 schéma zapojení

3.3 Princip činnosti generátoru

Operační zesilovač IC1B pracuje jako integrátor, integrující výstupní napětí z OZ IC1A, který pracuje jako komparátor s hysterezí nastavitelnou trimem P12. Výstup komparátoru nabývá hodnot $+u_{SAT}$ nebo $-u_{SAT}$. Napětí u_c je tedy dáno vztahem:

$$u_c(t) = -\frac{1}{(R4 + P11) \cdot C1} \cdot \int \pm u_{sat} dt \quad (5)$$

To se dá přepsat do vztahu:

$$\Delta u_c = -\frac{\pm u_{sat}}{(R4 + P11) \cdot C1} \cdot \Delta t \quad (6)$$

z kterého je lépe vidět časová změna napětí u_c v závislosti na okamžité hodnotě napětí na výstupu komparátoru IC1A.

Když je na výstupu komparátoru IC1A napětí $+u_{SAT}$, napětí na kondenzátoru u_c na výstupu integrátoru lineárně klesá s časovou konstantou $R5 \cdot C1$. Až toto napětí klesne na dolní překlápěcí úroveň komparátoru, komparátor se překlápí a jeho výstup přejde na záporné napětí $-u_{SAT}$.

Napětí u_c na výstupu integrátoru IC1B začne lineárně stoupat se stejnou časovou konstantou $R5 \cdot C1$.

Když dosáhne horní překlápěcí úrovně komparátoru, komparátor se opět překlápí a na jeho výstupu se objeví kladné napětí $+u_{SAT}$.

Napětí na vývodu integrátoru začne opět lineárně klesat a celý tento děj se periodicky opakuje.

K překlápění komparátoru dochází v okamžiku, kdy je napětí mezi diferenčními vstupy nulové. Je-li na výstupu komparátoru napětí $+u_{SAT}$ a k překlápění komparátoru dojde, pokud bude platit:

$$\frac{(u_c - u_{SAT}) \cdot R3}{R3 + R5} + u_{SAT} = 0 \quad (7)$$

To znamená jestliže výstup integrátoru dosáhne hodnoty:

$$R3 \cdot u_c = -R5 \cdot u_{SAT} \quad (8)$$

A ta je označována jako dolní komparační úroveň u_{K-} .

Je-li na výstupu komparátoru napětí $-u_{SAT}$, k překlopení komparátoru tedy dojde, pokud bude platit:

$$\frac{u_c}{(R4 + P11)} + \frac{-u_{SAT}}{R3} = 0 \quad (9)$$

tj. pokud výstup integrátoru dosáhne hodnoty:

$$u_c = +u_{SAT} \cdot \frac{(R4 + P11)}{R3} \quad (10)$$

která je označována jako horní komparační úroveň u_{K+} .

K určení periody a kmitočtu potřebujeme znát dobu, za kterou výstupní napětí integrátoru přejde od dolní komparační úrovně k horní. Tato doba je rovna polovině periody. Rozdíl $u_{K+} - u_{K-}$ odpovídá šířce hysterese smyčky. a v našem případě je dán vztahem:

$$u_H = u_{SAT} \frac{(R4 + P11)}{R3} \cdot (1 + R3) - \left(-u_{SAT} \cdot \frac{(R4 + P11)}{R3} \right) = \pm u_{SAT} \frac{(R4 + P11)}{R3} \cdot (2R3) \quad (11)$$

Polovinu periody tedy můžeme určit ze vztahu:

$$\frac{\pm u_{SAT}}{R5 \cdot C1} \cdot \frac{T}{2} = \pm u_{SAT} \frac{(R4 + P11)}{R3} \cdot (2R3) \quad (12)$$

Po úpravě dostáváme:

$$\frac{T}{2} = \frac{(R4 + P11) \cdot R5 \cdot C1}{R3} \cdot (2R3) \quad (13)$$

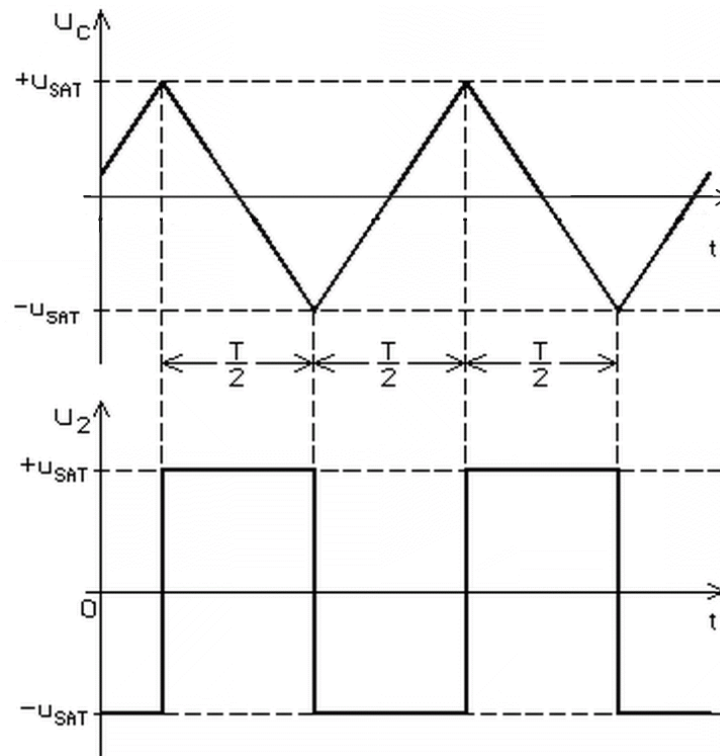
Celková doba periody je tedy:

