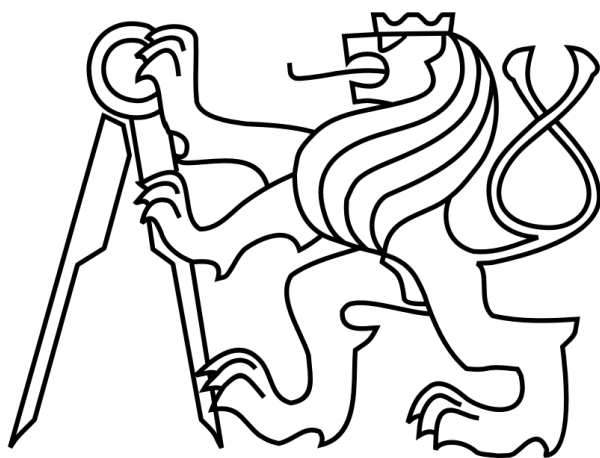


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky



Diplomová práce

Generátor funkcí pro ovládání umělého svalu

Autor: Bc. Ondřej Jirčák

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jirčák** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **457081**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Generátor funkcí pro ovládání umělého svalu

Název diplomové práce anglicky:

Artificial Muscle Function Generator

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte dostupnou literaturu týkající se generátorů funkcí a napájecích zdrojů.
2. Na základě 1) navrhnete a realizujete generátor funkcí (sinus, obdélník / lichoběžník, trojúhelník), schopný dodávat průběhy o napětí do 600 V a frekvenci 0,5 Hz - 20 Hz .
3. Proveďte ověřovací měření.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky.
5. Navrhnete případné další změny zapojení.
6. Zařízení zůstane v majetku zadávajícího pracoviště.
7. Publikování výsledků dosažených v této práci je možné pouze se svolením zadavatele.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Krejčířik, A.: Napájecí zdroje I. - III., BEN, Praha 2003 a další vydání.
- [2] Aplikační poznámky ty IRF (Infineon), STMicroelectronics, TI, apod.
- [3] High Speed Analog Design and Application Seminar. (<http://www.ti.com/lit/ml/slyp169/slyp169.pdf>), únor 2020.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Lubor Jirásek, CSc., katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **07.02.2020** Termín odevzdání diplomové práce: **14.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

Ing. Lubor Jirásek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Házdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci Generátor funkcí pro ovládání umělého svalů zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu uvedenou na konci práce. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne

Podpis studenta

Anotace

V práci jsou popsány základní principy spínaných zdrojů a teorie generátorů funkcí. Následně popisuje návrh nízkofrekvenčního generátoru pro ovládání umělého svalu a pomocných spínaných zdrojů. Řeší hardwarovou i softwarovou stránku problému. Výsledkem práce je funkční generátor schopný vytvářet základní průběhy napětí (pila, rampa, trojúhelník, sinus a obdélník) o amplitudě až 600 V a frekvenci do 20 Hz. Zařízení je ovládáno pomocí maticové klávesnice a nastavené hodnoty zobrazuje na LCD. Práce obsahuje ověřovací měření jednotlivých zdrojů a funkčního generátoru.

Klíčová slova

Generátor funkcí, spínaný zdroj, DC-DC měnič, umělý sval

Abstract

The work describes basic principles of switch mode power supply and theory of function generators. Consequently it describes design of low frequency function generator and auxiliary switch mode power supplies. It solve hardware and software problem of the design. Result of the work is function generator, which is able to create basic voltage waveforms (sawtooth, ramp, triangle, sine and square) with amplitude 600 V and frequency lower than 20 Hz. The device is controlled by matrix keyboard and set values are displayed on the LCD. The work includes testing measurement of switch mode power supplies and function generator.

Key words

Function generator, switch mode power supply, DC-DC converter, artificial muscle

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Luboru Jiráskovi, CSc. za trpělivost a cenné rady, které mi pomohly tuto práci vytvořit. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za dostatek podpory.

Obsah

Seznam obrázků.....	13
Seznam tabulek.....	15
Seznam použitých zkratk a symbolů	16
1. Úvod.....	19
2. Umělý sval	19
3. Napájecí zdroje	20
3.1 Lineární stabilizátory.....	20
3.2 Spínané zdroje	21
3.2.1 Zvyšující měnič	23
3.2.2 Snižující měnič	26
4. Generátory funkcí	29
4.1 Základy k průběhům funkcí	30
4.2 Analogové generátory funkcí.....	31
4.3 Digitální generátory funkcí	32
5. Realizace zařízení	34
5.1 Základní deska	35
5.1.1 Napájecí zdroj.....	35
5.1.2 Koncový zesilovač.....	37
5.2 Generátor funkcí.....	39
5.2.1 Popis programu.....	40
5.2.2 Generování funkcí	41
5.2.3 Předzesilovač a D/A převodník	43
5.2.4 Sběrnice I2C	47
5.2.5 Převodník napěťových úrovní	48
5.2.6 Ovládací prvky	49
5.3 Napájecí jednotka.....	51
5.3.1 Návrh snižujícího měniče	51
5.3.2 Lineární stabilizátory	53

6.	Měření.....	53
6.1	Napájecí zdroje	53
6.1.1	Zvyšující měnič	54
6.1.2	Snižující měnič	55
6.2	Generátor funkcí	57
6.2.1	Sinus	57
6.2.2	Obdélníkový průběh	60
6.2.3	Trojúhelníkové průběhy	63
7.	Zhodnocení výsledků a závěr	66
8.	Literatura.....	68
9.	Přílohy.....	70
9.1	Naměřené průběhy napětí	70
9.2	Schéma zapojení	73
9.3	Seznam součástí	76
9.4	Motiv plošných spojů.....	79
9.5	Schéma zapojení přístrojové krabice	82
9.6	Fotografie desek plošných spojů.....	83
9.7	Fotografie zařízení	86
9.8	Tabulky naměřených hodnot.....	88

Seznam obrázků

Obrázek 1: Princip umělého svalu (převzato z [10])	20
Obrázek 2: Blokové schéma spínaného zdroje	22
Obrázek 3: Zvyšující měnič	23
Obrázek 4: Průběh proudu indukčností L u zvyšujícího měniče	24
Obrázek 5: Snižující měnič	26
Obrázek 6: Průběh proudu indukčností L u snižujícího měniče	27
Obrázek 7: Tvary základních průběhů funkcí	31
Obrázek 8: Analogový generátor funkcí	32
Obrázek 9: Blokové schéma digitálního generátoru	33
Obrázek 10: Zjednodušené uspořádání generátoru	34
Obrázek 11: Schéma zapojení 600V zdroje	36
Obrázek 12: Odvození zesílení můstkového zapojení	37
Obrázek 13: Schéma zapojení koncového zesilovače	38
Obrázek 14: Schéma zapojení generátoru	40
Obrázek 15: Vývojový diagram algoritmu mikrokontroléru	41
Obrázek 16: Hodnota čítače v závislosti na čase	42
Obrázek 17: Neinvertující sumátor jako předzesilovač	44
Obrázek 18: Napěťová reference s použitím integrovaného obvodu TL431	45
Obrázek 19: Převodní charakteristika digitálního potenciometru	47
Obrázek 20: Převodník napěťových úrovní	49
Obrázek 21: Zapojení maticové klávesnice (převzato a upraveno z [22])	50
Obrázek 22: Blokové schéma napájecího systému	51
Obrázek 23: Schéma zapojení snižujícího měniče	52
Obrázek 24: Zapojení lineárních stabilizátorů	53
Obrázek 25: Zatěžovací charakteristika zvyšujícího měniče	54
Obrázek 26: Účinnost zvyšujícího měniče	55
Obrázek 27: Zatěžovací charakteristika snižujícího měniče	56

Obrázek 28: Účinnost snižujícího měniče.....	56
Obrázek 29: Změna THD sinového průběhu v závislosti na zatěžovacím odporu	58
Obrázek 30: Závislost střední kvadratické hodnoty napětí první harmonické na zatěžovacím odporu.....	58
Obrázek 31: Změna THD sinového průběhu v závislosti na zatěžovací kapacitě	59
Obrázek 32: Závislost střední kvadratické hodnoty napětí sinového průběhu na zatěžovací kapacitě.....	60
Obrázek 33: Závislost napětí špička-špička obdélníkového průběhu na zatěžovacím odporu	61
Obrázek 34: Vliv zatěžovacího odporu na náběžné hrany obdélníkového průběhu	61
Obrázek 35: Závislost napětí špička-špička obdélníkového průběhu na zatěžovací kapacitě	62
Obrázek 36: Vliv zatěžovací kapacity na náběžné hrany obdélníkového průběhu	62
Obrázek 37: Změna THD pilového průběhu v závislosti na zatěžovacím odporu	63
Obrázek 38: Závislost napětí špička-špička pilového průběhu na zatěžovacím odporu	64
Obrázek 39: Změna THD pilového průběhu v závislosti na zatěžovacím odporu	65
Obrázek 40: Závislost napětí špička-špička pilového průběhu na zatěžovacím odporu	65

Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry zvyšujícího měniče.....	35
Tabulka 2: Hodnoty součástí pro předzesilovač	46
Tabulka 3: Naměřené hodnoty pro nastavení stejnosměrné složky	46
Tabulka 4: Parametry snižujícího měniče	52

Seznam použitých zkratek a symbolů

A_u	-	Napět'ové zesílení
ARM		Acorn RISC Machine
ARR		Auto – reload registr
ACK		Acknowledge
C	F	Kapacita
C_n		Kapacita vstupního kondenzátoru
C_v		Kapacita výstupního kondenzátoru
CNT	-	Aktuální hodnota čítače
D	%	Střída
DBA	-	Dibutyladipát
dBV		Logaritmická jednotka pro napětí
dBV_{RMS}		Logaritmická jednotka pro RMS napětí
DPS		Deska plošného spoje
D/A		digitálně-analogový převodník
E	-	Hodinový signál
f	Hz	Frekvence
f_{CLK}		Hodinová frekvence mikrokontroléru
FFT	-	Fast Fourier transform
g_m	S	Vodivost
GND	-	Ground
I	A	Proud
I_L		Proud indukčností
ΔI_L		Zvlnění proudu indukčností
I_n		Vstupní proud
I_{ref}		Proud tekoucí do reference (TL431)
I_v		Výstupní proud
I2C	-	Inter-Integrated circuit
L	H	Indukčnost

L_{\min}	H	Minimální hodnota indukčnosti
LCD	-	Liquid crystal display
MOSFET	-	Metal oxid semiconductor field effect transistor
P	W	Výkon
P_n		Vstupní výkon
P_v		Výstupní výkon
PSC	-	Prescaler
PVC		Polyvinylchlorid
PWM		Pulse width modulation
Q	C	Náboj
R	Ω	Odpor
R_{AB}		Odpor digitálního potenciometru mezi A a B
R_{BW}		Odpor digitálního potenciometru mezi B a W
R_W		Odpor digitálního potenciometru terminálu W
RS	-	Register select
R/W		Read / Write
RAM		Random access memory
RMS		Root mean square
SCL	-	Hodinový vodič
SDA		Datový vodič
SPI		Serial peripheral interface
t	s	čas
t_n		Doba trvání náběžné hrany
t_s		Doba trvání sestupné hrany
T		perioda
THD	%	Total harmonic distortion
U	V	Napětí
U_{BE}		Napětí mezi bází a emitorem
U_D		Dopředné napětí diody
U_{GS}		Napětí mezi gate a source

U_{KA}	V	Napětí mezi katodou a anodou
U_n		Vstupní napětí
U_{ref}		Referenční hodnota napětí
U_{RMS}		Střední kvadratická hodnota napětí
$U_{\dot{\bar{u}}}$		Napětí špička-špička
U_v		Výstupní napětí
ΔU_v		Zvlnění výstupního napětí
U_1		Střední kvadratická hodnota první harmonické
u_i		Vstupní napětí
u_o		Výstupní napětí
φ	°	Fáze

1. Úvod

Pro ovládání umělého svalu je nutné použít poměrně vysokého napětí, které se pohybuje v řádu stovek voltů. Umělý sval se bude pohybovat podle přiloženého funkčního průběhu (sinus, trojúhelník, pila, rampa a obdélník). Používané frekvence pro testování jsou v řádu desítek Hz.

Cílem práce je sestrojít funkční generátor, který bude schopný vytvářet napětíové průběhy o frekvenci do 20 Hz a špičkovém napětí do 600 V. Generátor bude sloužit k testování umělého svalu.

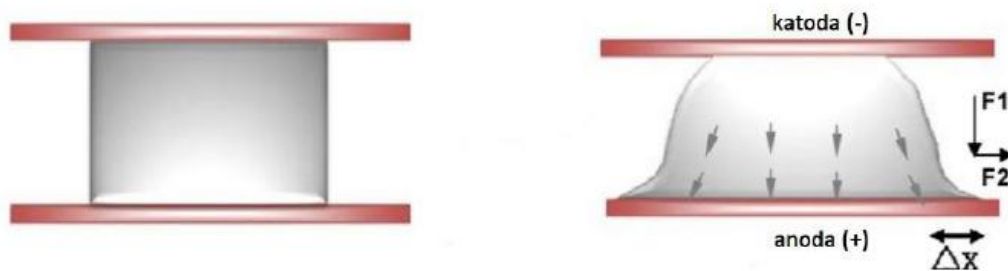
Tato práce rozebírá v první části základy umělého svalu a podrobněji popisuje problematiku spínaných zdrojů a generátorů funkcí. Druhá část se zabývá realizací celého zařízení. Obsahující návrh zdrojů, generátoru funkcí a zesilovače (předzesilovač a výkonový zesilovač). V poslední části je provedeno ověřovací měření zdrojů napětí a výstupního napětí generátoru.

2. Umělý sval

Jinak řečeno aktuátor s PVC gelem. PVC gel je složen ze dvou složek, nezměkčeného PVC a změkčovadla. Vlastnosti aktuátoru jsou dány poměrem těchto dvou složek. Jako změkčovadlo se používá DBA (dibutyladipát).

PVC gel si lze představit jako pevnou PVC mřížku, která je oklopena změkčovadlem. Při přiložení vysokého stejnosměrného napětí se mřížka nabije a PVC gel se na ni začne natlačovat. Umělý sval se stáhne.

PVC gel se chová jako dielektrikum a při přiložení napětí na elektrody se tedy bude chovat jako kapacita. Kapacita svalu se bude měnit s přiloženým napětím. Podrobný popis o fungování a konstrukci umělého svalu v [10].



Obrázek 1: Princip umělého svalu (převzato z [10])

3. Napájecí zdroje

Napájecí zdroje lze rozdělit do dvou základních skupin. První skupina jsou spínané zdroje a druhou skupinu tvoří zdroje lineární. V současnosti jsou více rozšířené spínané zdroje, které pomalu vytlačují lineární zdroje. Ve většině případů plyne jejich výhoda z nižší ceny, vyšší účinnosti a menších rozměrů.

Nevýhoda spínaných zdrojů je jejich větší složitost a náročnost jejich návrhu. Mimo to dochází ve většině případů ke spínání velkých proudů, což klade velké nároky na spínací prvky a způsobuje značné elektromagnetické rušení okolí.

3.1 Lineární stabilizátory

Lineární stabilizátory lze rozdělit do několika skupin. Patří mezi ně parametrické stabilizátory, zpětnovazební stabilizátory a integrované stabilizátory.

Parametrické stabilizátory jsou nejjednodušší. Většinou jsou tvořeny pouze Zenerovou diodou a sériovým rezistorem pro omezení proudu přes diodu. Existují i různé úpravy, které odstraňují proud omezující rezistor a umožňují, tak dosahovat většího výstupního proudu. Nevýhoda této skupiny stabilizátorů je nestabilita výstupního napětí, která je způsobena změnou pracovního proudu diody a teplotní nestabilitou Zenerova napětí.

Zpětnovazební stabilizátory jsou tvořeny komplikovanějším zapojením než parametrické stabilizátory. Zavádí se zpětná vazba, která dává regulátoru informaci, o kolik se liší výstupní napětí od nastavené hodnoty. Zpětnovazební regulátory mají lepší schopnost stabilizovat napětí, například při změně vstupního napětí, nebo při změně zátěže. Teplotní nestabilita může přetrvávat, záleží na použité napěťové referenci.

Integrované stabilizátory jsou nejjednodušší pro návrh. Nejčastěji používané jsou třísvorkové stabilizátory. Kde jedna svorka představuje vstupní napětí, druhá nulové napětí (GND) a na třetí svorce lze odebírat stabilizované napětí. Viz [4].

Podrobnější popis lze nalézt v [1].

3.2 Spínané zdroje

Jak bylo zmíněno v kapitole 3., tak předností spínaných zdrojů jsou jejich malé rozměry. Zmenšení rozměrů je možné především díky vysoké spínací frekvenci (s vyšší frekvencí klesá potřebná kapacita a indukčnost použitých součástek). Tato frekvence musí být vyšší, než úroveň slyšitelnosti (nad 20 kHz). Většinou se spínací frekvence pohybuje v řádu stovek kHz. Používají se i zdroje, které spínají v řádu jednotek MHz. U těch je nutné použít velmi rychlé spínací prvky, aby na nich nedocházelo k velkým spínacím ztrátám. Viz [3].

Existuje mnoho variant zapojení spínaných stabilizátorů. Jsou to například zvyšující měniče, snižující měniče, invertující měniče, nebo měniče, které dokážou napětí jak snižovat, tak i zvyšovat. Spínané stabilizátory lze také rozdělit podle používaného akumulčního prvku. Tím může být kondenzátor, nebo cívka. Cívka může být v podobě transformátoru, nebo klasické cívky s jedním vinutím.

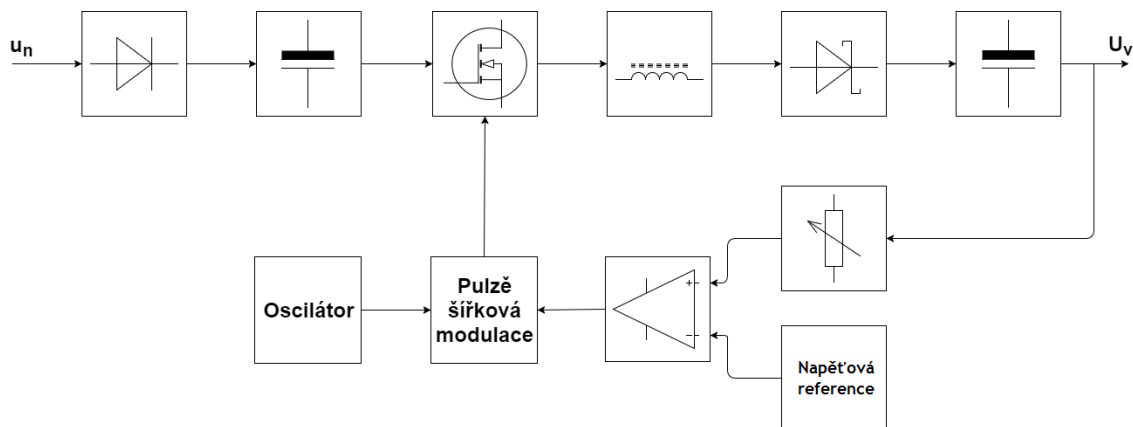
Spínané zdroje využívající kondenzátor jako akumulční prvek (také označované jako nábojové pumpy) se většinou používají pouze pro malé výkony (v řádu mW), protože nejsou schopné dodat na výstup velký proud. Fungují na principu přepínání nabitých kondenzátorů. Například pro zdvojení napájecího napětí bude docházet k přepínání sériového a paralelního zapojení dvou kondenzátorů. Kdy v paralelním zapojení se budou

kondenzátory nabíjet a v sériovém zapojení se jejich napětí sečtou a umožní odebrat dvojnásobné napětí na výstupu. Další často využívané zapojení, které patří mezi nábojové pumpy, je například invertor napětí.

Druhá skupina jsou spínané zdroje využívající cívku jako akumulční prvek. Tyto zdroje lze využít pro odběr vyšších výkonů než nábojové pumpy. Velikost výstupního výkonu závisí na použitém zapojení. Například pro výkony do 50 W se většinou používají zdroje, které využívají jeden spínací prvek a jako akumulční prvek využívají cívku. Pokud je potřeba dodávat výkony do 250 W, tak je výhodné používat spínané zdroje využívající jeden spínací prvek a jako akumulční prvek transformátor. Pro výkony nad 500 W se využívají spínané zdroje, které mají jako akumulční prvek použit transformátor a spínají jej pomocí dvou, nebo čtyř spínacích prvků (tzv. dvojčinné měniče). Podrobnější popis základních topologií bude rozebrán dále.

