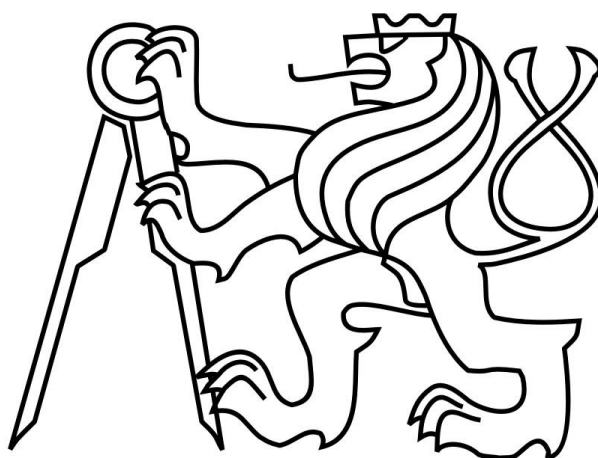


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

katedra mikroelektroniky



Bakalářská práce

Řízený násobič s tranzistory MOSFET

Autor: Radomír Křečan

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Radomír Křečan
Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Aplikovaná elektronika
Název tématu: Řízený násobič s tranzistorem MOSFET

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte dostupnou literaturu týkající se vlastností násobičů napětí a synchronních usměrňovačů.
2. Na základě 1) navrhnete a realizujete přípravek umožňující demonstrovat vlastnosti synchronních násobičů napětí.
3. Provedte simulace navržených obvodů a ověřovací měření přípravku.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky
5. Přípravek zůstane v majetku zadávajícího pracoviště.
6. Publikování výsledků dosažených v této práci je možné pouze se svolením zadavatele.

Seznam odborné literatury:

- [1] Krejčířík, A.: Napájecí zdroje I.- III. BEN, Praha 1996 a pozdější vydání. ISBN 8086056023.
[2] Faktor, Z.: Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. BEN, Praha 2002, ISBN 8086056910.
[3] Aplikační poznámky k součástkám firmy IRF a dalších.

Vedoucí: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

Platnost zadání: 10.9.2018

L.S.

Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 10.2.2017

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci „Řízený násobič s tranzistory MOSFET“ zpracoval sám s pomocí vedoucího práce. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne 20.5.2017

Radomír Křečan

Poděkování

Chci poděkovat především Ing. Luborovi Jiráskovi, CSc. za odborné vedení a cenné rady, které mi během práce poskytl, ale také za trpělivost ve chvílích, kdy mé výkony nebyly nejlepší. V neposlední řadě velmi děkuji své rodině a přátelům, kteří mi byli oporou a motivací v průběhu celého studia.

Anotace

Cílem práce je prostudovat možné výhody a nevýhody napěťového násobiče realizovaného pomocí tranzistorů MOSFET a porovnání našich poznatků s dobře známým násobičem diodovým. První část je věnována obecnému popisu a dává prostor pro diskuzi o možných řešeních násobiče. Jsou popsány jevy, které ovlivňují technické parametry. Součástí je také teoretický návrh obvodů a popis principu funkce.

Druhá část práce bude zaměřena na realizaci násobiče včetně výpočtů, jejich implementaci a zpracování výsledků. Dále zde poskytneme porovnání našeho výrobku s běžným násobičem napětí.

V závěru jsou zhodnoceny dosažené výsledky a naše úsilí. Součástí je prostor pro diskuzi o možném zlepšení resp.: dalším možném postupu v řešení problému a zdokonalení násobiče.

Abstract

The aim of this thesis is to study the possible advantages and disadvantages of a voltage multiplier constructed using MOSFETs. The results will be compared with other well-known multipliers which use diodes. The first part is dedicated to a general description and provides a discussion about possible solutions. The physical phenomena that affects technical parameters is described. This part of the work also includes the theoretical design of the circuit and a description of the principal per which it functions.

The second part of this thesis will focus on the realization of the multiplier, including calculations, their implementation and processing of the results. Furthermore, a comparison of features of our multiplier and the diode multiplier will also be present.

Finally, we will evaluate the achieved results and our efforts. The conclusion will include a discussion of possible upgrades, next steps in solving the issue and maximal improvement of the voltage multiplier.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$V_{CC\pm}$	(V)	-	Napájecí napětí
C	(F)	-	Kapacitor
C_{GD}		-	Millerova kapacita
C_{GS}		-	Kapacita gate-source
D		-	Dioda
f	(Hz)	-	Frekvence
t_{rr}	(s)	-	Doba závěrného zotavení
t		-	Čas
R	(Ω)	-	Rezistor
$R_{DS(on)}$		-	Odpor kanálu drain-source
U_{Amp}	(V)	-	Amplituda
U_{DS}		-	Napětí drain-source
U_{ef}		-	Efektivní hodnota napětí
U_F		-	Úbytek napětí na diodě
U_{LOW}		-	Napětíová úroveň pro log.0
U_{GS}		-	Napětí gate-source
U_{HIGH}		-	Napětíová úroveň pro log.1
U_{IN}		-	Vstupní napětí
U_{MAX}		-	Maximální hodnota napětí
U_{OUT}		-	Výstupní napětí
U_{REF}		-	Referenční napětí
U_{SS}		-	Stejnoseměrné napětí
ϵ_r	(-)	-	Relativní permitivita

Obsah

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	2
Čestné prohlášení	3
Poděkování.....	4
Anotace.....	5
Abstract	5
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	6
ÚVOD	9
1. TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1.1 Vlastní obvod násobiče	10
1.2 Řídicí obvod	12
1.3 Napájení	14
1.3.1 Transformátor.....	14
1.3.2 Stabilizátor napětí TL 431	15
1.4 Galvanické oddělení.....	16
1.5 Invertor	17
1.6 H – Můstek	17
1.7 High side – Low side budič.....	18
1.8 Kapacitory	19
1.8.1 Keramické kapacitory	19
1.8.2 Elektrolytické kapacitory	20
1.8.3 Kapacitory s dielektrikem z umělých hmot.....	20
1.9 Tranzistory	20
1.10 Desky plošných spojů.....	21
1.10.1 Konstrukce DPS	21
1.10.2 Technologie výroby DPS	22

1.10.3 Návrh DPS.....	22
1.10.4 Osazování DPS.....	23
2. PRAKTICKÁ ČÁST.....	24
2.1 Výpočty.....	24
2.1.1 Transformátory.....	24
2.1.2 Zvlnění	24
2.1.3 Stabilizátor TL 431.....	25
2.2 Měření a grafy.....	26
3. ZÁVĚR.....	33
4. SEZNAM LITERATURY	34
5. SEZNAM PŘÍLOH.....	35

ÚVOD

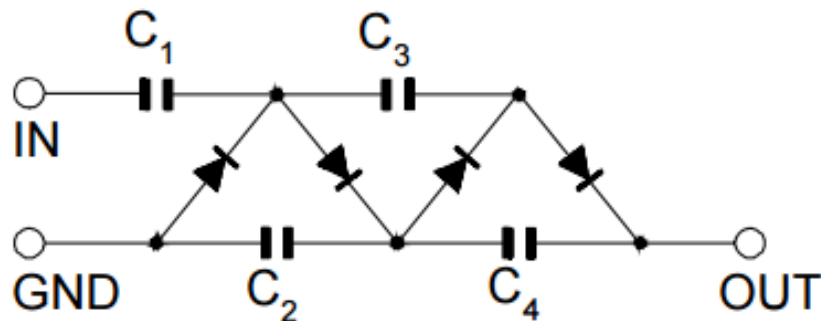
Násobič napětí je poměrně jednoduchý obvod, jehož funkce je konverze nižšího střídavého napětí na napětí vyšší stejnosměrné, za pomoci série kapacitorů a diod. Zmíněné zapojení se nazývá Greinacher multiplier po svém vynálezci Heinrichu Greinacherovi, který je také vynálezcem magnetronu. Toto zapojení bylo použito fyziky J. D. Cockroftem a E. T. Waltonem roku 1932 jako zdroj vysokého napětí pro jejich urychlovač částic, který jim roku 1951 přinesl Nobelovu cenu za fyziku. Nespornou výhodou tohoto násobiče je fakt, že ho lze použít jak pro generaci několika voltů v elektronice, tak pro velmi vysoká napětí. Při vysokém napětí na výstupu nemusí být všechny části násobiče dimenzovány na toto napětí, ale stačí, pokud jsou jednotlivé komponenty dimenzovány na napětí daného stupně násobiče, což snižuje náklady. Problémem je poměrně velký úbytek napětí na diodách a jejich doba závěrného zotavení, což je spojeno s účinností.

Realizace násobiče řízeného tranzistoru MOSFET nám teoreticky dovolí násobič udělat rychlejší s menšími úbytky napětí na usměrňujícím prvku. Pro náš násobič použijeme tranzistory typu N-Kanál. Je potřeba navrhnout řídicí obvod pro tranzistory, který zaručí správnost a načasování jejich otevření v průběhu periody pro každou frekvenci v rozsahu, ve kterém se bude násobič používat. Výběr metody řízení tranzistorů bude jedním ze zásadních rozhodnutí, které je rozebráno ve druhé kapitole práce. Pro ochranu zdroje signálu je třeba galvanicky oddělit vlastní obvod násobiče s budiči. Zvolili jsme galvanické oddělení pomocí optočlenu. Jednotlivé členy řídicího obvodu mají určité zpoždění, které je třeba brát v potaz. Řešení problému časování bude opět záviset na způsobu zpracování řídicího obvodu.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Vlastní obvod násobiče

Nejvíce používaným zapojením násobiče je půlvlnný sériový násobič (half-wave series multiplier). Všechny další násobiče mohou být z tohoto násobiče odvozeny. Používá se hlavně v aplikacích, kde je potřeba vysokého napětí s malým odběrem proudu. Původně se používaly v CRT televizorech. V dnešní době se používají pro lasery, rentgeny, TWT (Traveling wave tubes), elektronické svaly, kopírky a další zařízení, která využívají vysokého stejnosměrného napětí.



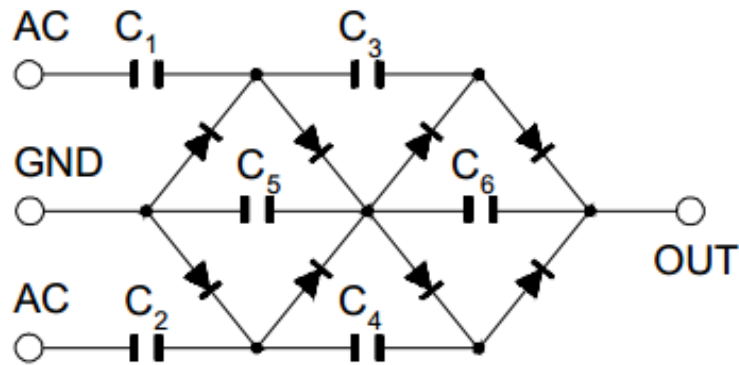
Obrázek 1: Základní zapojení násobiče (half - wave) [1]

Stupně násobiče v základním zapojení lze teoreticky libovolně zvyšovat dle potřeby. Praktické zkušenosti ukazují, že maximální vhodný počet stupňů je tři až čtyři. Není třeba všechny součástky dimenzovat na výstupní napětí, postačí je dimenzovat na napětí na jednotlivých stupních. Pro první stupeň dimenzujeme součástky na vstupní napětí U_{IN} a pro stupně další na napětí $2U_{IN}$. Diody D usměrňují napětí do kapacitoru C , a ten je nabíjen na stejnosměrné napětí $U_{SS} = U_{IN} - U_F$. Průrazné napětí diody D volíme alespoň na hodnotu:

$$U_D = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{IN} \cong 2 \cdot U_{ef} \quad (1)$$

Otočením polarity diod na obrázku č. 1 získáme výstupní napětí opačné polarity a je možné použít zapojení se sudými i lichými počty stupňů. Výstupní napětí lze odebírat v jakémkoliv uzlu podél násobiče. Z toho vyplývá, že lze odebírat více různých napětí z jednoho násobiče zároveň. Spojením zapojení pozitivního a negativního násobiče získáme násobič s duální polaritou.

