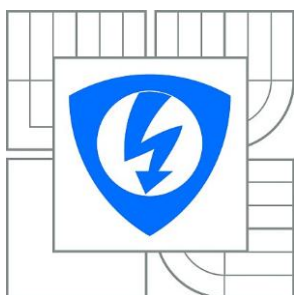


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ZDROJ GENERUJÍCÍ DEFINOVATELNÉ PROUDOVÉ IMPULZY

POWER-SUPPLY GENERATING SPECIFIED CURRENT PULSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

KAREL SVOBODA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ROMAN ŠOTNER, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Karel Svoboda

ID: 138682

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Zdroj generující definovatelné proudové impulzy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte a doporučte obvodové koncepce zdrojů pro tvorbu proudových impulzů (proudy do jednotek A do zátěže odporového charakteru) s nastavitelnou úrovní, náběhem a dobou trvání. Navrhněte systém řízení (analogový), který použijete ve studovaných obvodech. Navržené obvody ověřte simulacemi a připravte výrobní podklady pro vhodně vybraný typ.

Vyrobte, osadte a oživte modul. Očekávané chování ověřte laboratorními testy, proveďte finální optimalizaci a úpravy parametrů. Zpracujte a zhodnoťte výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] NOVOTNÝ, V., VOREL, P., PATOČKA, M. Napájení elektronických zařízení. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2004.

[2] VRBA, K., HERMAN, I., KUBÁNEK, D. Konstrukce elektronických zařízení. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 30.5.2014

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

Konzultanti bakalářské práce:

doc. 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

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou generování definovatelných proudových impulzů v řádu jednotek ampér do odporové zátěže. Nejprve jsou zde rozebrány možné obvodové koncepce a jejich analogové řízení. Dále je navrhnutá a popsána výsledná sestava. Součástí práce jsou i simulace z programu PSpice a naměřené průběhy z osciloskopu, které dokládají funkčnost a parametry celé sestavy. Na závěr práce jsou shrnuty dosažené výsledky.

KLÍČVÁ SLOVA

Generátor, zdroj proudu, definovatelný impulz, analogové řízení

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with generation of current impulses, which can be defined in range of few amperes, to resistive load. The first part of this project is focused on analysing of single circuit's concepts and possibility of their analog control. The next part of this work describes whole setup of designed circuit. This thesis includes simulations from PSpice and signal snapshots from an oscilloscope, which prove the functionality and parameters of the whole device. Final section of this work discuss all results achieved during design process.

KEYWORDS

Generator, current source, definable impulse, analog control

SVOBODA, K. *Zdroj generující definovatelné proudové impulzy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 34 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Roman Šotner, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Zdroj generující definovatelné proudové impulzy jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Romanu Šotnerovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Zdroje proudu	2
1.1 Teorie zdrojů proudu	2
1.1.1 Ideální zdroj proudu.....	2
1.1.2 Reálný zdroj proudu.....	2
1.2 Nelineární prvky jako zdroje proudu	3
1.2.1 Variátor	3
1.2.2 Bipolární tranzistor	4
1.2.3 Unipolární tranzistor	4
1.3 Koncepce zdroje proudových impulzů	5
2 Analogové řídicí bloky	8
2.1 Generování obdélníkového impulzu	8
2.1.1 Časovač 555	8
2.1.2 Generátor obdélníkového impulzu s <i>OZ</i>	9
2.2 Operační zesilovače	10
2.3 Realizace krátkého impulzu.....	11
3 Návrh výsledné sestavy	13
3.1 Blok řízení délky impulzu.....	13
3.2 Blok imedančního oddělení	14
3.3 Blok náběžné hrany	15
3.4 Blok proudového omezení	17
3.5 Blok pro převod <i>U-I</i>	18
4 Realizace	22
5 Závěr	27
Literatura	28
Seznam zkratek a symbolů	29

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1	Zatěžovací charakteristika ideálního zdroje proudu	2
Obr. 1.2	Náhradní schéma ideálního zdroje proudu.....	2
Obr. 1.3	Náhradní schéma reálného zdroje proudu.....	3
Obr. 1.4	Zatěžovací charakteristika reálného zdroje proudu	3
Obr. 1.5	V-A charakteristika variátoru	4
Obr. 1.6	Výstupní charakteristiky bipolárního tranzistoru.....	4
Obr. 1.7	Výstupní charakteristika <i>MOSFET</i> s indukovaným kanálem typu <i>N</i>	5
Obr. 1.8	Převodní charakteristika <i>MOSFET</i> s indukovaným kanálem typu <i>N</i>	5
Obr. 1.9	Zdroj proudu z diskretních součástek	6
Obr. 1.10	Zdroj proudu řízený napětím.....	6
Obr. 1.11	Zvýšení rozsahu u integrovaných zdrojů proudu.....	7
Obr. 2.1	Vnitřní blokové schéma <i>OI 555</i> [4]	8
Obr. 2.2	Monostabilní klopný obvod s <i>555</i>	9
Obr. 2.3	Monostabilní klopný obvod s <i>OZ</i>	10
Obr. 2.4	Invertující zesilovač s <i>OZ</i>	10
Obr. 2.5	Derivační článek	11
Obr. 2.6	Derivační článek pro generaci sestupné hrany.....	12
Obr. 3.1	Výsledné blokové schéma.....	13
Obr. 3.2	Časovač <i>555</i> generující definovatelnou délku impulzu	14
Obr. 3.3	Spouštěcí impuls (U_{B0})	14
Obr. 3.4	Řízení délky impulzu (U_{B1})	14
Obr. 3.5	Blok impedančního oddělení	15
Obr. 3.6	Impedanční oddělení (U_{B2})	15
Obr. 3.7	Integrátor.....	16
Obr. 3.8	Integrátor se zpětnovazebním rezistorem	16
Obr. 3.9	Výsledné zapojení integrátoru	17
Obr. 3.10	Simulace řízení délky náběžné hrany (U_{B3}).....	17
Obr. 3.11	Blok proudového omezení	18

Obr. 3.12	Omezení napět'ové úrovně na 1 V (U_{B4}).....	18
Obr. 3.13	Důsledek nelinearity převodní charakteristiky tranzistoru <i>MOSFET</i> (průběh na zátěži)	19
Obr. 3.14	Činnost zpětné vazby (napětí na elektrodě GATE)	19
Obr. 3.15	Vliv rezistoru R_1 na sestupnou hranu (proud zátěží).....	20
Obr. 3.16	Blok pro převod $U-I$	20
Obr. 3.17	Simulace řízení proudové úrovně (I_{B5})	21
Obr. 4.1	Změna délky impulzu: a) 2,4 ms pro $R = 22 \text{ k}\Omega$; b) 6,8 ms pro $R = 60 \text{ k}\Omega$; c) 10,2 ms pro $R = 90 \text{ k}\Omega$;.....	22
Obr. 4.2	Závislost délky impulzu na hodnotě příslušného rezistoru.....	22
Obr. 4.3	Změna délky náběžné hrany: a) 2 ms pro $R = 25 \text{ k}\Omega$; b) 4,5 ms pro $R = 55 \text{ k}\Omega$; c) 8 ms pro $R = 100 \text{ k}\Omega$;	23
Obr. 4.4	Závislost délky náběžné hrany na hodnotě příslušného rezistoru.....	23
Obr. 4.5	Změna proudové úrovně: a) 10A pro $V_{in} = 1 \text{ V}$; b) 6,7 A pro $V_{in} = 0,67 \text{ V}$; b) 3 A pro $V_{in} = 0,3 \text{ V}$;	24
Obr. 4.6	Závislost proudové úrovně na hodnotě vstupního napětí.....	24
Obr. 4.7	Délka sestupné hrany: a) 4 μs ; b) 10 μs ; c) 30 μs ;.....	25
Obr. 4.8	Průběh krátkého impulzu, délka náběžné hrany 10 μs , délka celého impulzu 160 μs , délka sestupné hrany 30 μs , proudová úroveň 10A	25
Obr. 4.9	Reakce modulu na změnu zátěže	25

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1	Přehled a funkce jednotlivých Pinů <i>IO 555</i> [4].....	8
Tab. 5.1	Přehled dosažených parametrů.....	27

ÚVOD

Cílem této práce je navrhnout zdroj definovatelných proudových impulzů, jejichž proudová úroveň bude nastavitelná v řádu jednotek ampér, generovaných do zátěže odporového charakteru. Řídící část má být dle zadání analogová. Požadované časové parametry impulzu nebyly konkrétně zadány, pouze byl požadavek, zjistit jaké minimální časy, jsou vhodně zvoleným způsobem realizovatelné.

Celé zařízení lze rozdělit do několika funkčních bloků: spouště, řídicí části a výkonové části. Spoušť má za úkol odstartovat celý mechanismus. Řídící část zařízení musí uživateli umožnit nezávisle na sobě nastavit proudovou úroveň, délku náběžné hrany a délku celého impulzu. Výkonová část v okamžiku spuštění přijme informace z řídicí části a vytvoří na připojené zátěži požadovaný impulz, poté systém čeká na další spuštění.

V této práci je nejprve rozebrána teoretická část, kde jsou vysvětleny základní pojmy. Dále je uvedeno několik obvodových koncepcí zdrojů proudu. V další části jsou popsány způsoby analogového řízení. Následně je zde po blocích postupně popsána výsledná sestava včetně simulací z programu PSpice. Na závěr práce jsou diskutovány výsledky měření, které dokládají funkčnost a dosažené parametry výsledného zapojení.

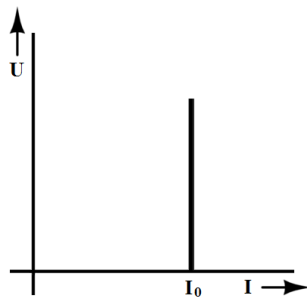
1 ZDROJE PROUDU

V této kapitole bude postupně rozebrána problematika proudových zdrojů. Nejprve jsou zde vysvětleny pojmy jako ideální zdroj proudu a reálný zdroj proudu, dále v textu jsou popsány různé obvodové koncepce zdrojů proudu v souvislosti s generováním proudových impulzů.

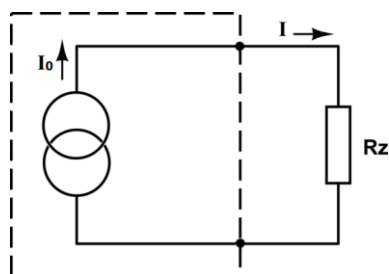
1.1 Teorie zdrojů proudu

1.1.1 Ideální zdroj proudu

Ideálním zdrojem proudu se rozumí takový zdroj, který neohledně na jakékoliv okolnosti (například velikost a charakter zátěže) dodává do zátěže stále konstantní proud, viz obr. 1.1. Takový zdroj má nekonečně velký vnitřní paralelní odpor. Z toho vyplývá že, vnitřním odporem neteče žádný proud a všechny generovaný proud je směřován do zátěže R_z . Také platí $I_0=I$, viz obr. 1.2. Dále musí tento zdroj disponovat nekonečně vysokým napětím potřebným pro udržení výstupního proudu v případě rozpojení výstupních svorek ideálně $R_z=\infty$ (Ohmův zákon). Realizace tohoto ideálního zdroje není z těchto důvodů možná.