Na Obrázku 2 je znázorněné blokové schéma obecného spínaného zdroje. Na vstupu je nutné využít usměrňovač, který převede střídavé napětí na stejnosměrné. Usměrněné napětí se pomocí spínacího prvku rozdělí na impulzy (o vysoké frekvenci) a pomocí akumulčního prvku se upraví na požadovanou hodnotu. Následuje výstupní usměrňovač, který vyfiltruje výstupní napětí. Z výstupu je odebírán přes napěťový dělič vzorek napětí. Ten je porovnáván s referenční hodnotou napětí přes chybový zesilovač. Z hodnoty, která je na výstupu chybového zesilovače, jsou následně vytvořeny impulzy, které řídí spínací prvek.

Popis dělení spínaných zdrojů je popsán v [3].

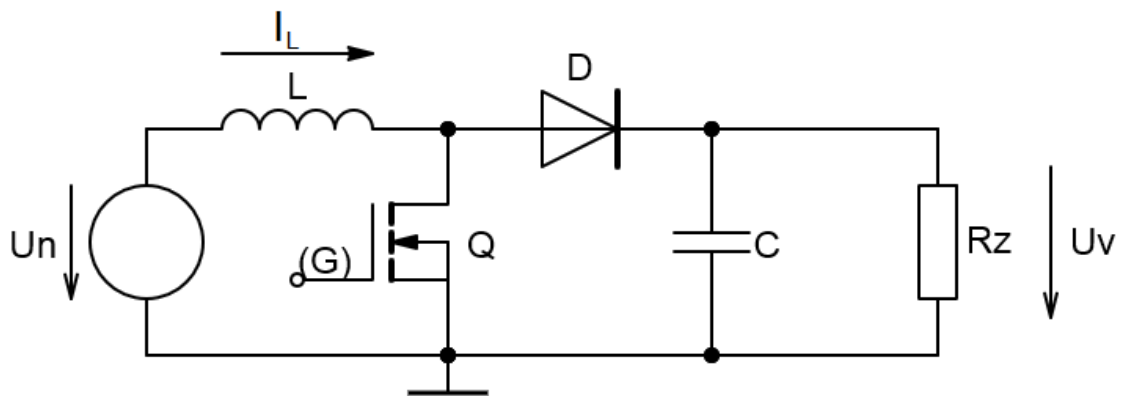


Obrázek 2: Blokové schéma spínaného zdroje

3.2.1 Zvyšující měnič

Zvyšující měnič (také označovaný jako boost konvertor) se řadí mezi jednočinné spínané zdroje využívající indukčnost. Z principu činnosti musí u tohoto měniče platit, že napětí na jeho výstupu je vyšší než napětí na vstupu.

Principiální schéma zvyšujícího měniče je znázorněno na Obrázku 3 a průběh proudu cívkou L na Obrázku 4. Zvyšující měnič transformuje napětí ze vstupu na výstup tak, že výstupní napětí je vyšší než vstupní napětí. Velikost výstupního napětí je dána střídou spínání D tranzistoru Q.

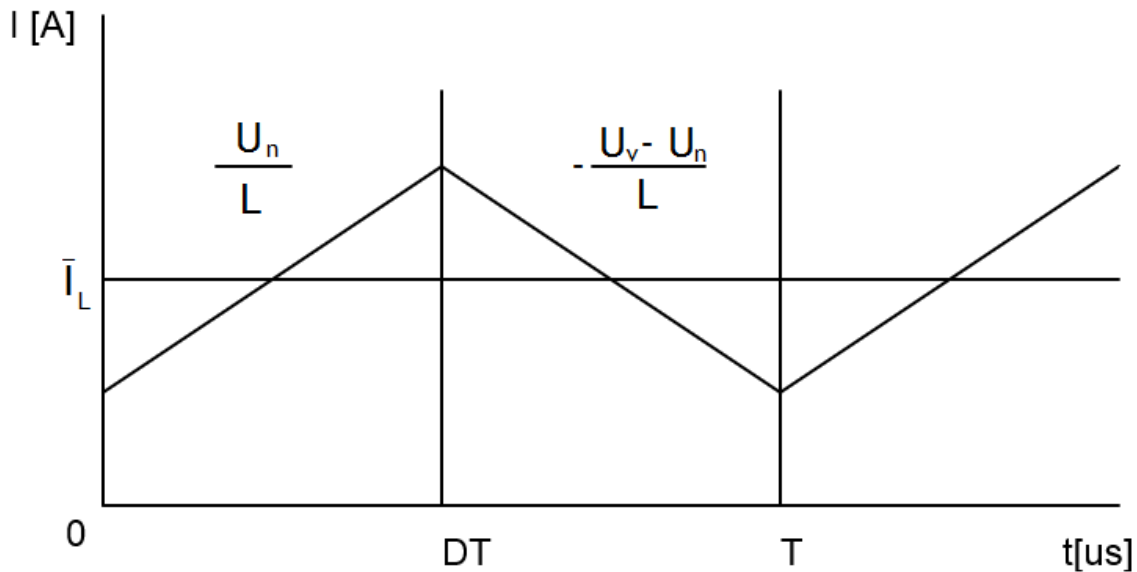


Obrázek 3: Zvyšující měnič

Předpokládejme, že výstupní kondenzátor C je již nabit na ustálenou hodnotu napětí. V první fázi je tranzistor Q sepnut po dobu DT (kde T značí periodu spínání tranzistoru) a proud tekoucí cívkou L roste. Směrnice tohoto nárůstu je dána poměrem napájecího napětí a velikostí indukčnosti cívky. Dioda D bude v této fázi zavřena, protože její katoda bude připojena k výstupnímu napětí, které bude za normálních podmínek kladné. V druhé fázi po dobu $(1-D)T$ bude tranzistor rozepnut. Na cívce se naindukují napětí, které se sečte s napájecím napětím. Jakmile toto napětí překročí součet výstupního napětí a úbytku napětí na diodě, tak dojde k otevření diody. Cívka se bude vybíjet do výstupního kondenzátoru. Napětí na cívce bude v této fázi dáno rozdílem vstupního a výstupního napětí (při zanedbání

úbytku napětí na diodě). Z toho plyne, že směrnice poklesu proudu je dána poměrem rozdílu výstupního a vstupního napětí a indukčnosti cívky.

Pokud bude cívka navržena správně (její indukčnost bude dostatečně velká), tak jí tekoucí proud nikdy nebude mít nulovou hodnotu. Pokud by proud dosahoval nulové hodnoty, zhoršila by se účinnost a spínaný zdroj by nadměrně rušil své okolí.



Obrázek 4: Průběh proudu indukčnosti L u zvyšujícího měniče

Jak již bylo zmíněno, tak velikost výstupního napětí je dána střídou spínání D . Střídu lze odvodit z Obrázku 4. Pokud je napětí na výstupním kondenzátoru ustálené, tak musí platit následující rovnost:

$$\frac{U_n}{L} DT = -\frac{U_v - U_n - U_D}{L} (1 - D)T \quad (1)$$

Kde U_D představuje úbytek napětí na diodě (dále bude tato hodnota zanedbána). Po úpravě vztahu (1) dostaneme následující vztah, který udává velikost střídy při zadaném poměru vstupního a výstupního napětí:

$$\frac{U_v}{U_n} = \frac{1}{1 - D} \quad (2)$$

Pro určení hranice mezi spojitým (proud cívku nedojde do nuly) a nespojitým módem (proud cívku bude dosahovat nulové hodnoty) se zavádí střední hodnota proudu tekoucího cívku:

$$2\bar{I}_L = \frac{U_n D}{L} DT \quad (3)$$

Vztah (3) popisuje nárůst proudu cívku z nulové hodnoty až na hodnotu dvojnásobku střední hodnoty. Pro hranici mezi spojitým a nespojitým módem bude tedy platit:

$$L_{min} \geq \frac{U_n D}{2\bar{I}_L f} \quad (4)$$

Pokud bude výsledná indukčnost cívky větší než vypočtená hodnota, tak proud tekoucí cívku nebude dosahovat do nuly. Ve skutečnosti se použije cívka mnohonásobně větší (záleží na požadovaném zvlnění proudu cívku). Pro vypočtení zvlnění proudu cívku stačí upravit vztah (4) následujícím způsobem:

$$L = \frac{U_n D}{\Delta I_L f} \quad (5)$$

Kde ΔI_L označuje požadované zvlnění proudu cívku. Vztah pro vstupní a výstupní kondenzátor vychází ze vztahu $Q = C U$.

$$C_v = \frac{I_v D}{\Delta U_v f} \quad (6)$$

Výstupní kondenzátor se vybíjí po dobu, kdy je spínač sepnutý. Jeho velikost se navrhuje tak, aby napětí na něm bylo zvlněné maximálně o ΔU_v . I_v představuje maximální hodnotu výstupního proudu.

$$C_n = \frac{I_n D}{\Delta U_n f} \quad (7)$$

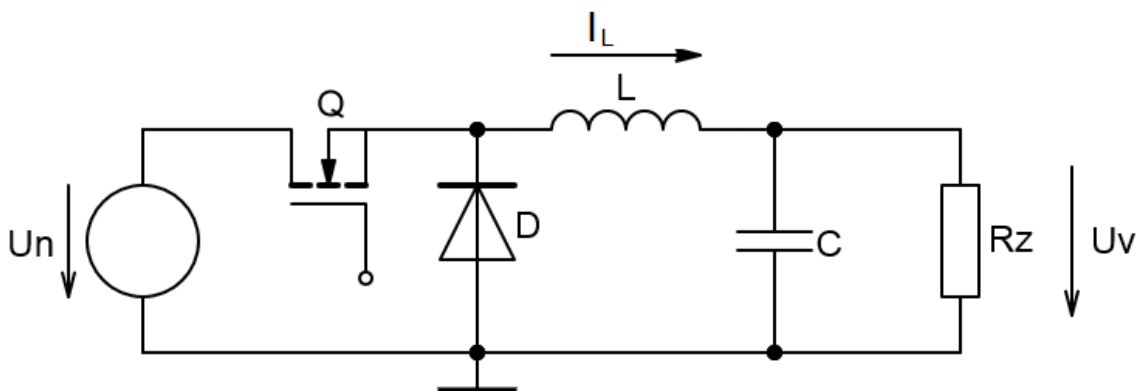
Vstupní kondenzátor musí být navržen tak, aby byl schopný pokrýt špičkové odběry proudu, které jsou nutné pro správnou funkci spínaného zdroje. I_n představuje vstupní proud spínaného zdroje a ΔU_n maximální možné zvlnění vstupního napětí.

Podrobnější popis v [5].

3.2.2 Snižující měnič

Snižující měnič (také označovaný jako buck konvertor) se řadí mezi jednočinné spínané zdroje využívající jako akumulací prvek cívku. Jak už název napovídá, tak výstupní napětí je menší než vstupní napětí.

Stejně jako u zvyšujícího měniče je výstupní napětí dáno střídou spínání D tranzistoru Q . Schéma zapojení je znázorněné na Obrázku 5 a průběh proudu cívkou L na Obrázku 6.

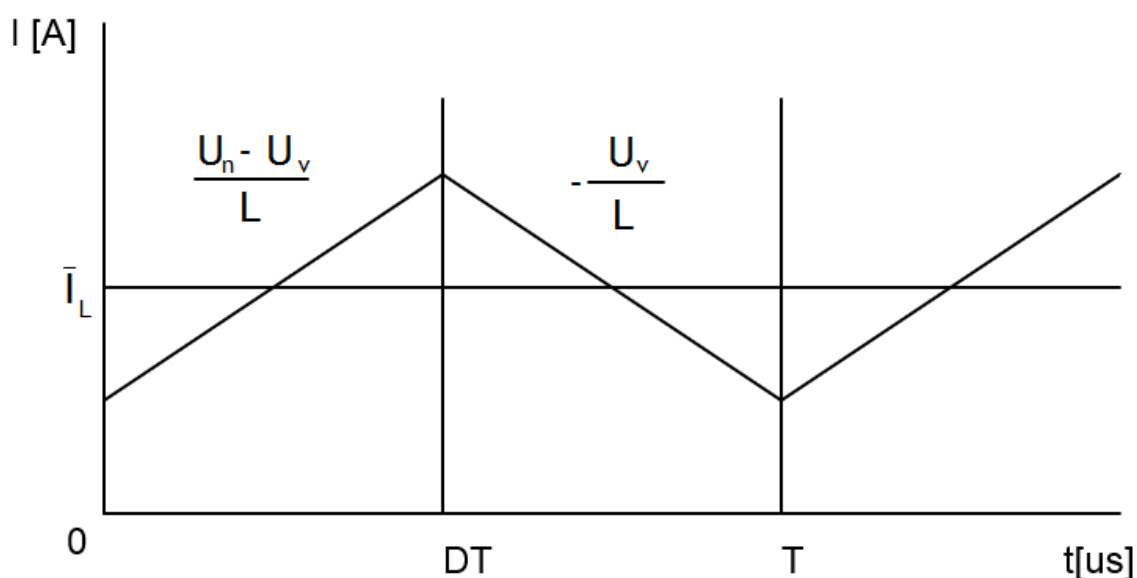


Obrázek 5: Snižující měnič

Předpokládejme, že výstupní kondenzátor je nabit na nastavenou hodnotu. Potom je v první fázi sepnut tranzistor Q po dobu DT . Proud cívkou L roste a dioda D je zavřená. Nárůst proudu je dán poměrem napětí na cívce (rozdíl vstupního a výstupního napětí) a její

indukčnosti. V druhé fázi se tranzistor Q rozezne na dobu $(1-D)T$. Cívka se snaží udržet stejný směr proudu a začne fungovat jako proudový zdroj. Otočí se na ní polarita napětí a otevře se dioda D, přes kterou uzavře proudovou smyčku. Proud cívkou tedy klesá, tento pokles je dán směrnicí, která odpovídá poměru rozdílu výstupního napětí a napětí na diodě a indukčnosti cívky.

Stejně jako u zvyšujícího měniče je nutné navrhnut správně velikost indukčnosti tak, aby proud cívkou procházející se nedostával až na nulovou hodnotu. Pokud se proud cívkou dostane až na nulovou hodnotu, tak se zhorší účinnost a zdroj bude více rušit své okolí. U snižujícího měniče je důležité si dát pozor na použití spínacího prvku. Pokud se použije tranzistor MOSFET s kanálem typu N, tak bude mít plovoucí source. V tomto případě je nutné použít bootstrapový obvod, nebo specializovaný integrovaný obvod, který má tento problém v sobě vyřešený.



Obrázek 6: Průběh proudu indukčností L u snižujícího měniče

Střídou spínání je možné odvodit z Obrázku 6. Pokud je napětí na výstupním kondenzátoru ustálené, tak musí platit následující rovnost:

$$\frac{U_n - U_v}{L} DT = \frac{U_v - U_D}{L} (1 - D)T \quad (8)$$

U_D představuje úbytek napětí na diodě (pro další výpočet bude zanedbáno). Úpravou vztahu (8) lze odvodit střihu spínání:

$$\frac{U_v}{U_n} = D \quad (9)$$

Jak je vidět, tak střida spínání je rovna pouze poměru vstupního a výstupního napětí. Dále je nutné spočítat minimální hodnotu indukčnosti. Postupuje se stejným způsobem jako v kapitole 3.2.1.

$$2\bar{I}_L = \frac{U_n - U_v}{L} DT \quad (10)$$

Ze vztahu (10) lze odvodit minimální hodnotu indukčnosti, při které bude zdroj fungovat ve spojitém módu:

$$L \geq \frac{U_n - U_v}{2\bar{I}_L} DT \quad (11)$$

Použitá indukčnost musí mít stejně jako u zvyšujícího měniče vyšší hodnotu, která bude odpovídat požadovanému zvlnění proudu cívku. Vztah pro výpočet indukčnosti se zadanou hodnotu zvlnění proudu cívku lze dostat úpravou rovnice (11).

$$L = \frac{U_n - U_v}{\Delta I_L} DT \quad (12)$$

Kde ΔI_L značí zvlnění proudu. Vztahy pro vstupní a výstupní kondenzátor lze odvodit stejně jako u zvyšujícího měniče podle vztahu $Q = C U$. U snižujícího měniče je nutné uvažovat, že výstupní kondenzátor je i v případě rozepnutého spínače dobíjen částečně z cívky (pokud bude měnič pracovat ve spojitém módu). Viz [7].

$$C_v = \frac{\Delta I_L}{8 \times \Delta U_v \times f} \quad (13)$$

Vstupní kondenzátor musí být schopen pokrýt nárazové odběry proudu spínaného zdroje tak, aby nedocházelo k poklesům napájecího napětí.

$$C_n = \frac{I_n D}{\Delta U_n \times f} \quad (14)$$

Proud je z kondenzátoru odebírán pouze v momentě, kdy je spínač sepnutý. ΔU_n označuje zvlnění napájecího napětí.

Podrobnější popis v [6] a [7].

4. Generátory funkcí

Generátory funkcí se používají ke generování průběhů napětí, které se mění v čase. Průběhy mohou být buď bipolární (střední hodnota generovaného napětí je nulová), nebo mohou mít zavedenou určitou stejnosměrnou složku.

Generátory funkcí lze rozdělit do dvou základních skupin. První skupinu tvoří generátory, které vytvářejí výstupní napětí pomocí analogových obvodů. Výhoda této skupiny je velmi malé zkreslení výstupního napětí. Druhá skupina je složena z generátorů, které vytvářejí výstupní napětí za pomoci digitálních obvodů. Tyto generátory vytvářejí výstupní napětí ze vzorků napětí, které proloží křivkou. To má za následek větší zkreslení výstupního napětí. Výhoda této skupiny je možnost naprogramovat na výstup téměř libovolný průběh napětí.

Většina moderních generátorů využívá pro generování průběhů oba tyto mechanismy a spojuje tak výhody obou těchto skupin.

4.1 Základy k průběhům funkcí

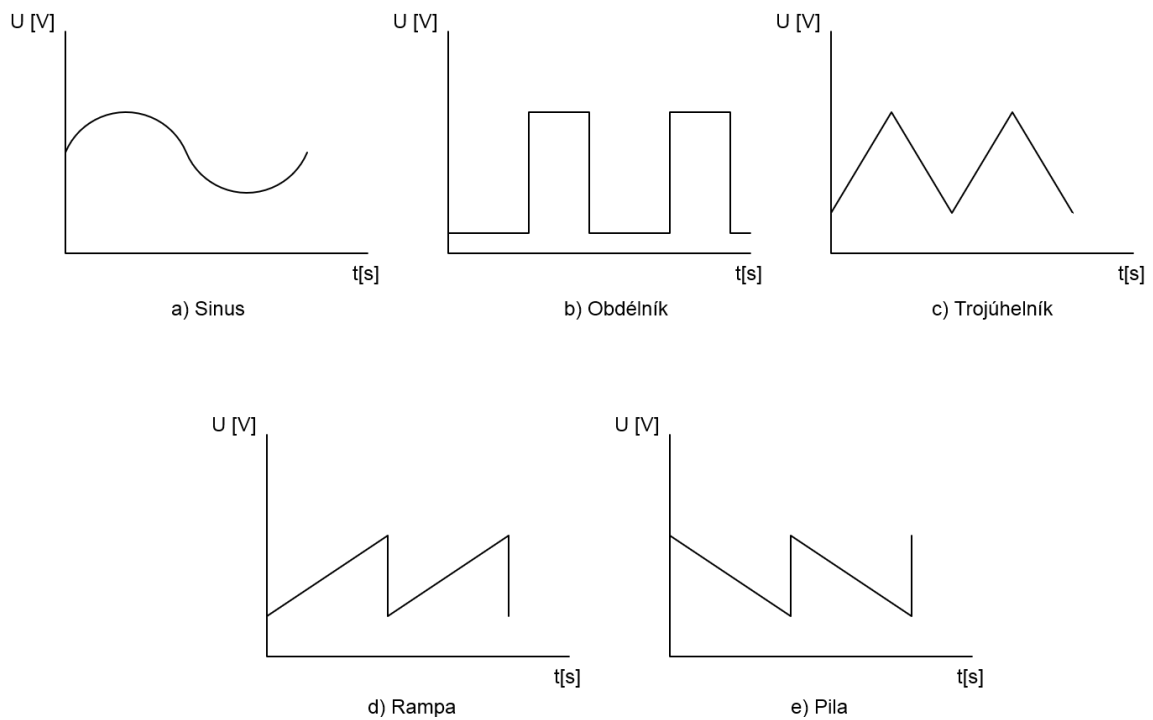
Průběh funkce představuje závislost signálu (většinou představovaného napětím) na čase. U funkčních průběhů lze rozlišit tři základní parametry. Patří mezi ně rozkmit signálu, jeho fáze a frekvence.

Rozkmit signálu lze popisovat například pomocí střední kvadratické hodnoty, ale ve většině případů se používá napětí špička-špička. Toto napětí popisuje rozdíl hodnot globálních extrémů popisované funkce.