$$T = 4 \cdot (R4 + P11) \cdot C1 \cdot \left(\frac{R3}{R5} \right) \quad (14)$$

Frekvence je tedy:

$$f = \frac{R3}{4 \cdot (R4 + P11) \cdot C1 \cdot R5} \quad (15)$$

Průběh napětí u_c a výstupu komparátoru jsou na následujícím Obr. 3.3.



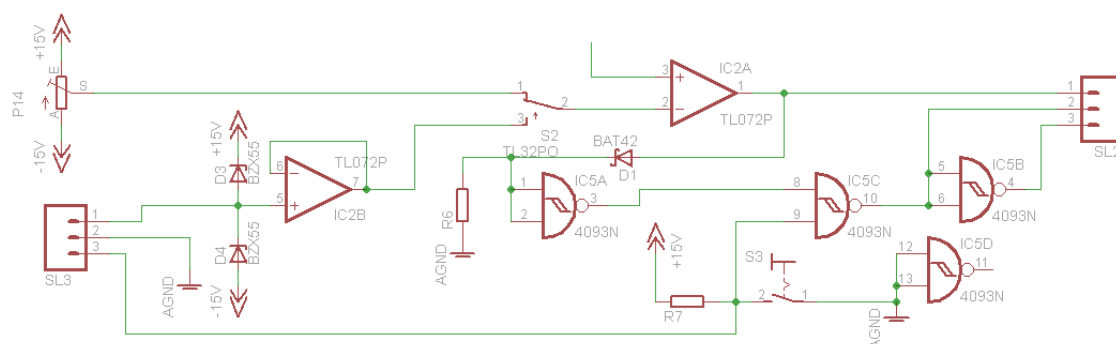
Obr. 3.3 průběhy napětí – horní výstup IC1B a spodní výstup IC1A

3.4 Další funkce zapojení

Jak je vidět na Obr. 3.4 OZ IC2A je zapojen jako komparátor bez hystereze a porovnává trojúhelníkový průběh z výstupu relaxačního generátoru a potenciometru P14 nebo externího vstupu což určuje přepínač S2. Externí vstup je oddělen OZ IC2B v zapojení jako sledovač napětí a impedančně odděluje tento vstup od vstupu komparátoru IC2A. Navíc je vstup tohoto externího zdroje omezen dvojicí zenerových diod D3 a D4 proti přepětí +/-15V.

Logické členy NAND se Schmidtovým klopným obvodem mají několik funkcí. Jednak pomocí schottky diody D1 a rezistoru R6 oddělují výstup komparátoru, hradlo IC5A jej přizpůsobuje úrovní CMOS logiky a schmittův klopný obvod tvaruje náběžnou a sestupnou hranu impulzů a tedy logické úrovně.

Další hradlo IC5C slouží jako blokování výstupu PWM buďto spínačem S3 nebo externím zdrojem vyvedeným na svorky SL3/3. Hradlo IC5B je jen invertor aby byl k dispozici invertovaný PWM signál pro inverzní logiku.

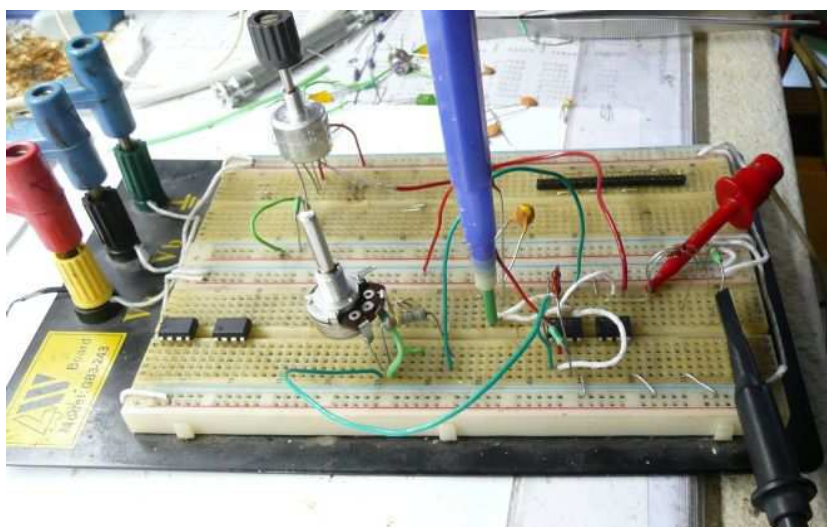


Obr. 3.4 výřez obvodu na Obr. 3.2 realizující další funkce

3.5 Stavba prototypu

Následující obrázky dokumentují stavbu vlastního generátoru respektive jeho prototypu.