Obr. 1.1 Zatěžovací charakteristika ideálního zdroje proudu

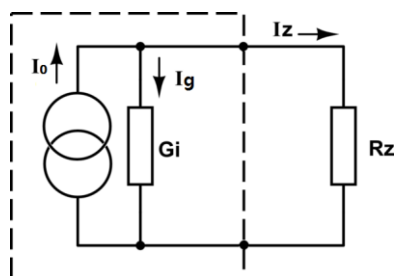


Obr. 1.2 Náhradní schéma ideálního zdroje proudu

1.1.2 Reálný zdroj proudu

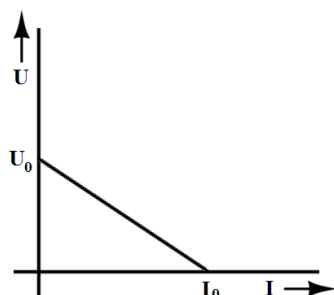
Při realizaci zdroje proudu se vlastnostmi snažíme přiblížit ideálnímu zdroji proudu, viz kapitola 1.1.1. Díky jistým technickým limitům se nám nikdy nepodaří dosáhnout všech

parametrů ideálního zdroje. Výsledný zdroj můžeme nahradit náhradním schématem, viz obr. 1.3 [5]. Ve schématu oproti ideálnímu zdroji proudu přibyla paralelně připojená vodivost. Tato vodivost způsobuje dělení generovaného proudu I_0 na proud vnitřní vodivosti I_g a proud do zátěže I_z .



Obr. 1.3 Náhradní schéma reálného zdroje proudu

Na obrázku obr. 1.4 je znázorněno, jak se reálný zdroj proudu chová při změně velikosti zátěže. Svorkové napětí klesá od hodnoty U_0 , která reprezentuje napětí na rozpojených svorkách, až po hodnotu $U=0V$ při svorkách zkratovaných, tehdy protéká svorkami proud na krátko $I_k=I_0$.



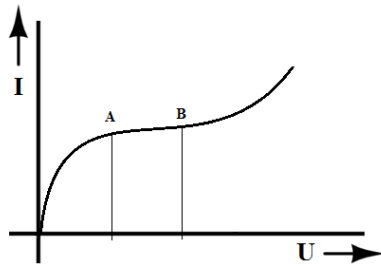
Obr. 1.4 Zatěžovací charakteristika reálného zdroje proudu

1.2 Nelineární prvky jako zdroje proudu

Za zdroje proudu lze považovat nelineární prvky, jejichž dynamický odpor je v daném pracovním bodě mnohem vyšší, jak odpor stejnosměrný [2].

1.2.1 Variátor

Jedním z těchto prvků je variátor. Ve skleněné baňce naplněné vodíkem je umístěn železný drát, při nárůstu napětí na tomto drátu roste i teplota drátu a tím i jeho odpor, v určité části V-A charakteristiky mezi body A a B viz obr. 1.5 je proud téměř konstantní [2]. V této oblasti se dříve variátor používal jako zdroj proudu, přičemž hodnotu stabilizovaného proudu určoval průřez tohoto drátu. Díky jeho vysoké spotřebě a nemožnosti řízení se dnes již nepoužívá.



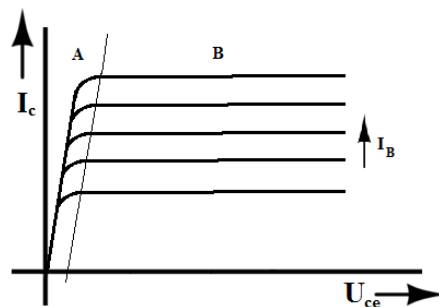
Obr. 1.5 V-A charakteristika variátoru

1.2.2 Bipolární tranzistor

Bipolární tranzistor je polovodičová součástka se dvěma *PN* přechody jejíž hlavní funkcí je schopnost řídit nízkým proudem do řídicí elektrody (báze) velký proud kolektorem a emitorem. Poměr mezi těmito proudy je staticky definován, parametrem h_{21}

$$h_{21} = \frac{I_c}{I_b}, \quad (1.1)$$

přičemž, I_c je proud kolektorem a I_b proud do báze. Jak je znázorněno na obr. 1.6 je nutné vhodně zvolit pracovní bod tranzistoru, který by se měl nacházet v lineární oblasti: oblast (B).



Obr. 1.6 Výstupní charakteristiky bipolárního tranzistoru

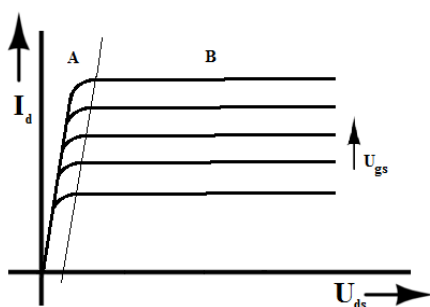
V této oblasti se bipolární tranzistor chová jako zdroj proudu. Bohužel abychom takto dostali zdroj proudu, musíme bázi napájet také zdrojem proudu. Proto použití bipolárního tranzistoru jako zdroje definovatelných proudových impulzů nemusí být příliš vhodné a to především pro výkonové bipolární tranzistory, které vyžadují do báze již celkem velký proud (mají nízké h_{21}).

1.2.3 Unipolární tranzistor

Unipolární tranzistory, nebo také pro jejich vysoký vstupní odpor *FET* (Field Effect Transistor) jsou tranzistory řízené polem. Vysoký vstupní odpor je velkou výhodou oproti bipolárním tranzistorům, které nepříznivě zatěžují vstupní zdroje signálu. Nevýhodou je však možnost poškození statickým výbojem [2],[3]. Další nevýhodou je

při rychlém spínání parazitní kapacita hradla [3].

Tyto tranzistory se dále dělí podle typu řídicího hradla na *IGFET*, *MOSFET*, *MISFET*, *JFET* [5]. Na obr. 1.7 se nachází výstupní charakteristika tranzistoru *MOSFET* s indukovaným kanálem typu *N*. Hned na první pohled vypadá jako výstupní charakteristika bipolárního tranzistoru (obr. 1.6), jen názvy oblastí jsou jiné. Pracovní bod by měl ležet v oblasti saturace (B). Nejpodstatnějším rozdílem je, že pro požadovaný zdroj proudu nepotřebujeme jiný zdroj proudu [2]. Postačí nám napěťový zdroj, který bude podle převodní charakteristiky (obr. 1.8) převádět napětí U_{gs} na proud I_d . Z tohoto důvodu je unipolární tranzistor pro aplikaci zdroje definovatelných proudových impulzů velice vhodný. Rozsah provozu však bude omezen typem zvoleného tranzistoru. Jistou nevýhodou je, že tato převodní charakteristika není lineární.



Obr. 1.7 Výstupní charakteristika *MOSFET* s indukovaným kanálem typu *N*



Obr. 1.8 Převodní charakteristika *MOSFET* s indukovaným kanálem typu *N*

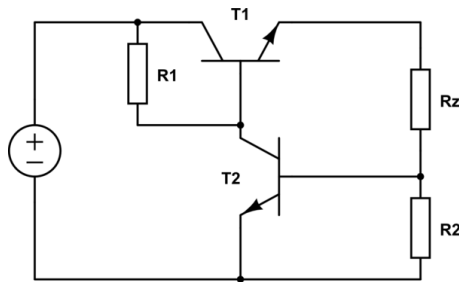
1.3 Koncepce zdroje proudových impulzů

Zdroj proudových impulzů by se měl ideálně skládat ze dvou základních částí: řídicí části a výkonové části. Tyto dvě části by mezi sebou měly být vhodně propojeny. Bloky řídicí části jsou popsány v kapitole 2. V této kapitole budou, rozebrána různá zapojení zdrojů proudu a budou diskutovány možnosti jejich řízení.

Požadovaný zdroj musí v klidovém stavu zajistit na výstupu nulový proud a na spouštěcí signál musí zareagovat velmi rychle, nejlépe okamžitě. Dále musí umožnit lineární náběh proudu, a to již od nulových hodnot. Požadovaný výstupní proud je

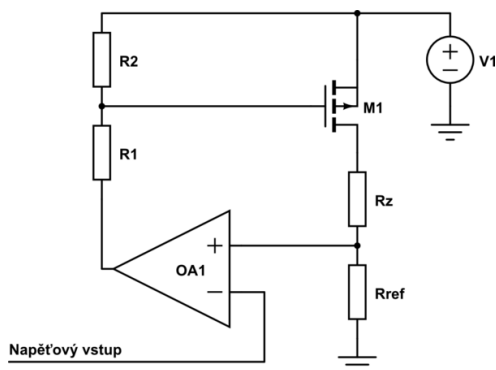
v jednotkách ampér.

Proudové zdroje se dají rozdělit na několik skupin. První skupina jsou zdroje tvořené diskrétními součástkami. Tyto zdroje jsou většinou složeny z nelineárních součástek a zpětné vazby, která zajistí stabilizaci výstupního proudu. Velkou výhodou těchto zdrojů je jejich univerzálnost, záleží jen na návrháři, jak zapojení modifikuje. Základ takovéhoto zapojení demonstruje obr. 1.9 [2]. Tento obvod stabilizuje proud na zátěži R_z . Princip je takový, že při zvýšení výstupního proudu se na rezistoru R_2 zvýší napěťový úbytek. Zvýší se i napětí U_{BE} tranzistoru T_2 a ten se otevře a tím přizemní bázi tranzistoru T_1 . V případě, že se výstupní proud sníží, tranzistor T_2 se přivře a T_1 se pootevře. Systém se ustálí a na výstupu je tak stabilizovaný proud. Velikost tohoto proudu lze řídit rezistorem R_2 [2],[3].



Obr. 1.9 Zdroj proudu z diskrétních součástek

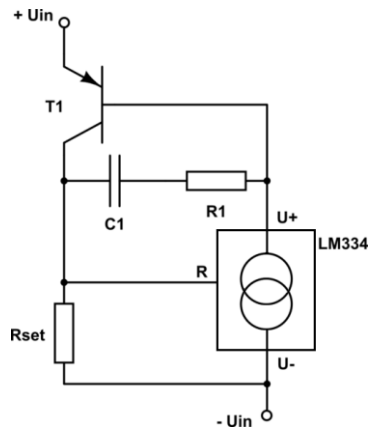
Jelikož proud v zapojení (obr. 1.9) lze řídit pouze změnou odporu R_2 není toto zapojení pro naši aplikaci příliš vhodné. Mnohem vhodnější je zapojení na obr. 1.10. Princip činnosti je velmi podobný předchozímu zapojení. Také je zde zpětná vazba a nelineární prvek. Výstupní proud je však v tomto zapojení řízený napětím přivedeným na záporný vstup OA_1 . To nám přináší možnost nejprve vytvořit požadovaný impulz napěťově a poté ho převést na impulz proudový.



Obr. 1.10 Zdroj proudu řízený napětím

Další skupinu zdrojů proudu tvoří takzvané integrované zdroje proudu. Jedná se o jedinou součástku, ve které je vše potřebné již integrováno. Největší výhodou těchto zdrojů je jejich jednoduchost. Ovšem jejich řízení se ve většině případů provádí pouze připojením rezistoru, což není ideální. Proudový rozsah těchto obvodů je také značně omezen, například integrovaný zdroj proudu LM234-3 je podle výrobce použitelný v rozsahu $1 \mu A$ až $100 mA$ [2]. Proudový zdroj lze samozřejmě posílit externím

tranzistorem (obr. 1.11) [2], ale to už zapojení ztrácí svoji jednoduchost. Zátěž se v tomto zapojení připojí sériově mezi $+U_{in}$ a V_{cc} , nebo $-U_{in}$ a GND .



Obr. 1.11 Zvýšení rozsahu u integrovaných zdrojů proudu

Do poslední skupiny se dají zařadit zdroje proudu tvořené stabilizátory napětí. Stabilizátory napětí jsou také integrované součástky, a také mají stejné výhody a nevýhody jako integrované zdroje proudu. V těchto zapojeních se využívá skutečnosti, že průchodem proudu přes odpor vzniká na tomto odporu napětí a pokud je toto napětí konstantní (to zaručí napěťový stabilizátor), tak je konstantní i daný proud [2].

2 ANALOGOVÉ ŘÍDÍCÍ BLOKY

Tato kapitola se zabývá způsoby generování, upravování a řízení analogových signálů, dle právě požadované funkce.