Frekvence signálu se udává v hertzech (Hz). Představuje převrácenou hodnotu periody signálu. Perioda signálu (délka jedné vlny) se určuje jako vzdálenost dvou bodů průběhu signálu, kde od druhého bodu se začíná tvar funkce opakovat.

Fáze signálu se udává ve stupních a udává o kolik je signál posunut v čase vůči referenčnímu signálu. Jedna perioda signálu představuje 360° . Mezi další parametry průběhů patří stejnosměrná složka signálu (offset), náběžné a sestupné hrany signálu, nebo střída. Podrobný popis parametrů v [9].

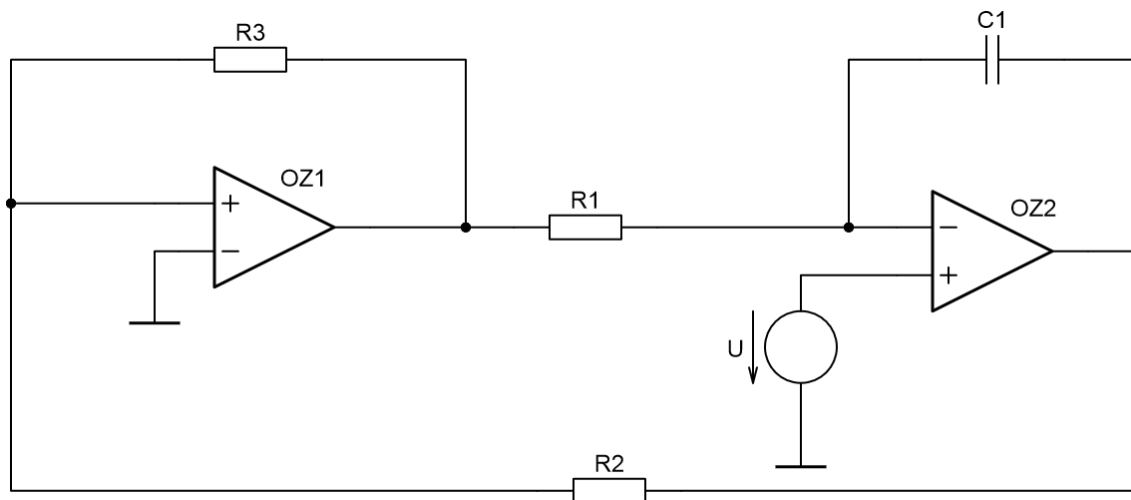
Mezi nejpoužívanější průběhy signálů patří sinus, trojúhelníkový průběh a obdélníkový průběh (u obdélníkového průběhu je významným parametrem střída). U trojúhelníkového průběhu lze rozlišit tři základní typy. Klasický trojúhelníkový průběh (sestupná i náběžná hrana je stejně dlouhá), rampa (náběžná hrana trvá většinu periody a poté dojde k prudkému poklesu napětí) a poslední je pila, která je inverzní k rampě. Tvary základních průběhů funkcí jsou vykresleny na Obrázku 7.



Obrázek 7: Tvary základních průběhů funkcí

4.2 Analogové generátory funkcí

Nejznámější druh analogového generátoru funkcí je tvořen dvěma operačními zesilovači a operační sítí rezistorů a kondenzátorů. Kde jeden z operačních zesilovačů funguje jako komparátor s hysterezí a druhý jako invertující integrátor. Na výstupu integrátoru je možné naměřit trojúhelníkový průběh a na výstupu komparátoru obdélníkový. Zjednodušené schéma zapojení je nakresleno na Obrázku 8.



Obrázek 8: Analogový generátor funkcí

Pomocí integrátoru (RC článek tvořený R1 a C1) lze nastavit frekvenci generátoru a pomocí napětí U se nastavuje střída impulsů (tedy i délka náběžné a sestupné hrany trojúhelníkových průběhů).

Na výstupu komparátoru OZ1 se objeví kladné napětí. Napětí na výstupu integrátoru klesá až do doby, kdy na neinvertujícím vstupu komparátoru bude napětí rovno GND. V ten moment komparátor překlopí na výstup záporné napětí a napětí na výstupu integrátoru bude opět narůstat.

Pro dosažení sinusového průběhu je nutné použít tvarovací obvod, který z trojúhelníkového průběhu vytvoří sinus. Pro tyto účely se využívá nelineární převodní charakteristiky polovodičových součástek, například tranzistoru.

4.3 Digitální generátory funkcí

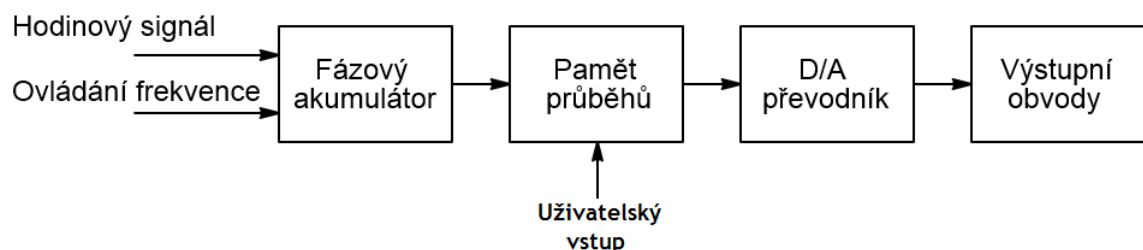
Velkou nevýhodou digitálních generátorů je zkreslení výstupního napětí způsobeného kvantizačním šumem. Kvantizační šum vzniká při převodu z digitální hodnoty na analogovou, protože minimální posuv analogové hodnoty je dán poměrem referenčního napětí D/A převodníku a počtem bitů jedné hodnoty na jeho vstupu. Při použití

vícebitových D/A převodníků je možné kvantizační šum omezit, ale úroveň zkreslení signálu bude za normálních podmínek vyšší než u analogových způsobů vytváření signálu.

Digitální generátory dokážou vytvářet stejné průběhy jako generátory analogové, některé mají navíc možnost nahrávat do RAM nestandardní vzorky průběhů. Tyto průběhy dokáže digitální generátor přečíst a vytvořit z nich průběh na výstup.

Možná konstrukce digitálního generátoru je blokově znázorněna na Obrázku 9. První blok představuje fázový akumulátor, který je tvořen z děliček a fázových závěsů. Umožňuje upravit hodinový signál pomocí řídicího signálu. Následuje paměť průběhů. V paměti průběhů mohou být vzorky základních průběhů (trojúhelník, obdélník, sinus...) určené výrobcem, ale některé digitální generátory umožňují nahrát vzorky libovolných průběhů uživatelem. Vzorky z paměti průběhů jsou vyčítány výstupní frekvencí fázového akumulátoru. Při znalosti počtu uložených vzorků jedné periody průběhu v paměti a znalosti výstupní frekvence fázového akumulátoru, lze přesně nastavit výstupní frekvenci generátoru.

Hodnoty vzorků průběhů v paměti průběhů jsou představovány binární hodnotou, kterou je potřeba převést na analogovou hodnotu. K tomu slouží následující blok, který představuje D/A převodník. Na jeho výstupu je již analogová hodnota, která je obrazem k vzorkům průběhu. Tento signál je ale zatížen kvantizačním šumem. Proto výstupní obvody většinou obsahují filtr, který redukuje kvantizační šum. Dále mohou zahrnovat předzesilovač pro úpravu signálu z D/A převodníku (nastavení stejnosměrné složky a rozkmitu signálu) a výkonový zesilovač pro proudové, nebo napěťové posílení výstupu.



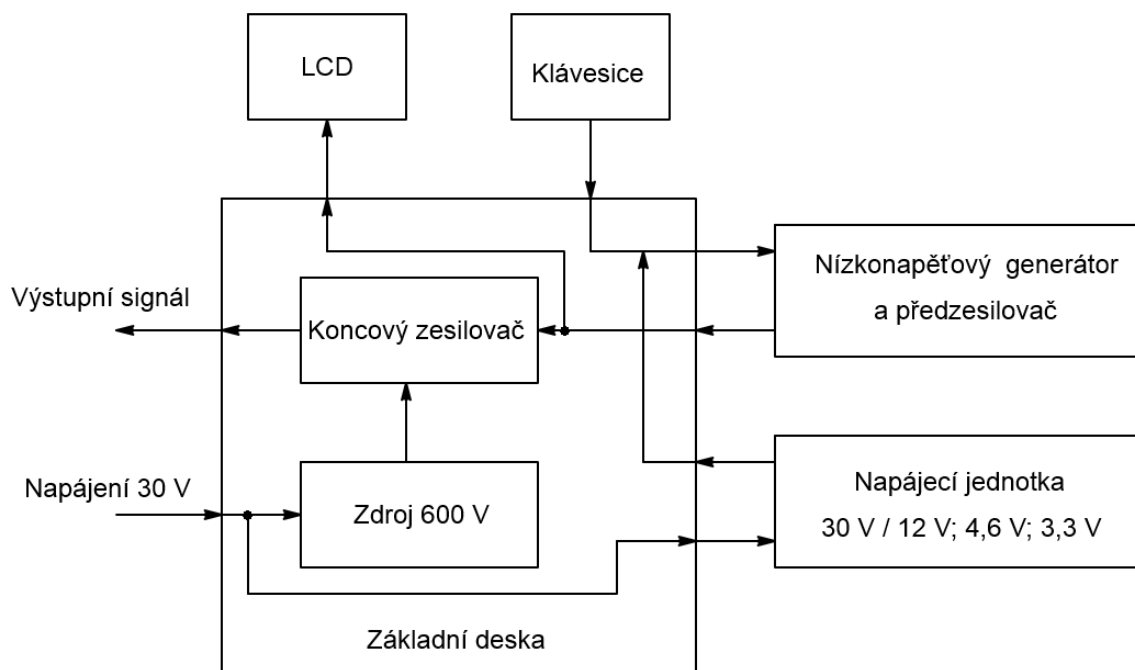
Obrázek 9: Blokové schéma digitálního generátoru

5. Realizace zařízení

Zařízení je složeno ze základní desky, ke které se připojují dva zásuvné moduly. Na základní desce se nachází zdroj 600 V, který se používá pro napájení koncového zesilovače pro ovládání umělého svalu, a koncový zesilovač. Dále se na základní desce nacházejí konektory, které umožňují připojit ovládací prvky.

První zásuvný modul představuje generátor funkcí. Je tvořen procesorem a předzesilovačem. Procesor umožňuje přijímat příkazy z klávesnice a zobrazuje na LCD nastavené hodnoty. Pomocí I2C sběrnice komunikuje s řídicími prvky generátoru a nastavuje tak průběh výstupního napětí.

Druhý zásuvný modul funguje jako napájecí jednotka, která z 30 V na vstupu vytváří napětí 12 V, 4,6 V a 3,3 V. Tyto hodnoty se používají pro napájení všech periférií zařízení. Schéma uspořádání zařízení je znázorněno na Obrázku 10.



Obrázek 10: Zjednodušené uspořádání generátoru

5.1 Základní deska

Základní deska zařízení je tvořena zdrojem 600 V a koncovým zesilovačem. Dále jsou na ní konektory pro napájení a konektory které slouží pro připojení dalších periférií. Patří mezi ně nejen displej a klávesnice, ale i konektory pro připojení zásuvných modulů, kterými jsou pomocné napájení a samotný generátor funkcí.

5.1.1 Napájecí zdroj

Napájecí zdroj musí být schopen vytvořit napětí 600 V z 30 V a dodat proud až 20 mA. Vzhledem ke zvyšování napětí a nízkému výstupnímu výkonu byl zvolen spínaný zdroj se zvyšující topologií, který využívá jedné indukčnosti.

Hodnoty použitých součástek byly zvoleny dle kapitoly 3.2.1. Parametry měniče jsou znázorněny v Tabulce 1.

Tabulka 1: Parametry zvyšujícího měniče

U_n (V)	30	I_n (A)	0,8
U_v (V)	600	I_v (A)	0,02
f (kHz)	500	D (-)	0,95
ΔI_L (A)	0,05	ΔU_v (V)	0,1
ΔU_n (V)	0,001	L (uH)	1000
C_v (uF)	13,5	C_n (uF)	100

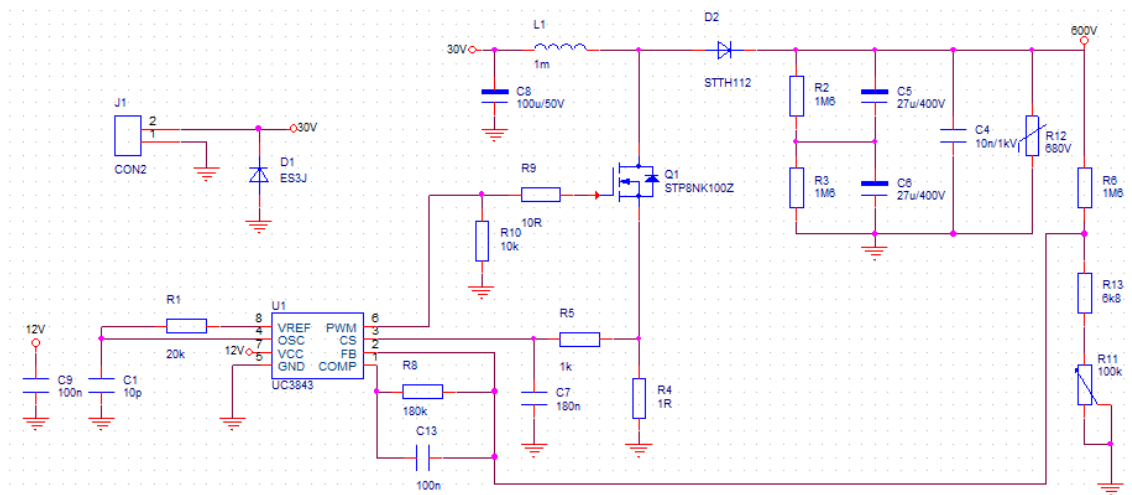
Vstupní proud I_n byl vypočten pomocí odhadu účinnosti, které byla hodnota i s rezervou stanovena na 50 %. Dále byla zvýšena hodnota výstupního kondenzátoru proti vypočtené hodnotě, a to z důvodu nárazového odběru proudu umělým svalem (například v případě obdélníkového průběhu).

Pro zvyšující měnič byl zvolen PWM kontrolér s proudovým omezením UC3843 [11]. Tento obvod byl zvolen především díky možnosti nastavení vysoké pracovní frekvence (až 500 kHz) pomocí externího RC oscilátoru. Vysokou spínací frekvenci je nutné nastavit kvůli minimalizaci velikosti indukčnosti cívky měniče.

Spínací tranzistor musí být zvolen tak, aby vydržel překmit napětí na cívce a zároveň ho nezničil proud, který jím bude protékat. Pro minimalizaci ztrát na tranzistoru je výhodné zvolit tranzistor s co nejmenším odporem kanálu v sepnutém stavu a krátkou spínací a rozpínací dobou. Při zohlednění těchto skutečností a dostupností tranzistorů byl zvolen výkonový MOSFET STP8NK100Z [12].

Volba usměrňovací diody záleží především na maximálním propustném proudu diodou. Při rozepnutém spínači teče diodou proud cívky, který může dosahovat vysokých hodnot. Pro minimalizaci ztrát je výhodné použít diodu s krátkou dobou závěrného zotavení a co nejmenším úbytkem napětí v propustném směru. Ideální by bylo použití Schottkyho diody, ale v této aplikaci je tomu překážkou vysoké výstupní napětí, které by běžně dostupné diody prorazilo. Byla tedy zvolena vysokonapěťová rychlá dioda s označením STTH112 [13].

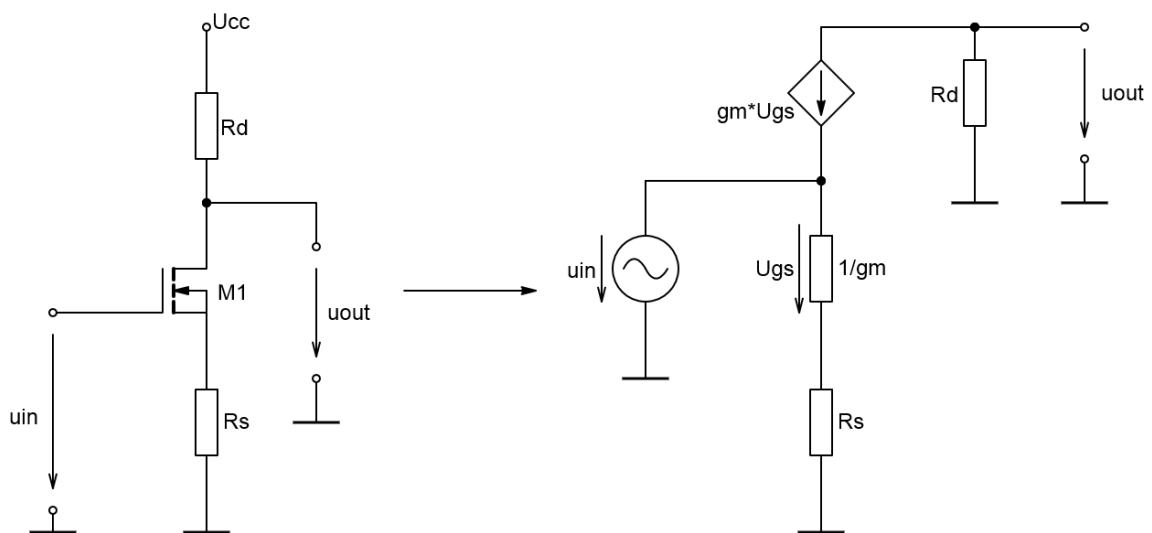
Celkové schéma zapojení 600 V zdroje je zobrazeno na Obrázku 11. Mimo zmiňované části je zdroj opatřen ochrannými prvky. Patří mezi ně závěrně polarizovaná dioda na vstupních svorkách (ochrana proti přepólování) a varistor, který zabraňuje nárůstu výstupního napětí nad 680 V.



Obrázek 11: Schéma zapojení 600V zdroje

5.1.2 Koncový zesilovač

Koncový zesilovač zesiluje napěťově a proudově napětí z výstupu generátoru. Koncový zesilovač se skládá ze dvou kaskádně zapojených částí. První stupeň využívá můstkového zapojení unipolárního tranzistoru a zesiluje vstupní signál napěťově. Druhý stupeň funguje jako napěťový sledovač a zesiluje výstup prvního stupně proudově. Na Obrázku 12 je naznačeno odvození napěťového zesílení prvního zesilovacího stupně.



Obrázek 12: Odvození zesílení můstkového zapojení

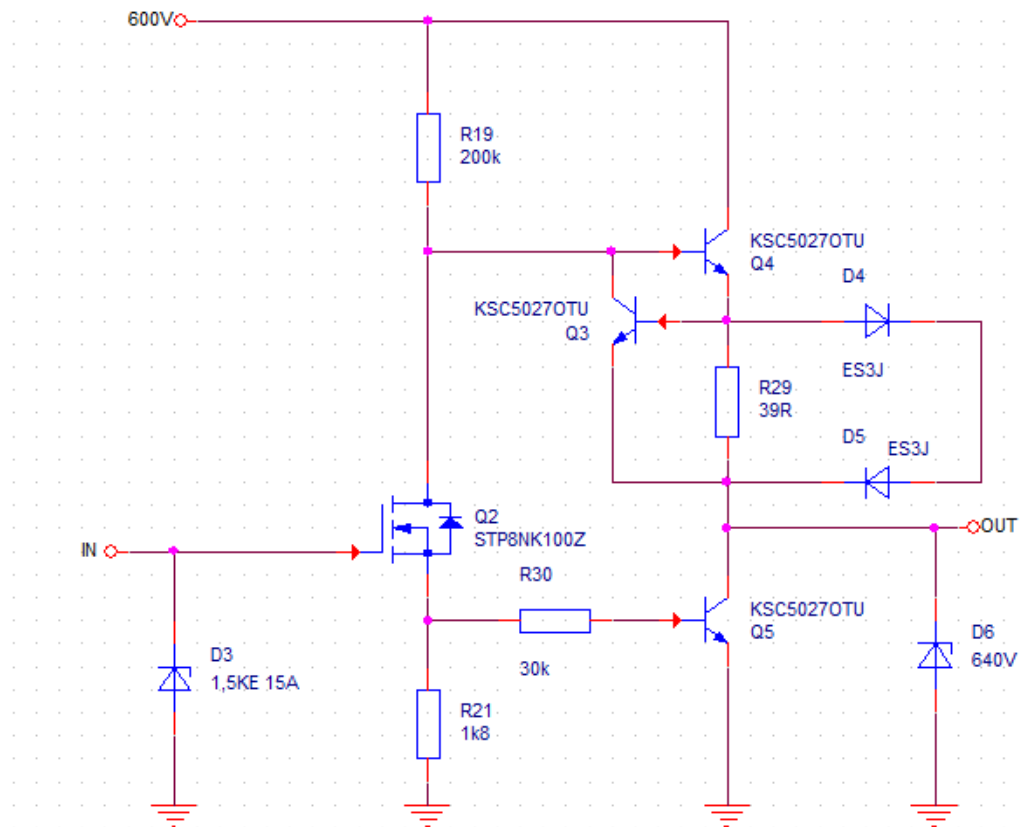
Vlevo je vykresleno principiální zapojení a schéma vpravo znázorňuje jeho náhradní lineární obvod. Pro zesílení tedy bude platit následující vztah.