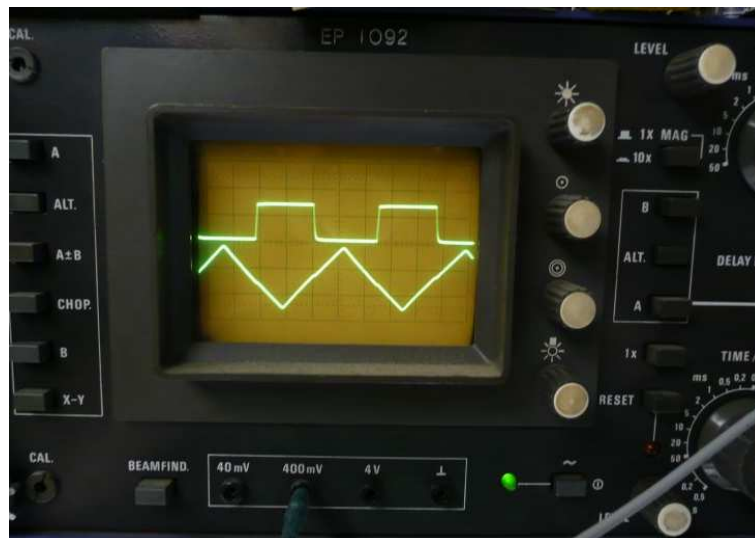
Zapojení generátoru na nepájivém kontaktním poli je na Obr. 3.5.



Obr. 3.5 konstrukce prototypu na nepájivém poli

Na následujícím obrázku je ukázka prototypu generátoru PWM v provozu na osciloskopu. Ve spodní stopě je vidět průběh napětí výstupu OZ IC1B, tento signál je zároveň použit i jako synchronizační vstup osciloskopu.

V horní stopě osciloskopu je vidět výstup z komparátoru IC2A kde je již PWM signál, v tomto případě se střídou cca 50% a zároveň je patrné že strmost náběžných a sestupných hran obdélníkového signálu není ideální jako z výstupu hradla IC5A.



Obr. 3.6 zobrazení průběhů na výstupu generátoru a trojúhelníkového průběhu na C1/C2 při střídě 50%

4 Ověření vlastností generátoru

4.1 Naměřené parametry

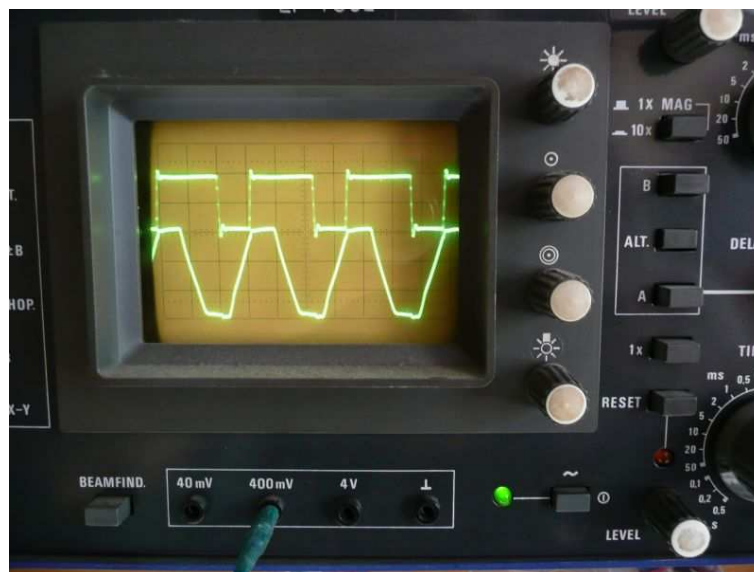
Pro měření byly použity přístroje:

- Osciloskop BM566
- Univerzální čítač BM520
- Multimetr M890G

Napájení je možné realizovat pomocí popisovaného symetrického napájecího zdroje nebo ze stabilizovaného laboratorního zdroje. Odběr tohoto generátoru nepřesáhl 50mA ani v jednom pracovním režimu.