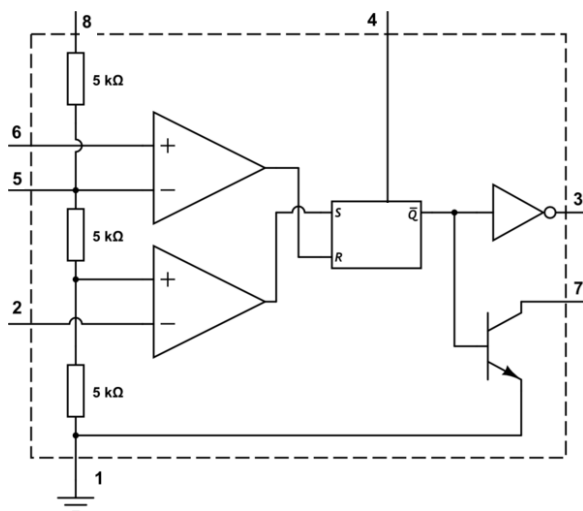
2.1 Generování obdélníkového impulzu

2.1.1 Časovač 555

Jedním z nejvíce používaných integrovaných obvodů pro práci s časem je obvod 555. Pro tento obvod bylo vymyšleno mnoho různých aplikací (časové spínače, impulzní generátory, zkoušečky, měřicí přístroje ...) a bylo napsáno několik knih. Tento obvod vznikl na přelomu šedesátých a sedmdesátých let minulého století a byl vyvinut jako časovač. Skládá se z kombinace analogových a číslicových částí integrovaných do jednoho čipu [4]. Dostupný je v provedení s osmi piny. Funkce jednotlivých pinů vysvětluje tabulka tab. 2.1. Vnitřní blokové zapojení ukazuje obrázek obr. 2.1 [4].

Tab. 2.1 Přehled a funkce jednotlivých Pinů IO 555 [4]

Pin	Označení	Popis funkce
1	GND	Zemní pin
2	TRIGGER	Spouštěcí pin
3	OUTPUT	Výstup obvodu
4	RESET	Nulovací vstup
5	CONTROL	Řídící napětí
6	THRESHOLD	Práh
7	DISCHARGE	Vybíjení
8	VCC	Napájecí napětí (4,5 V-16 V)



Obr. 2.1 Vnitřní blokové schéma IO 555 [4]

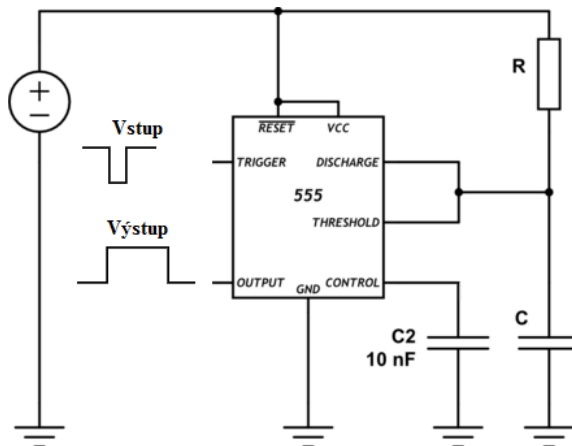
Základní zapojení *IO 555* je astabilní klopný obvod a monostabilní klopný obvod. Astabilní *KO* je vlastně impulzní generátor, na jehož výstupu se periodicky střídá logická nula a jedna. Frekvenci a střidu určují v tomto zapojení dva odpory a jeden kondenzátor [4].

Pro generování jednotlivého impulzu je vhodnější zapojení jako Monostabilní *KO* (obr. 2.2), v tomto zapojení obvod po příchodu sestupné hrany na spouštěcím pinu vygeneruje na výstupu obdélníkový impulz o předem definované délce, která je dána přibližně vztahem

$$T \approx 1,1 \cdot R \cdot C, \quad (2.1)$$

kde R a C jsou odpor a kondenzátor v zapojení na obr. 2.2 [4], a T je čas v sekundách. Doporučené hodnoty odporů a kapacit pro spolehlivou a přesnou funkci jsou: odpory od 2 k Ω do 20 M Ω , kapacity od 500 pF do 6,8 μ F a realizované zpoždění od 5 μ s do 150 s [4].

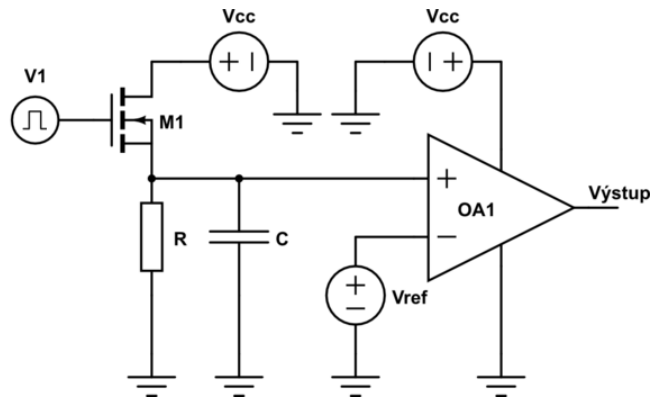
Takto vzniklý impulz má přibližně napětíovou úroveň napájecího napětí. Spouštěcí impulz musí být vždy kratší, než požadovaný výstupní impulz (obvod nedokáže překlopit výstup z vysoké na nízkou úroveň, pokud je na vstupu úroveň nízká).



Obr. 2.2 Monostabilní klopný obvod s 555

2.1.2 Generátor obdélníkového impulzu s *OZ*

Možnou náhradou *IO 555* v monostabilním zapojení může být obvod na obr. 2.3. Obvod se spustí krátkým impulzem do řídicí elektrody tranzistoru M_1 , tento impulz musí být natolik dlouhý, aby se kondenzátor C stihl přes tranzistor M_1 nabít na určitou úroveň (minimální úroveň pro správnou funkci musí být vyšší, než je hodnota V_{ref}). Komparátor OA_1 přepne na výstup V_{cc} . A kondenzátor C se začne přes odpor R vybíjet, až se kondenzátor vybije pod referenční napětí V_{ref} , komparátor OA_1 přepne výstup na nulu. Délku výstupního impulzu nastavujeme stejně jako u *IO 555* RC členem.

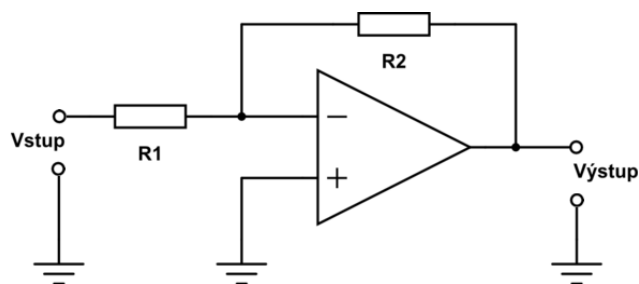


Obr. 2.3 Monostabilní klopný obvod s *OZ*

2.2 Operační zesilovače

Operační zesilovač je univerzální analogový aktivní prvek. Jedná se o aktivní součástku, což znamená, že potřebuje napájecí napětí. *OZ* je základním elektronickým prvkem pro práci s analogovými signály. Svými vlastnostmi se *OZ* blíží ideálním zesilovačům napětí. Zesílení bez zpětné vazby dosahuje hodnot až 10^7 . Vstupní odpor dosahuje hodnot až $10^{14} \Omega$, výstupní odpor je nízký v řádu jednotek Ohm, je však kmitočtově závislý. *OZ* je schopen zpracovávat signály stejnosměrné i střídavé do kmitočtu jednotek GHz [5]. U většiny zapojení se využívá zpětná vazba, která snižuje napěťové zesílení, zvětšuje šířku pásma. Zpětná vazba má vliv i na stabilitu a vstupní i výstupní impedanci [6].

Jedno ze základních zapojení *OZ* je invertující zesilovač. Schéma zapojení, viz obr.2.4.



Obr. 2.4 Invertující zesilovač s *OZ*

Zesílení tohoto zapojení lze při zanedbání vstupního proudu do vstupů *OZ* vypočítat podle rovnice [6]:

$$A_U = -\frac{R_2}{R_1}, \quad (2.2)$$

Další používané zapojení je sledovač signálu. Toto zapojení má na výstupu stejné napětí, jako na vstupu. Slouží k oddělení vysokoimpedančního uzlu a

nízkoimpedančního uzlu.

Pro převod napětí na výstupní proud lze použít *OZ* v zapojení jako Howlandova proudová pumpa [5].

Pro vytvoření lineární náběžné hrany je možné použít *OZ* v zapojení jako integrátor. Toto zapojení lze použít i jako filtr dolní propust [5].

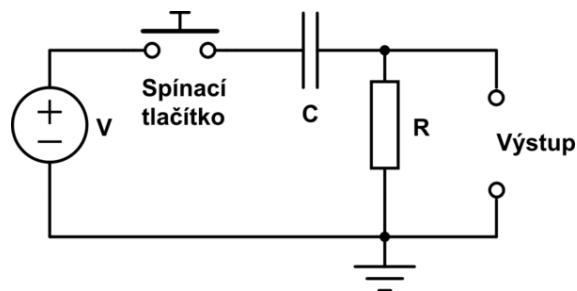
2.3 Realizace krátkého impulzu

Při návrhu řídicí části zdroje impulzu, je nutné vygenerovat spouštěcí impulz, který by odstartoval řídicí mechanismus. Tento spouštěcí impulz by měl být co možná nejkratší, pokaždé by měl být stejně dlouhý a neměl by mít žádné zákmity.

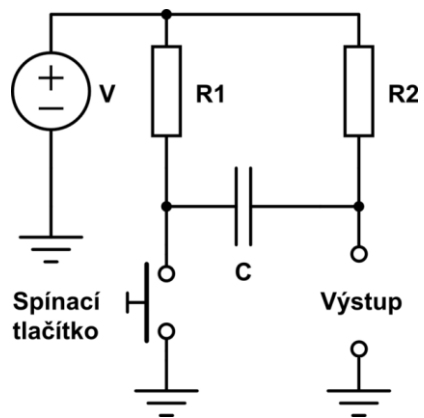
Všechny tyto požadavky by velice elegantně vyřešil výstup mikroprocesoru s příslušným jednoduchým programem, který by mohl obsahovat i řízení frekvence požadovaných výstupních impulzů. Jelikož se má tato práce zabývat analogovým řízením, musíme tuto možnost odložit.

Další možností je použití tlačítka (jedná se o spínací prvek, který má jen jednu stabilní polohu, většinou rozepnutou). Použití tlačítka bez potřebného ošetření by bylo velice nepřesné, jelikož obsluhující přístroje nedokáže pokaždé tlačítko stisknout na stejnou definovanou dobu.

Potřebné ošetření lze vyřešit derivačním článkem v zapojení podle obr. 2.5 nebo podle obr. 2.6, které je navrženo přímo pro obvod 555 v režimu monostabilního *KO*. V tomto režimu obvod reaguje na sestupnou hranu, viz kapitola 2.1.1.



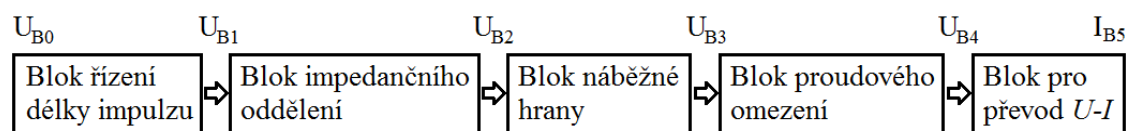
Obr. 2.5 Derivační článek



Obr. 2.6 Derivační článek pro generaci sestupné hrany

3 NÁVRH VÝSLEDNÉ SESTAVY

Tato kapitola postupně po blocích popisuje celý návrh výsledného modulu. Celkové schéma je přiloženo v přílohách (příloha A.1). Pro zdroj generující definovatelný proudový impuls byla vybrána koncepce, kde se nejprve posupně vytvaruje napěťový impuls, který se následně převede na impuls proudový a to pomocí unipolárního tranzistoru ze zpětnou vazbou. Výsledné blokové schéma je znázorněno na obr.3.1. Pro přehlednost jsou zde uvedeny názvy vstupních a výstupních veličin jednotlivých bloků, tyto názvy budou v rámci celé kapitoly dodržovány.