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{g_m U_{gs} R_d}{U_{gs} + g_m U_{gs} R_s} \quad (15)$$

Po úpravě uvedeného vztahu a předpokladu, že $1 \ll g_m R_s$ vychází pro napěťové zesílení:

$$A_u \doteq \frac{R_d}{R_s} \quad (16)$$

Pro první zesilovací stupeň byl zvolen tranzistor MOSFET s označením STP8NK100Z [12] a velikosti rezistorů byly stanoveny na $R_d = 200\text{ k}\Omega$ a $R_s = 1,8\text{ k}\Omega$. Napěťové zesílení potom vychází 111,11.



Obrázek 13: Schéma zapojení koncového zesilovače

Na Obrázku 13 je znázorněno schéma koncového zesilovače. V druhém zesilovacím stupni jsou použity dva bipolární NPN tranzistory (klasický zesilovač s komplementární dvojicí tranzistorů nelze použít, protože PNP tranzistory nejsou na vysoké napětí dostupné). Báze prvního tranzistoru je zapojena na výstup prvního zesilovacího stupně a funguje jako napěťový sledovač. Umělý sval se chová jako kapacitní zátěž, to znamená, že je potřeba při poklesu vstupního napětí dostat uchovaný náboj ve svalu pryč, jinak by došlo ke zkreslení signálu a následně k zničení horního tranzistoru. K tomu slouží tranzistor Q5. Řídí se pomocí proudu, který teče přes rezistor R30 a je řízen úbytkem napětí na rezistoru R21. Napětí na rezistoru R21 je invertované vůči výstupu prvního stupně, takže pokud bude horní tranzistor otevřen, tak se spodní uzavře a naopak.

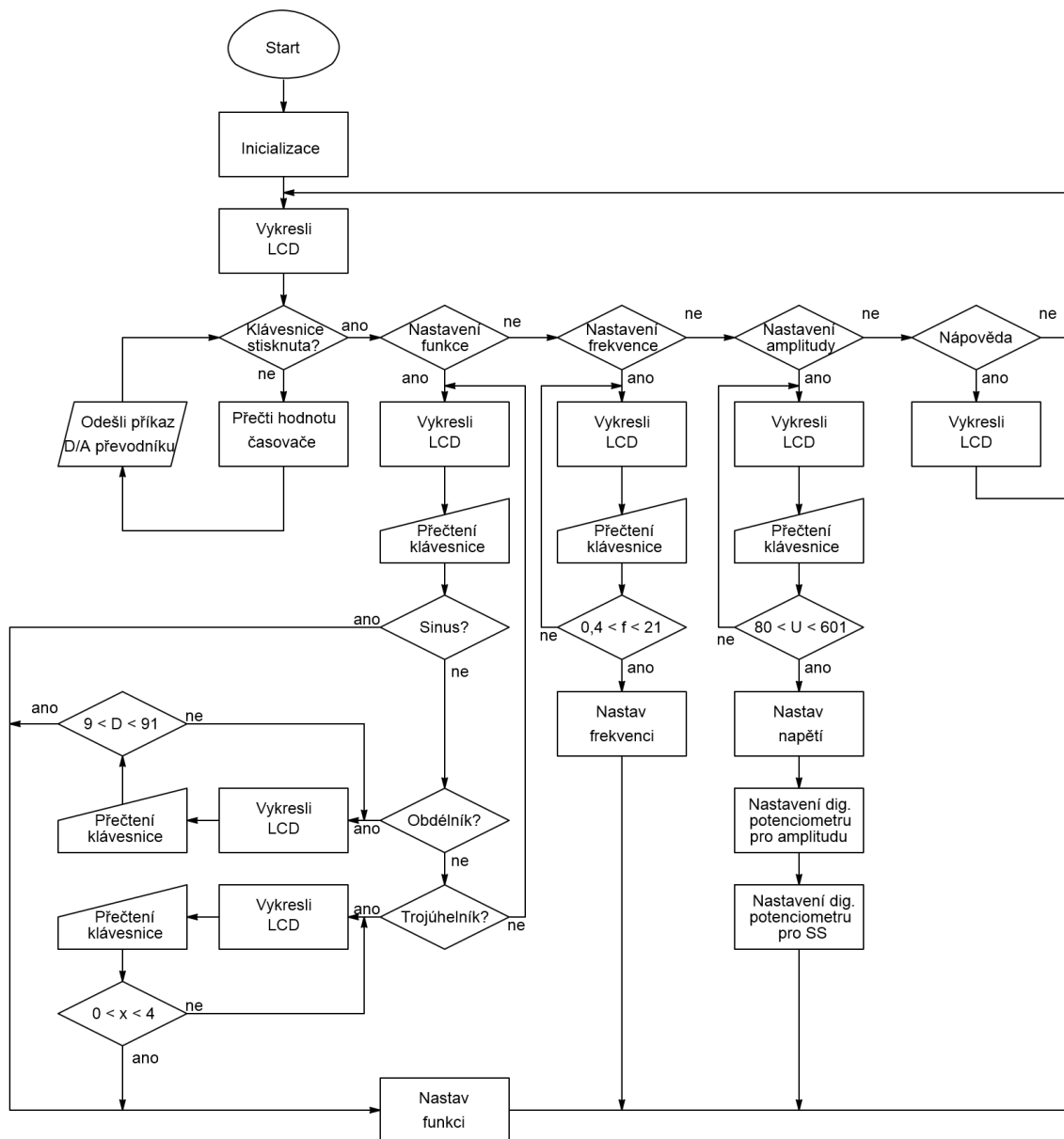
Koncový zesilovač je opatřen ochranou proti zkratu, která je realizována pomocí tranzistoru Q3 a rezistoru R29. Pokud bude úbytek napětí na rezistoru větší než napětí 0,7 V, tak dojde k zavření tranzistoru Q4. Další použitou ochranou je transil D3, který zabraňuje poškození předzesilovače a tranzistoru Q2 vlivem zvýšení napětí na gate. Zvýšení napětí může být způsobeno proražením tranzistoru, nebo proniknutím napětí přes kapacitní vazbu mezi G a D.

Diody D4 a D5 slouží k omezení napětí na rezistoru R29 a zabraňují zničení tranzistoru Q3, ke kterému může dojít během přechodového jevu při vyzkratování výstupních svorek. Transil D6 slouží jako ochrana proti přepětí na výstupu a zabraňuje tak zničení výstupních tranzistorů, u kterých by mohlo dojít k překročení povoleného napětí U_{CE} .

Jako výstupní tranzistory jsou použity vysokonapěťové NPN tranzistory s označením KSC5027OTU [14]

5.2 Generátor funkcí

Generátor funkcí je jedním ze zásuvných modulů do základní desky. Mimo samotný generátor realizovaný pomocí D/A převodníku obsahuje i předzesilovač pro úpravu signálu, který je připojen ke koncovému zesilovači. Deska také obsahuje řídicí procesor, který s ovládacími prvky komunikuje pomocí I2C sběrnice. Celkové schéma zapojení je ukázáno na Obrázku 14.

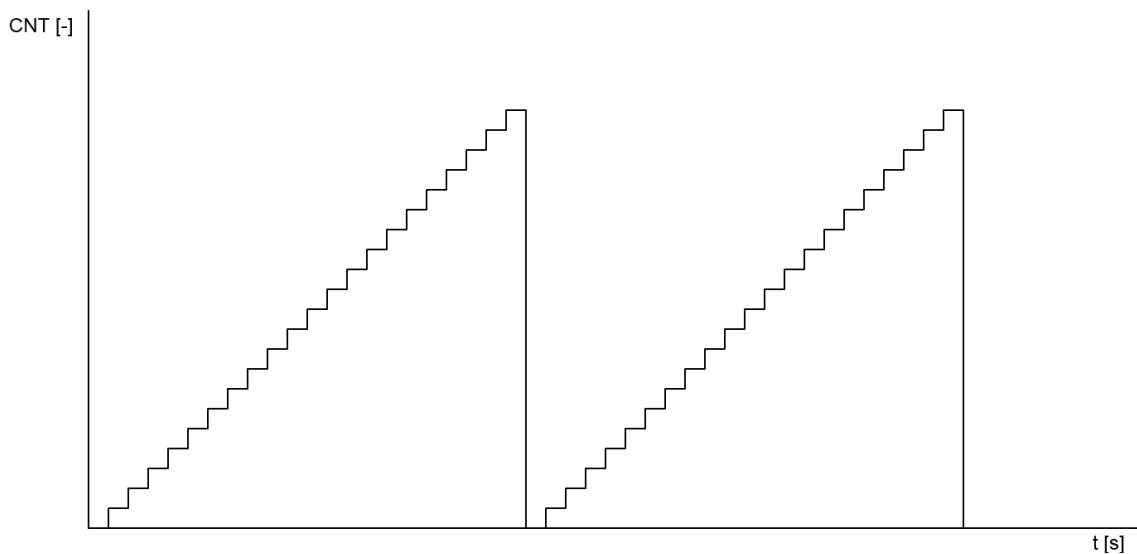


Obrázek 15: Vývojový diagram algoritmu mikrokontroléru

5.2.2 Generování funkcí

Generátor funkcí se řadí mezi digitální generátory, které umožňují generovat předem definované funkce (neumožňuje uživatelský vstup). Jako fázový akumulátor je použit fázový závěs a děličky integrované v mikrokontroléru. Místo paměti průběhů je využito časovačů, které zvládnou vytvořit trojúhelníkový průběh. Různými modifikacemi lze dosáhnout všech základních průběhů.

Časovač je periferie mikrokontroléru, která s hodinovým taktem zvyšuje (inkrementuje), nebo snižuje (dekrementuje) svou hodnotu. Existují tři základní módy čítání. Jsou to inkrementující mód, dekrementující mód a třetí kombinuje oba dva módy dohromady. Při přetečení čítače se změní inkrementující na dekrementující mód a naopak. Hodnota čítače v závislosti na čase bude vytvářet pilový průběh. Graf závislosti hodnoty čítače (CNT) na čase je zobrazen na Obrázku 16. V tomto obrázku se také projevuje nevýhoda digitálních generátorů. Zde je dobře patrné zkreslení signálu, které je způsobené skokovou změnou hodnoty. To je možné částečně odstranit pomocí filtrů.



Obrázek 16: Hodnota čítače v závislosti na čase

Čítač lze tedy použít pro generování základních trojúhelníkových průběhů popsaných v kapitole 4.1. Pro generování obdélníkového průběhu se využívá komparace hodnoty čítače s nastavenou hodnotou. Pokud je nastavená hodnota větší než hodnota čítače, tak bude na výstupu generátoru minimální hodnota napětí a v případě, kdy je nastavená hodnota menší, bude na výstupu maximální napětí. Tímto způsobem lze snadno nastavit i střihu obdélníkového průběhu. Pro generování sinusového průběhu se využívá funkce $\sin()$, která je součástí knihovny překladače. Nevýhodou tohoto způsobu generování sinu je poměrně dlouhá výpočetní doba. Pro generování vyšších frekvencí by nebylo možné tento způsob použít. Pro ovládání umělého svalu se používají frekvence maximálně v jednotkách Hz, proto je tento způsob dostačující.

Pomocí registrů PSC (prescaler) a ARR (auto reload register) lze hodinový takt, kterým je řízen časovač, nastavit. Přesněji řečeno ARR říká, do jaké hodnoty bude čítač počítat, než přeteče a PSC dělí hodinový takt mikrokontroléru na vstup hodinového signálu čítače. Výsledná frekvence přetékání čítače je tedy dána vztahem:

$$f = \frac{f_{clk}}{ARR(1+PSC)} \quad (17)$$

Pomocí tohoto vztahu lze nastavit frekvenci generovaného průběhu. Hodnota ARR je pevně nastavena na hodnotu 255. Důvodem je připojení 8 bitového D/A převodníku, kterému lze následně poslat přímo hodnotu čítače pro generování požadované funkce a není potřeba tuto hodnotu dále upravovat. Detailní popis o funkci a možnostech čítačů je uveden v [17].

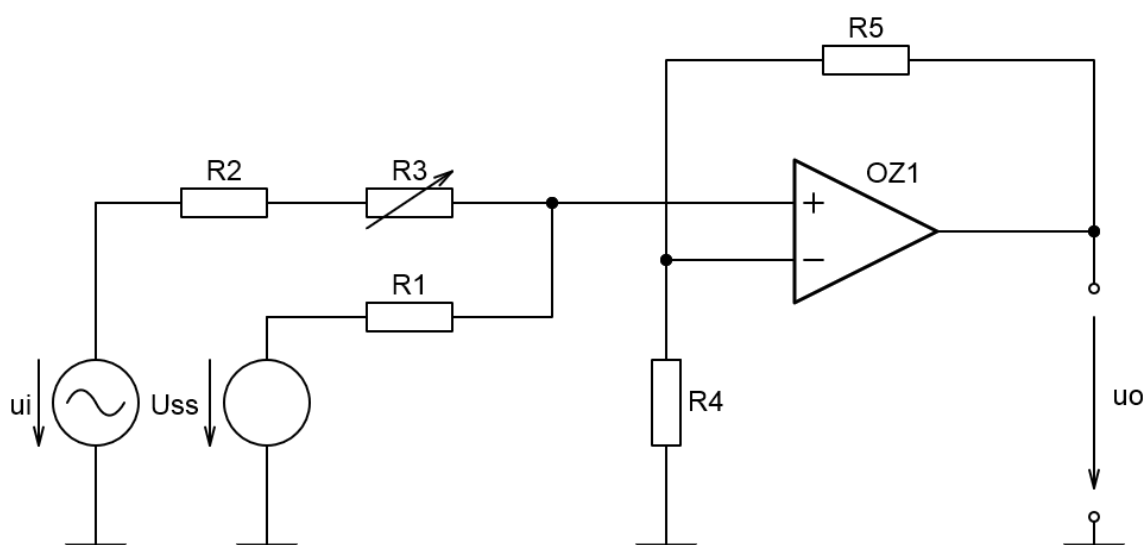
5.2.3 Předzesilovač a D/A převodník

Pro generování funkcí byl zvolen D/A převodník od firmy Microchip s označením TC1320EOA [18]. Tento integrovaný obvod dokáže převést digitální 8 bitovou hodnotu z mikrokontroléru na analogovou hodnotu. S mikrokontrolérem komunikuje přes I2C sběrnici, pro jeho ovládání stačí použití tří vodičů (SCL, SDA, GND). Řadí se tedy mezi sériové D/A převodníky. Jeho nevýhoda spočívá v pomalejší změně výstupního napětí od odeslání prvního bitu proti paralelním převodníkům. Pro ovládání umělého svalů je tato rychlost dostačující.

Předzesilovač slouží k úpravě signálu z D/A převodníku. Signál je z předzesilovače přiveden přímo na koncový zesilovač. Na výstupu D/A převodníku je průběh napětí, který tvarově odpovídá nastavené funkci a je potřeba upravit jeho amplitudu a stejnosměrnou složku. Při změně amplitudy signálu na výstupu předzesilovače dojde i ke změně napětí na výstupu koncového zesilovače a stejnosměrnou složku je potřeba nastavit, aby byl

výstupní signál v rozsahu od 0 V až do hodnoty nastaveného špičkového napětí (stejnosemřná složka je rovna polovině špičkové hodnoty napětí).

Jako předzesilovač je použit operační zesilovač UA741 [19] v zapojení neinvertujícího sumátoru. Kde se sčítá výstup D/A převodníku se stejnosemřnou hodnotou napětí, nastavenou pomocí napěťové reference TL431 [20]. Principiální schéma zapojení předzesilovače je znázorněno na Obrázku 17. V reálném zapojení jsou pro změnu odporu použity digitální potenciometry, které komunikují s mikrokontrolérem přes I2C sběrnici. Popis tohoto integrovaného obvodu AD5241 lze nalézt v literatuře [21].



Obrázek 17: Neinvertující sumátor jako předzesilovač

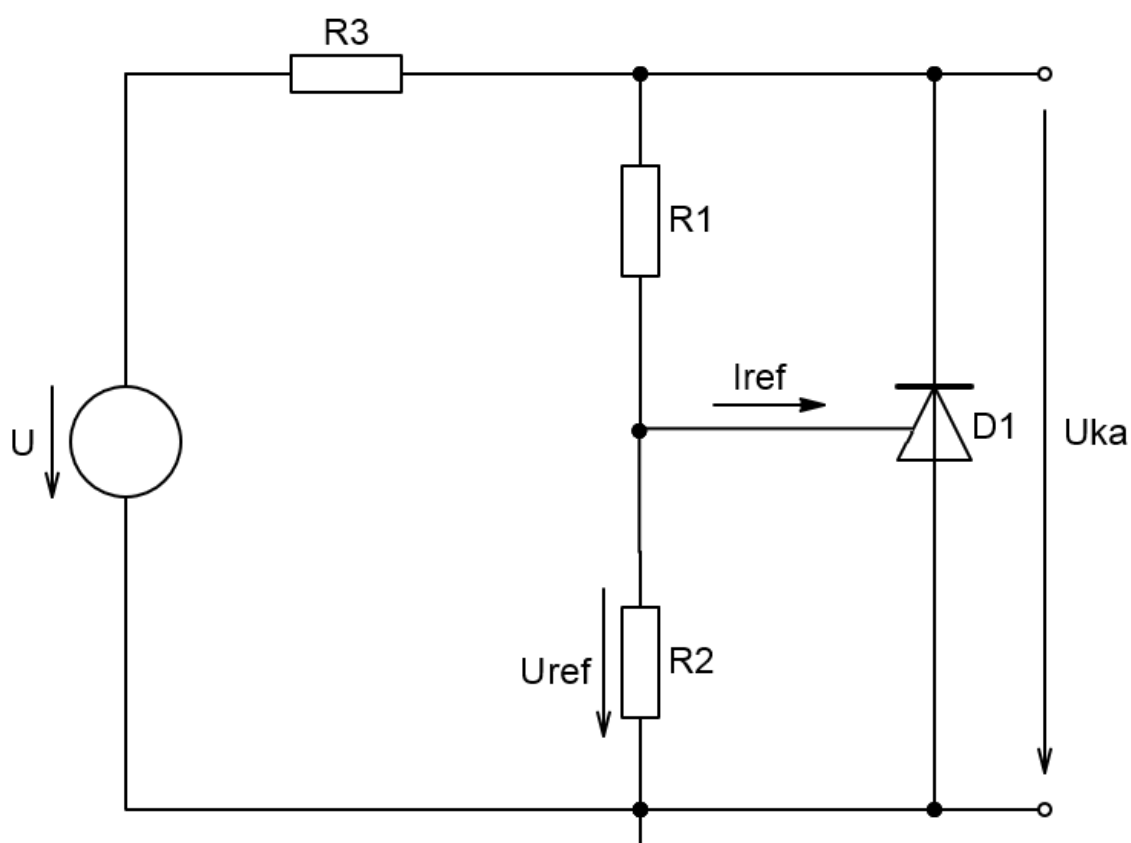
Napěťový zdroj u_i představuje výstup D/A převodníku a U_{ss} napěťovou referenci. Tyto dvě hodnoty se sečtou a jsou zesíleny podle poměru odporu rezistorů v operační síti. Výstupní napětí tohoto zapojení je dáno vztahem (18). První sčítanec popisuje amplitudu výstupního signálu a druhý sčítanec jeho stejnosemřnou složku.

$$u_o = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} \left(1 + \frac{R_5}{R_4} \right) u_i + \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \left(1 + \frac{R_5}{R_4} \right) U_{ss} \quad (18)$$

Pro nastavení konkrétní hodnoty stejnosemřné složky výstupního signálu je nutné znát dva vztahy. První je vztah pro výpočet výstupního napětí napěťové reference [20]:

$$U_{KA} = U_{ref} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) + R_1 I_{ref} \quad (19)$$

Použité reference ve vztahu (19) odpovídají Obrázku 18, místo rezistoru R2 je použit digitální potenciometr.



Obrázek 18: Napěťová reference s použitím integrovaného obvodu TL431

Druhý potřebný vztah vychází z literatury [21] a popisuje převod mezi vstupními daty a velikostí odporu potenciometru mezi terminály B a W.

$$R_{BW} = \frac{DATA}{DATA_{max}} R_{AB} + R_W \quad (20)$$

DATA značí vstupní data a $DATA_{max}$ je rovno 2^n , kde n je počet bitů, kterými lze nastavovat hodnotu digitálního potenciometru. Úpravou vztahů (19) a (20) vnikne vztah, který převádí vstupní data na velikost napětí U_{KA} .