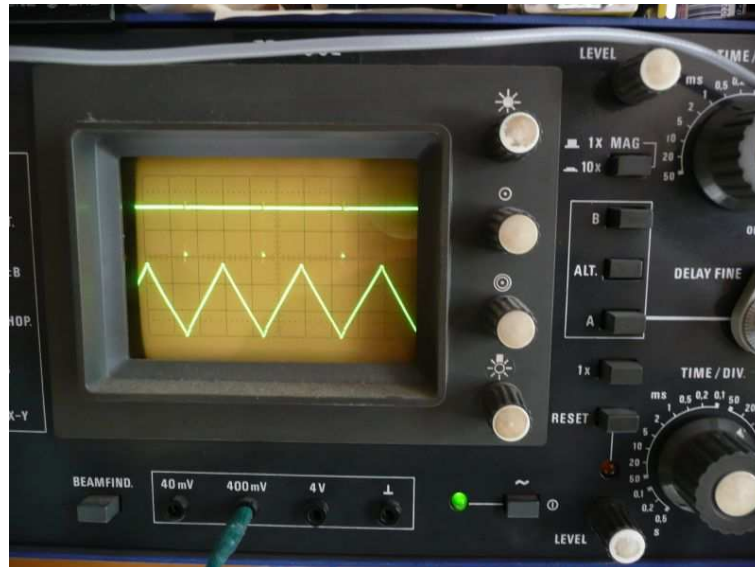
S použitými součástkami bylo možné dosáhnout střídy 0-100% při nosné frekvenci 240Hz – 73,8kHz. Při připojení nejmenšího kondenzátoru 220pF na místo C1 bylo možné dosáhnout frekvenci až 152,419kHz, ale při této frekvenci již docházelo k deformaci průběhu trojúhelníkového průběhu jak je vidět na Obr. 4.1 nicméně stále bylo možno měnit střídu PWM 0-100%.

V praktických měřeních ve školních laboratořích se takto vysokých spínacích frekvencí obvykle nepoužívá z důvodu narůstajících ztrát na spínacích prvcích.

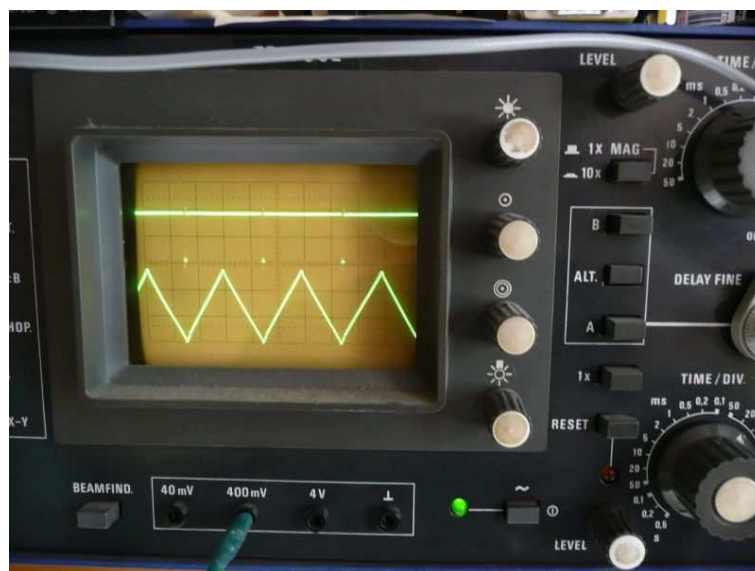


Obr. 4.1 průběhy při nejvyšší frekvenci 152kHz a jejich deformace

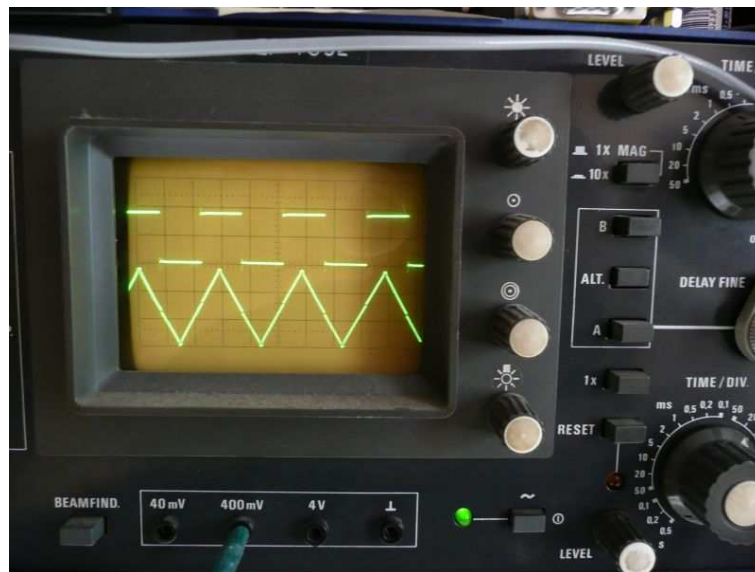
Následující obrázky dokumentují průběh v místě výstupu OZ IC1B (spodní stopa) a výstup PWM generátoru na výstupu z hradla IC5C (horní stopa). Obr. 4.2 dokumentuje nastavení průběhu se střídou cca 1% a Obr. 4.3 ve stejných bodech průběh se střídou cca 99%.