Další variantou násobiče je tzv. full-wave multiplier, jehož zapojením docílíme usměrnění celého průběhu vlny, které povede k menšímu zvlnění. [1]

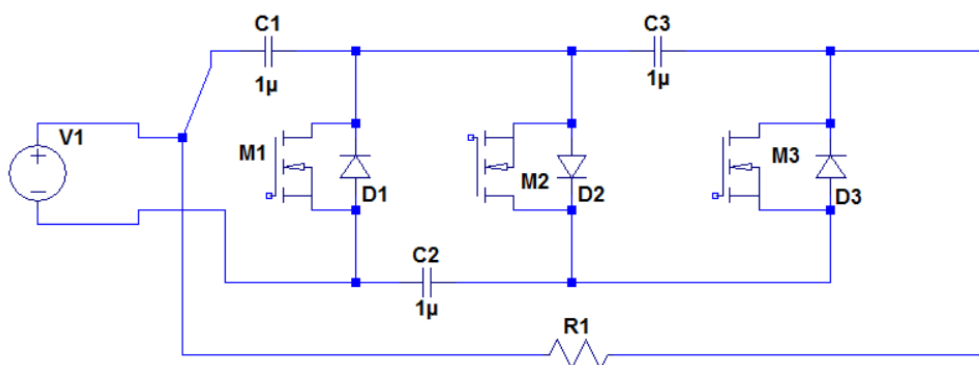


Obrázek 2: Full-wave series multiplier [1]

Na trhu diodové násobiče vyrábí například firma Voltage Multipliers Inc. nebo firma Eastern Voltage Research, LLC.

Firma VMI vyrábí tyto násobiče na zakázku přesně podle preferencí klienta s určitým omezením např.: frekvence.

Cíl bylo ověřit možnosti a vlastnosti synchronního násobiče, ve kterém jsou diody nahrazeny tranzistory MOSFET. Důvodem je pokus o snížení úbytků napětí na diodách s PN přechodem, jelikož při generaci vysokých napětí je úbytek na diodových sloupcích značný. Dále bude naší snahou docílit funkce na frekvenci 100 kHz, kde násobiče diodové nefungují kvůli parametru diod t_{rr} (Time reverse recovery).



Obrázek 3: Vlastní obvod násobiče s tranzistory

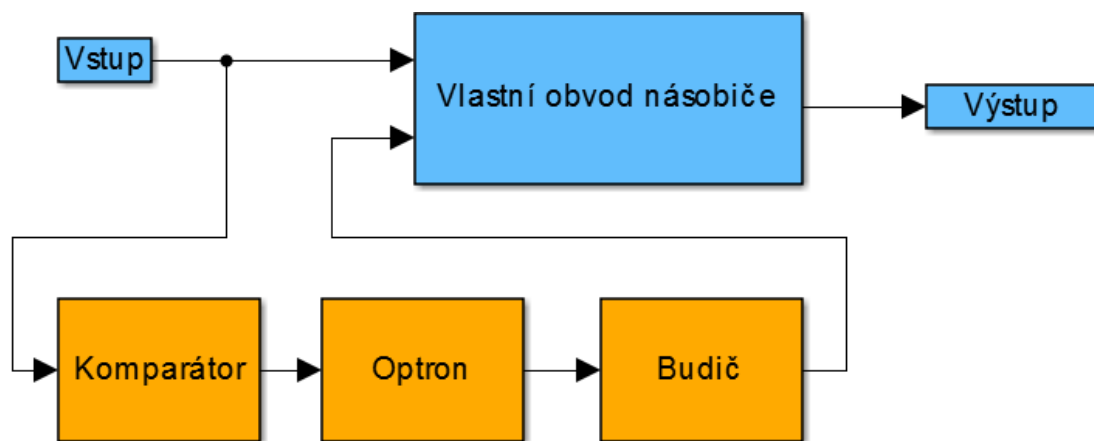
Takto vypadá schéma násobiče, kde nahradíme diody tranzistory MOSFET. Tranzistory vyžadují řídicí obvod, kterým budeme přivádět napětí na Gate, a tak tranzistory spínat.

1.2 Řídicí obvod

Pro ovládání synchronního násobiče je třeba řídicí obvod. Tranzistory je potřeba nějakým způsobem otevírat. Jelikož náš násobič má fungovat na různých napětích a frekvencích, je potřeba, aby řídicí obvod byl stále synchronní s fází násobeného napětí.

Řídicí obvod je možné řešit více způsoby. V této práci se budeme zabývat dvěma způsoby realizace řídicího obvodu pro náš násobič, na kterých jsme v průběhu pracovali a zdůvodníme výběr řešení.

Blokové schéma prvního typu řídicího obvodu, kterým jsme se zabývali, je zobrazeno na obrázku č. 4.



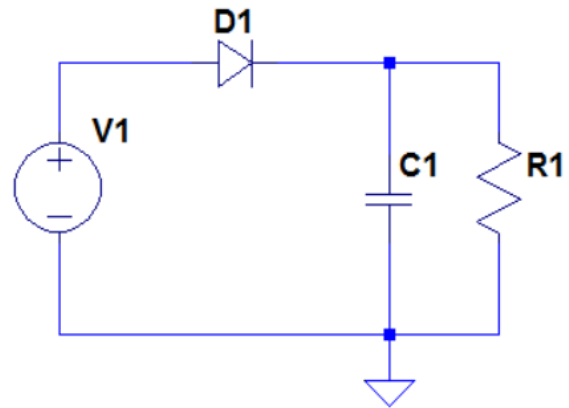
Obrázek 4: Realizace pomocí řídicího obvodu s komparátorem

Přivedeme sinusový signál na vstup komparátoru, kde ho porovnáme s nulovou napětěovou úrovní a nastavíme dostatečně velké zesílení, aby komparátor saturoval. Získáme tak obdélníkový signál, který bude skokově měnit svou hodnotu při průchodu sinusového signálu nulou. Pro ochranu komparátoru při násobení vyšších napětí, předradíme napětěový dělič. Obdélníkový signál poté přivedeme na primární stranu optočlenu. Za optočlen zařadíme například High-Low side budič, který signál zpracuje a vytvoří 2 signály navzájem inverzní, které přivedeme na hradla jednotlivých dvojic tranzistorů.

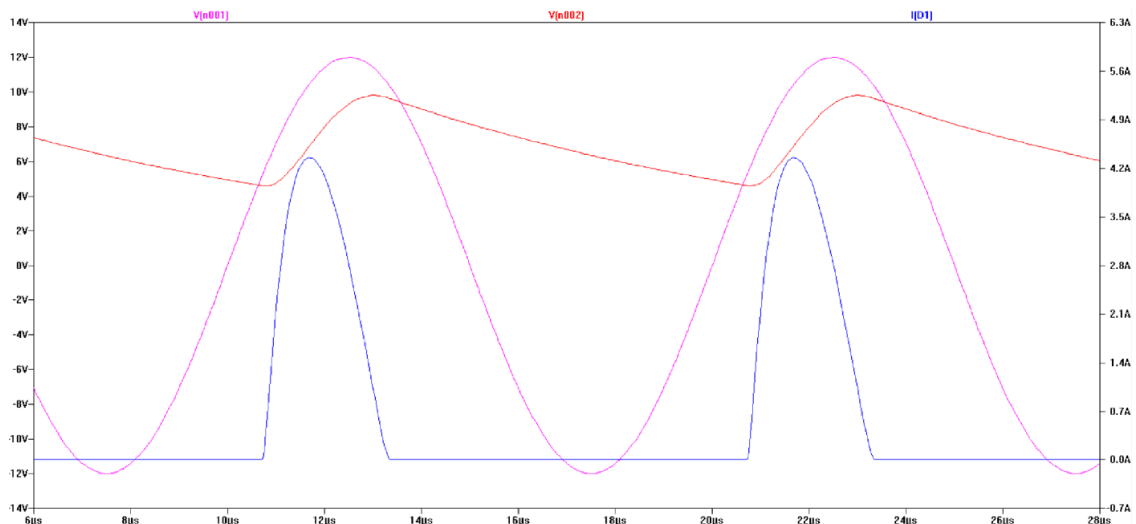
Prvním problémem je řešení zpoždění řídicího obvodu. Bylo by možné řídicí signál fázově posunout pomocí sériového RLC obvodu, anebo zpoždit pomocí Schmittova klopného obvodu s hysterezí. Problémem je však fakt, že zpoždění řídicího obvodu je neměnné v závislosti na frekvenci. Při změně frekvence se nemění ani fázový posun

RLC obvodu, mění se však časový posun. Další komplikací je také fakt, že pro různou velikost amplitudy sinusového signálu na vstupu, je třeba upravovat napěťový dělič na vstupu komparátorů, abychom ho ochránili.

Náš násobič funguje na principu jednocestného usměrňovače z obr. č. 5. Proud začne téct diodou až ve chvíli, kdy napětí zdroje překročí napětí kondenzátoru o velikost úbytku napětí na samotné diodě. Na obrázku č. 6 je zobrazena přesně tato skutečnost. Z této skutečnosti vyplývá problém se synchronizací.

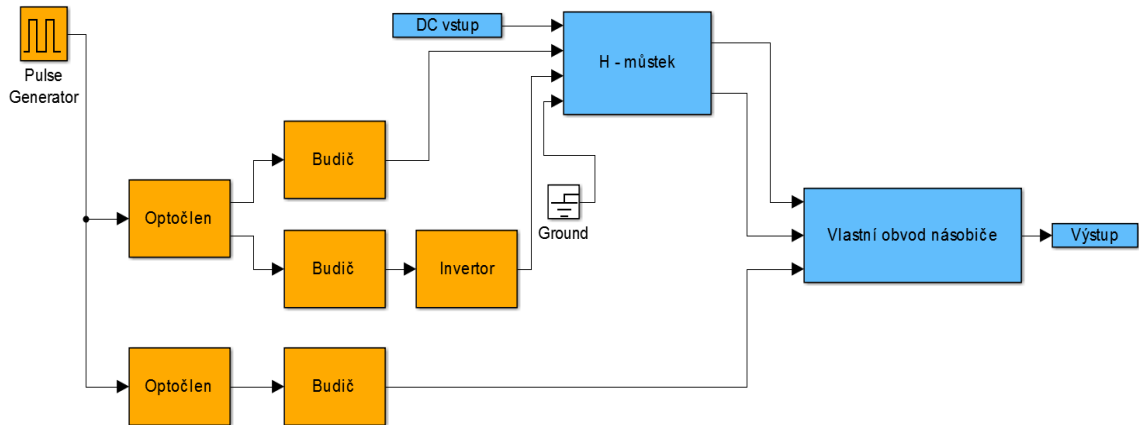


Obrázek 5: Jednocestný usměrňovač



Obrázek 6: Průběhy napětí a proudu v jednocestném usměrňovači (Modrý – proud zátěží, Červený – napětí na kapacitoru, Růžový – vstupní sin. Napětí)

Tento jev způsobuje nesynchronnost sinusového vstupního signálu a otevírání tranzistorů. Tranzistory se začnou otevírat ve chvíli, kdy sinus projde nulou, avšak proud neteče. To způsobuje zpětné vybití kapacitorů. Bylo by potřeba synchronizovat řídicí obdélkový signál s proudovou křivkou. Proudová křivka je navíc proměnná v závislosti na zátěži. Mohli bychom to řešit změnou vstupního signálu ze sinusového na obdélkový. Nastane však problém s posunem obdélkového signálu. Časový posun obdélkového signálu bez jeho zkreslení je poměrně složitý problém, který pro nás není výhodné řešit.