Hodnoty použitých součástek jsou napsány v Tabulce 2.

Tabulka 2: Hodnoty součástek pro předzesilovač

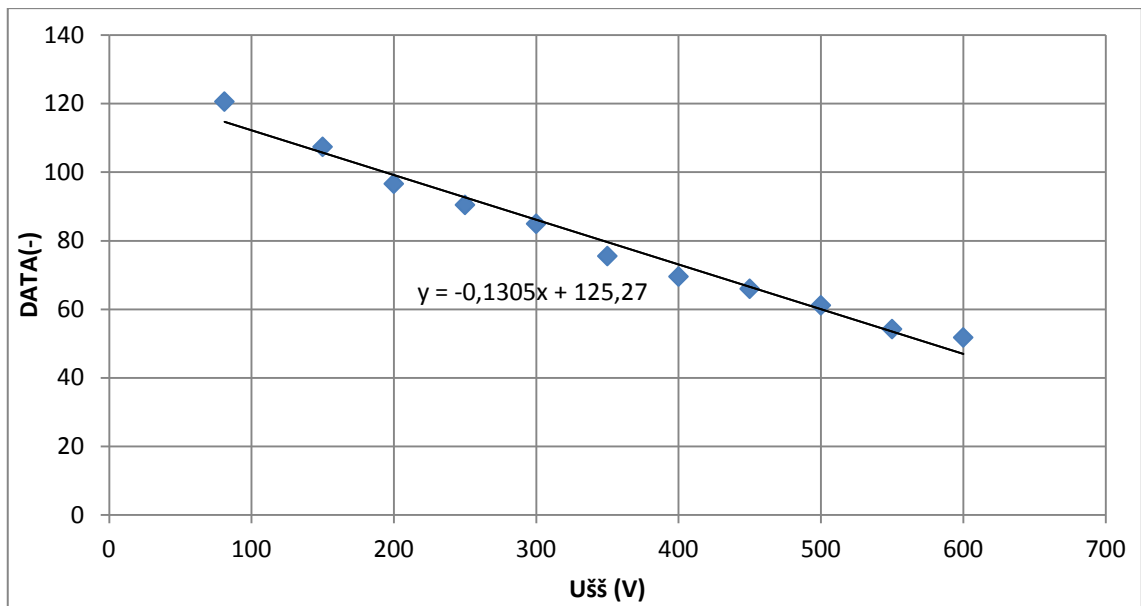
Neinvertující sumátor			
R1 (Ω)	10k	R4 (Ω)	15k
R2 (Ω)	2,5k	R5 (Ω)	15k
R3 (Ω)	100k (AD5241)	OZ1	UA741
Napěťová reference			
R1 (Ω)	5k	R3 (Ω)	1k
R2 (Ω)	10k (AD5241)	D1	TL431

Stejnosečná složka výstupního signálu musí být nastavena tak, aby $U_{ss} = U_{\text{ss}}/2$. Signál bude mít tedy minimum vždy na úrovni 0 V. Napětí U_{KA} bylo určeno pomocí naměřených hodnot, které jsou zaznamenány v Tabulce 3.

Tabulka 3: Naměřené hodnoty pro nastavení stejnosměrné složky

Uref (V)	DATA (-)	Uout (V)
5,1	121	81
5,4	107	150
5,7	97	200
5,9	90	250
6,1	85	300
6,5	76	350
6,8	70	400
7,0	66	450
7,3	61	500
7,8	54	550
8,0	52	600

Vypočtené hodnoty, které se přivádí na vstup digitálního potenciometru (DATA) jsou graficky znázorněny na Obrázku 19. Vynesené body jsou proloženy polynomem prvního stupně ($DATA = -0,1305U_{\text{ss}} + 125,27$). Tento vztah odpovídá převodní charakteristice pro nastavení stejnosměrné složky.



Obrázek 19: Převodní charakteristika digitálního potenciometru

5.2.4 Sběrnice I2C

I2C je sériová sběrnice typu multimaster. Pro komunikaci se využívá dvou (třech) vodičů, hodinový signál a data (nulový vodič). Většinou se používá pro komunikaci na krátkou vzdálenost. Vzdálenost limituje celková kapacita sběrnice (tímto faktorem je limitován i maximální počet připojených zařízení), protože při velké kapacitě sběrnice budou dlouhé náběžné a sestupné hrany signálu, což může mít za následek větší chybovost přenosu dat. Pro zlepšení komunikace na sběrnici s velkou kapacitou je možné snížit chybovost, snížením přenosové frekvence (na úkor pomalejšího přenosu).

Fyzická vrstva I2C je tvořena datovým a hodinovým vodičem. K oběma vodičům se připojují pull-up rezistory, které v klidovém stavu (bez komunikace), zajišťují logickou jedničku na sběrnici. Velikost rezistoru také ovlivňuje rychlost komunikace. Připojená zařízení musí mít výstup typu otevřený kolektor. Při sepnutí tranzistoru se na sběrnici objeví logická nula. Standardní přenosová rychlost má hodnotu 100 kHz (existují i rychlejší standardy 400 kHz, 1 MHz, 3,4 MHz a 5 MHz).

Komunikaci na sběrnici může zahájit jakékoliv připojené zařízení „start podmínkou“, stažením datového vodiče do logické nuly, když je hodinový vodič v logické jedničce.

Následuje sedmi bitová, nebo deseti bitová adresa zařízení, pro které je přenos určen. Po adrese je odeslán R/W bit, který určuje, jestli iniciátor komunikace požaduje čtení, nebo zápis. Pro odeslání dalšího bitu je sběrnice ponechána v logické jedničce a přijímací stanice potvrdí příjem stažením sběrnice do logické nuly (kontrolní bit označovaný jako ACK). Dále jsou odeslána data (ve směru daným bitem R/W). Každý odeslaný byte je potvrzen kontrolním bitem. Po ukončení komunikace je vyslána „stop podmínka“.

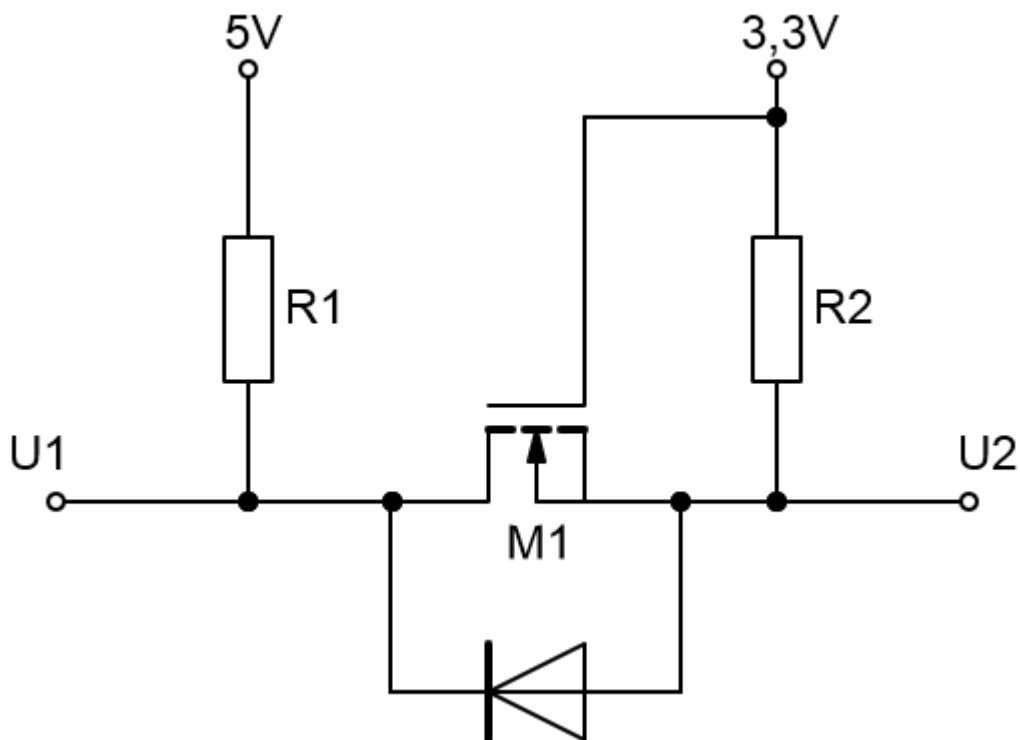
Kolizím na sběrnici, při komunikaci více zařízení, se zabráňuje pomocí detekce kolizí. Předtím než nějaké zařízení začne komunikovat, zkontroluje, jestli na sběrnici již neprobíhá nějaká komunikace. Pokud ano počká, než přenos skončí.

Pro generátor je vyžita I2C sběrnice s přenosovou rychlostí 10 kHz (pro generování průběhů s nízkou frekvencí je tato rychlost dostačující). Obsahuje jedno master zařízení (mikrokontrolér) a tři slave zařízení. Mezi ně patří dva digitální potenciometry a D/A převodník. Master v tomto případě zahajuje vždy komunikaci, která obsahuje sedmibitovou adresu (v případě digitálního potenciometru lze adresu nastavit pomocí dvou vstupních pinů [21]) následovanou bitem pro zápis do zařízení. Následují dva byty k odeslání. První byte určuje, do jakého registru zařízení se bude zapisovat. Druhý byte představuje odeslaná data.

Podrobný popis o možnostech a fungování I2C v [17], [18] a [21].

5.2.5 Převodník napět'ových úrovní

Napájecí napětí mikrokontroléru 3,3 V je nižší než napájecí napětí ostatních periférií připojených na I2C, které jsou napájeny z 5 V. Logické úrovně těchto zařízení se liší, proto je potřeba zařadit mezi ně převodník napět'ových úrovní, který bude přizpůsobovat komunikaci mezi nimi. Zapojení, které tohle dokáže zařídit je znázorněno na Obrázku 20.

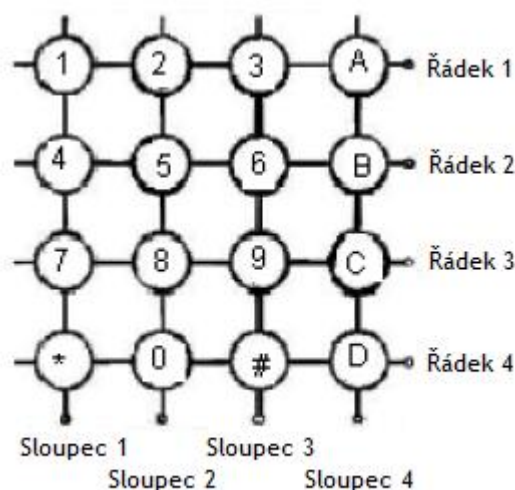


Obrázek 20: Převodník napět'ových úrovní

Zapojení je složeno z jednoho unipolárního tranzistoru (musí obsahovat substrátovou diodu) a dvou rezistorů. U1 představuje skupinu zařízení, které pracují s vyšším napětím a U2 skupinu zařízení pracující s nižším napětím. V klidovém stavu, kdy je na U2 logická jednička je napětí U_{GS} nulové, tranzistor i dioda jsou zavřeny a na výstupu U1 je napětí 5 V. Pokud napětí U2 klesne pod úroveň logické nuly, potom vzroste napětí U_{GS} a tranzistor se otevře. Napětí U1 bude nulové. V opačném případě, kdy je napětí U1 v logické jedničce, je dioda uzavřena a na U2 se objeví napětí 3,3 V. Pokud bude na U1 logická nula, potom se substrátová dioda otevře a na výstupu U2 se objeví úbytek napětí na diodě (tedy logická nula).

5.2.6 Ovládací prvky

Pro ovládání generátoru se využívá maticové klávesnice s šestnácti tlačítky [22]. Jako zobrazovací zařízení je použit LCD [23], [24].



Obrázek 21: Zapojení maticové klávesnice (převzato a upraveno z [22])

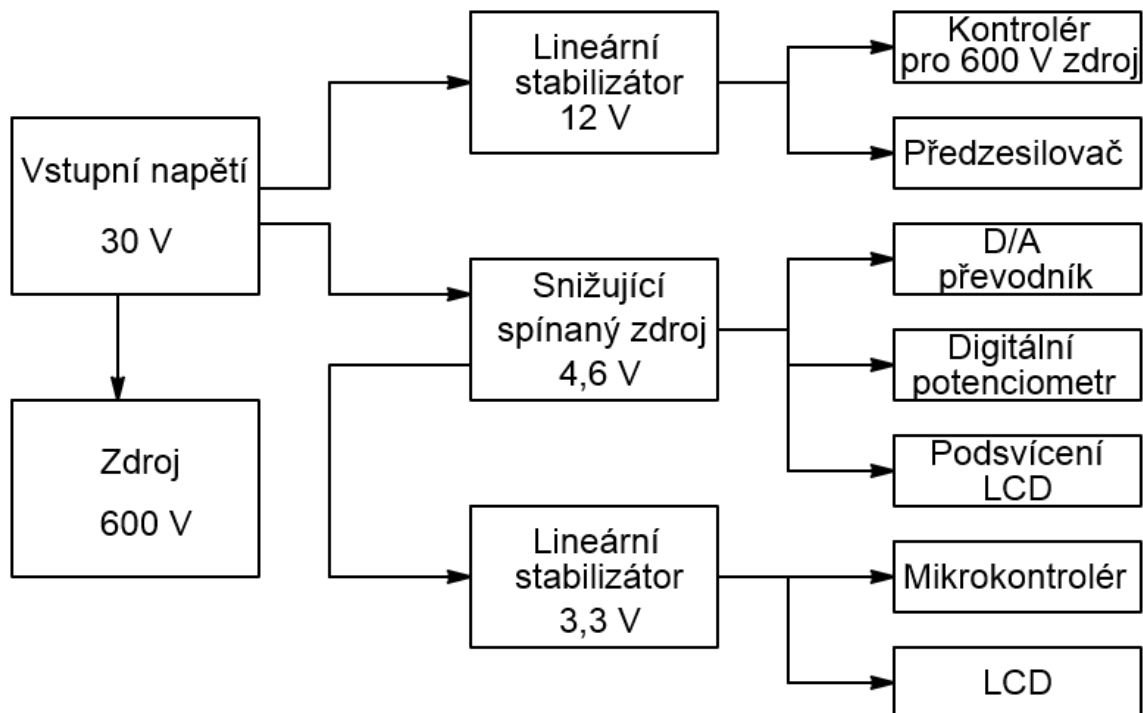
Na Obrázku 21 je znázorněno schéma maticové klávesnice. K připojení mikrokontroléru ke klávesnici je potřeba 8 vodičů (4 pro sloupce a 4 pro řádky). Všechny sloupce jsou nadefinovány jako vstupy s pull-down rezistory a řádky jako výstupy. V klidovém stavu je na všechny řádky připojena logická jednička. Pokud dojde ke stisku tlačítka, tak se na jednom ze sloupců objeví logická jednička. Následně dojde k přepínání řádků do logické nuly, aby se zjistilo, které ze čtyř tlačítek bylo stisknuto. Po zjištění stisknutého tlačítka se vše vrátí do klidového stavu. Ochrana proti záskmitům tlačítka je realizována pomocí čítače uvnitř mikrokontroléru. Další tlačítko může být stisknuto až po uplynutí určité doby (po odeznění záskmitů).

Jako zobrazovací jednotka je použit alfanumerický LCD. Displej má integrovaný řadič, který umožňuje jeho snadné ovládání. Displej umožňuje tři možnosti komunikace. Jsou jimi SPI sběrnice a čtyřvodičové, nebo osmivodičové připojení. Jedná se o transmisivní displej, tedy je nutné jej opatřit podsvícením. Viz [23] a [24].

Displej je napájen napětím 3,3 V a podsvícení z 4,6 V. Pro komunikaci byla zvolena osmivodičová komunikace. Ke komunikaci jsou kromě osmi datových vodičů použity ještě tři signály: zápis/čtení (R/W), volba registru (RS) a hodinový signál (E).

5.3 Napájecí jednotka

Zásuvný modul s napájecími obvody je složen ze tří základních prvků. Jsou jimi snižující spínaný zdroj, který vytváří napětí 4,6 V a dva lineární stabilizátory, na jejich výstupu je napětí 12 V a 3,3 V. Blokové schéma napájecí jednotky a periferií, které napájejí je znázorněno na Obrázku 22.



Obrázek 22: Blokové schéma napájecího systému

5.3.1 Návrh snižujícího měniče

Pro vytvoření napětí 4,6 V byl zvolen místo lineárního stabilizátoru spínaný zdroj, protože při vstupním napětí 30 V a výstupním proudu maximálně 0,5 A by na lineárním stabilizátoru docházelo k velkým výkonovým ztrátám.

Hodnoty měniče byly vypočteny dle kapitoly 3.2.2. Parametry měniče jsou napsány v Tabulce 4.

Tabulka 4: Parametry snižujícího měniče

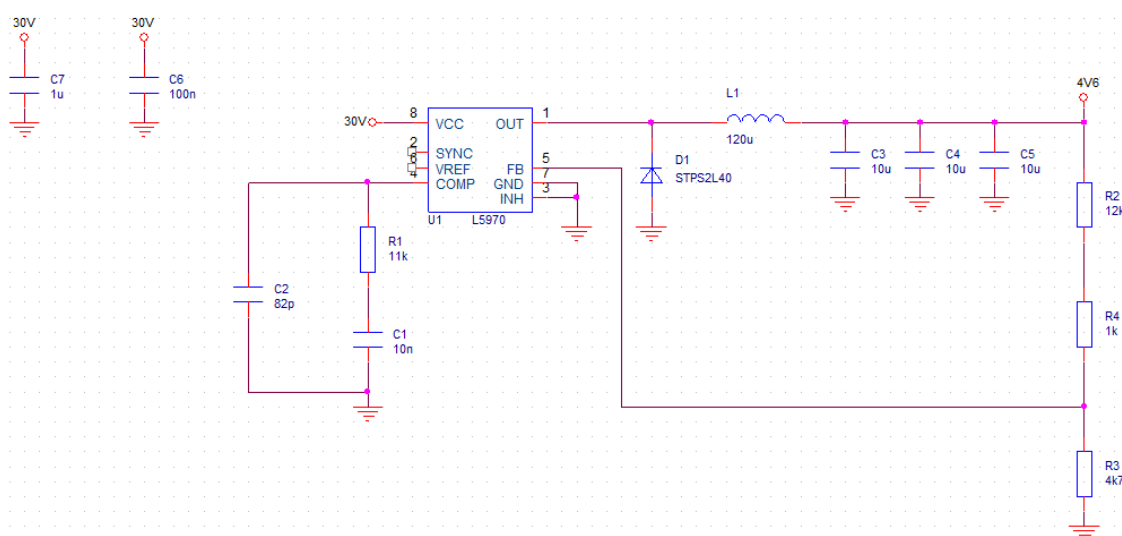
U_n (V)	30	I_n (A)	0,12
U_v (V)	4,6	I_v (A)	0,5
f (kHz)	250	D (-)	0,16
ΔI_L (A)	0,1	ΔU_v (V)	0,1
ΔU_n (V)	0,05	L (uH)	120
C_v (uF)	30	C_n (uF)	5

Zvlnění proudu cívku bylo určeno na 20 % výstupního proudu [6]. Vypočtené hodnoty indukčností a kondenzátorů upraveny dle dostupnosti součástek. Vstupní proud měniče byl odhadnut na 0,12 A, za předpokladu, že měnič bude mít 70% účinnost [25].

Jako řídicí obvod měniče byl zvolen L5970D [25]. Tento integrovaný obvod v sobě integruje spínací tranzistor a redukuje tím počet pomocných součástek měniče. Jeho spínací frekvence má hodnotu 250 kHz, díky vysoké frekvenci je dosaženo poměrně nízkých hodnot použitých součástek. Hodnoty součástek kompenzace zpětné vazby byly určeny pomocí simulátoru eDesignSuite od firmy ST Microelectronics a doladěny experimentálně.

Ve snižujícím měniči byla zvolena dioda STPS2L40. Jedná se o Schottkyho diodu, která vydrží proud až 2 A a v závěrném směru napětí 40 V. Díky malému úbytku napětí na diodě v propustném směru nebude docházet k velkým ztrátám alepší se tím účinnost měniče.

Celkové schéma zapojení je znázorněno na Obrázku 23.