Obr. 4.2 zobrazení výstupu PWM při střídě cca 99% a průběh výstupu IC1B



Obr. 4.3 zobrazení výstupu PWM při střídě cca 1% a průběh výstupu IC1B



Obr. 4.4 zobrazení výstupu PWM při střídě 50% a průběh výstupu IC1B

Měření generovaného PWM respektive frekvence nosné na výstupu z hradla IC5C.



Obr. 4.5 naměřená frekvence 230Hz



Obr. 4.6 naměřená frekvence 73,84kHz



Obr. 4.7 naměřená nejvyšší frekvence 152,419kHz

5 Návod k použití

Generátor byl navržen pro jednoduché použití, proto má jen několik ovládacích prvků a jeho uvedení do provozu je velmi jednoduché.

Potenciometrem P11 se nastavuje nosná frekvence PWM, spínačem S1 se změní rozsah v intervalu 240Hz – 2,5kHz nebo 10,7kHz – 74,8kHz.

Potenciometrem P14 se nastavuje střída v rozsahu 0-100% pokud přepínač S2 je v poloze 1, když je S2 přepnutý v poloze 2 tak hloubka modulace je určena vnějším zdrojem napětí které je přivedeno na svorky SL3/1 a SL3/2.

Na svorkách konektoru SL3/3 je možno připojit vnější blokování výstupu PWM v logice CMOS. Pokud je rozpojen spínač S3 je toto externí blokování přemostěno.

Závěr

Cílem této bakalářské práce je provedení přehledu a z toho vyplývající porovnání generátorů s důrazem na funkci regulace PWM modulace v požadovaném rozsahu střídy, pro použití v laboratořích KVE k oživování regulátorů, pulzních měničů a jejich driverů. Dále pak návrh a realizace jednoduchého PWM generátoru z diskretních součástek s dalšími požadovanými parametry a vlastní výrobu prototypu takového generátoru.

Při realizaci a hledání vhodných součástek jsem narazil na internetu na zdroj [16], jenž se zabývá takovými generátory. Jsou zde zmíněny i integrované obvody, které jsou převodníky respektive modulátory stejnosměrného napětí na PWM modulaci. Mnohé z nich jsou určeny pro přímé použití ve spínaných napájecích zdrojích a proto bohužel nemají plný rozsah střídy typicky jen 10-90% nicméně pro některé aplikace by i toto omezení vyhovělo. Takovéto obvody však jsou špatně dostupné na našem trhu.

Byl postaven prototyp funkčního generátoru pro realizaci PWM řízení. Na něm bylo dosaženo těchto parametrů: frekvence nosné 240Hz – 73,8kHz ve dvou rozsazích s extrémní hodnotou 152kHz za použití nejmenšího integračního kondenzátoru. Rozsah střídy je skutečně 0-100% přesnost nastavení je však závislá na použitém nastavovacím potenciometru. Při nároku na vysokou citlivost nastavení střídy je třeba použít deseti-otáčkový aripot.

Popsaný PWM generátor lze tedy použít pro výukové účely nebo pro vývoj uživatelských aplikací. Návrh tohoto generátoru je možno realizovat i v amatérských podmínkách, kdy není vhodné či žádoucí použít součástky se SMD montáží, ale není tato možnost vyloučena neboť použité součástky jsou dostupné i v pouzdrech pro SMT.