Obrázek 7: Realizace pomocí H – můstku

Druhý způsob realizace z obrázku č. 7 byl navržen tak, aby se těmto problémům zcela vyhnul. V tomto řešení přivedeme stejnosměrné napětí na H–můstek tvořený tranzistory MOSFET. Tranzistory tohoto můstku jsou řízeny stejným obdélníkovým signálem, který řídí i tranzistory vlastního obvodu násobiče. Obdélníkový řídicí signál odebíráme z generátoru. Použitím stejných integrovaných obvodů jak pro řízení obvodu násobiče, tak pro řízení H – můstku řeší problém časové synchronizace.

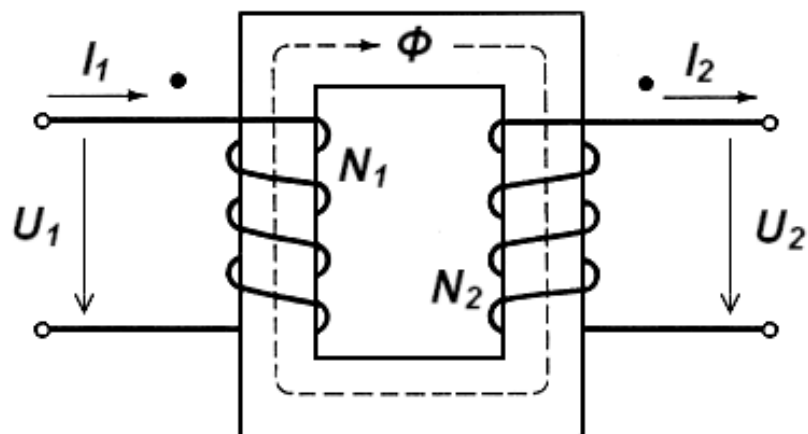
Rozhodli jsme se tedy realizovat druhé řešení, jelikož je z hlediska obvodové složitosti a testování podstatně jednodušší.

1.3 Napájení

Jednotlivé integrované obvody pro řízení tranzistorů potřebují svá oddělená napájení. Toto napájení budeme realizovat pomocí transformátorů ze sítě. Napětí sekundární strany budeme usměrňovat jednocestným usměrňovačem a dále stabilizovat stabilizátorem na napětí vhodná pro jednotlivé integrované obvody.

1.3.1 Transformátor

Jedná se o komponentu, která umožňuje přenos energie pomocí vzájemné indukce dvou různých obvodů. Použití nachází hlavně při galvanickém oddělení obvodů od síťového napětí společně se změnou velikosti napětí.



Obrázek 8: Princip funkce transformátoru [7]

Primární vinutí protéká proud I_1 , který vytváří magnetický indukční tok ϕ . Tento tok se šíří magnetickým obvodem jádra (feromagnetikem, ferimagnetikem atp.). Z principu Faradayova zákona vychází, že na sekundární straně transformátoru se průchodem magnetického toku indukuje napětí. Velikost napětí je dána rovnicí:

$$U_i = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

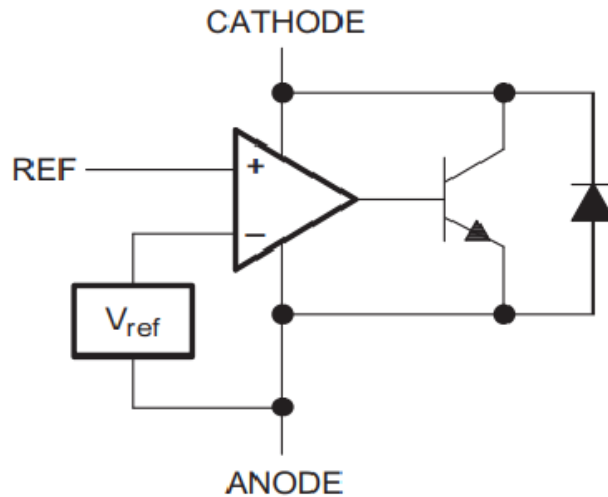
kde N je počet závitů transformátoru.

Tak jako většina elektronických součástek má i transformátor ztráty. U transformátorů vysokých výkonu se ztráty pohybují do 1 %. U transformátorů malých výkonů lze počítat se ztrátou okolo 10 %.

V našem případě použijeme transformátory malých rozměrů a výkonů určené pro integraci na desky plošných spojů. [8]

1.3.2 Stabilizátor napětí TL 431

Jedná se o třísvrkový napěťový regulátor s malým výstupním odporem od firmy Texas Instruments. Referenční napětí je nastaveno výrobcem na 2,5 V. Výstupní napětí tohoto zpětnovazebního regulátoru lze nastavit v rozmezí 2,5 V až 36 V pomocí dvou rezistorů. Dále je potřeba předřadit sériový odpor pro regulaci proudu. Obvod disponuje poměrně strmou výstupní charakteristikou podobnou Zenerově diodě.

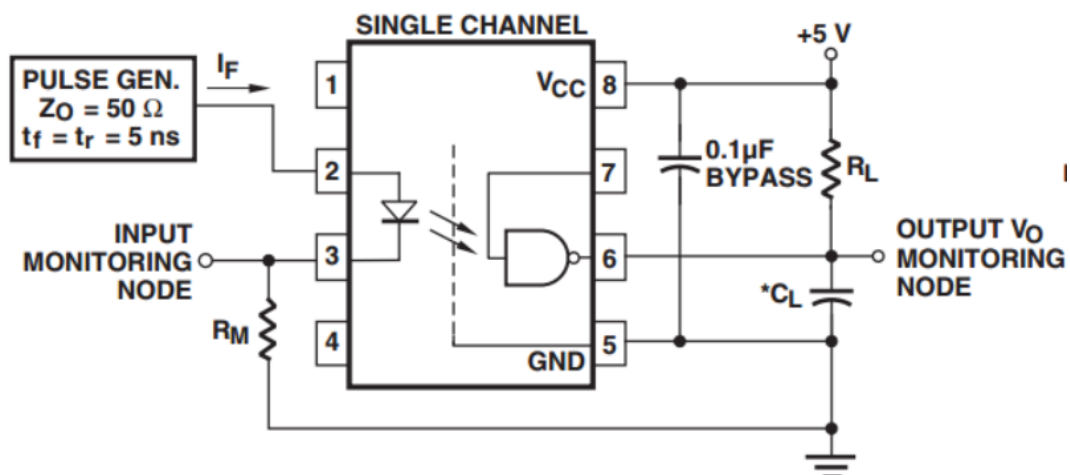


Obrázek 9: Vnitřní struktura TL 431 [10]

Stabilizátory jsou dostupné v mnoha typech pouzder (TO226AA, SOT-89, DIP atd.), podle kterých se liší maximální ztrátový výkon. Stabilizátor v námi použitém pouzdru TO-92/TO-226 je dimenzován na maximální proud $I_{MAX} = 100 \text{ mA}$. [10]

1.4 Galvanické oddělení

V našem řešení jsme se rozhodli pro galvanické oddělení pomocí optočlenu. Zejména kvůli nižší ceně a rozměrům v porovnání s impulsním transformátorem. Jedná se o elektronickou součástku poskytující galvanické oddělení optickou cestou. Na primární straně optočlenu nalezneme LED diodu (IR), která svítí na fotocitlivý polovodičový člen na sekundární straně. Tento člen je většinou realizován fotodiodou nebo fototranzistorem (PNP, NPN, ale i kombinace). Čím větší proud LED diodou, tím více dioda svítí a otevírá fototranzistor. Tímto oddělením lze ovládat obvody lišící se napěťovou úrovní v řádech jednotek kilovoltů. V našem případě se jedná o oddělení zdroje signálu a budičů můstku a jednotlivých stupňů násobiče. Jak už bylo zmíněno dříve, budiče se vyskytují proti řídicímu signálu na vysokém potenciálu, a proto je potřeba je galvanicky oddělit, aby nedošlo ke zničení generátoru, anebo jiných obvodů.



Obrázek 10: Zapojení optočlenu [11]

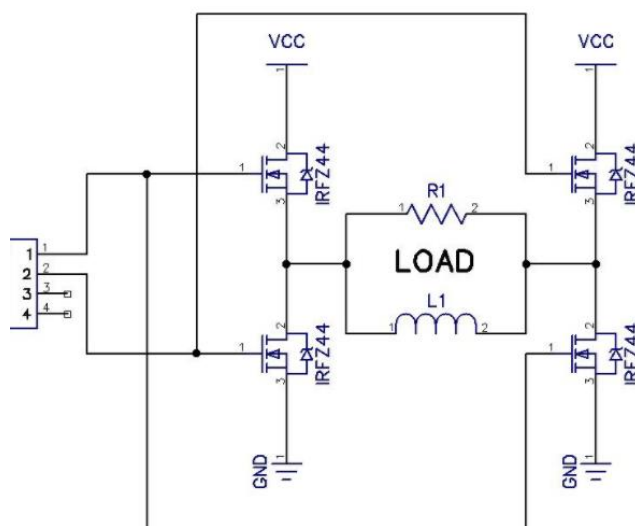
Optočlen, který jsme použili má na sekundární straně Schottkyho tranzistor s otevřeným collectorem (Schottky-Clamped transistor). V TTL logice používáme normální tranzistory v saturaci. Při saturaci je v objemu struktury tranzistoru uložen náboj, který způsobuje zpoždění uzavření tranzistoru. Tohoto zpoždění se lze zbavit tím, že zamezíme tranzistoru v hluboké saturaci. Schottkyho tranzistor dělá přesně to. Ve struktuře Schottkyho tranzistoru je mezi bází a collector připojena Schottkyho dioda, která funguje jako upínací obvod a zamezí poklesu napětí collector-emitor pod hodnotu cca 0,5 V. Odpor R_L na obrázku č. 10 je pull-up rezistor, který určuje logickou hodnotu v případě, kdy není tranzistor sepnut. Hodnota tohoto rezistoru je určena výrobcem, ale pohybuje se řádově od $1k\Omega$ do $10k\Omega$.

1.5 Invertor

Jedná se o integrovaný Schmittův klopný obvod s hysterezí od firmy Texas Instrument sloužící k inverzi signálu. Invertor najde uplatnění v naší práci pro řízení jedné strany H – můstku. Námí zakoupený invertor je dimenzován na napájecí napětí $V_{CC} = 5 V$. [12]

1.6 H – Můstek

Jedná se o specifické zapojení 4 tranzistorů, které valně používá pro ovládání motorů či jiných zátěží s vysokou indukčností. Díky schopnosti rychlého zapínání a vypínání, lze řídit jeho otáčky.

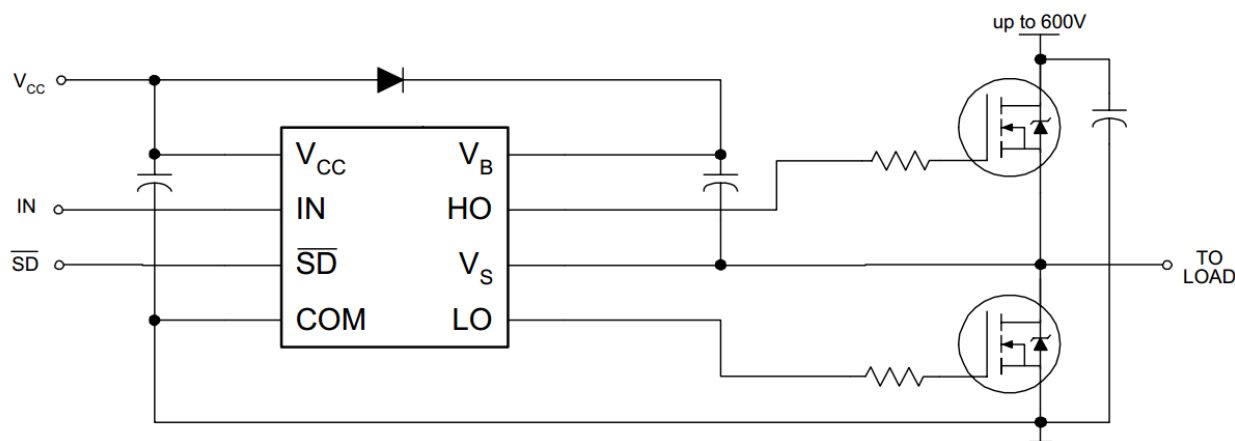


Obrázek 11: H – Můstek [13]

V naší práci využijeme tento můstek pro vytvoření obdélníkového signálu vhodného jak svou frekvencí, tak fází pro vstup do vlastního obvodu násobiče. Změna úrovně stejnosměrného napětí přivedeného na H – můstek přímo ovlivňuje úroveň výstupního napětí. Je tedy třeba, aby jednotlivé tranzistory byly dimenzovány na stejné napěťové úrovně jako komponenty vlastního obvodu násobiče. Použili jsme výkonové tranzistory IRF820.