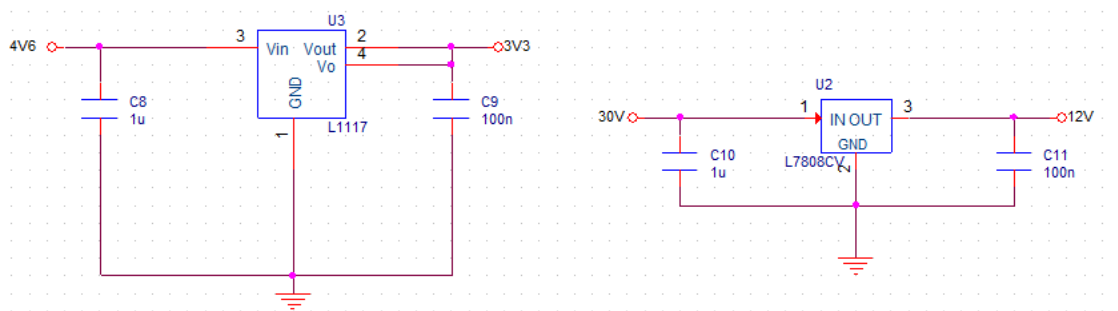


Obrázek 23: Schéma zapojení snižujícího měniče

5.3.2 Lineární stabilizátory

Pro napětí 12 V se nepředpokládá velký odběr proudu, proto i přes velký napěťový úbytek byl zvolen lineární stabilizátor L7812 [4]. Pro napětí 3,3 V může být díky procesoru větší proudový odběr než u 12 V výstupu, ale pokud se napětí bude snižovat pouze ze 4,6 V, nedojde k velkým výkonovým ztrátám. Pro tuto aplikaci byl zvolen lineární stabilizátor s označením LDL1117 [26]. Jeho výhoda spočívá v tom, že dokáže stabilizovat napětí na výstupu již od vstupního napětí, které je o 350 mV vyšší než výstupní [26].

Hodnoty vstupního a výstupního kondenzátoru byly stanoveny dle doporučení výrobce ([4] a [26]). Celkové schéma zapojení stabilizátorů je znázorněno na Obrázku 24.



Obrázek 24: Zapojení lineárních stabilizátorů

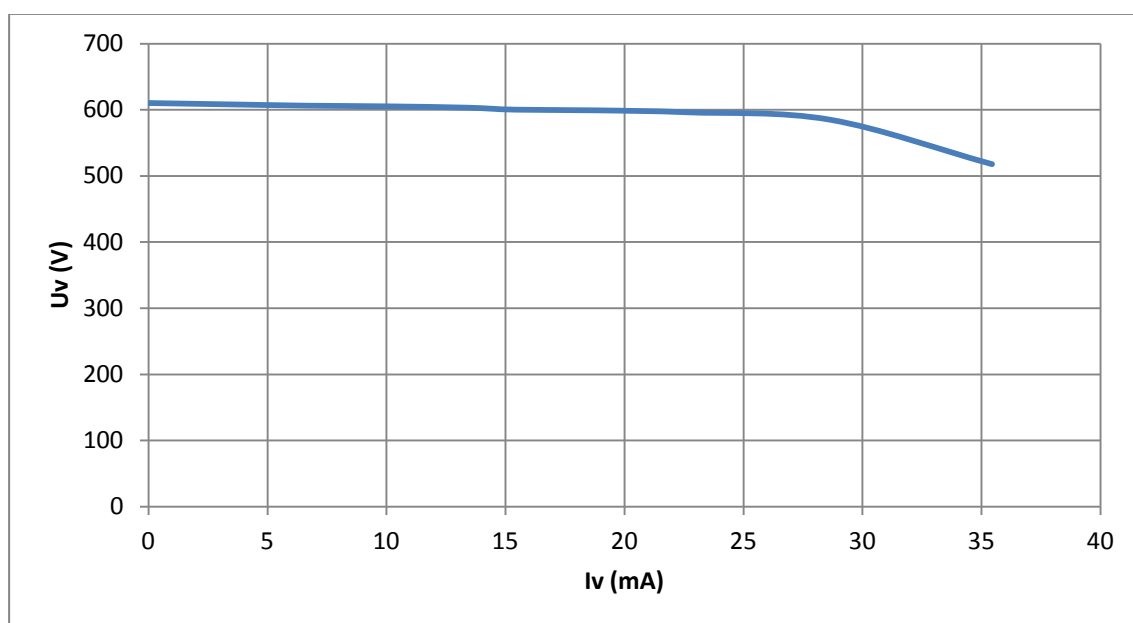
6. Měření

6.1 Napájecí zdroje

U spínaných zdrojů použitých v zařízení byla provedena základní zatěžovací měření. Výsledkem těchto měření je výstupní charakteristika a výpočet účinnosti převodu napětí.

6.1.1 Zvyšující měnič

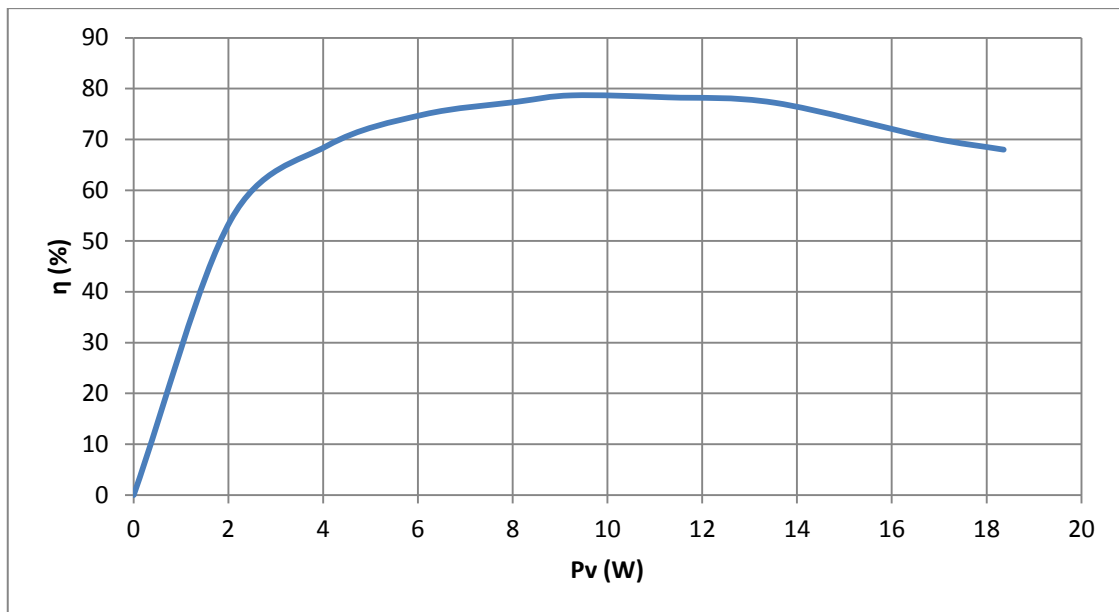
Byla proměřena zatěžovací charakteristika zvyšujícího měniče navrženého v kapitole 5.1.1. Rozsah měření byl proveden od výstupního proudu 0 mA až do hodnoty, kdy se začne vlivem omezení proudu snižovat výstupní napětí. Tato hodnota odpovídá výstupnímu proudu asi 28 mA. Změřená výstupní charakteristika je znázorněna na Obrázku 25.



Obrázek 25: Zatěžovací charakteristika zvyšujícího měniče

Jak je vidět, tak v navrhovaném pracovním rozsahu (0 mA – 20 mA) nedochází k velkým poklesům napětí a zdroj lze v tomto ohledu použít pro generátor.

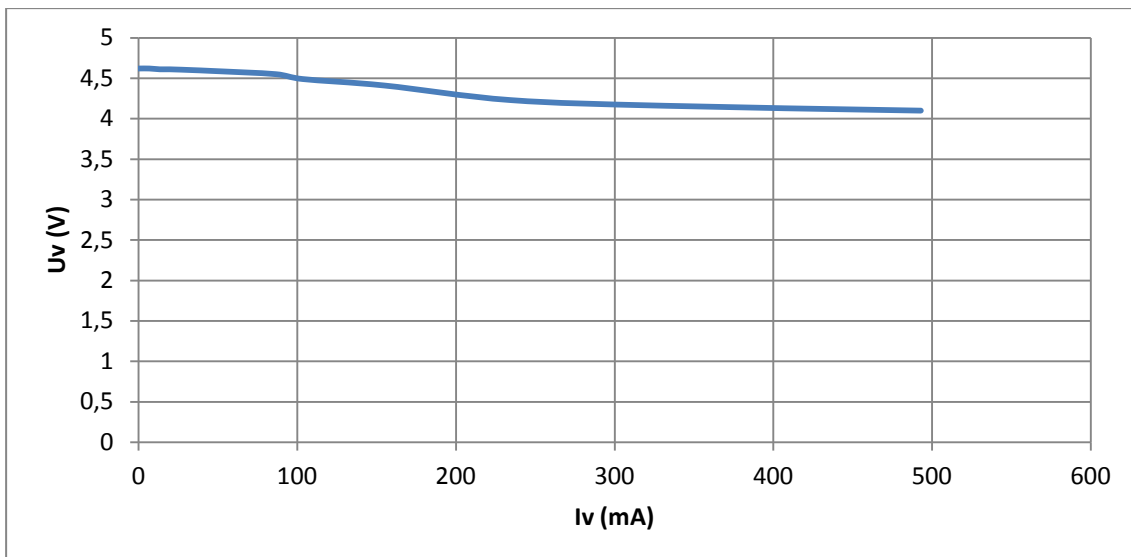
Z naměřených hodnot byla dále vypočtena účinnost spínaného zdroje. Z počátku je hodnota účinnosti nižší, především kvůli nezanedbatelně velké spotřebě řídicího obvodu vůči výstupnímu proudu. Při odebrání většího proudu z výstupu zdroje se účinnost zvyšuje a pohybuje se mezi 70 % až 80 % s maximem v 79 %. Vypočtená účinnost v závislosti na výstupním výkonu je vynesena na Obrázku 26.



Obrázek 26: Účinnost zvyšujícího měniče

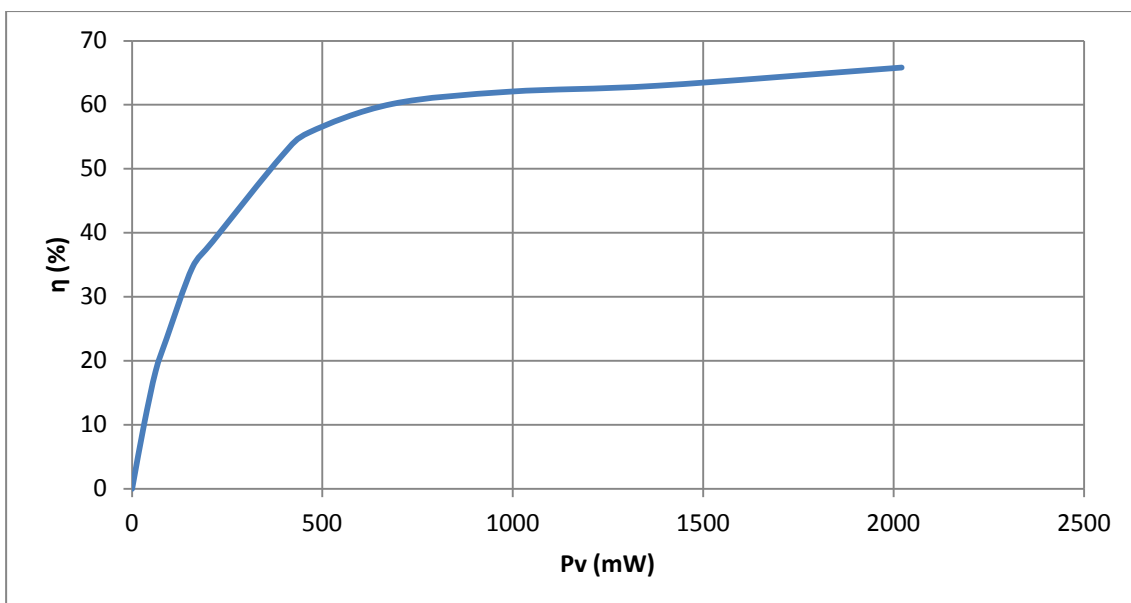
6.1.2 Snižující měnič

Byla proměřena zatěžovací charakteristika snižujícího měniče navrženého v kapitole 5.3.1. Rozsah měření byl proveden od výstupního proudu 0 mA až do hodnoty 500 mA. Horní hodnota měření je omezena možnostmi součástek. Při větším odběru proudu by byla velká pravděpodobnost jejich zničení. Změřená výstupní charakteristika je znázorněna na Obrázku 27. Při zatěžování dojde v měřeném rozsahu k poklesu napětí o 0,5 V. Což je asi 11 % z nastavené hodnoty. Tato změna, ale nemá vliv na výslednou funkci zařízení, proto je možné ji zanedbat.



Obrázek 27: Zatěžovací charakteristika snižujícího měniče

Účinnost tohoto zdroje se při větším výstupním výkonu pohybuje mezi 60 % a 70 %. Nižší účinnost než u předchozího zdroje může být způsobena nezanedbatelnými ztrátami na diodě z důvodu nízkého výstupního napětí. Vyšší účinnosti by bylo dosaženo s použitím synchronního usměrňovače, který by tyto ztráty snížil pouze na ztráty závislé na odporu kanálu tranzistoru v sepnutém stavu. Graf účinnosti je znázorněn na Obrázku 28.



Obrázek 28: Účinnost snižujícího měniče

6.2 Generátor funkcí

U generátoru funkcí byly změřeny zatěžovací charakteristiky. Bylo provedeno zatěžování jak odporovou zátěží, tak i kapacitní zátěží, která se blíže podobá zatěžování umělým svalem.

6.2.1 Sinus

Pro určení zkreslení sinového signálu byl změřen parametr harmonického zkreslení (dále THD). Tento parametr je definován jako poměr vyšších harmonických složek vůči základní harmonické složce. THD je dáno vztahem (21) a udává se v procentech. Ideální sinus by měl být tvořen pouze první harmonickou, jeho THD by potom bylo 0 %.

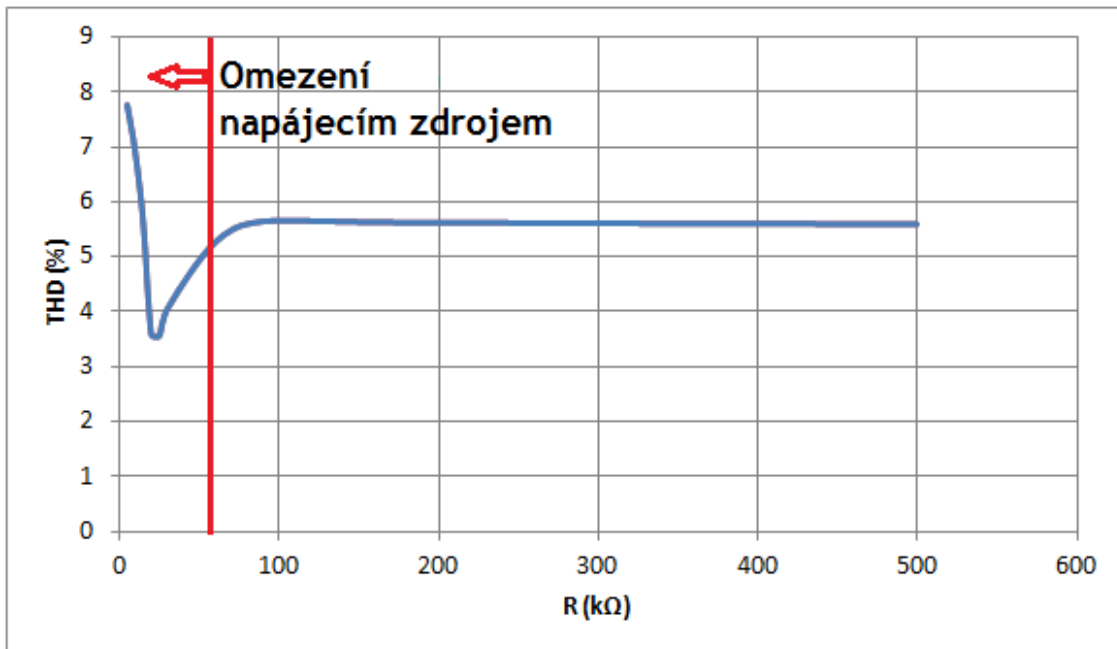
$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^m U_n^2}}{U_1} \times 100 \quad (21)$$

Velikost jednotlivých harmonických složek byla určena pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) za použití osciloskopu. Naměřené hodnoty napětí jsou udávány v decibelech jako střední kvadratická hodnota (dBV_{RMS}). Pro přepočítání na střední kvadratickou hodnotu je použit vztah:

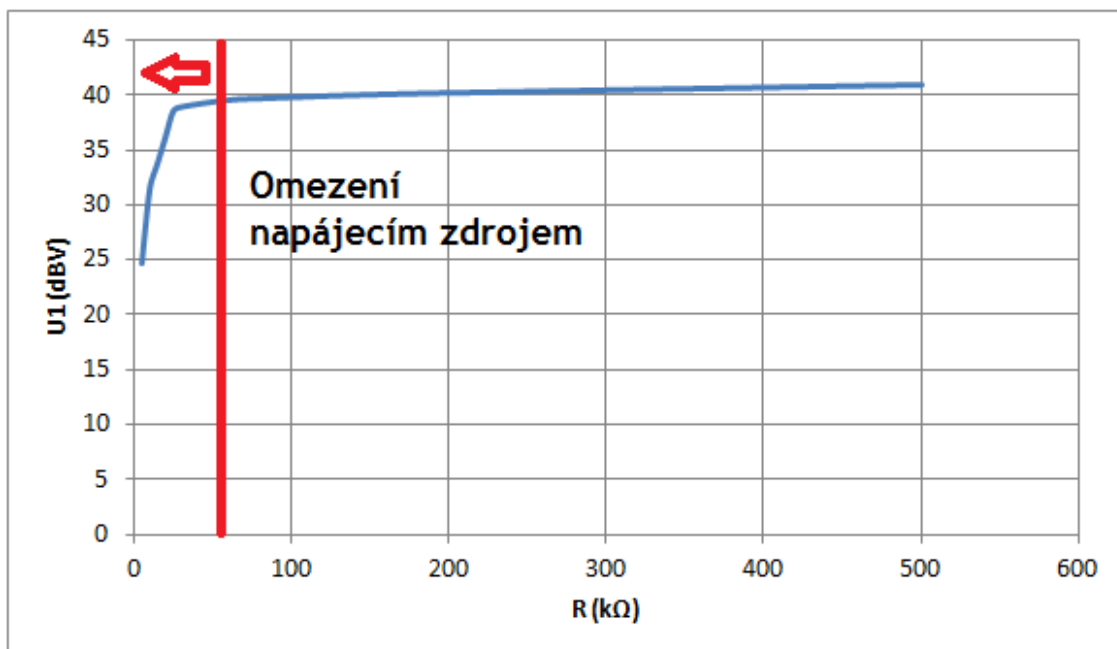
$$U_{dBV} = 20 \log U_{RMS} \quad (22)$$

Pro měření byl použit sinus s frekvencí 10 Hz a napětím špička-špička 300 V. Výsledná závislost THD na zatěžovacím odporu je vynesena na Obrázku 29. A změna střední kvadratické hodnoty signálu na Obrázku 30. Jak je vidět, tak při zatěžování odporovou zátěží dojde k poklesu napětí průběhu a k výraznějšímu zkreslení až při malých

hodnotách odporu zatěžovacích rezistorů. Tato hodnota odpovídá asi 60 k Ω , pro menší hodnoty rezistorů se již naráží na omezení 600 V zdroje.