Použitá literatura

- [1] Operační zesilovač – Wikipedie [on-line] [Citace 30.3.2013]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Opera%C4%8Dn%C3%AD_zesilova%C4%8D
- [2] Pulzně šířková modulace – Wikipedie [on-line] [Citace 30.3.2013]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Pulzn%C4%9B_%C5%A1%C3%AD%C5%99kov%C3%A1_modulace
- [3] Andrea Ronešová - Relax. generátory - řešené [on-line]. [Citace 2.2.2013]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~ronesova/index.php?menuitem=aes_rrg
- [4] Home > Product > Signal Sources > Arbitrary Function Generators > AFG-3000 Series [on-line] [Citace 20.4.2013]. Dostupné z: <http://www.gwinstek.com/en/product/productdetail.aspx?pid=5&mid=305&id=1286>
- [5] Home > Product > Signal Sources > DDS Function Generators > SFG-2100/2000 Series [on-line] [Citace 20.4.2013]. Dostupné z: <http://www.gwinstek.com/en/product/productdetail.aspx?pid=5&mid=72&id=92>
- [6] HAMEG: HM8030-6: [on-line] [Citace 20.4.2013]. Dostupné z: <http://www.hameg.com/140.0.html?L=1>
- [7] Datasheet catalog for integrated circuits, diodes, triacs, and other semiconductors, view [on-line] [Download 3.4. 2013] http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/L/M/7/8/LM7815.shtml
- [8] Datasheet catalog for integrated circuits, diodes, triacs, and other semiconductors, view [on-line] [Download 3.4.2013]. Dostupné z: http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/L/M/7/9/LM7915.shtml
- [9] HAMEG: HMF2525 [HMF2550]: [on-line] [Citace 20.4.2013] Dostupné z: <http://www.hameg.com/0.149.0.html>
- [10] Generátor funkcí METEX MXG-9810 - GM electronic - elektronika, kterou znáte...: [on-line] [Citace 20.4.2013]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/generatory-funkci-citace/generator-funkci-metex-mxg-9810-p721-019/>
- [11] OWON AG4151 Arbitrary Waveform Generátor User Manual [on-line] [Download 20.4.2013]. Dostupné z: http://www.owon.com.cn/images/upfile/probook/AG4151%20Waveform%20Generator%20USER_MANUAL%20en.pdf
- [12] Arbitrární generátor funkcí Rigol DG2041A | Conrad.cz: [on-line] [Citace 1.6.2013]. Dostupné z: <http://www.conrad.cz/arbitrani-generator-funkci-rigol-dg2041a.k123967>
- [13] AFG3000 Function Generator Arbitrary/Function Generators | Tektronix: [on-line] [Citace 1.6.2013]. Dostupné z: <http://www.tek.com/datasheet/signal-generator/afg3000-function-generator-arbitrary-function-generators>
- [14] Signální generátory funkcí Sigenol DDS: [on-line] [Citace 1.6.2013]. Dostupné z: <http://www.sigenol.cz/specifications.php>
- [15] Zapojení s operačním zesilovačem – Wikipedie: [on-line] [Citace 19.5.2013]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Zapojen%C3%AD_s_opera%C4%8Dn%C3%ADm_zesilova%C4%8Dem

- [16] PWM Signal Generators: [on-line] [Citace 25.5.2013]. Dostupné z: <http://homepages.which.net/~paul.hills/Circuits/PwmGenerators/PwmGenerators.html>
- [17] Generate pulses for carrier-based two-level pulse width modulator (PWM) in converter bridge - Simulink: [on-line] [Citace 20.4.2013]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/phymod/powersys/ref/pwmgenerator.html>
- [18] Andrea Ronešová - Relax. gen. a převodníky U/f: [on-line] [Citace 27.4.2013]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~ronesova/index.php?menuitem=aes_muf
- [19] Dvojitý napájecí zdroj: [on-line]. [Citace 27.5.2013]. Dostupné z: <http://www.pavouk.org/hw/dualpowersupply/index.html>
- [20] Programovatelný generátor GW Instek AFG-3051 | Eshop Měřicí technika.cz: [on-line]. [Citace 7.6.2013]. Dostupné z: <http://www.mericitechnika.cz/afg-3051>
- [21] Generátor funkcí Goodwill Instek SFG-2120 | Conrad.cz: [on-line]. [Citace 7.6.2013]. Dostupné z: <http://www.conrad.cz/generator-funkci-goodwill-instek-sfg-2120.k122946>
- [22] modul Hameg HM 8030-5/6 (generátor) - MICRONIX, spol. s r.o.: [on-line]. [Citace 7.6.2013]. Dostupné z: <http://eshop.micronix.cz/merici-technika/elektricke-veliciny/generatory-funkci/hm-8030-5-6.html>
- [23] HMF2525 - HAMEG - ARBITRARY FUNCTION GENERATOR, | Farnell: [on-line]. [Citace 7.6.2013]. Dostupné z: <http://cz.farnell.com/jsp/displayProduct.jsp?sku=1636921&CMP=KNC-GCZ-FCZ-GEN-SKU-OTH&mckv=suAgADSw|pcrid|13677204040|kword|hmf2525|match|p|plid>
- [24] Generátor TEKTRONIX AFG3022B: [on-line]. [Citace 7.6.2013]. Dostupné z: <http://www.elexbrno.cz/detail.php?proId=74&secId=76>
- [25] Funkční generátor Sigenol DDS7 | Eshop Měřicí technika.cz: [on-line]. [Citace 7.6.2013]. Dostupné z: <http://www.mericitechnika.cz/sigenol-dds7>
- [26] SG3525A Datasheet pdf - REGULATING PULSE WIDTH MODULATOR - Microsemi: [on-line]. [Download 7.6.2013]. Dostupné z: http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/S/G/3/5/SG3525A.shtml
- [27] SG1524 Datasheet pdf - REGULATING PULSE WIDTH MODULATOR - Microsemi: [on-line]. [Download 7.6.2013]. Dostupné z: http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/S/G/1/5/SG1524.shtml
- [28] TL494 Datasheet pdf - Pulse-Width-Modulation (Pwm) Control Circuit - Texas Instruments: [on-line]. [Download 7.6.2013]. Dostupné z: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/texasinstruments/tl494.pdf>
- [29] MAX038 Datasheet pdf - High-Frequency Waveform Generator - MAXIM - Dallas Semiconductor: [on-line]. [Download 7.6.2013]. Dostupné z: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/maxim/MAX038.pdf>