1.7 High side – Low side budič

Jedná se o integrovaný budič obvod, který zaručí správné spínání tranzistorového polo-můstku. Do vstupu je přiveden signál na úrovni TTL logiky, který je zpracován, zesílen na úroveň napájecího napětí a poté přiváděn na gate tranzistorů. Jde o poměrně složitý aktivní obvod. V našem zapojení vyžaduje vlastní galvanicky oddělený napájecí zdroj. Je důležité si uvědomit, že collector horního tranzistoru se nachází na kladném potenciálu o hodnotě až 350V (U_{ef}) proti zemnímu vodiči. Jelikož jsou řídicí obvody uzemněny, je zřejmé, že budič se proti řídicímu obvodu vyskytuje trvale na vysokém potenciálu a nebude možné tedy řídicí signál přivést vodičem, nýbrž galvanicky oddělenou cestou.



Obrázek 12: Schéma zapojení budícího obvodu [5]

Kondenzátor z obrázku č. 12 zapojený na straně tranzistorů se nazývá tzv. bootstrapový kondenzátor a slouží k napájení obvodu v okamžiku, kdy je dolní tranzistor rozepnut a horní sepnut. Kondenzátor je dobíjen ze zdroje napětí přes diodu a je nabíjen na napětí $V_{CC} - U_F$. Pro tento účel bude nejvhodnější Schottkyho dioda, a to zejména kvůli jejímu nízkému úbytku napětí a velice krátké době závěrného zotavení t_{rr} . Schottkyho dioda je však limitována hodnotou závěrného napětí. Pro náš prototyp je výhodná, jelikož násobič operuje s malou hodnotou napětí. Pro násobič, který bude operovat na vysokém napětím bude potřeba použít diodu s přechodem PN. Hodnotu kondenzátoru v praxi volíme přibližně 1000 krát větší než je kapacita hradla tranzistoru. Nevýhodou napájení z kondenzátoru je to, že nelze mít po dlouhou dobu sepnutý horní tranzistor, jelikož se kondenzátor vybije. Při použití je potřeba dbát na to, aby jednotlivé pulzy byly přesně časovány a nepřekrývaly se. Zvolili jsme budič se společným vstupem, kde obvod budiče sám signál invertuje pro jeden z tranzistorů. Máme tak jistotu, že tranzistory nebudou otevřeny ve stejný čas. Tento budič má však nižší rychlost přenosu (vyšší propagation delay time).

1.8 Kapacity

Než budeme volit jmenovité napětí, musíme vybrat z dostupných konstrukčních typů podle jejich vhodnosti pro náš projekt.

1.8.1 Keramické kapacity

Používají dielektrikum s velmi vysokou relativní permitivitou (ϵ_r do řádu 10^4), proto dosahují malých rozměrů. Přesnost hodnoty kapacity je nízká. Dosahují hodnot

kapacity jednotek μF a jmenovité napětí dosahuje až desítek kV. Dielektrika s vysokou ϵ_r mohou mít značné nelinearity ve frekvenční oblasti. Keramické kapacitory se tedy hodí spíše na nízkofrekvenční úlohy např.: blokování a filtrace.

1.8.2 Elektrolytické kapacitory

Tyto kapacitory disponují vyššími hodnotami kapacit na jednotku objemu a velmi přijatelnou cenou. Je nutné je polarizovat. Pokud bychom polaritu otočili, dojde k odformování dielektrika a vzniku tepla. V případě připojení vyššího napětí dojde k explozi součástky. Tento kapacitor není vhodný pro použití v obvodu vlastního obvodu násobiče, avšak najde své uplatnění tam, kde je malý nárok na přesnost a potřeba velké kapacity. Např.: v usměrňovači pro napájení řídicího obvodu.

1.8.3 Kapacitory s dielektrikem z umělých hmot

Dosahují poměrně velkých rozměrů kvůli ϵ_r materiálu dielektrika (polystyren, polyester, polypropylen atp.), která se pohybuje v řádu jednotek. Maximální kapacita se pohybuje v řádu jednotek až desítek μF . Provozní napětí se pohybuje do 1kV, což je pro náš projekt dostačující, jelikož na jednotlivých členech 1kV nedosáhneme. Důležitými parametry jsou však jejich dobré vysokofrekvenční vlastnosti.

Pro vlastní obvod násobiče bude nejvhodnější kapacitor fóliový, který svými vlastnostmi nejvíce vyhovuje.

$$X_c = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad (3)$$

Z rovnice vychází, že při zvyšující se frekvenci klesá reaktance kapacitoru, což zapříčiní vzrůst průchodu proudu skrze izolační materiál. Při zvýšeném odběru proudu rapidně klesá napětí na výstupu. [3]

1.9 Tranzistory

Volba tranzistorů je pro projekt poměrně důležitou součástí. V posledních letech vývoj tranzistorů zaznamenává velký rozmach. Zlepšují se jak parametry mezní, tak i statické a dynamické. Zvolili jsme tranzistory MOSFET s kanálem typu N. Důvodů pro upřednostnění tohoto typu tranzistoru před tranzistorem bipolárním je hned několik.:

- a) „Velmi vysoký vstupní odpor hradla (až $10^{13}\Omega$), nulový vstupní proud, a tedy nulový vstupní zdánlivý výkon.“

b) „Při malém proudu drainu je napětí U_{DS} téměř nulové ($R_{DS(on)} < 1\Omega$). Kladný koeficient teplotní závislosti odporu $R_{DS(on)}$ usnadňuje paralelní řazení tranzistorů.“ [4, str. 81]

Největším nebezpečím je destrukce hradlového oxidu statickou elektřinou. Na lidském těle s kapacitou cca 100 pF až 300 pF se může indukovat napětí s energií dostatečnou k proražení oxidu. Připojuje se tedy ochranná dioda, ale v našem případě bude integrována přímo v tranzistoru. Zvolili jsme tranzistory od firmy IR (International Rectifier), a to konkrétně model IRFB9N60A. Tyto tranzistory jsou dimenzovány na $U_{DS} = 600V$. Parametr je mezní a nesmí být nikdy (ani špičkově) překročen. Měli bychom se snažit MOSFETy používat pouze do 80 % hodnoty U_{DS} . Tranzistory budeme budit napětím $U_{GS} = 15V$. Gate tranzistoru se chová jako kondenzátor. V klidovém stavu neteče proud, ale pro otevření a zavření je potřeba dostatečný proud do gate, a to kvůli kapacitě hradla, kterou je potřeba rychle nabít, resp. vybit. Při zavírání MOSFETu je také potřeba velký proud Gate, jelikož se vybíjí kapacita Gate C_{GS} , ale také tzv. Millerova kapacita C_{DG} , která má tendenci zvyšovat napětí na gate, a tak pootevřít MOSFET ve chvíli, kdy má být zavřený. Taková skutečnost by mohla v některých případech vést ke zničení tranzistoru. Dalším faktorem je velikost kapacity hradla tranzistoru, jelikož ovlivňuje rychlost otevírání. Bohužel je třeba si vybrat mezi malým odporem kanálu, anebo malou kapacitou hradla. Pro zmenšení odporu kanálu je třeba zvětšit jeho plochu a tím se zvětší kapacita hradla.

1.10 Desky plošných spojů

1.10.1 Konstrukce DPS

Deska plošných spojů (DPS) je nejlepším prostředkem pro praktické sestavení elektrických obvodů. Součástky jsou mechanicky připojeny k desce a propojeny vodivými spoji.

Základním nosným materiálem desky plošných spojů je skleněná tkanina procházející epoxidovou pryskyřicí. Tento materiál se nazývá Pre-Preg. Složením více vrstev Pre-Pregu, přiložením Cu fólie o tloušťce cca 5 - 105 μ m z obou stran a následným slisováním vzniká kompozit nazývaný FR4. Dále se Cu fólie očistí a pokryje fotorezistem (polymerem, který se po osvětlení stává nerozpustným ve vývojce). Vývojka je vodní roztok chemických sloučenin se speciálními činidly. Přes šablonu exponujeme (osvítíme)

části fotorezistu, které chceme jako layout plošných spojů. Poté desku omyjeme vývojkou, která odmyje fotorezist, který nebyl osvícen. Následuje leptání leptadlem selektivním na Cu, které odleptá Cu fólii na místech, kde není fotorezist. Následuje omývání zbylého fotorezistu např.: horkou vodou s 1 % ethanolu. Tento postup se nazývá fotolitografie (fotocesta). V našem případě jsme DPS vyrobili právě fotocestou.

Výše zmíněný postup je pro dvouvrstvou desku plošných spojů, avšak lze tak vyrobit i desky vícevrstvé, a to vrstvením dalších listů pre-pregu z vnějšku 2vrstvé desky. Vodivé spoje mezi vrstvami se nazývají prokovy (Vias).

1.10.2 Technologie výroby DPS

Desky plošných spojů lze vyrábět třemi metodami. Těmi jsou:

- Subtraktivní
- Aditivní
- Semiaditivní

Subtraktivní metoda je založena na odstraňování nanesené mědi. Aditivní metoda spočívá v nanášení mědi přímo ve tvaru plošných spojů a semiaditivní metoda je kombinací obou metod předešlých. [9]

1.10.3 Návrh DPS

Pro návrh desek plošných spojů se využívá softwaru. Program výrazně usnadňuje práci a kontroluje uživatele v průběhu návrhu. Pro vytvoření technologických dat pro výrobu DPS jsem využil návrhového prostředí Cadance OrCAD 16.6 dostupného na katedře mikroelektroniky.

Elektrické schéma nakreslíme v editoru OrCAD Capture CIS. Capture nabízí rozsáhlé knihovny součástek, které lze ve svém schématu použít. Mě osobně hledání některých součástek přišlo až moc časově náročné a jednodušší bylo si součástku kompletně navrhnout. Nevýhodou vlastních navržených součástek je to, že neobsahují fyzikální model pro simulaci obvodu v programu PSpice AD jako součástky knihoven.

Každé součástce náleží pouzdro (PCB Footprint), které navrhne pomocí programu OrCAD PCB Designer.

Po nakreslení schématu zapojení a vytvoření jednotlivých pouzder je načas vytvořit tzv. Netlist. V tomto dokumentu jsou uloženy informace o vzájemném funkčním propojení jednotlivých součástek a jejich PCB Footprintech. Netlist přeneseme do PCB Designeru, kde budeme dále pokračovat s návrhem samotné desky.

Nejprve je třeba nastavit obecné parametry desky jako např.: rozměry, minimální tloušťku spojů, izolační vzdálenosti, prokovy atp. Následuje postupné rozmístění součástek na desku (layout) a jejich vodivé propojení. Tyto úkony je třeba dělat s dostatečnou pečlivostí, a to nejen s ohledem na elektronickou funkčnost, ale také vyrobiteľnosť a osazení součástkami.

Následuje vygenerování výrobních dat a odeslání výrobcí nebo v našem případě tisk fólií a osvětlení DPS. Podrobnější postup naleznete ve zdroji. [9]

1.10.4 Osazování DPS

Jedná se o rozmístění a vodivé upevnění součástek, a jde o nedílnou součást výroby. Nejčastějším způsobem osazení je pájení tekutým kovem o vysoké teplotě. Nejčastěji používanou pájkou je 63 % Sn – 37 % Pb olovnatá pájka s teplotou tavení cca 183 °C.