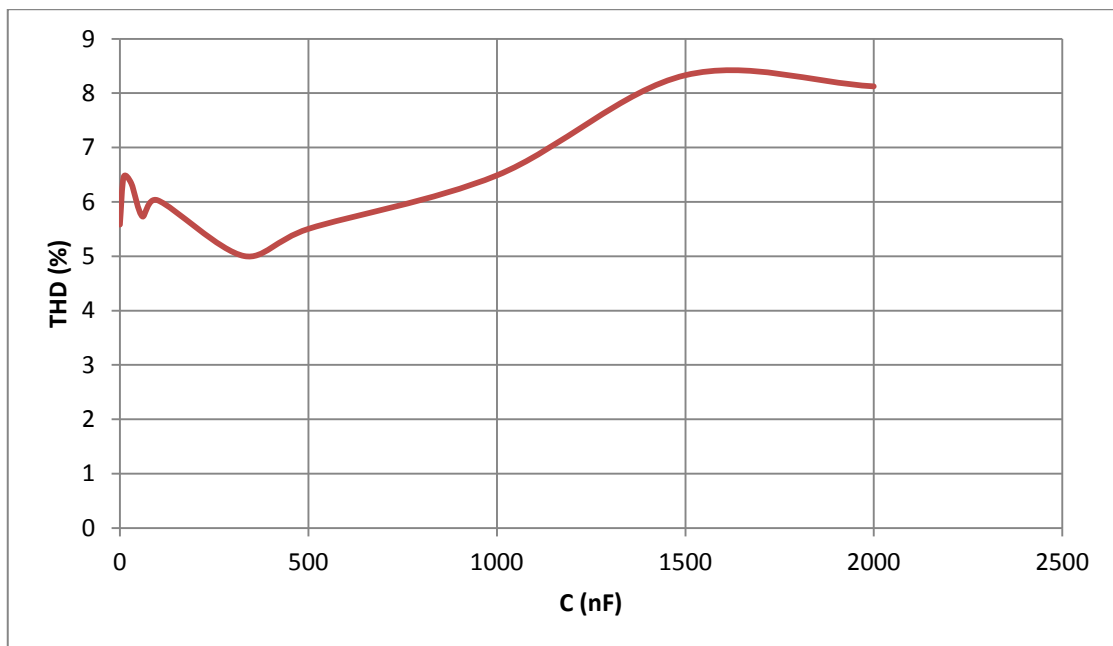


Obrázek 29: Změna THD sinového průběhu v závislosti na zatěžovacím odporu

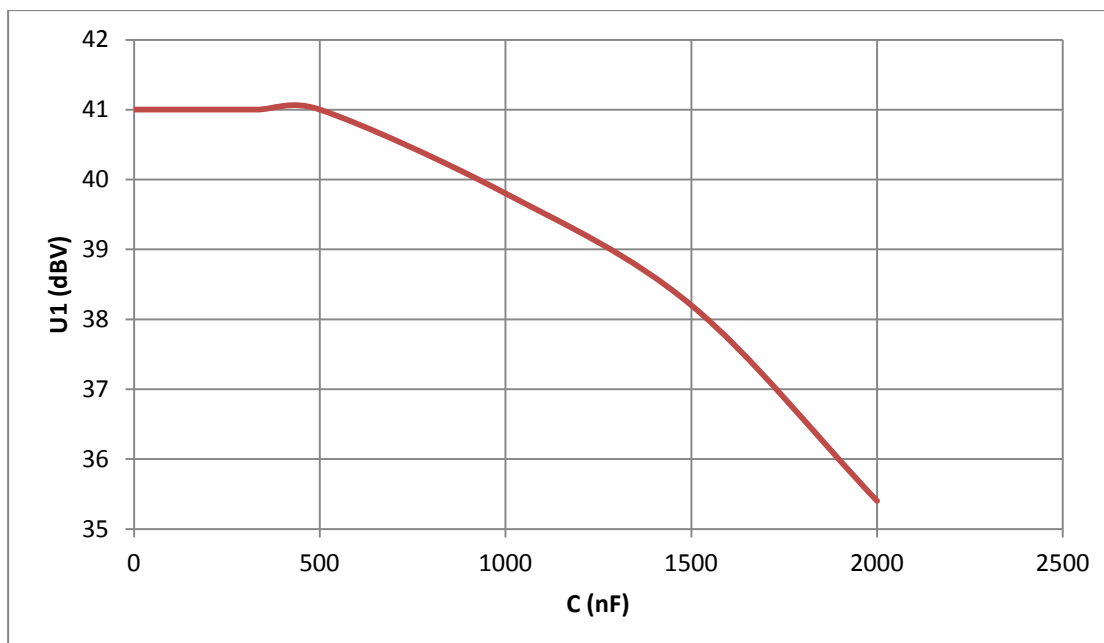


Obrázek 30: Závislost střední kvadratické hodnoty napětí první harmonické na zatěžovacím odporu

Pro kapacitní zátěž byly změřeny stejné charakteristiky jako pro odporovou zátěž. Změna THD na zatěžovací kapacitě je zobrazena na Obrázku 31 a změna střední kvadratické hodnoty napětí na Obrázku 32. Z grafů je patrné, že hodnota napětí výstupního signálu drží konstantní hodnotu až do hodnoty zatěžovací kapacity 500 nF. Zkreslení signálu se pohybuje stejně jako u odporové zátěže mezi 5 % a 6 % až do zhruba 700 nF. Při větší zatěžovací kapacitě dojde k většímu zkreslení signálu. Protože kapacita se nestíhá dostatečně rychle vybíjet.



Obrázek 31: Změna THD sinového průběhu v závislosti na zatěžovací kapacitě



Obrázek 32: Závislost střední kvadratické hodnoty napětí sinového průběhu na zatěžovací kapacitě

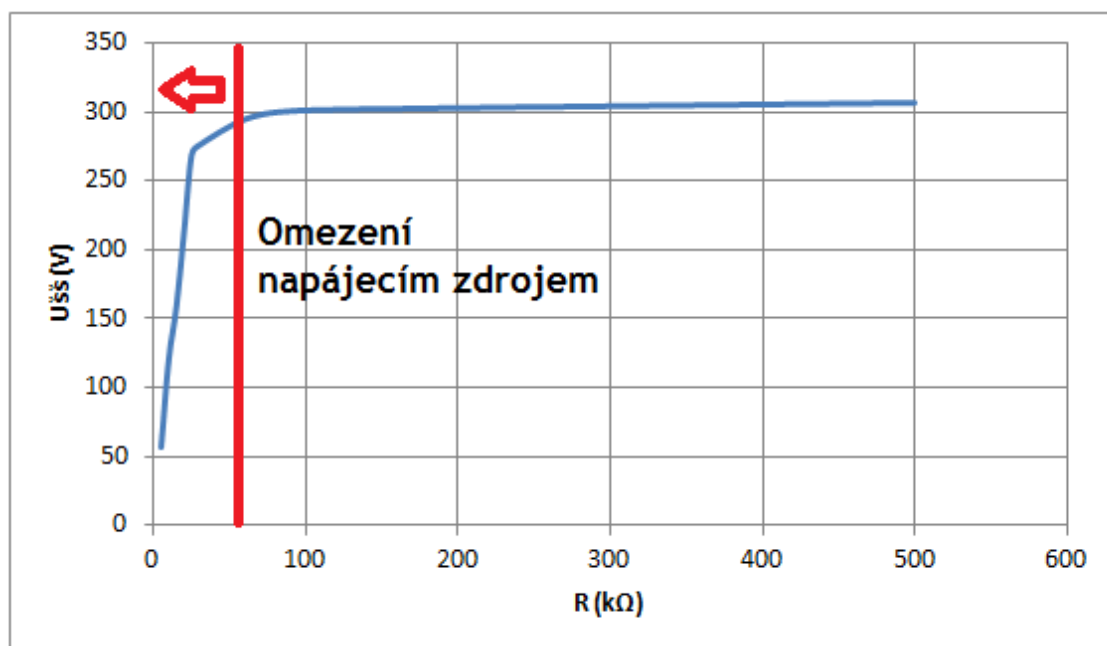
Z tohoto měření lze usoudit, že sinový průběh je možné použít pro ovládání umělého svalu. Umělý sval se chová jako kapacitní zátěž, jehož kapacita je maximálně 500 nF. V tomto rozsahu zatěžovacích kapacit generátor nevykazuje nadměrné zkreslení signálu ani pokles napětí.

6.2.2 Obdélníkový průběh

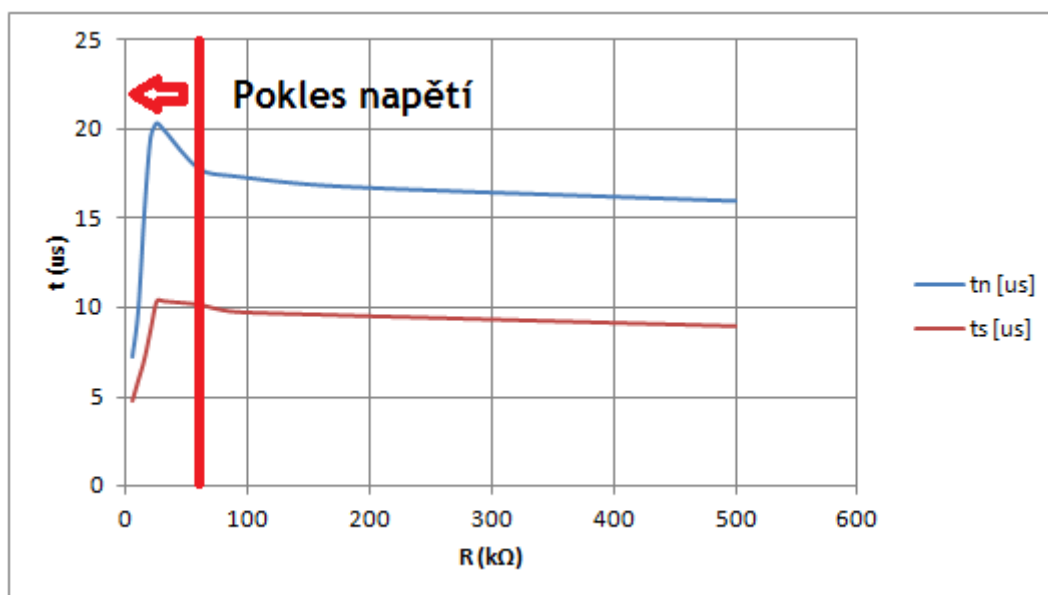
Obdélníkový průběh byl měřen s frekvencí 10 Hz, napětím špička-špička 300 V a střídou 50 %. Měření bylo zaměřeno na náběžné (t_n) a sestupné hrany (t_s) průběhu. Tato doba byla měřena podle standardní definice mezi 10 % a 90 % napětí špička-špička. Dále byly proměřeny změny napětí špička-špička v závislosti na zatížení.

V případě odporového zatížení nedocházelo k velkým změnám náběžných a sestupných hran. Ke změně došlo až při limitních hodnotách, kdy už působila omezení zdroje. Kratší náběžné a sestupné hrany při malém zatěžovacím odporu jsou způsobeny poklesem napětí špička-špička. Výstupní napětí vlivem zatížení rezistorem menším než 60 k Ω klesalo, to je

způsobené neschopností napájecího zdroje dodat dostatečně velký proud. Změřené charakteristiky jsou znázorněny na Obrázku 33 a na Obrázku 34.



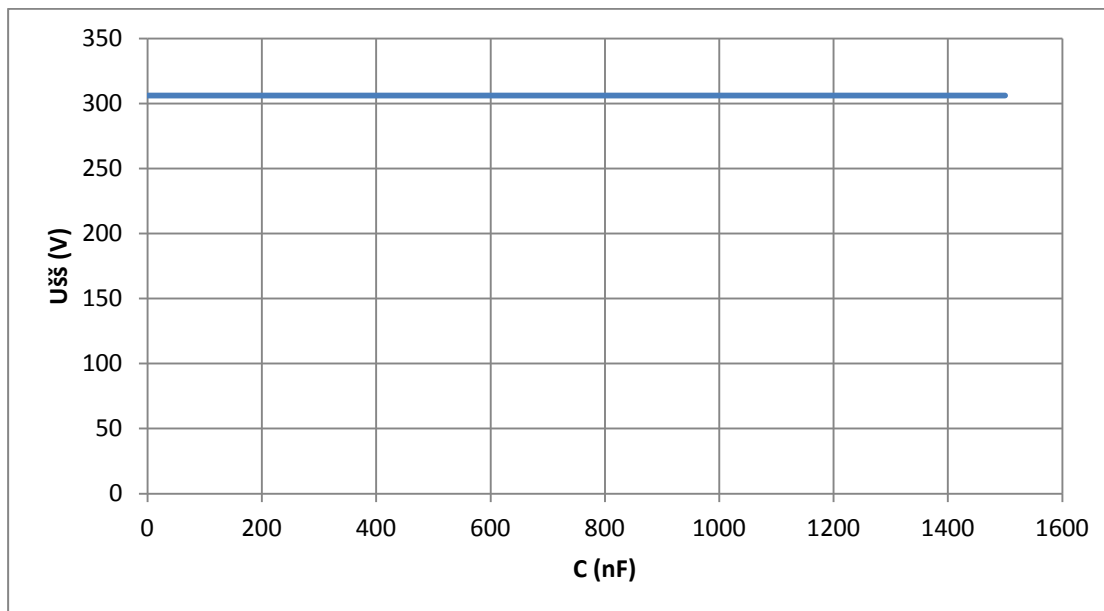
Obrázek 33: Závislost napětí špička-špička obdélníkového průběhu na zatěžovacím odporu



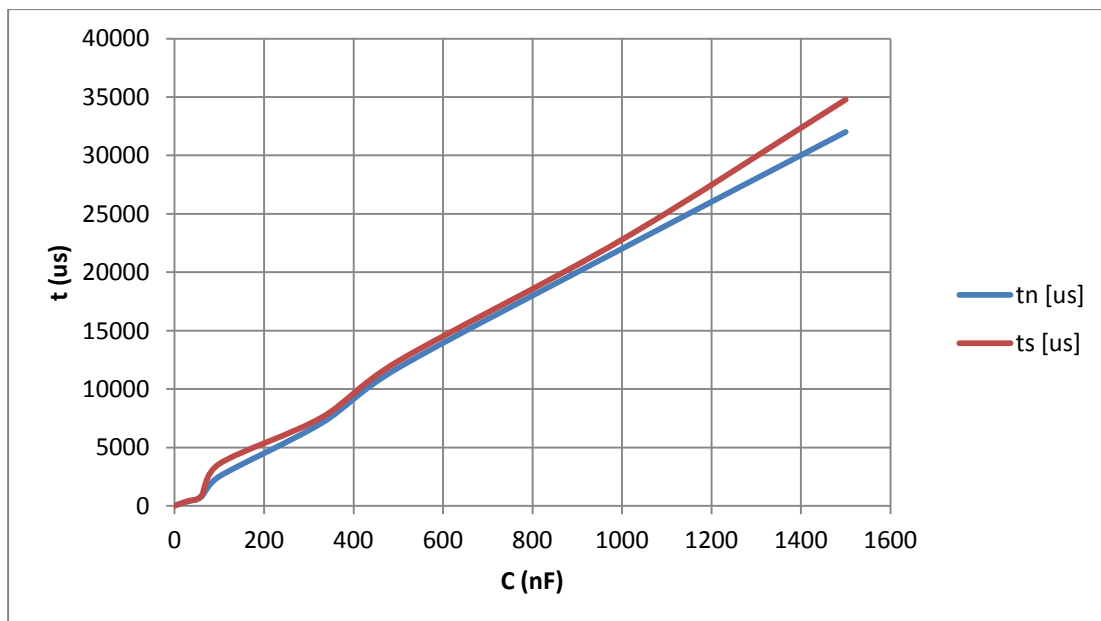
Obrázek 34: Vliv zatěžovacího odporu na náběžné hrany obdélníkového průběhu

Stejně měření bylo provedeno i pro kapacitní zátěž. V tomto případě nedocházelo ke změně napětí špička-špička, ale více se prodlužovala doba náběžných a sestupných hran.

To je způsobené především ochranou proti zkratovému proudu. Zrychlit náběžné a sestupné hrany by bylo možné posunutím hranice zkratového proudu, ale pro ovládání umělého svalu je tato rychlost dostačující. Změřené charakteristiky jsou vykresleny na Obrázku 35 a na Obrázku 36.



Obrázek 35: Závislost napětí špička-špička obdélníkového průběhu na zatěžovací kapacitě

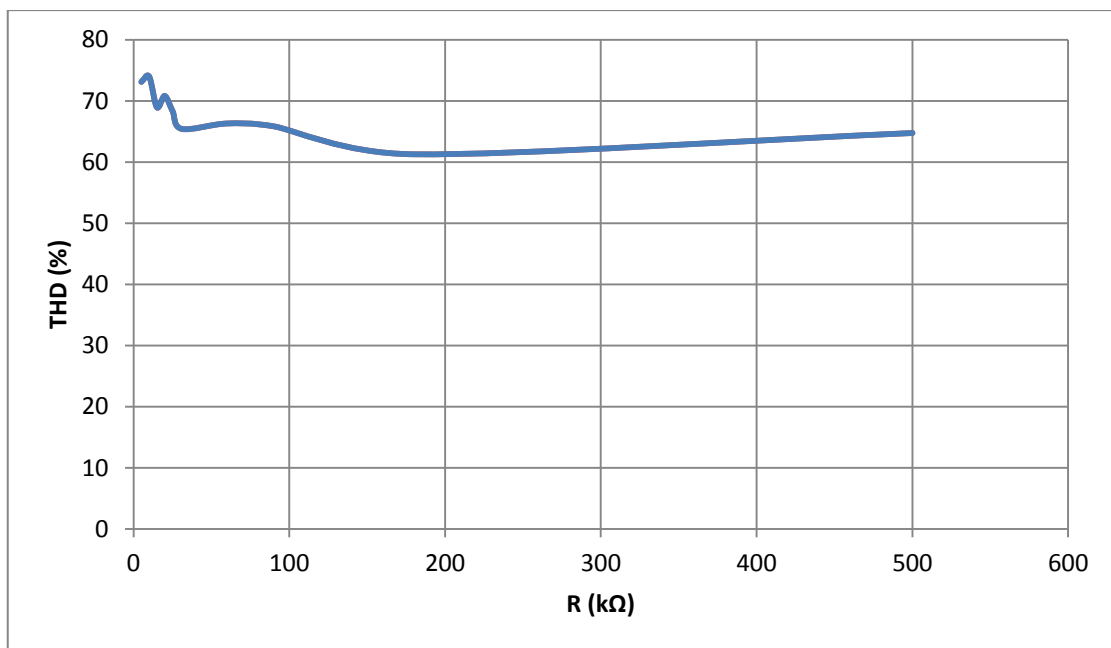


Obrázek 36: Vliv zatěžovací kapacity na náběžné hrany obdélníkového průběhu

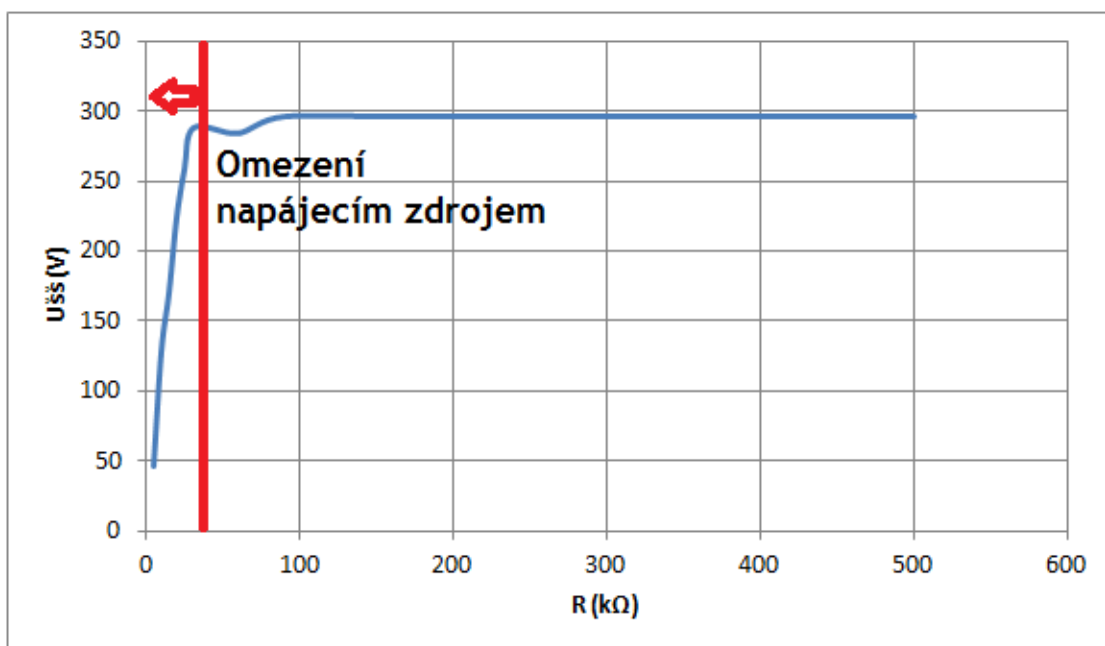
6.2.3 Trojúhelníkové průběhy

Pro měření trojúhelníkového průběhu byla zvolena pila. Pro ostatní trojúhelníkové průběhy lze očekávat podobné chování. Stejně jako u sinového průběhu bylo změřeno THD v závislosti na zatížení. U trojúhelníkového průběhu udává počáteční hodnota bez zatížení základní hodnotu THD a měří se jeho změna.

V měření byl použit pilový průběh s frekvencí 10 Hz a napětím špička-špička 300 V. Z grafů na Obrázku 37 a Obrázku 38 je vidět, že tvar průběhu se při zatížení výrazně nemění, ale při zatěžovacím odporu menším než 60 k Ω dojde k poklesu napětí. To je způsobené proudovým omezením napájecího zdroje a omezením 600 V zdroje.