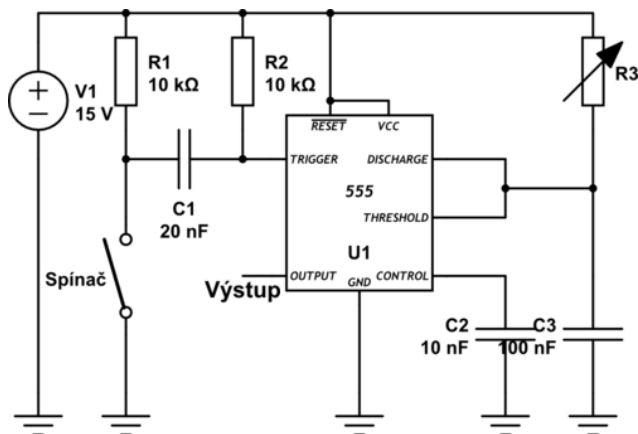
Obr. 3.1 Výsledné blokové schéma

Tato koncepce nám při relativně jednoduchém zapojení přinese velmi dobré výsledky, možnost nezávisle nastavovat výstupní proud, délku trvání a délku náběžné hrany. Výsledný obvod je navrhnut pro napájecí napětí ± 15 V, sloužící pro napájení *OZ* a *IO 555* a +30 V pro výkonovou část.

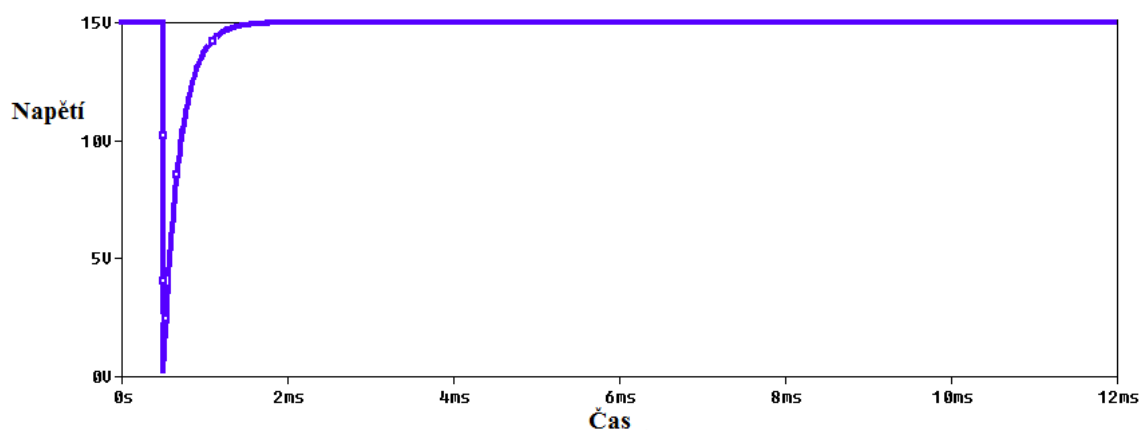
3.1 Blok řízení délky impulsu

Pro funkci řízení délky požadovaného impulsu byl vybrán časovač 555 a to pro jeho vysokou opakovací přesnost, která je uváděna jako 1%, dále kvůli jeho vysokému časovému rozsahu 5 μ s až 150 s [4], který je pro tuto aplikaci zcela dostačující. Spuštění systému je realizováno spínacím tlačítkem.

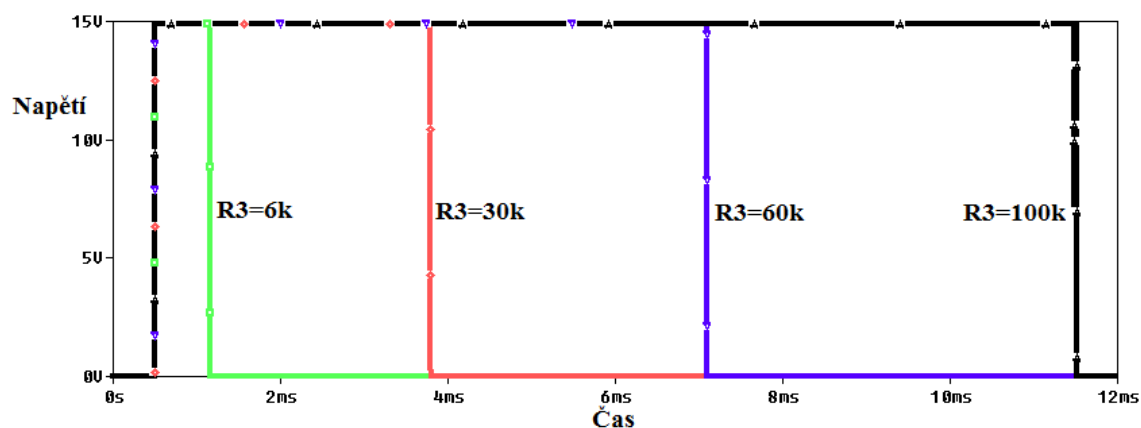
Výsledné zapojení tohoto bloku je znázorněno na obr. 3.2. Časovač 555 je zapojen v režimu monostabilního *KO*, který se spouští sestupnou hranou na řídicím pinu (Trigger). Tato sestupná hrana je vytvořena spínacím tlačítkem, které je ošetřeno derivačním článkem. Derivační článek zaručí, že se po stisknutí tlačítka objeví na řídicím pinu sestupná hrana, ale v řádu desetin milisekundy se vrací zpět na vysokou napěťovou úroveň, viz obr. 3.3. Toto ošetření je velmi důležité, protože člověk není schopen stlačit tlačítko vždy na stejnou dobu, tato doba musí být navíc velmi krátká, jelikož časovač 555 v tomto zapojení dokáže generovat na výstupu (output) pouze impulzy delší než je impuls spouštěcí. Délku výstupního impulsu určuje potenciometr R_3 a kondenzátor C_3 podle rovnice (1.1). Velikost kondenzátoru C_3 byla zvolena 100 nF a velikost $R_3=0$ k Ω -100 k Ω . Toto umožní časový teoreticky rozsah výstupních impulsů od 0 ms -11 ms, viz obr. 3.4. Hodnoty $R_1=10$ k Ω $R_2=10$ k Ω a $C_1=20$ nF byly s ohledem na požadovanou funkci optimalizovány podle simulací v PSpice.



Obr. 3.2 Časovač 555 generující definovatelnou délku impulsu



Obr. 3.3 Spouštěcí impuls (U_{B0})



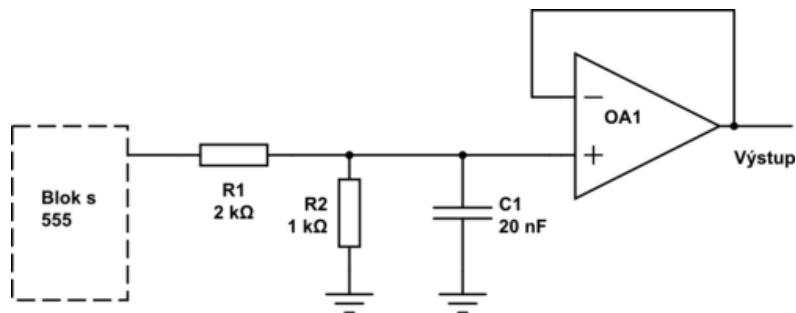
Obr. 3.4 Řízení délky impulsu (U_{B1})

3.2 Blok impedančního oddělení

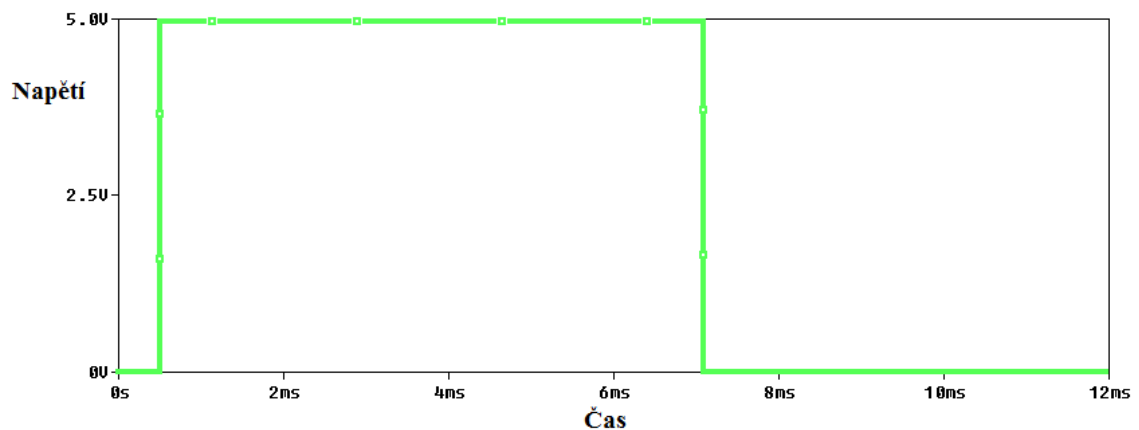
Tento blok pouze připravuje napěťový impuls vytvořený časovačem 555 pro další použití. Výstupní impuls z IO 555 má napěťovou úroveň přibližně stejnou, jako je napájecí napětí tohoto obvodu a může obsahovat nežádoucí zákmity, což není pro další

zpracování vhodné. Z těchto důvodů je nutné impuls příslušně upravit.

Výsledné zapojení tohoto bloku se nachází na obr. 3.5. Pro potlačení nežádoucích zákmitů postačí filtrační kondenzátor C_1 , který vyfiltruje vyšší harmonické, a pro snížení napěťové úrovně odporový dělič tvořený rezistory R_1 a R_2 jejichž hodnoty jsou voleny tak, aby z původních 15 V (V_{cc}) vytvořily impuls o velikosti 5 V (obr. 3.6), který je pro následné úpravy mnohem vhodnější. Další nezbytností je zde impedanční oddělení, realizované operačním zesilovačem v zapojení jako sledovač signálu. Simulace ukázaly, že v tomto případě by neoddělené impedance způsobily závislost výstupního proudu na zvolené délce náběžné hrany, a v krajním případě by dokonce po proběhnutí impulsu výstupními svorkami dále protékal proud v řádu jednotek ampér. Z těchto důvodů je tento blok zcela nezbytný.



Obr. 3.5 Blok impedančního oddělení



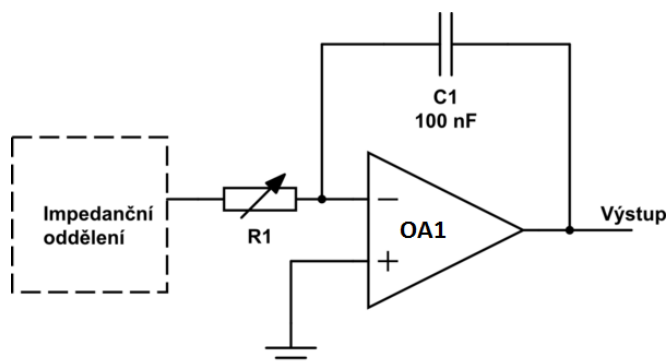
Obr. 3.6 Impedanční oddělení (U_{B2})

3.3 Blok náběžné hrany

Tento blok slouží k vytvoření lineární náběžné hrany o požadované délce. Pro vytvoření lineární náběžné hrany, byl vybrán integrátor s *OZ*.