Alternativou k pájení je vodivé lepení speciálně navrženým lepidlem. Používají se hlavně v případech, kdy by vysoká teplota způsobila poškození součástek. Lepidla se skládají ze dvou složek. Těmi jsou vazební složka (epoxidová nebo silikonová pryskyřice) a vodivá složka (vodivé kuličky nebo šupinky). Lepidla vykazují horší vodivostní vlastnosti oproti pájkám. Pájení prototypu nebo malých sérií probíhá většinou ručně. Velké série jsou pájeny výhradně strojově. Součástky jsou umístěny automaticky a zapájeny přetavením, anebo vlnou kapalných pájek. [9]

2. PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Výpočty

2.1.1 Transformátory

Jednotlivé integrované obvody napájíme transformátory. Jedná se o transformátory se dvěma sekundárními vinutími. Transformátory snižují napětí ze síťového (230 V) na:

- 2 x 15 V (1,5 VA)

Hodnoty napětí na sekundárním vinutí jsou udávána v efektivní hodnotě. Amplitudu napětí tedy určíme ze vztahu:

$$U_{Amp} = \sqrt{2} \cdot U_{ef} = \sqrt{2} \cdot 15 V = 21,2 V \quad (4)$$

Potřebný výkon transformátoru vypočteme dle vzorce:

$$P = U \cdot I \quad (5)$$

Odběry proudů jednotlivých integrovaných obvodů jsou udávány orientačně, a nebo nejsou udávány vůbec. Je tedy třeba počítat s dostatečnou rezervou.

Pro napájení optočlenu dostáváme hodnotu:

$$P = 5 \cdot (30 \cdot 10^{-3}) \cong 0,15 VA$$

Pro napájení budičů dostáváme hodnotu:

$$P = 15 \cdot (30 \cdot 10^{-3}) \cong 0,45 VA$$

2.1.2 Zvlnění

Napětí na výstupu usměrňovače není dokonale stejnosměrné, nýbrž obsahuje střídavou složku. Pro většinu spotřebičů a akumulátorů je zvlnění nežádoucí, a proto je potřeba jej odfiltrvat. K tomu použijeme filtrační kondenzátor. Hodnotu zvlnění v procentech lze vypočítat podle následujícího vzorce:

$$p = \frac{C \cdot U_{SS}}{k \cdot I_{výst}} \quad (6)$$

kde p je hodnota zvlnění v procentech

k je empirická konstanta, pro jednocestný usměrňovač $k = 600$ s

$I_{výst}$ je proud zátěží v mA

C je kapacita kondenzátoru [3]

Použili jsme jednocestný usměrňovač s diodou 1N4007, na které lze naměřit úbytek napětí 0,7 V. Upravíme vztah č. 7 na:

$$C = \frac{k \cdot I_{výst}}{p \cdot U_{SS}} \quad (\mu F; -, mA, \%, V) \quad (7)$$

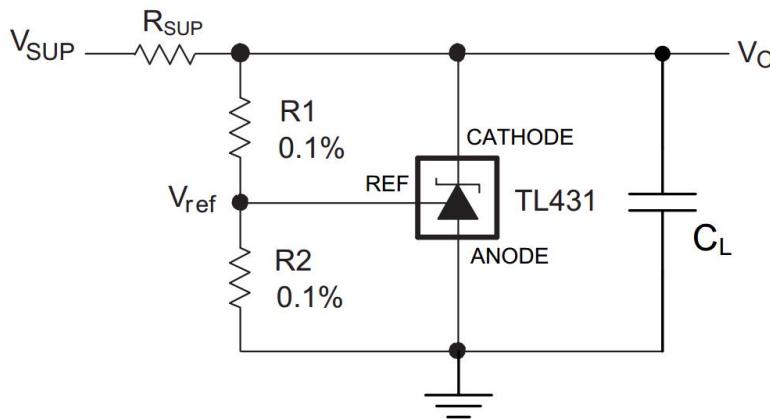
Kapacitor je dobíjen na hodnotu $U_{Amp} - U_F$. Proud $I_{výst}$ všech sekundárních vinutí transformátorů dosáhne hodnoty maximálně 30 mA.

$$C = \frac{600 \cdot 30}{1 \cdot (21,2 - 0,7)} = 923 \mu F$$

Zvolili jsme tedy hodnotu $C = 1000 \mu F$.

2.1.3 Stabilizátor TL 431

V případě TL 431 je výrobcem dané referenční napětí $U_{REF} = 2,5 V$ resp.: maximální hodnota napětí a proudu. Výstupní napětí a proud je možné nastavit rezistory.



Obrázek 13: Doporučené zapojení TL431[10]

Pro stabilizátor TL 431 je nutné dopočítat dle potřeby hodnoty všech rezistorů doporučeného zapojení z obrázku č. 13.

Odběry proudu obvodů různých sekundárních vinutích transformátorů se mění, avšak výpočet probíhá analogicky. V případě napájení komparátoru je potřebné napětí na výstupu stabilizátoru $U_{OUT} = 5 V$.

$$U_{IN} = U_{Amp} - U_F = 21,2 - 0,7 = 19,5 \text{ V} \quad (8)$$

$$R_{SUP} = \frac{U_{IN} - U_{OUT}}{I} = \frac{19,5 - 5}{30 \cdot 10^{-3}} \cong 500 \Omega \quad (9)$$

$$U_{REF} = 2,5 \text{ V}$$

$$\frac{U_{REF}}{R_2} = \frac{2,5}{2k2} = 1,2 \text{ mA} \quad (10)$$

$$\frac{U_{OUT}}{U_{REF}} = \frac{5}{2,5} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (11)$$

$$R_1 = \frac{5 \cdot 2k2}{2,5} - 2k2 = 2200 \Omega \quad (12)$$

Zvolíme hodnoty reálných rezistorů $R_1 = 2k2 \Omega$, $R_2 = 2k2 \Omega$ a $R_{SUP} = 500 \Omega$.

V případě napájení budiče je potřebné napětí na výstupu stabilizátoru $U_{OUT} = 15 \text{ V}$.

$$U_{IN} = U_{Amp} - U_F = 21,2 - 0,7 = 19,5 \text{ V}$$

$$R_{SUP} = \frac{U_{IN} - U_{OUT}}{I} = \frac{19,5 - 15}{30 \cdot 10^{-3}} \cong 500 \Omega$$

$$U_{REF} = 2,5 \text{ V}$$

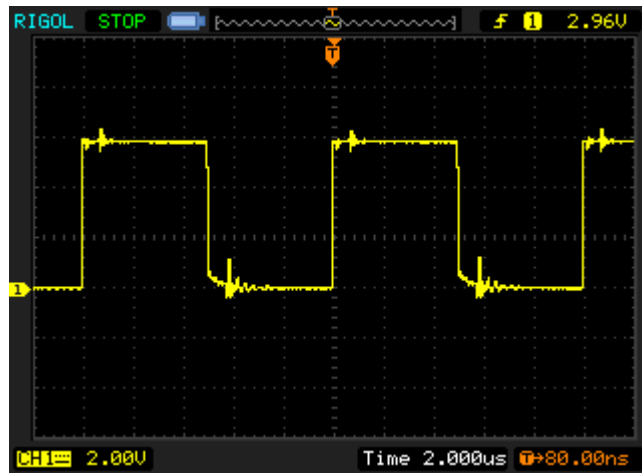
$$\frac{U_{REF}}{R_2} = \frac{2,5}{2k2} = 1,2 \text{ mA}$$

$$\frac{U_{OUT}}{U_{REF}} = \frac{15}{2,5} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

$$R_1 = \frac{15 \cdot 2k2}{2,5} - 2k2 = 11000 \Omega$$

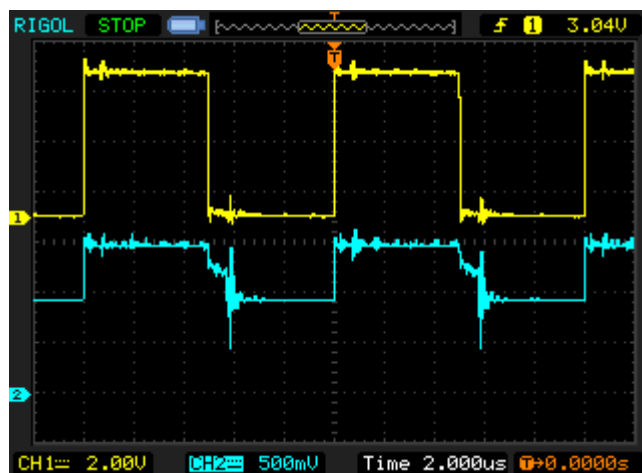
2.2 Měření a grafy

Jako první budeme měřit průběhy napěťových vstupů/výstupů jednotlivých integrovaných obvodů pro ověření synchronnosti a funkčnosti celého přípravku. Měření probíhá pro frekvenci $f = 100 \text{ kHz}$. Pro měření průběhů byl použit digitální osciloskop RIGOL DS1102E.



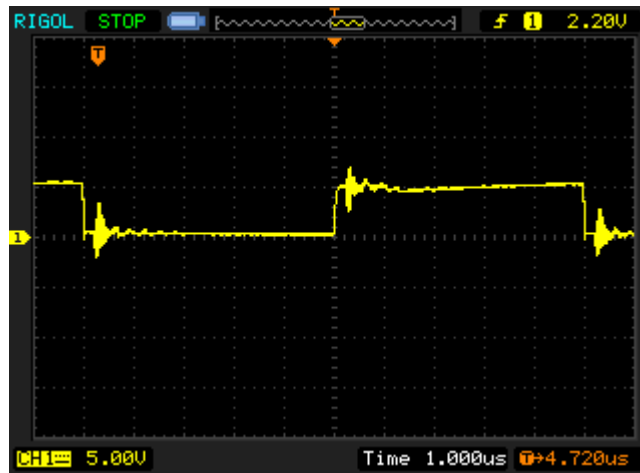
Obrázek 14: Vstupní signál optronu č.1

Na obrázku č. 14 je zobrazen výstupní signál z generátoru RIGOL-D61022, který je zároveň vstupním signálem všech optočlenů. Optočleny jsou řazeny sériově, což znamená součet úbytků napětí jednotlivých LED diod. Je tedy potřeba, aby měl vstupní signál dostatečnou napěťovou úroveň.



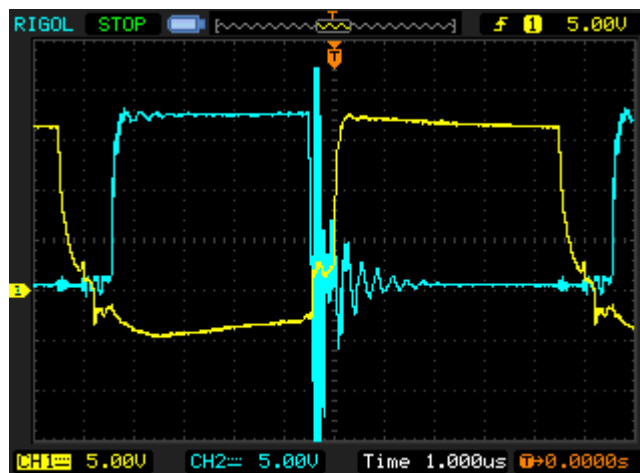
Obrázek 15: Vstupní signály optočlenů

Žlutý průběh napětí představuje vstupní napětí na všech optočlenech v sérii a modrý posledního, resp. čtvrtého. Můžeme si všimnout napěťového rozdílu přibližně 4,5 V, což by znamenalo, že jednotlivé LED diody mají úbytek napětí $U_F \cong 1,5 V$. Výstupem optočlenů bude signál o napěťové úrovni V_{cc} , tedy přibližně 5 V.