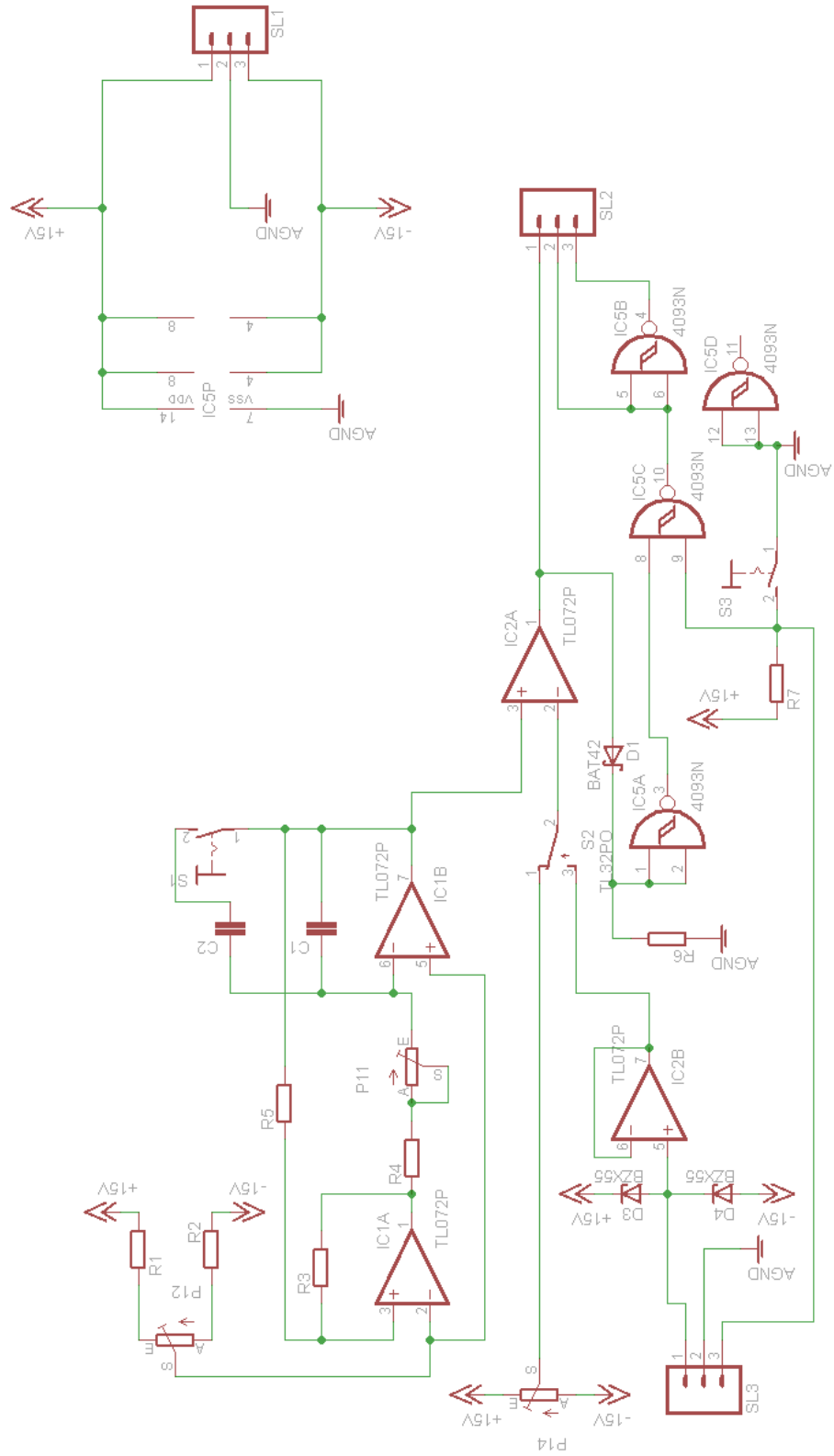
Seznam obrázků

OBR. 1.1 GENERÁTOR GOODWILL INSTEK AFG3051	13
OBR. 1.2 GENERÁTOR GOODWILL INSTEK SFG-2120.....	13
OBR. 1.3 GENERÁTOR HAMEG HM 8030-6	14
OBR. 1.4 GENERÁTOR HAMEG MHF2525	14
OBR. 1.5 GENERÁTOR METEX MXG-9810.....	15
OBR. 1.6 GENERÁTOR OWON 4151	15
OBR. 1.7 GENERÁTOR RIGOL DG2041A	16
OBR. 1.8 GENERÁTOR TEKTRONIX AFG3022B	16
OBR. 1.9 GENERÁTOR SIGENOL DDS7	17
OBR. 2.1 PILOVÝ PRŮBĚH GENEROVANÝ ČÍTAČEM - OBRÁZEK PŘEVZAT Z [16]	18
OBR. 2.2 PRINCIP TVORBY PWM - OBRÁZEK PŘEVZAT Z [16].....	19
OBR. 2.3 MODULOVÁNÍ PWM SINUSOVÝM SIGNÁLEM - OBRÁZEK PŘEVZAT Z [17].....	20
OBR. 2.4 OZ INVERTUJÍCÍ ZAPOJENÍ - OBRÁZEK PŘEVZAT Z [15]	23
OBR. 2.5 OZ NEINVERTUJÍCÍ ZAPOJENÍ - OBRÁZEK PŘEVZAT Z [15]	23
OBR. 2.6 OZ JAKO SLEDOVAČ NAPĚTÍ - OBRÁZEK PŘEVZAT Z [15]	23
OBR. 2.7 OZ JAKO KOMPARÁTOR - OBRÁZEK PŘEVZAT Z [15]	24
OBR. 2.8 OZ JAKO INTEGRAČNÍ ZESILOVAČ - OBRÁZEK PŘEVZAT Z [15].....	24
OBR. 2.9 OZ JAKO DERIVAČNÍ ZESILOVAČ - OBRÁZEK PŘEVZAT Z [15]	24
OBR. 3.1 SCHÉMA ZDROJE	25
OBR. 3.2 SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	26
OBR. 3.3 PRŮBĚHY NAPĚTÍ – HORNÍ VÝSTUP IC1B A SPODNÍ VÝSTUP IC1A	29
OBR. 3.4 VÝŘEZ OBVODU NA OBR. 3.2 REALIZUJÍCÍ DALŠÍ FUNKCE	30
OBR. 3.5 KONSTRUKCE PROTOTYPU NA NEPÁJIVÉM POLI	30
OBR. 3.6 ZOBRAZENÍ PRŮBĚHŮ NA VÝSTUPU GENERÁTORU.....	31
OBR. 4.1 PRŮBĚHY PŘI NEJVYŠŠÍ FREKVENCI 152KHZ A JEJICH DEFORMACE.....	32