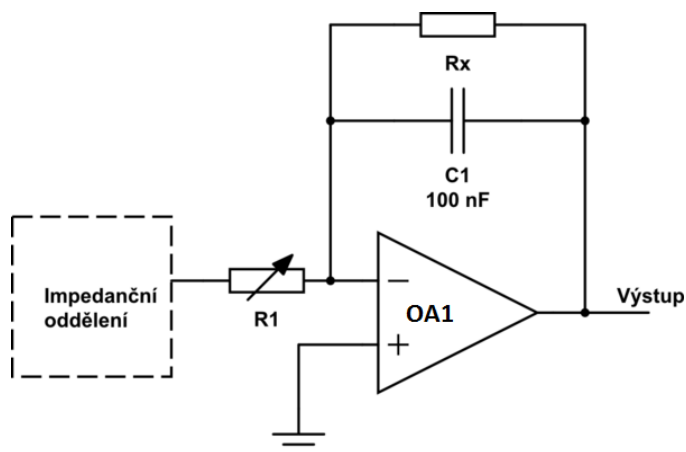
Při použití samotného integrátoru (obr. 3.7) nastává problém v okamžiku, kdy by

se měl impuls ukončit. Kondenzátor ve zpětné vazbě zůstává nabitý a operační zesilovač udržuje na svém výstupu konstantní napětí (ve stavu bez zátěže).



Obr. 3.7 Integrátor

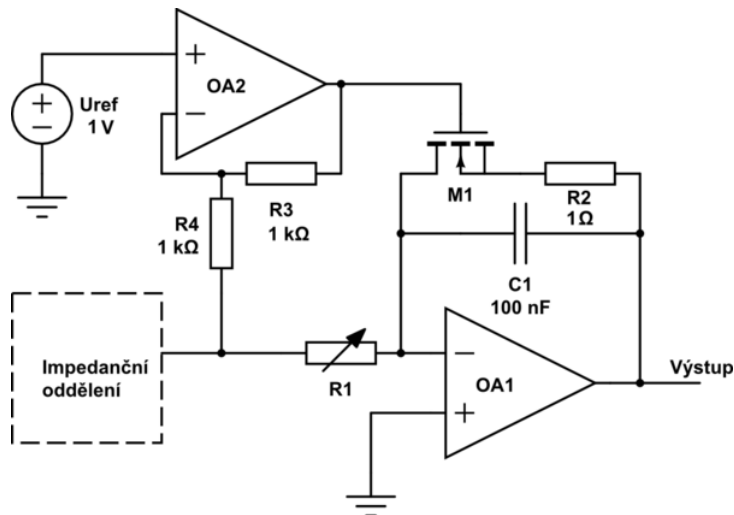
Řešením tohoto problému, může být paralelní připojení rezistoru ke zpětnovazebnímu kondenzátoru (obr. 3.8) rezistor R_x . Bohužel toto řešení je prakticky nepoužitelné. Pokud použijeme rezistor nízké hodnoty až do desítek $k\Omega$, bude tento odpor nepříznivě ovlivňovat časovou konstantu nabíjení a zesílení OZ , které bude navíc velmi závislé na právě zvolené délce náběžné hrany (rezistor R_1). Druhou možností je použití rezistoru s vysokým odporem (od stovek $k\Omega$), takovýto rezistor ovlivňuje zesílení OZ menší měrou, ale vybíjení kondenzátoru probíhá velice pomalu.



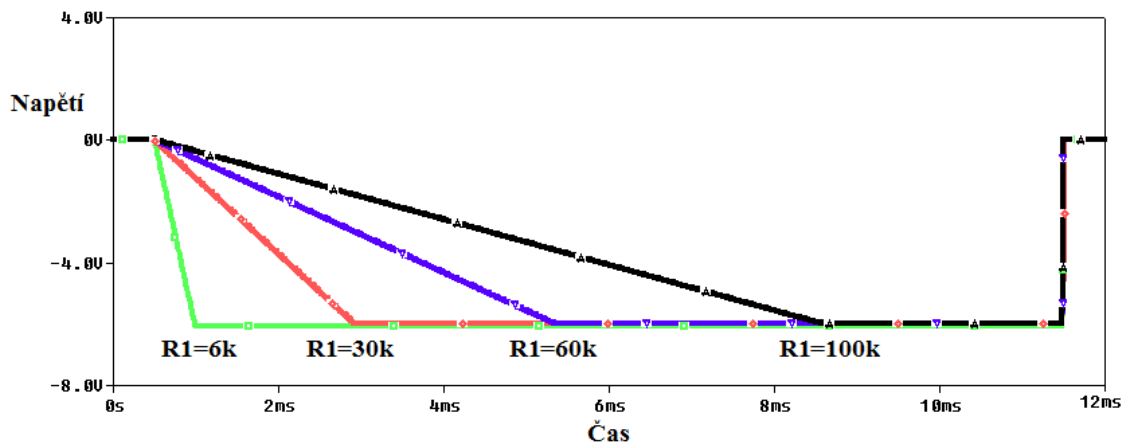
Obr. 3.8 Integrátor se zpětnovazebním rezistorem

Výsledné řešení s OZ , unipolárním tranzistorem a rezistorem s nízkým odporem ve zpětné vazbě (obr. 3.9), kombinuje výhody nízkého i vysokého odporu ve zpětné vazbě dohromady. OA_2 porovnává vstupní napětí na záporném vstupu s referenčním napětím na kladném vstupu U_{ref} , jestliže je na záporném vstupu vyšší napěťová úroveň než je referenční napětí, OA_2 uzavře tranzistor M_1 , kterým neprotéká žádný proud a tak negativně neovlivňuje funkci integrátoru. V opačném případě OA_2 tranzistor otevře a tím se uplatní rezistor R_2 . Zpětnovazební kondenzátor integrátoru se přes tento odpor rychle vybije a tím vznikne na výstupu rychlá sestupná hrana. Hodnota C_1 je volena

100 nF a potenciometr R_1 je volen 0-100 k Ω . Tyto hodnoty zaručí možnost nastavení náběžné hrany až do délky 8 ms, viz obr. 3.10 (impulz generovaný IO 555 je max. 11 ms dlouhý).



Obr. 3.9 Výsledné zapojení integrátoru



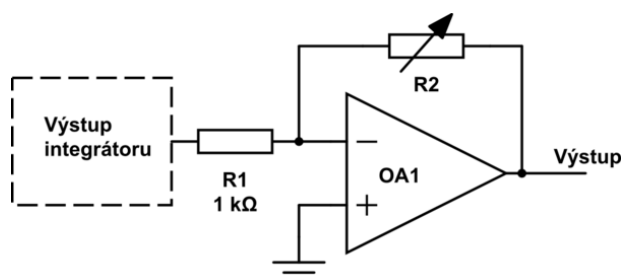
Obr. 3.10 Simulace řízení délky náběžné hrany (U_{B3})

3.4 Blok proudového omezení

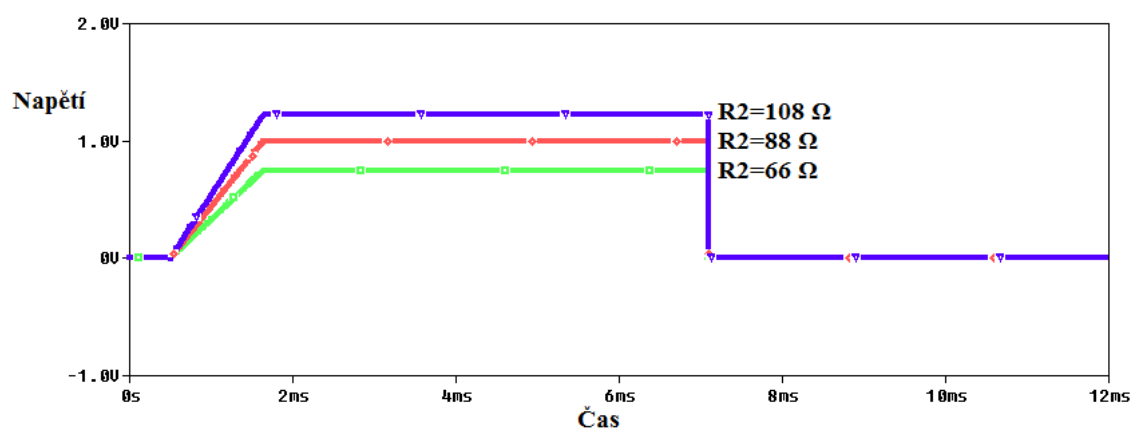
Tento blok slouží k invertování výstupního signálu integrátoru (pro získání kladného impulsu). Dále tento blok slouží k zeslabení amplitudy signálu na požadovanou hodnotu.

Blok je tvořen OZ v zapojení invertujícího zesilovače (obr. 3.11). Rezistor ve zpětné vazbě bude tvořen trimrem a při realizaci modulu tak bude možné, přesné nastavení požadovaného výstupního napětí tohoto bloku. Toto napětí bude reprezentovat jistý způsob proudového omezení. Jestliže v následujícím bloku (kapitola 3.5) bude jako referenční rezistor zapojen rezistor 0.1 Ω , tak 1 V na výstupu tohoto bloku (U_{B4}) bude představovat proudové omezení 10 A (Ohmův zákon).

Relativně nízkou hodnotu 1 V jsem zvolil z důvodu snížení napěťového úbytku na referenčním rezistoru (R_{ref}) z následujícího bloku (kapitola 3.5). Jestliže výstupní signál předešlého bloku (U_{B3}) má amplitudu -15 V, R_1 je volen 1 k Ω , vychází $R_2=66.6 \Omega$. Hodnota R_2 je pouze orientační a bude závislá na přesném U_{B3} . Výsledek simulace je na obr. 3.12.



Obr. 3.11 Blok proudového omezení



Obr. 3.12 Omezení napěťové úrovně na 1 V (U_{B4})

3.5 Blok pro převod $U-I$

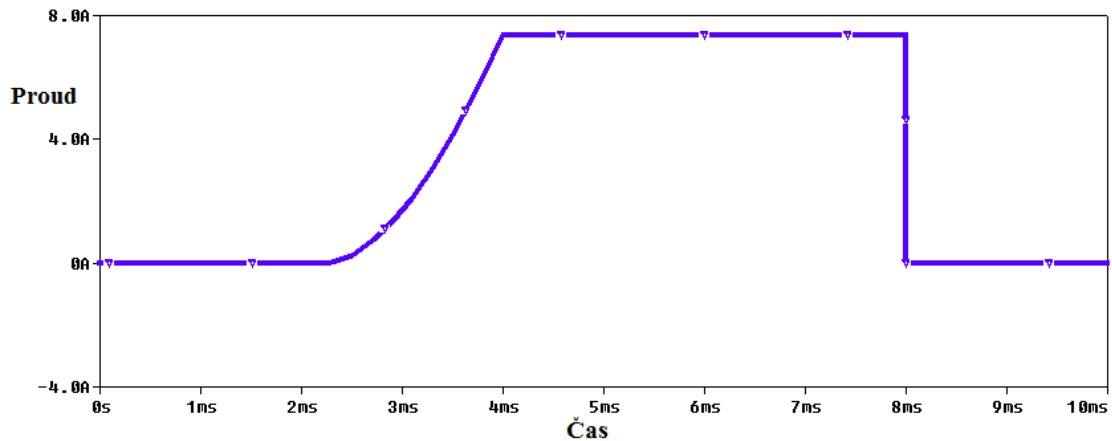
Funkce tohoto bloku je převést vstupní napěťový impulz na impulz proudový, s možností nastavení proudové úrovně.

Tento blok, jenž se nachází na obr. 3.16, má již na vstupu kladný impulz o požadované celkové délce a délce náběžné hrany upravený na napěťovou úroveň 1 V. K řízení proudové úrovně impulzu slouží potenciometr s vyvedeným středem R_3 . Tímto potenciometrem je umožněno lineární nastavení napětí v rozsahu 0-1 V, což dále představuje proud $0-I_{max}$ (obr. 3.17).

I_{max} je dáno referenčním odporem R_{ref} , který je zvolen 0,1 Ω a výstupním napětím předchozího bloku (U_{B4}), které je zvoleno 1 V.