Obrázek 16: Výstupní signál optočlenů

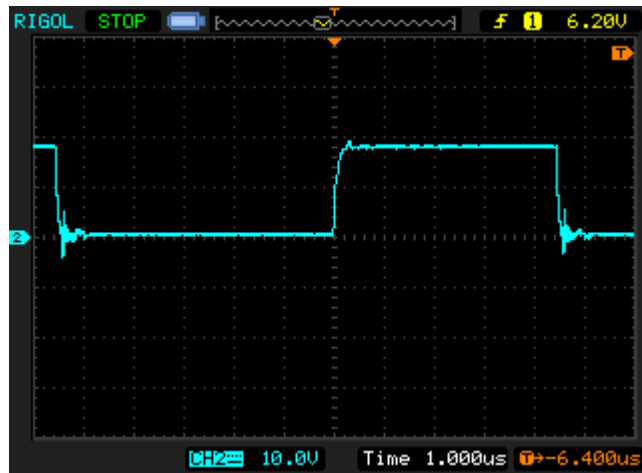
Můžeme si všimnout, že napěťové špičky se dostaly i na výstup optočlenu. Důvodem vzniku těchto špiček si nejsme jisti. Nejspíš se jde o přeslechy od výkonových členů násobiče.



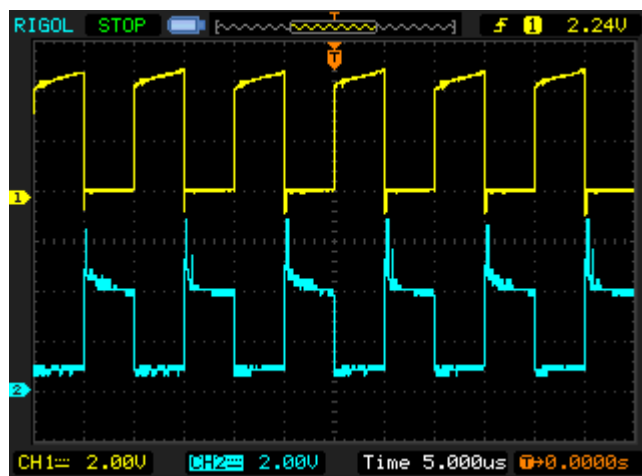
Obrázek 17: Výstupy High-Low side budiče

Modrý průběh zobrazuje HO signál a žlutý průběh zobrazuje LO signál na výstupu budiče. Můžeme si všimnout, že HO signál má na sestupné hraně velkou špičku s přechodovým jevem. Tento jev je způsoben měřením LO a HO signálu stejného budiče zároveň. Oba signály jsou měřeny proti napěťové úrovni VS (High side floating supply offset voltage). To způsobuje zobrazené zvlnění a dokonce záporné hodnoty LO signálu. Smyslem obrázku č. 17 je kontrola, zda se jednotlivé průběhy nepřekrývají.

Při měření jednotlivých výstupů samostatně na obrázku č. 18 je vidět, že průběh je v pořádku.

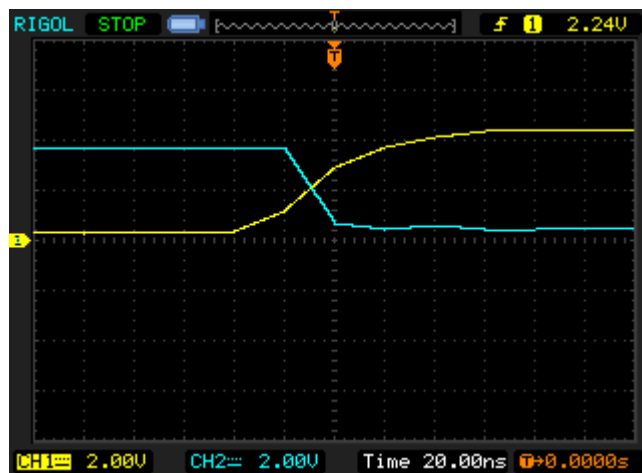


Obrázek 18: Výstup LO budiče měřený samostatně



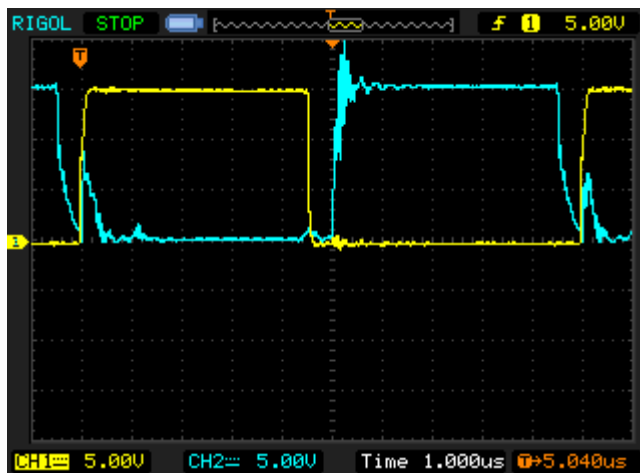
Obrázek 19: Vstup a výstup invertoru

Žlutý průběh představuje vstupní signál invertoru a modrý průběh zobrazuje výstup. Obrázek je kontrolou, zda invertor správně obrací fázi signálu a příliš signál nezpožďuje.



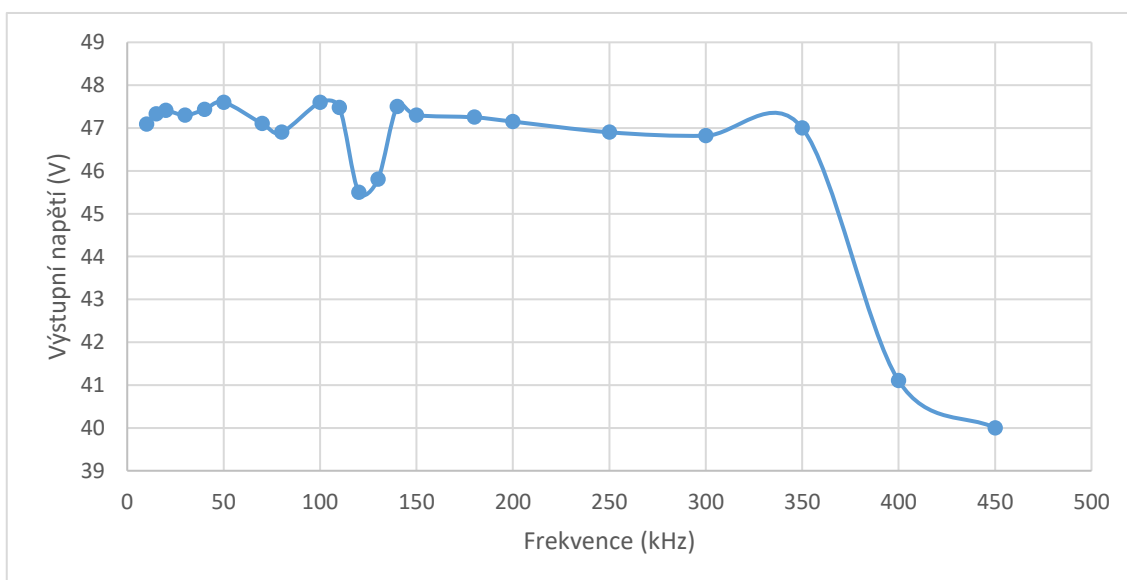
Obrázek 20: Propagační zpoždění invertoru

Na obrázku č. 20 je přiblížen průběh vstupu a výstupu pro odečtení propagačního zpoždění invertoru. Propagační zpoždění udáváno výrobcem je maximálně 40 ns. Z průběhů na osciloskopu můžeme odečíst zpoždění přibližně 20 ns. Můžeme si také všimnout, že sestupná hrana výstupního signálu je podstatně kvalitnější.



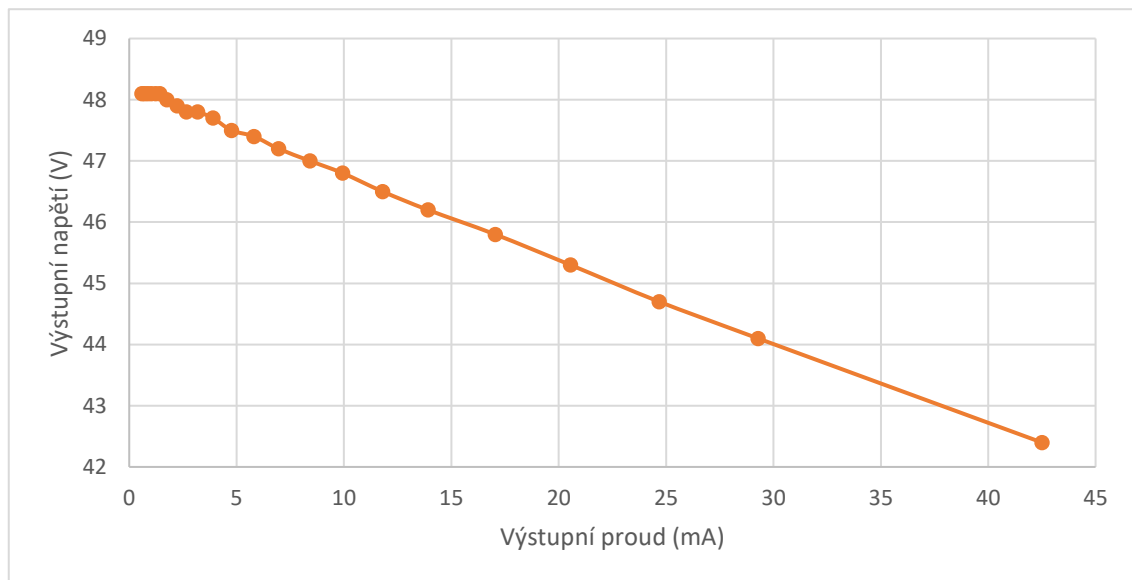
Obrázek 21: Porovnání signálu LO budičů H-Můstku

Na obrázku č. 21 jsou zobrazeny průběhy LO budičů pro řízení tranzistorů H-Můstku. U modrého signálu jsme zaznamenali určitý přeslech. Mohlo by to být důsledkem rychlého otevírání tranzistorů. Je však divné, že přeslech byl zaznamenán pouze na jednom z průběhů. Opět jde o kontrolu inverze a synchronnosti budičů.

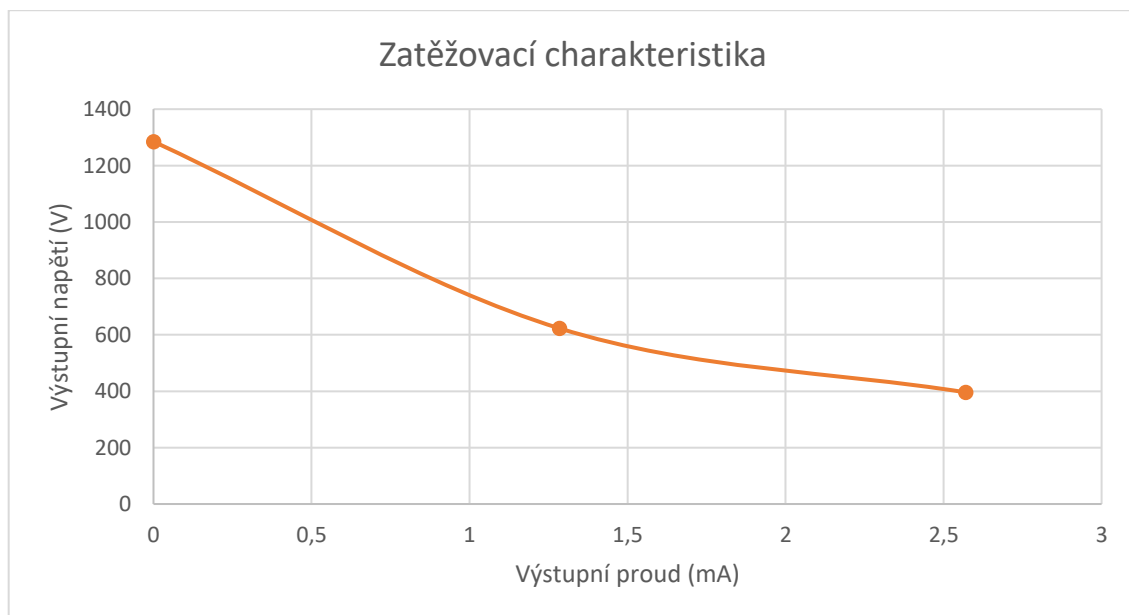


Obrázek 22: Graf závislosti výstupního napětí na frekvenci řídicího signálu

Hodnoty vynesené do grafu byly naměřeny při zatížení zátěží o hodnotě $R = 47 \text{ k}\Omega$. Při funkci na frekvenci 110-130 kHz můžeme vidět lehký pokles výstupního napětí. Na hodnotě 350 kHz nastává prudký pokles výstupního napětí. Domníváme se, že tento jev vzniká nedostatečnou rychlostí některých integrovaných obvodů což způsobí chybu v synchronizaci.