OBR. 4.2 ZOBRAZENÍ VÝSTUPU PWM PŘI STŘÍDĚ CCA 99% A PRŮBĚH VÝSTUPU IC1B.....	33
OBR. 4.3 ZOBRAZENÍ VÝSTUPU PWM PŘI STŘÍDĚ CCA 1% A PRŮBĚH VÝSTUPU IC1B.....	33
OBR. 4.4 ZOBRAZENÍ VÝSTUPU PWM PŘI STŘÍDĚ 50% A PRŮBĚH VÝSTUPU IC1B	34
OBR. 4.5 NAMĚŘENÁ FREKVENCE 230HZ	34
OBR. 4.6 NAMĚŘENÁ FREKVENCE 73,84KHZ	35
OBR. 4.7 NAMĚŘENÁ NEJVYŠŠÍ FREKVENCE 152,419KHZ.....	35

Seznam příloh

PŘÍLOHA A – SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	I
PŘÍLOHA B – SEZNAM SOUČÁSTEK.....	II

Příloha A – Schéma zapojení



Příloha B – Seznam součástek

Jméno	Hodnota	Označení	Pouzdro	Typ	Ks
C1	50nF	C-EU025_050-025X075	C025_050-025X075	kondenzátor	1
C2	1nF	C-EU025_050-025X075	C025_050-025X075	kondenzátor	1
D1	BAT42	BAT42	DO35-10	dioda	1
D3	BZX55	BZX55	DO35Z10	dioda	1
D4	BZX55	BZX55	DO35Z10	dioda	1
IC1	TL072P	TL072P	DIL08	OZ	1
IC2	TL072P	TL072P	DIL08	OZ	1
IC5	4093N	4093N	DIL14	CMOS	1
P11	25k	TRIM_EU-CIP20C-4MM	CIP20C-4MM	potenciometr	1
P12	5k6	TRIM_EU-CIP20C-4MM	CIP20C-4MM	potenciometr	1
P14	25k	TRIM_EU-CIP20C-4MM	CIP20C-4MM	potenciometr	1
R1	1k	R-EU_0207/10	0207/10	rezistor	1
R2	1k	R-EU_0207/10	0207/10	rezistor	1
R3	10k	R-EU_0207/10	0207/10	rezistor	1
R4	2k5	R-EU_0207/10	0207/10	rezistor	1
R5	8k2	R-EU_0207/10	0207/10	rezistor	1
R6	1k	R-EU_0207/10	0207/10	rezistor	1
R7	2k5	R-EU_0207/10	0207/10	rezistor	1
S1		MS243	MS243	spínač	1
S2	TL32PO	TL32PO	TL3XPO	přepínač	1
S3		MS243	MS243	spínač	1
SL1		M03	03P	konektor 3pin	1
SL2		M03	03P	konektor 3pin	1
SL3		M03	03P	konektor 3pin	1