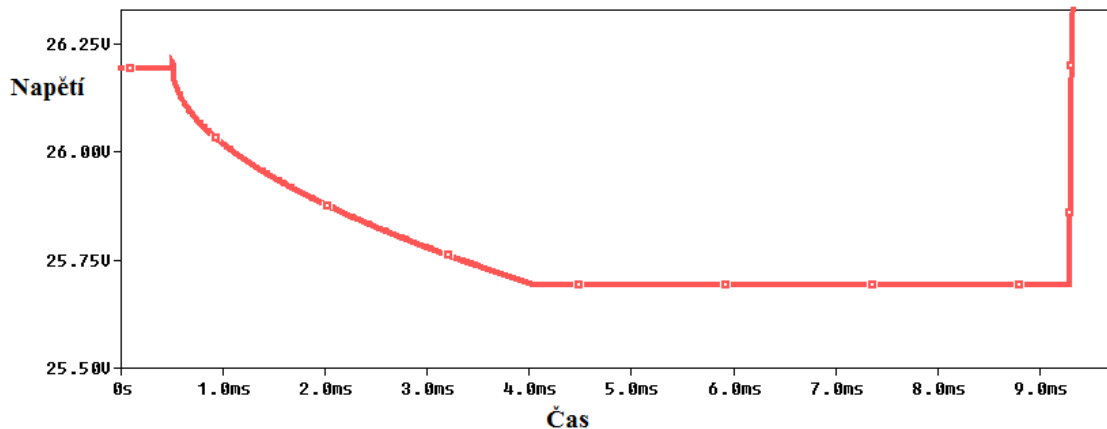
Tímto je požadovaný impulz plně určen a zbývá ho pouze převést na impulz proudový. Tento převod zajistí unipolární tranzistor, který převádí vstupní napětí na výstupní proud. Tento tranzistor by bylo možno teoreticky použít i bez zpětné vazby, ale v tomto případě by se na náběžné hraně proudového impulzu projevila nelinearita

převodní charakteristiky použitého tranzistoru, tak jak je to vidět na obr. 3.13



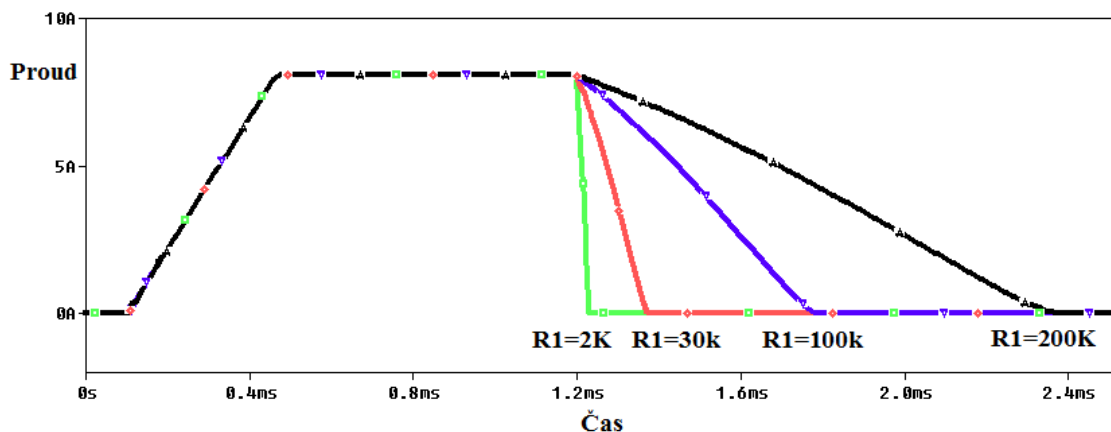
Obr. 3.13 Důsledek nelinearity převodní charakteristiky tranzistoru *MOSFET* (průběh na zátěži)

Lepší řešení je použít k řízení tranzistoru *OZ* s nelineární zpětnou vazbou (Obr. 3.16), která vyrovná nelinearity použitého tranzistoru, a tak věrněji převede napěťový impuls na impuls proudový. Obr. 3.14 názorně ukazuje chování zpětné vazby, pro lineární náběh proudu na výstupu (Obr. 3.17) zpětná vazba na řídicí elektrodě *GATE* vytvoří tuto nelinearitu, která je opačná k nelinearitě na obr. 3.13.



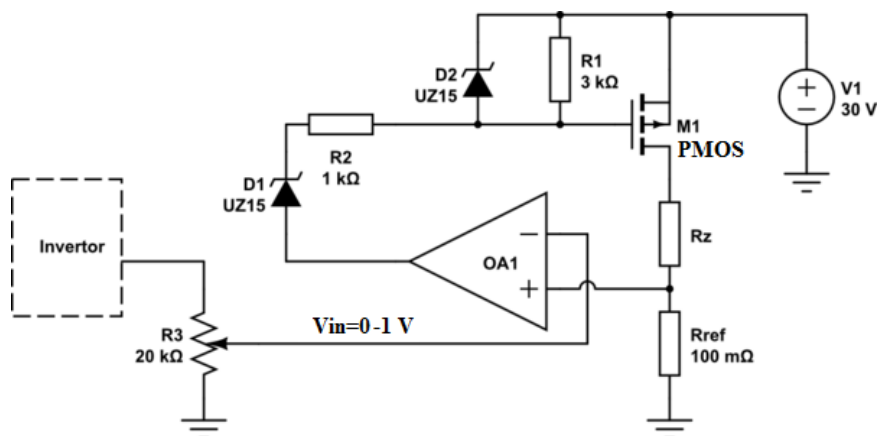
Obr. 3.14 Činnost zpětné vazby (napětí na elektrodě *GATE*)

Dále nám toto zapojení (Obr. 3.16) zajistí proudové omezení a nezávislost výstupního proudu na právě použitém tranzistoru a na změnách napájecího napětí. Zpětná vazba *OZ* OA_1 se pouze snaží vyrovnat napěťovou úroveň vstupního signálu a napěťovou úroveň na referenčním rezistoru R_{ref} , a tak otevírá a přivítá tranzistor M_1 , aby na tomto rezistoru výstupní proud vytvořil požadované napětí [5]. Zenerova dioda D_2 zapojená mezi U_{gs} tranzistoru M_1 chrání tranzistor před kritickou hodnotou U_{gs} , která nastane, když není *OZ* schopen vytvořit na výstupu dostatečný proud, který by vyrovnal napěťové úrovně obou vstupů [5]. Rezistory R_1 a R_2 slouží k vybíjení kapacit a omezení protékajících proudů, jejich hodnoty byly optimalizovány simulacemi. Vliv rezistoru R_1 ukazuje Obr. 3.15.

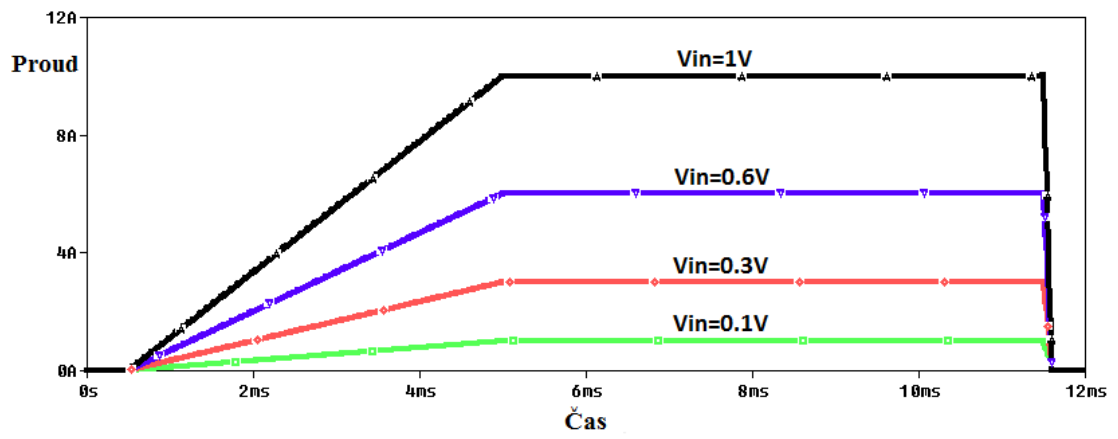


Obr. 3.15 Vliv rezistoru R_1 na sestupnou hranu (proud zátěží)

Zenerova dioda D_1 zapojená na výstupu OZ , slouží k možnosti OZ uzavřít tranzistor, který je připojen na vyšším napětí než je dostupné napětí tohoto OZ (Zenerova dioda pouze zvýší výstupní napětí OZ o Zenerovo napětí). Jestliže je napájecí napětí OZ voleno ± 15 V a tranzistor M_1 je připojen k napětí $+30$ V, tak je vhodné, aby Zenerova dioda vyrovnala rozdíl těchto napětí ($30 - 15 = 15$ V) a tak mohla U_{gs} tranzistoru snížit až na hodnotu 0 V. Podle simulací by postačovala i Zenerova dioda s nižším závěrným napětím, ale je vhodné mít určitou rezervu.



Obr. 3.16 Blok pro převod $U-I$



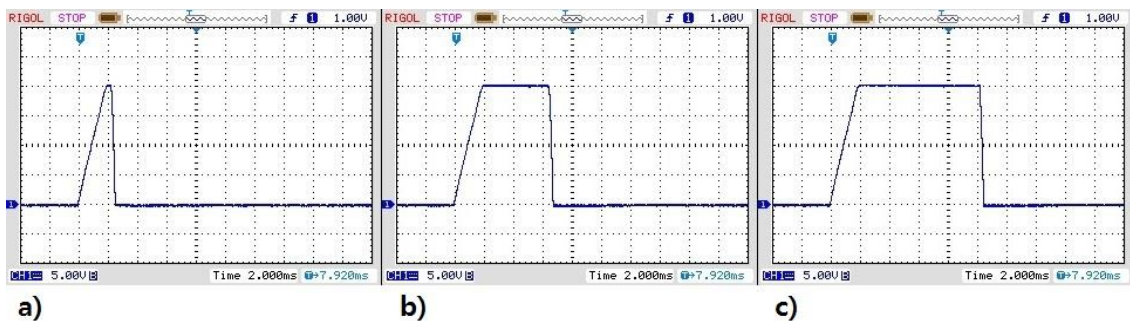
Obr. 3.17 Simulace řízení proudové úrovně (I_{B5})

4 REALIZACE

Výsledný modul byl realizován jako deska plošných spojů, která umožňuje některé zásadní součástky například výkonový tranzistor vyměnit bez nutnosti pájení. Tento přístup je velmi výhodný při testování i při provozu, neboť umožňuje rychlé a jednoduché modifikace. Realizovaný modul byl podroben laboratorním testům za účelem ověření jeho celkové funkčnosti, zjištění reálných parametrů a případně odhalení možných slabín.

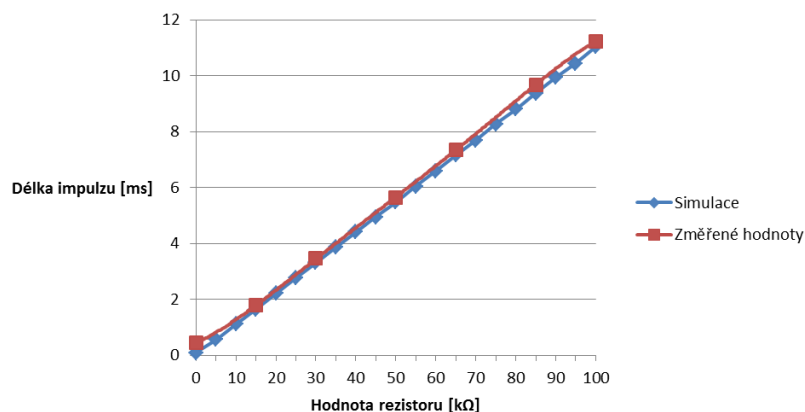
Výsledné zařízení pracuje dle předpokladů, po stisknutí tlačítka se na zátěži vygeneruje impuls, který odpovídá právě nastaveným hodnotám proudu, délce náběžné hrany a délce celého impulsu. Při testování byl modul napájen laboratorními zdroji a vzniklé impulsy byly zaznamenávány pomocí digitálního osciloskopu s *USB* výstupem.