Obrázek 23: Zatěžovací charakteristika násobiče s tranzistory MOSFET



Obrázek 24: Zatěžovací charakteristika běžného násobiče s diodami [14]

Na obrázku č. 24 je zobrazena charakteristika násobiče fungujícího na frekvenci 50 Hz. Jedná se o 9 stupňový násobič připojený k napětí o efektivní hodnotě 100 V. Na tomto násobiči jsme měřili již minulý semestr a poté co jsem zjistil, že data pro sestavení

podrobné zatěžovací charakteristiky chybí již násobič nebyl dostupný. Z dostupných dat jsem tedy sestavil alespoň tuto charakteristiku, která však v našem případě postačí.

Z obrázků č. 23 a 24 je zřejmé, že náš násobič je ve srovnání s běžným násobičem poměrně lineární, tedy "tvrdost", resp. vnitřní odpor násobiče s tranzistory je podstatně vyšší, resp. nižší. To je podstatné zejména v případě, kdy napájené zařízení potřebuje občas přejít z klidového stavu, ve kterém odebírá malý proud, do stavu, kdy odebírá vyšší proud. Úbytek napětí při odběru $I = 5 \text{ mA}$ je přibližně 1 %. Tuto skutečnost bych hodnotil velmi dobře, při srovnání s běžným násobičem, kde se úbytek napětí při odběru 1 mA pohybuje až okolo 40 %.

Díky poměrně vysoké frekvenci, kterou násobič používá a kondenzátorům o kapacitě 1 μF je možné násobič poměrně dost zatížit bez velkého zvlnění (řádově desetiny procent až jednotky procent).

$$U_{(t)} = U_0 \cdot e^{\frac{-t}{RC}}$$

Kde U_0 je počáteční hodnota napětí na kapacitoru

R_Z je zátěž,

t je čas periody průběhu napětí

$$C \gg \frac{t}{R_Z}$$

$$1 \cdot 10^{-6} \text{ F} \gg \frac{1 \cdot 10^{-5} \text{ s}}{1000 \Omega} = 1 \cdot 10^{-8}$$

$$1 \cdot 10^{-6} \text{ F} \gg 1 \cdot 10^{-8}$$

Násobiče se ve většině případů používají pro odběry proudů v řádu jednotek μA až 5 mA. Pokud však aplikaci násobiče nevadí úbytek napětí v jednotkách voltů, je možné z našeho výrobku odebírat proud až 50 mA. Pro vyšší hodnoty proudu než 50 mA by bylo potřeba dalších měření.

3. ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce jsem si rozšířil své znalosti počítačového návrhu desky plošných spojů. Této zkušenosti si velmi cením, jelikož v dnešní době je to zásadní dovednost, bez které se nelze obejít. Dále jsem se seznámil se základními vlastnostmi budičů a jejich aplikacemi.

Osazená deska plošných spojů nefungovala ihned po připojení napájení. Důvodem byly menší chyby v technologii výroby, které byly nalezeny a odstraněny během krátké chvíle. V obvodu nebylo třeba provádět žádné zásadní změny zapojení.

Podářilo se sestrojít synchronní násobič napětí pomocí tranzistorů MOSFET fungující při požadované frekvenci 100 kHz (nebo vyšší) a demonstrovat princip jeho funkce. Cíl této práce byl akademický. Výroba násobiče se jeví jako příliš náročná a nákladná v porovnání s násobičem diodovým. Demonstrovali jsme však, že pro specifická použití je možné tento násobič realizovat.

Násobič má poměrně dost prostoru pro další práci a zlepšení vlastností. Další postup v práci by mohl implementovat více stupňů násobiče a měřit rozložení napětí na jednotlivých stupních. Také by bylo dobré zařadit tavnou pojistku pro síťové napětí přivedené přímo na DPS, která by představovala zvýšení bezpečnosti práce s výrobkem. Násobič není schopen násobit sinusový průběh napětí, kvůli složitosti synchronizace spínání jednotlivých tranzistorů. Zpracování sinusového napětí by mohlo být předmětem další práce. Bylo by dobré provést měření závislosti zvlnění výstupního napětí na odebíraném proudu zátěže. Toto měření jsem opomenul a poté již nebylo možné ho provést. Můžeme tedy pouze odhadovat hodnoty zvlnění, což mě velice mrzí.

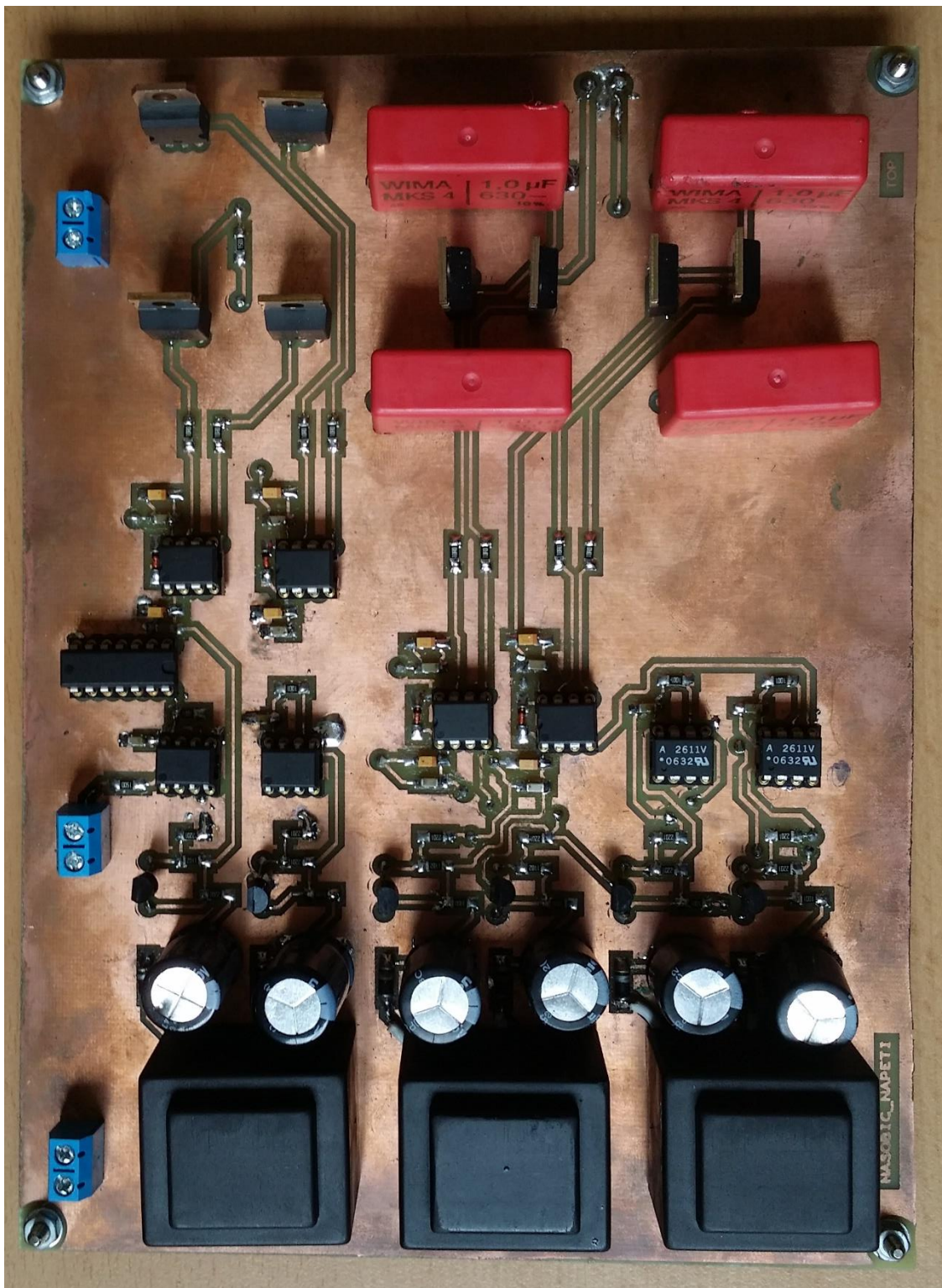
Výsledek bakalářské práce – funkční synchronní násobič napětí s tranzistory MOSFET.

4. SEZNAM LITERATURY

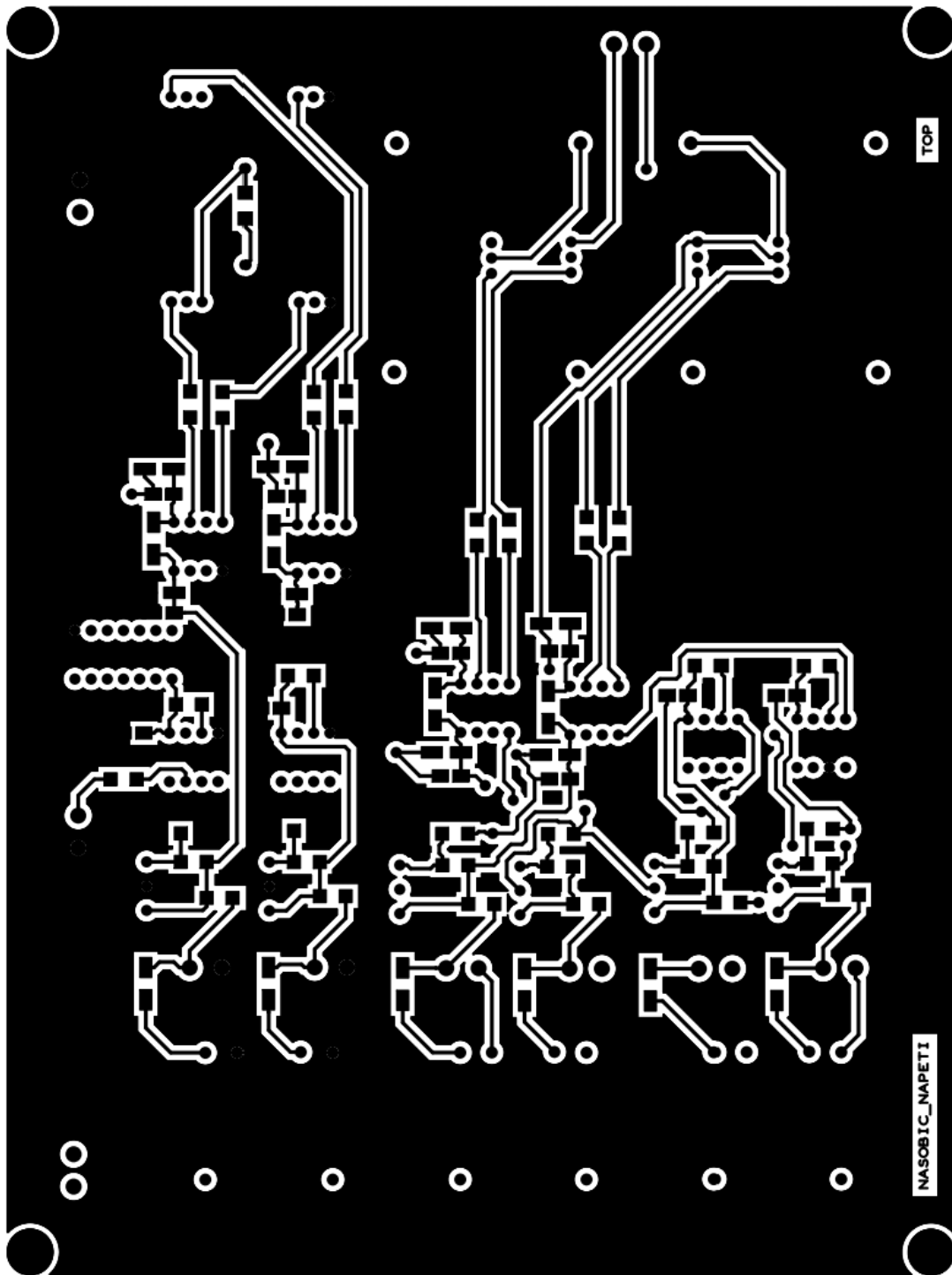
- [1] **VMI, Voltage Multipliers Inc.:** Dostupné z:
http://www.voltagemultipliers.com/pdf/Add04_Sec13.pdf
- [2] **NEČÁSEK, Sláva.:** Radiotechnika do kapsy. Praha 1: SNTL, 1981. Kapitola Zdujovače a násobiče napětí, s. 197.
- [3] **VOBECKÝ, Jan. a Vít ZÁHLAVA.:** Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady. 3., rozš. vyd. Praha: Grada Publishing, 2005. ISBN 978-80-247-1241-3.
- [4] **UHLÍŘ, Ivan.:** Elektrické obvody a elektronika. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03932-8.
- [5] **International Rectifier.:** IR2104(S) & (PbF) Half-bridge driver, Data Sheet No. PD60046-S
- [6] **HAVLÍČEK, Václav, Martin POKORNÝ, Ivan ZEMÁNEK.:** Elektrické obvody 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014-. ISBN 978-80-01-05492- 5.
- [7] **(Online),** Dostupné z:
[https://cs.wikibooks.org/wiki/Praktická_elektronika/Transformátor_\(obr.\)](https://cs.wikibooks.org/wiki/Praktická_elektronika/Transformátor_(obr.))
- [8] **FAKTOR, Zdeněk.:** Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 8086056910.
- [9] **ZÁHLAVA, Vít.:** *Návrh a konstrukce desek plošných spojů.* Praha: Nakladatelství ČVUT, 2005. 75 s
- [10] **Texas Instruments.:** TL431, Data Sheet
- [11] **Avago Technologies.:** hcpl - 0661 - 000e-ao-6e7850, Data Sheet
- [12] **Texas Instruments.:** SNx4HCT14 Hex Schmitt-Trigger Inverters, Data Sheet
- [13] **(Online),** Dostupné z:
<https://cdn.instructables.com/FNA/QR5R/HEI47TC2/FNAQR5RHEI47TC2.LARGE.jpg>
g **(obr.)**
- [14] **(Online),** Dostupné z: <https://celnav.de/hv/hv10.htm> **(Obr.)**