Obrázek 4.1 názorně ukazuje možnost změny délky impulsu pomocí příslušného potenciometru, přičemž je patrné, že ostatní parametry impulsu zůstávají nezměněny.



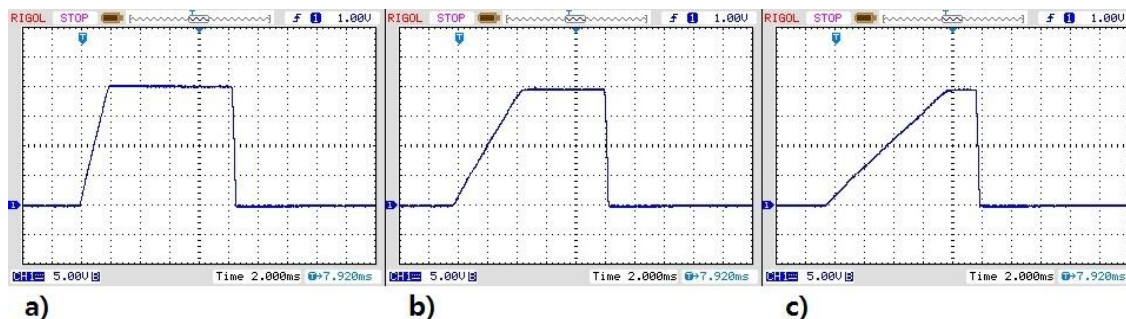
Obr. 4.1 Změna délky impulsu: a) 2,4 ms pro $R = 22 \text{ k}\Omega$; b) 6,8 ms pro $R = 60 \text{ k}\Omega$; c) 10,2 ms pro $R = 90 \text{ k}\Omega$;

Obrázek 4.2 ukazuje závislost délky impulsu na hodnotě příslušného rezistoru. Z obrázku vyplývá, že je závislost téměř lineární, a že změřené hodnoty se téměř shodují se simulací.



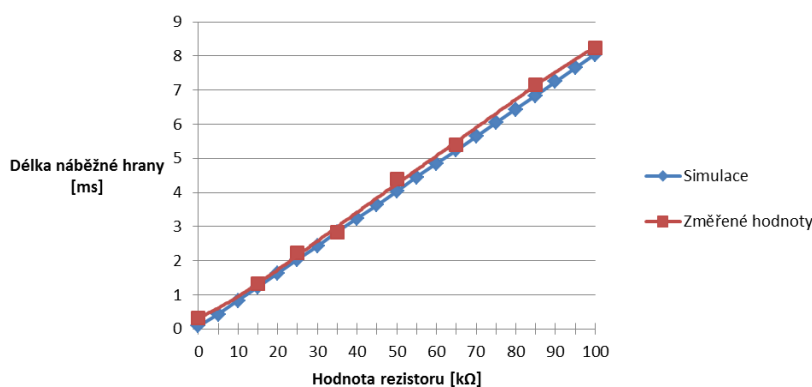
Obr. 4.2 Závislost délky impulsu na hodnotě příslušného rezistoru

Obrázek 4.3 znázorňuje změnu délky náběžné hrany, přičemž proudová úroveň a délka impulsu zůstává nezměněna. Může se zdát, že se impuls se zdelšující se náběžnou hranou zkracuje, ale není tomu tak pouze se posouvá směrem doleva, což je způsobeno nastavením triggeru osciloskopu.



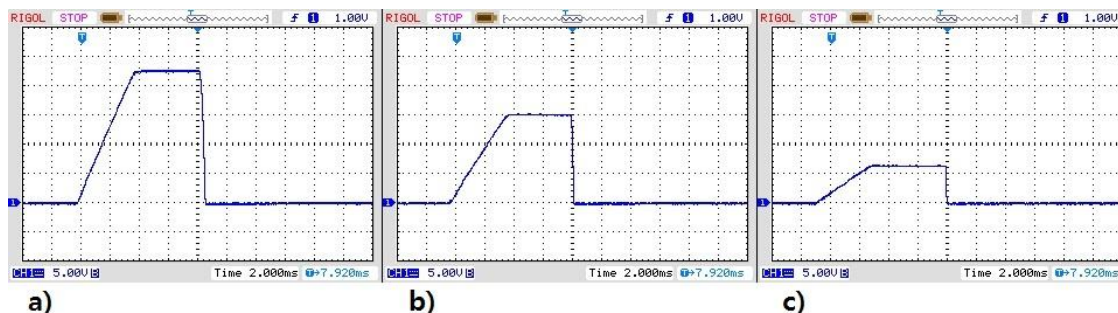
Obr. 4.3 Změna délky náběžné hrany: a) 2 ms pro $R = 25 \text{ k}\Omega$; b) 4,5 ms pro $R = 55 \text{ k}\Omega$; c) 8 ms pro $R = 100 \text{ k}\Omega$;

Obrázek 4.4 ukazuje závislost délky náběžné hrany na hodnotě příslušného rezistoru. Z obrázku vyplývá, že je závislost lineární, a že změřené hodnoty se téměř shodují se simulací.



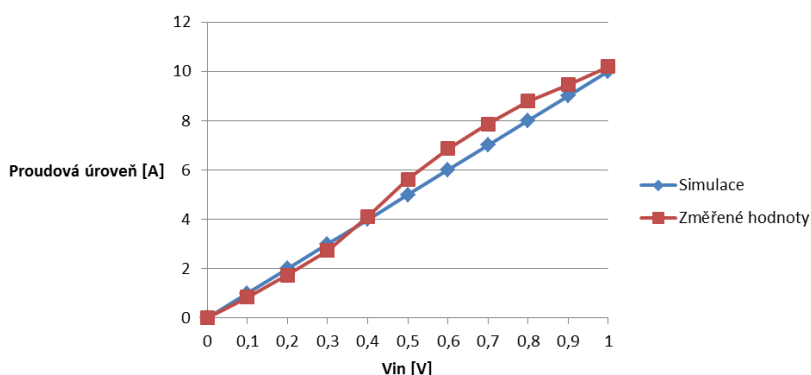
Obr. 4.4 Závislost délky náběžné hrany na hodnotě příslušného rezistoru

Obrázek 4.5 ukazuje možnost nastavení různé proudové úrovně. Stejně jako v předchozím případě se impuls na obrázku mírně posouvá směrem doleva.



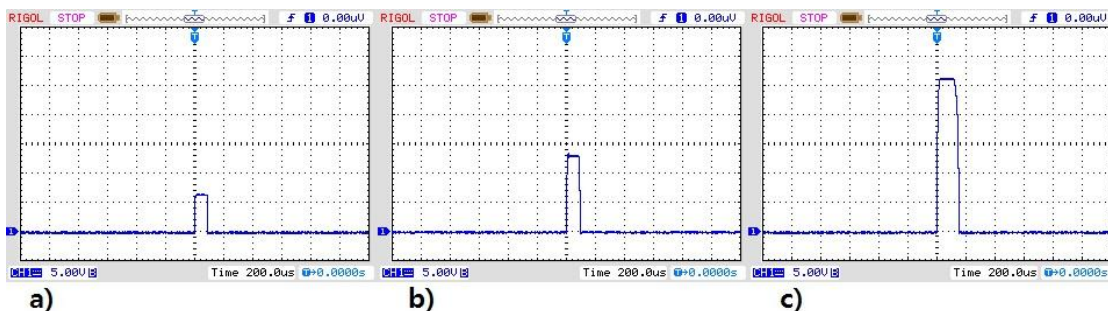
Obr. 4.5 Změna proudové úrovně: a) 10A pro $V_{in} = 1$ V; b) 6,7 A pro $V_{in} = 0,67$ V; b) 3 A pro $V_{in} = 0,3$ V;

Obrázek 4.6 ukazuje závislost proudové úrovně na hodnotě vstupního napětí (toto napětí je řízeno potenciometrem s vyvedeným středem). Zde je vidět, že nastavování proudové úrovně není zcela lineární, to však nemá na celkovou činnost modulu zásadnější vliv.



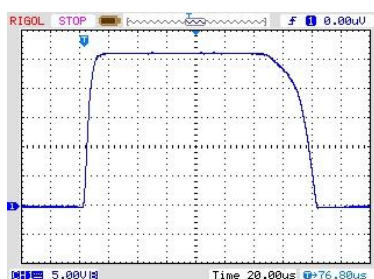
Obr. 4.6 Závislost proudové úrovně na hodnotě vstupního napětí

Testy dále ukázaly, že zařízení je spíše vhodné pro generování impulzů delších než 1 ms, kde jsou nastavené hodnoty proudu, náběžné hrany a délky impulzu na sobě téměř nezávislé, a nastavování parametrů je lineární. Realizovatelné časy jsou, až do stovek μs , zde se však projevují nelinearity a závislosti nastavených parametrů. Na obrázku 4.7 vidíme impuls délky cca 100 μs , v závislosti na nastavené proudové úrovni. S délkou impulzu se v tomto případě nemanipulovalo, ale je zde vidět, že impuls je při nastavené vyšší proudové úrovni o poznání delší. Důvodem je proměnná délka sestupné hrany. Použití kvalitnějších operačních zesilovačů nebude mít na zlepšení tohoto parametru téměř žádný vliv, neboť tento parazitní jev vzniká až ve výkonové části, při vybíjení kapacity hradla výkonového tranzistoru.



Obr. 4.7 Délka sestupné hrany: a) 4 μ s; b) 10 μ s; c) 30 μ s;

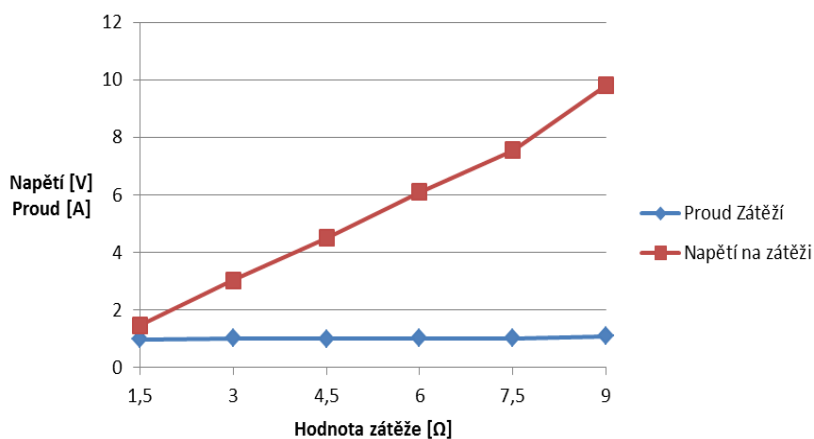
Průběh takto krátkého impulsu ukazuje obr. 4.8.



Obr. 4.8 Průběh krátkého impulsu, délka náběžné hrany 10 μ s, délka celého impulsu 160 μ s, délka sestupné hrany 30 μ s, proudová úroveň 10 A

Předchozí testy ukazují pro přehlednost změnu impulsu vždy jen v jednom parametru. Výsledné zařízení samozřejmě umožňuje libovolné nastavení všech parametrů impulsu.

Obrázek 4.9 ukazuje reakci modulu na změnu zátěže. Je zde patrné, že při zvyšování odporu zátěže, napětí na zátěži lineárně roste, tak aby byla udržena konstantní hodnota proudu. Toto chování je pro proudový zdroj zásadní.



Obr. 4.9 Reakce modulu na změnu zátěže

Testy bylo také zjištěno, že při používání modulu je nutné zajistit řídicí části nepřetržité napájecí napětí. V případě výpadku napájecího napětí řídicí části začne téct přes výstupní svorky maximální možný proud, s ohledem na připojenou zátěž (výkonový tranzistor je plně otevřen). To může vést ke zničení připojené zátěže i výkonového tranzistoru.

Také je nutné zajistit výkonové části dostatečně silný zdroj, který by měl mít výkon ideálně 300 W (30 V . 10 A).

5 ZÁVĚR

V této bakalářské práci byly nejprve diskutovány způsoby provedení zdroje definovatelných proudových impulzů a možnosti jeho řízení. Cílem bylo navrhnout jednoduché analogové zařízení, které bude disponovat v úvodu rozebranými možnostmi variability generovaného impulzu a zjistit jaké minimální časy jsou vhodně zvoleným způsobem realizovatelné. Na základě teoretických poznatků bylo navrženo optimální řešení, které splňuje veškeré zadané požadavky.

Výsledné zapojení se skládá z řídicí části, kde se postupně vytvaruje napěťový impulz a výkonové části, kde se tento impulz převede na požadovaný proudový impulz. Pro funkci řízení délky impulzu byl vybrán integrovaný obvod 555. Pro nastavení délky naběžné hrany byl použit integrátor s operačním zesilovačem. Jako výkonový prvek byl vybrán unipolární tranzistor *MOSFET* s indukovaným kanálem typu *P*.

Hodnoty součástek výsledného zapojení jsou voleny tak, aby zapojení splňovalo parametry, viz tab.5.1. Tyto parametry byly teoreticky předpokládány a měřením ověřeny. Délka impulzu a délka naběžné hrany lze jednoduše upravit změnou příslušných *RC* členů. Maximální proudovou úroveň lze jednoduše měnit příslušným zesilovačem s *OZ*, s ohledem na parametry použitého výkonového tranzistoru. Maximální výkon na zátěži je limitován maximálním povoleným proudem a napájecím napětím. Napájecí napětí v tomto zapojení není bohužel možné neomezeně zvyšovat. Při potřebě výrazně vyšších napájecích napětí je vhodné oddělit řídicí a výkonovou část například optočlenem.

Tab. 5.1 Přehled dosažených parametrů

Parametr	Dosažená hodnota
Délka impulzu	100 μ s - 11 ms
Délka naběžné hrany	10 μ s - 8 ms
Proudová úroveň	0 A - 10 A
Maximální výkon na zátěži	270 W (impulzově)

LITERATURA

- [1] NOVOTNÝ, V., VOREL, P., PATOČKA, M. Napájení elektronických zařízení. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2004.
- [2] KREJČÍŘÍK, Alexandr a Jenö TIHANYI. Napájecí zdroje I: Základní zapojení analogových a spínaných napájecích zdrojů. 2. vyd. Praha: BEN, 1997, 341 s. ISBN 80-860-5602-3.
- [3] STENGL, Jens Peer a Jenö TIHANYI. Výkonové tranzistory MOSFET. 1. české vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1999, 191 s. ISBN 80-860-5654-6.
- [4] HÁJEK, Jan a Jenö TIHANYI. 3x časovač 555: praktická zapojení se třemi časovači. 1. vyd. Praha: AA, 1999, 127 s. ISBN 80-860-5636-8.
- [5] LÁNÍČEK, R a Jenö TIHANYI. Elektronika obvody, součástky, děje: Základní zapojení analogových a spínaných napájecích zdrojů. 2. vyd. Praha: BEN, 1998, 478 s. ISBN 80-860-5625-2.
- [6] PUNČOCHÁŘ, Josef. Operační zesilovače v elektronice. 5. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-730-0059-8.

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

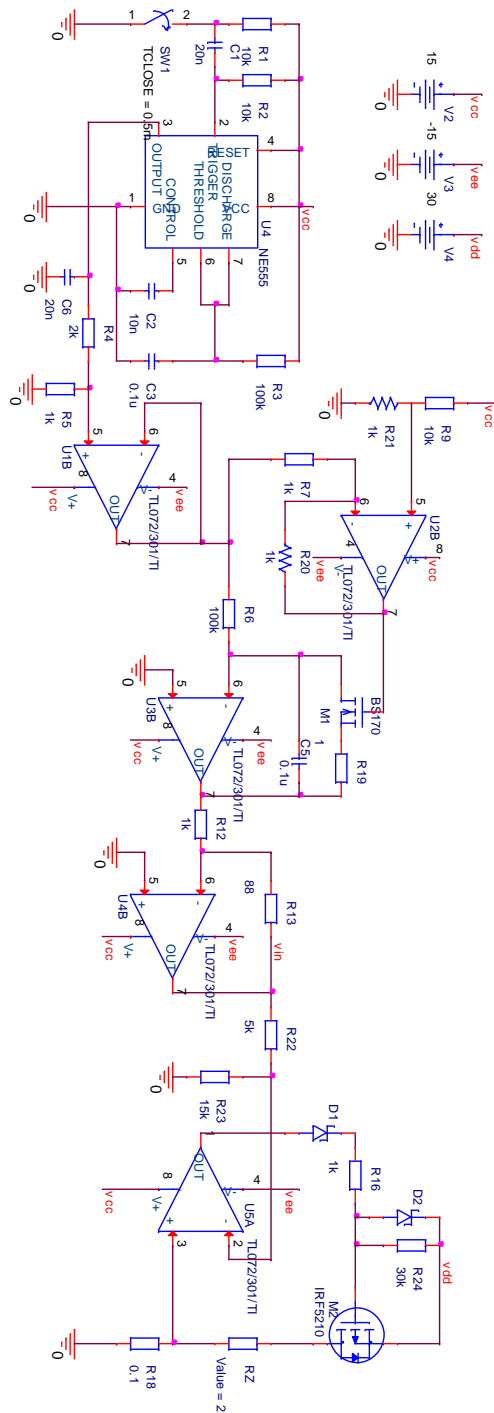
<i>V-A</i>	Volt-ampér	
<i>PN</i>	rozhraní příměsového polovodiče typu P a polovodiče typu N	
<i>MOS</i>	Metal Oxide Semiconductor, kov(M)-oxid(O)-polovodič(S)	
<i>FET</i>	Field-Effect Transistors, tranzistor řízený polem	
<i>IO</i>	Integrovaný obvod	
<i>KO</i>	Klopný obvod	
<i>OZ</i>	Operační zesilovač	
<i>RC</i>	Rezistor-kapacitor	
<i>GND</i>	zemní svorka	
I_o	Proud ideálního zdroje	[A]
R_z	Odpor zátěže	[Ω]
I	Proud	[A]
G_i	Vnitřní vodivost zdroje	[S]
U_0	Napětí na prázdko	[V]
A_u	Napět'ový přenos	[-]
I_k	Proud na krátko	[A]
h_{21}	diferenciální proudový přenos	[-]
I_C	Proud kolektorem	[A]
I_B	Proud bázi	[A]
U_{GS}	Napětí mezi gate a source	[V]
R	Odpor	[Ω]
C	Kapacita	[F]
V_{cc}	Napájecí napětí	[V]
V_{ref}	Referenční napětí	[V]
I_{max}	Maximální proud	[A]
R_{ref}	Referenční odpor	[Ω]

SEZNAM PŘÍLOH

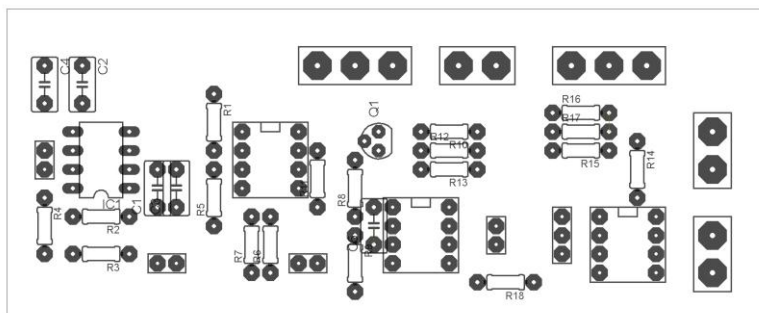
A	Návrh zařízení	31
A.1	Obvodové zapojení	31
A.2	Deska plošného spoje – top (strana součástek).....	32
A.3	Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)	32
A.4	Realizovaný modul	32
A.5	Přední panel	33
B	Seznam součástek	34

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

A.1 Obvodové zapojení

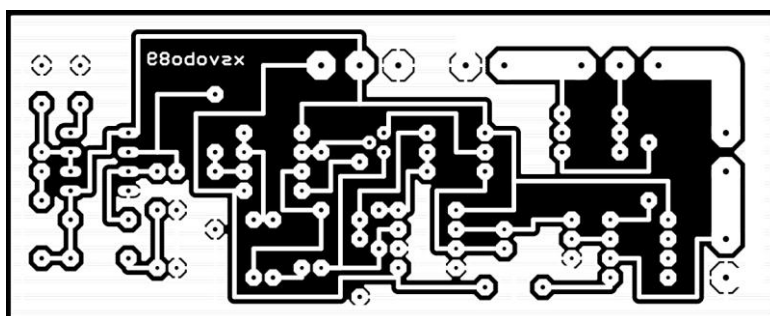


A.2 Deska plošného spoje – top (strana součástek)



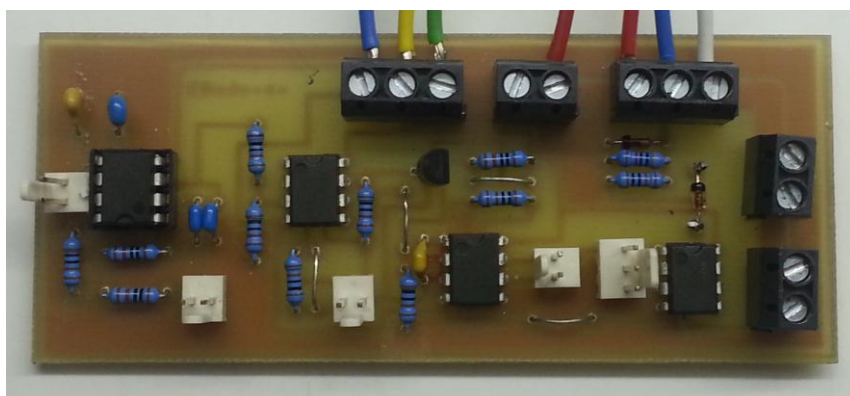
Rozměr desky 103x42 [mm]

A.3 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 103x42 [mm]

A.4 Realizovaný modul



Rozměr desky 103x42 [mm]

A.5 Přední panel



Rozměry panelu 183x60 [mm]

B SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R1	10 k	0207	Uhlíkový rezistor
R2	10 k	0207	Uhlíkový rezistor
R3	0-100 k		Potenciometr
R4	2 k	0207	Uhlíkový rezistor
R5	1 k	0207	Uhlíkový rezistor
R6	10 k	0207	Uhlíkový rezistor
R7	1 k	0207	Uhlíkový rezistor
R8	1 k	0207	Uhlíkový rezistor
R9	0-50 k	0207	Potenciometr
R10	1 k	0207	Uhlíkový rezistor
R11	1	0207	Uhlíkový rezistor
R12	1 k	0207	Uhlíkový rezistor
R13	0-500	6,3x6,3x4 mm	Trimr
R14,R15	0-20 k		Potenciometr
R16	1 k	0207	Uhlíkový rezistor
R17	30 k	0207	Uhlíkový rezistor
R18	0,1	KERAM	Drátový rezistor
C1	20 n	C025-025X050	Keramický kondenzátor
C2	10 n	C025-025X050	Keramický kondenzátor
C3	100 n	C025-025X050	Keramický kondenzátor
C4	20 n	C025-025X050	Keramický kondenzátor
C5	100 n	C025-025X050	Keramický kondenzátor
NE555	NE555	DIP8	Časovač NE555
U1B-U5B	TL072	DIP8	Operační zesilovač
D1-D2	15 V	DO-201	Zenerova dioda
M1	BS170	TO92	Unipolární tranzistor N
M2-M3	IRF5210	TO220AB	Unipolární tranzistor P