5. SEZNAM PŘÍLOH

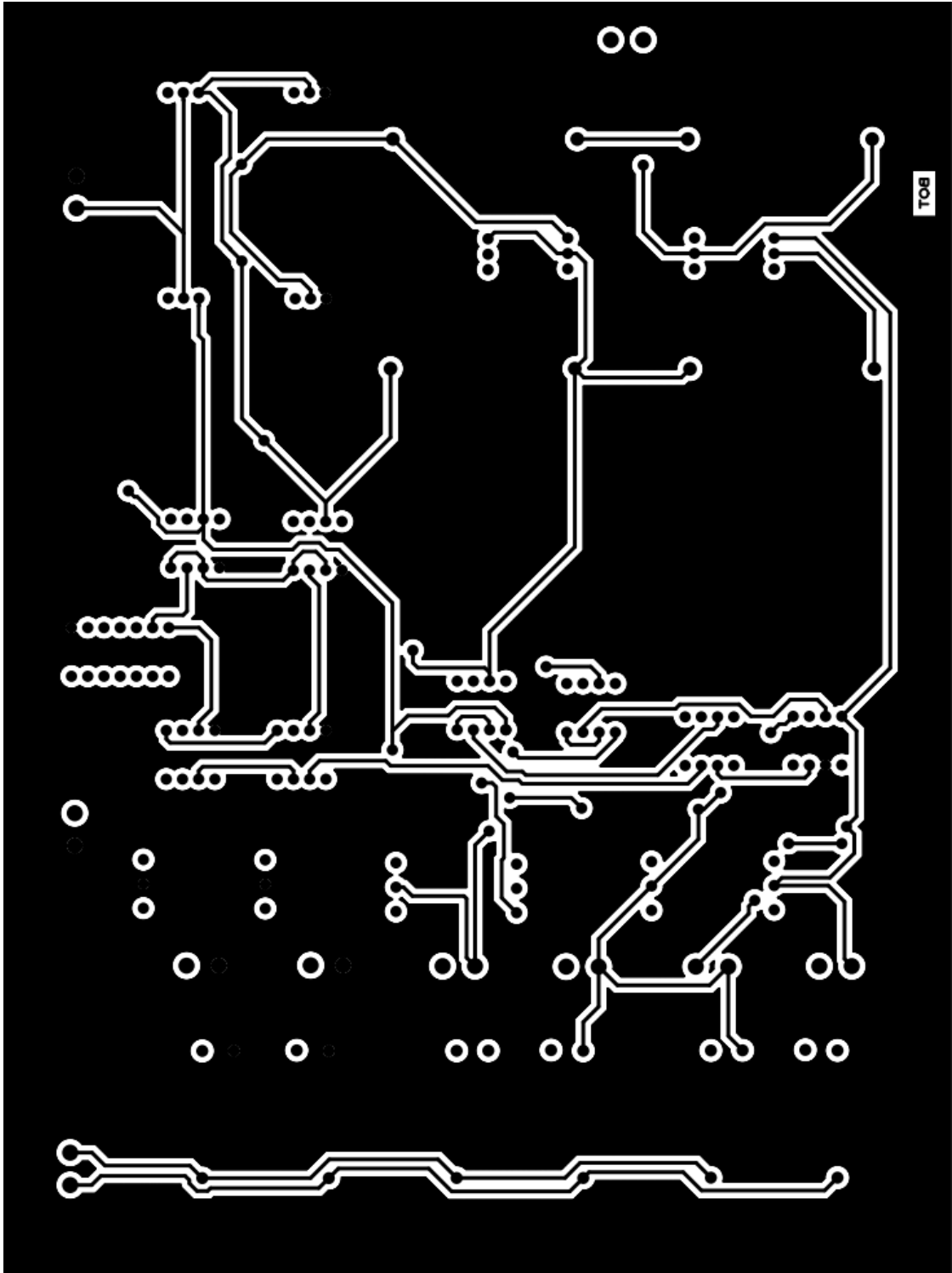
Příloha 1: Obrázek výrobku.....	36
Příloha 2: Film spojů vrstvy TOP	37
Příloha 3: Film spojů vrstvy BOTTOM.....	38
Příloha 4: Schéma elektrického zapojení násobiče.....	39
Příloha 5: Tabulka použitých součástek	40



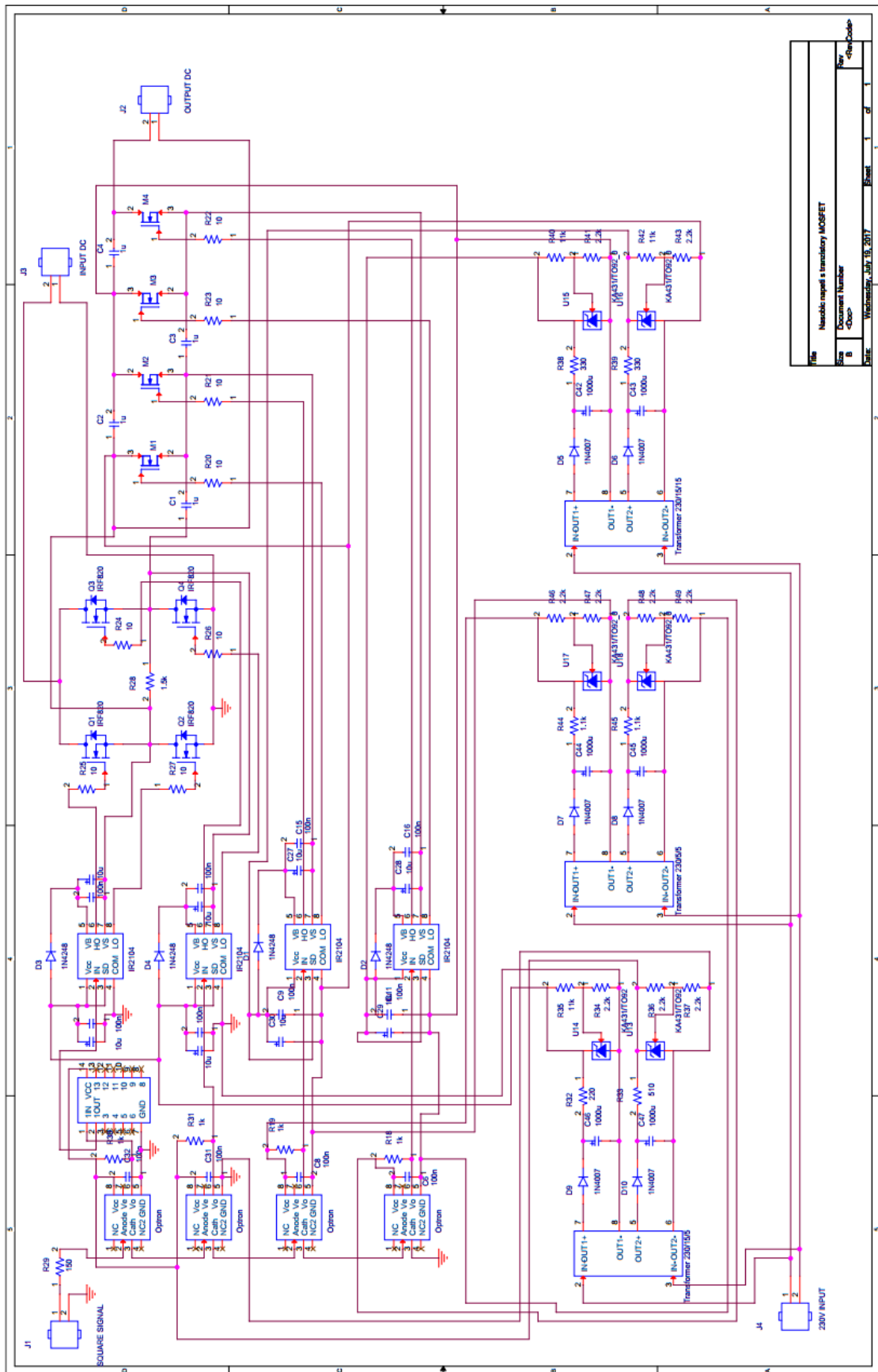
Příloha 1: Obrázek výrobku



Příloha 2: Film spojů vrstvy TOP



Příloha 3: Film spojů vrstvy BOTTOM



File	Násobník napájen tranzistorem MOSFET
Sheet	1 of 1
Doc. Number	4000
Date	Wednesday, July 19, 2017

Příloha 4: Schéma elektrického zapojení násobiče

Součástka	Počet	Hodnoty
Optočlen	4	
Transformátor	3	
C_WIMA_MKS	4	1u
Kondenzátor keramický	12	100n
Kondenzátor tantalový	8	10u
Kondenzátor elektrolytický	6	1000u
Dioda 1N4007	4	
Dioda 1N4248	6	
Svorkovnice	4	
Tranzistor IR_FB9N60A	4	
Tranzistor IRF820	4	
Rezistor	6	1k
	8	10
	1	1.5k
	1	150
	1	220
	1	510
	9	2.2k
	3	11k
	2	330
IRS2104	4	
Invertor	1	
TL431	6	

Příloha 5: Tabulka použitých součástek