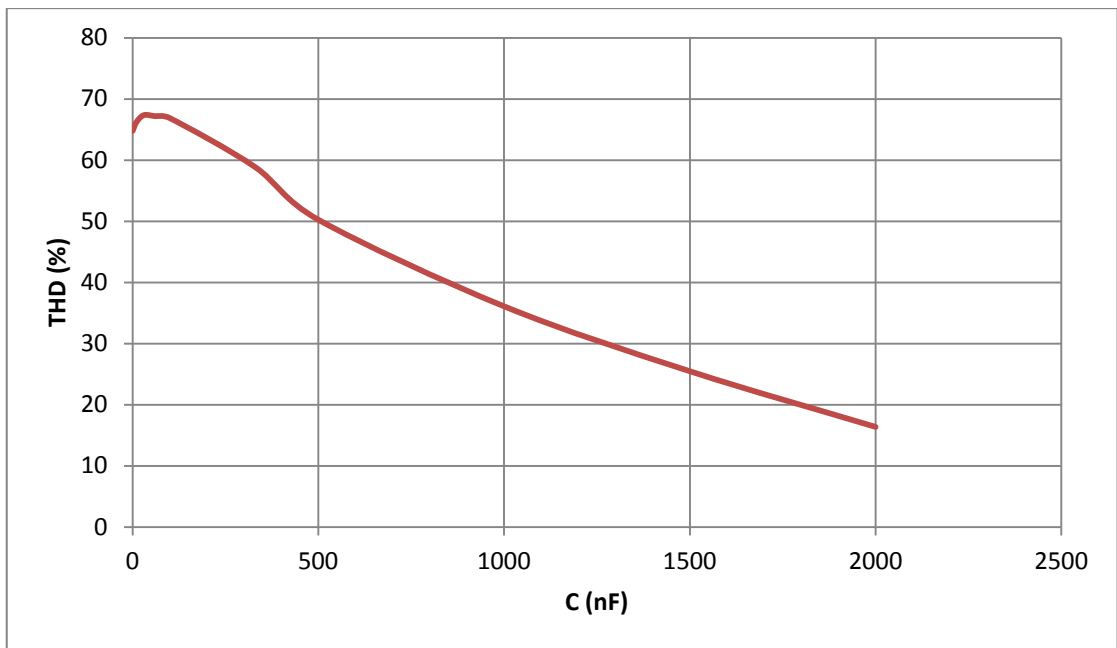


Obrázek 37: Změna THD pilového průběhu v závislosti na zatěžovacím odporu

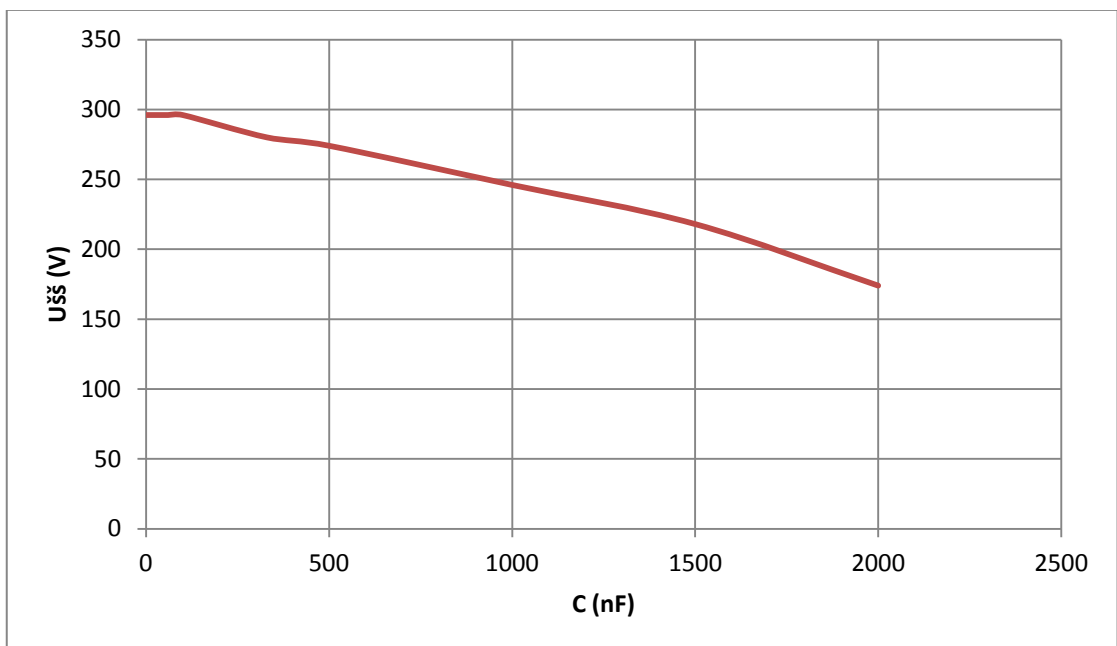


Obrázek 38: Závislost napětí špička-špička pilového průběhu na zatěžovacím odporu

Při zatěžování výstupu kapacitní zátěží došlo k většímu zkreslení signálu. THD s větší zatěžovací kapacitou klesá, to znamená, že vyšší harmonické složky průběhu se tlumí a průběh se začíná více podobat sinovému průběhu. Napětí špička-špička se zatížením klesá, protože s větší kapacitou je potřeba většího proudu pro její dostatečně rychlé nabití a proudové omezení zdroje to již nedovoluje. V používaném rozsahu měřeného zatížení nedosahuje tato změna velkých hodnot, proto ji lze zanedbat. Charakteristiky jsou znázorněny na Obrázku 39 a na Obrázku 40.



Obrázek 39: Změna THD pilového průběhu v závislosti na zatěžovacím odporu



Obrázek 40: Závislost napětí špička-špička pilového průběhu na zatěžovacím odporu

7. Zhodnocení výsledků a závěr

Cíl diplomové práce:

1. Navrhnout a realizovat napájecí zdroj, který bude konvertovat napětí z 30 V na 600 V a bude schopný dodat proud až 20 mA.
2. Navrhnout a realizovat nízkonapěťový generátor funkcí (sinus, obdélník/lichoběžník, trojúhelník) s rozsahem frekvencí 0,5 Hz – 20 Hz.
3. Navrhnout a realizovat koncový zesilovač pro ovládání umělého svalu.
4. Provést ověřovací měření.

Výsledky práce:

1. Podařilo se navrhnout zvyšující měnič, který splňuje zadané parametry.
2. Byl sestrojen nízkonapěťový digitální generátor schopný vytvářet zmiňované průběhy napětí v zadaném rozsahu frekvencí. Navíc dokáže nastavovat u obdélníkového průběhu střídu a je možné volit mezi třemi trojúhelníkovými průběhy.
3. Koncový zesilovač byl navržen tak, aby dokázal řídit kapacitní zátěž. Výstupní část je realizována pomocí dvou NPN tranzistorů (protože PNP tranzistory je obtížně vyrobit na vysoké napětí a nejsou běžně dostupné). Výkonový zesilovač je také doplněn předzesilovačem, který upravuje hodnotu velikosti napětí signálu a jeho stejnosměrnou složku.
4. Bylo provedeno ověřovací měření.
5. Generátor je chráněn proti nesprávné manipulaci a možným průrazům umělého svalu. V takové situaci dochází k vykratování výstupních svorek. Generátor je proto opatřen proudovou ochranou a přepětovými ochranami, které snižují riziko poškození přístroje. Mimo to obsahuje hlavní vypínač a možnost odpojení výstupního napětí pro bezpečnější práci s vysokým napětím.

Možné úpravy zařízení:

- a) Zvyšující měnič (600 V / 20 mA)
 - Pro možnost odběru většího proudu z generátoru a zlepšení účinnosti by bylo výhodné použití jiné topologie 600 V zdroje (zvyšující měnič s dělenou indukčností, flyback).
- b) Generátor funkcí
 - Pro méně zkreslené průběhy a dosažení vyšších frekvencí výstupního napětí by bylo výhodnější použití paralelního A/D převodníku namísto sériového.
- c) Zpětná vazba
 - Pro menší zkreslení výstupního napětí by se mohla zavést zpětná vazba, která by porovnávala vzorek výstupního napětí s vstupem a podle toho upravovala vstupní signál zesilovače.

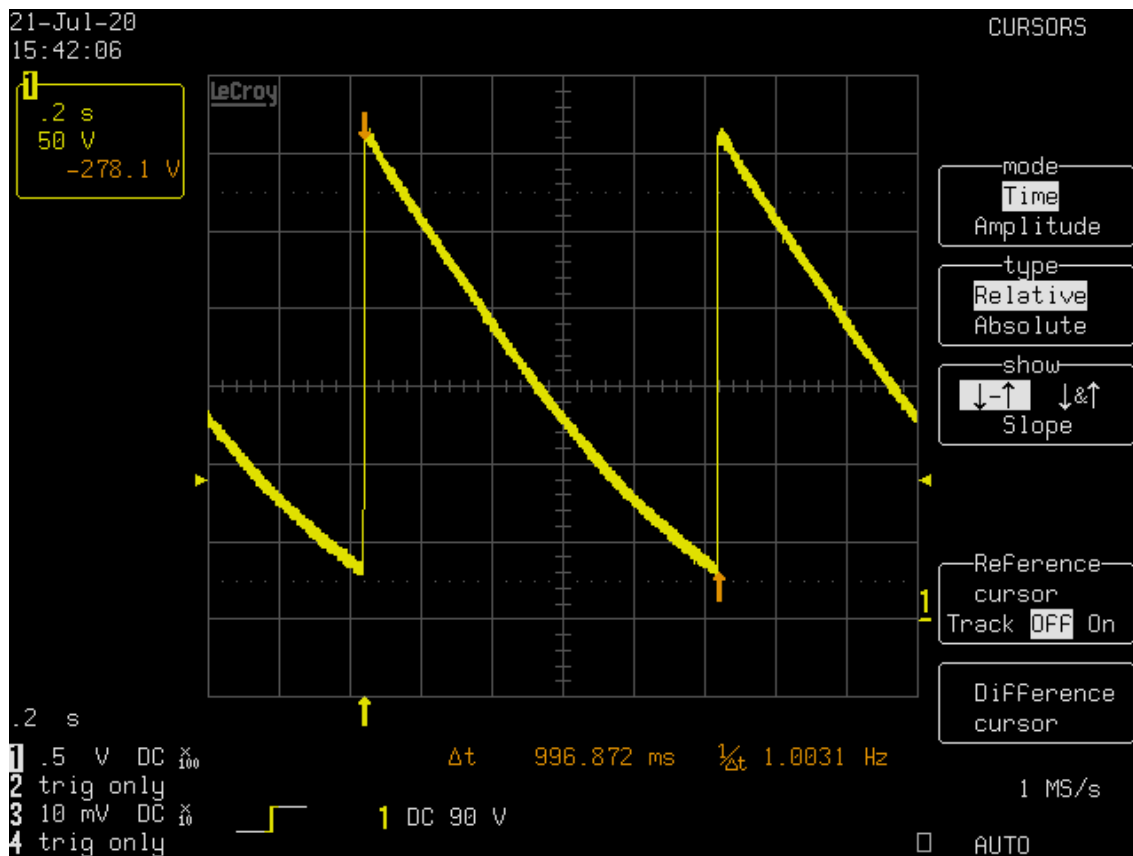
8. Literatura

- [1] Krejčířík, A.: *Napájecí zdroje I.*, BEN Praha 1996
- [2] Krejčířík, A.: *Napájecí zdroje III.*, BEN Praha 1999
- [3] Krejčířík, A.: *DC-DC měniče*, BEN Praha 2001
- [4] ST Microelectronics: L78, datasheet (September 2018) www.st.com
- [5] Texas Instrments: Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage (November 2009) www.ti.com
- [6] Texas Instrments: Basic Calculation of a Buck Converter's PowerStage (December 2011) www.ti.com
- [7] Richtek: Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage (December 2015) www.richtek.com
- [8] Kotisa, Z.: *NF zesilovače 3. díl*, BEN Praha 2003
- [9] Tektronix: Signal generator fundamentals (2009) www.tektronix.com/signal_generators
- [10] XIA, Hong, Midori TAKASAKI a Toshihiro HIRAI. Actuation mechanism of plasticized PVC by electric field (Febuary 2010) doi:10.1016/j.sna.2009.11.028
- [11] ST Microelectronics: UC3843B, datasheet (March 1999) www.st.com
- [12] ST Microelectronics: STP8NK100Z, datasheet (November 2005) www.st.com
- [13] ST Microelectronics: STTH112, datasheet (October 2009) www.st.com
- [14] ON Semiconductor: KSC5027OTU, datasheet (June 2001) www.onsemi.com
- [15] ON Semiconductor: BC817-40W,datasheet (May 2016) www.onsemi.com
- [16] ST Microelectronics: STM32F031K6T6, datasheet (May 2017) www.st.com
- [17] ST Microelectronics: STM32F031K6T6, reference manual (January 2017) www.st.com
- [18] Microchip: TC1320EOA, datasheet (2002 – 2012) www.microchip.com
- [19] ST Microelectronics: UA741, datasheet (September 2013) www.st.com
- [20] ST Microelectronics: TL431, datasheet (December 2017) www.st.com
- [21] Analog Devices: AD5241/AD5242, datasheet (2001 – 2015) www.analog.com
- [22] Multi-comp: klávesnice 4x4, datasheet (June 2012) V1.1 cz.farnell.com

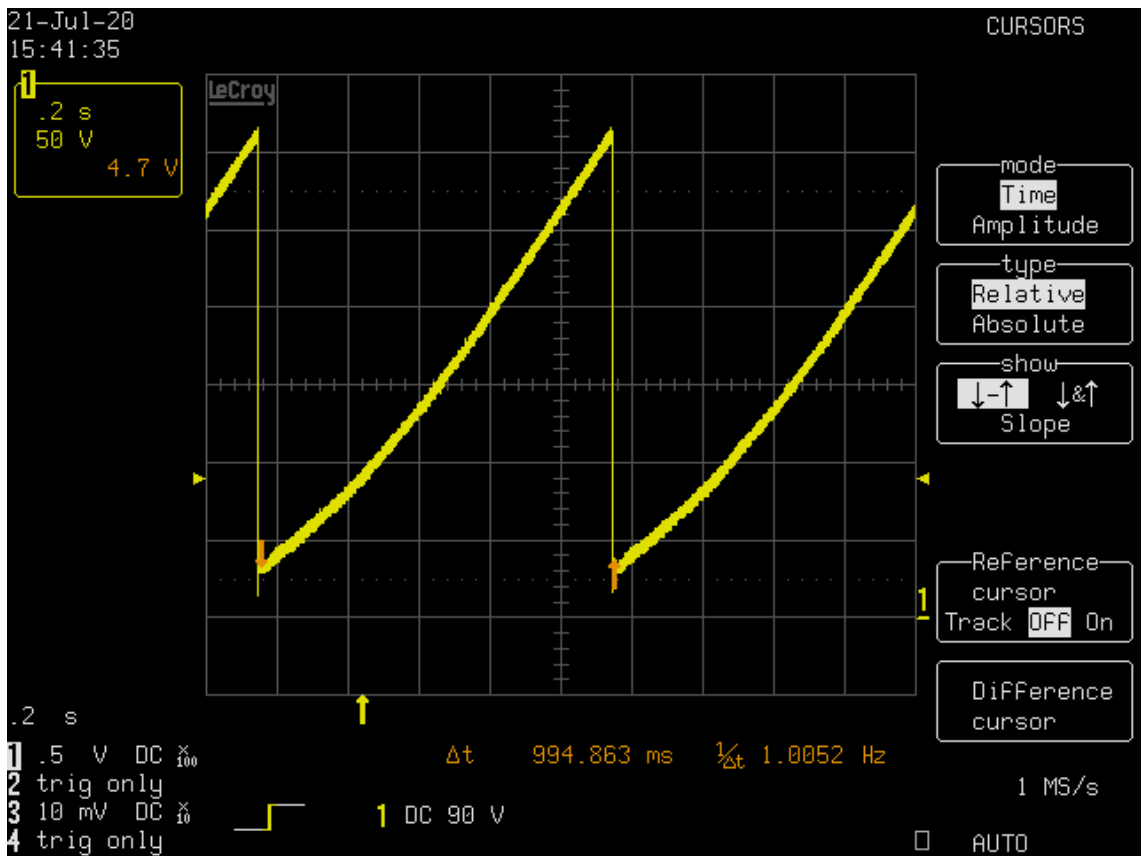
- [23] Sitronix: ST7036 Dot Matrix LCD driver/controller, datasheet (2003/12/24)
cz.farnell.com
- [24] Electronic assembly: EA DOG-M, datasheet (August 2012) cz.farnell.com
- [25] ST Microelectronics: L5970D, datasheet (October 2007) www.st.com
- [25] ST Microelectronics: STPS2L40, datasheet (September 2019) www.st.com
- [26] ST Microelectronics: LDL1117, datasheet (April 2020) www.st.com
- [27] Hospodka, J.: Soubor přednášek ČVUT Praha, Analogové obvody
- [28] Záhlava, V.: *Návrh a konstrukce DPS*, BEN Praha 2011
- [29] Hospodka, J. a Náhlík, J.: Soubor přednášek a cvičení ČVUT Praha, Laboratoř elektronických systémů
- [30] Záhlava, V.: Soubor přednášek ČVUT Praha, Principy a pravidla elektronického návrhu
- [31] Teplý T.: Soubor přednášek ČVUT Praha, Mikrokontroléry
- [32] Záhlava V., Hazdra P., Popelka S.: Soubor přednášek ČVUT Praha, Výkonová elektronika
- [33] Novák J., Jirásek L.: Soubor přednášek ČVUT Praha, Návrh napájecích zdrojů pro elektroniku

9. Přílohy

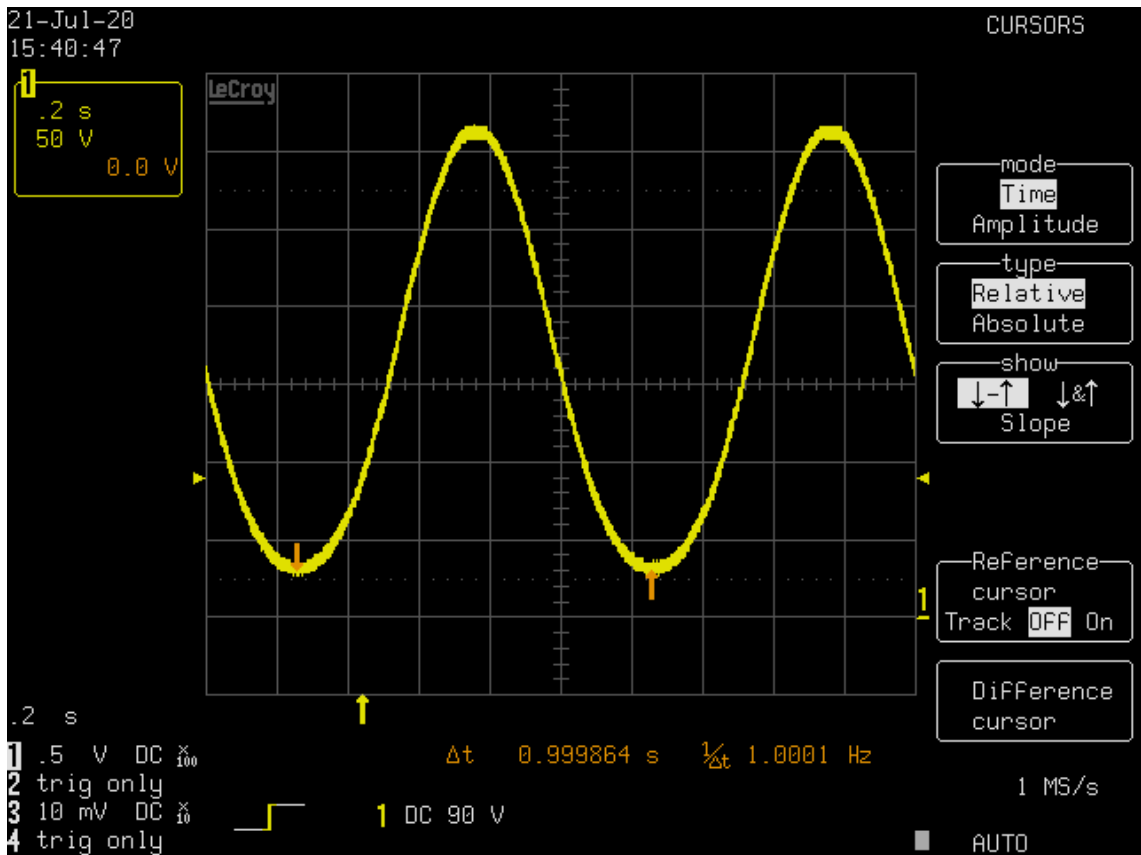
9.1 Naměřené průběhy napětí



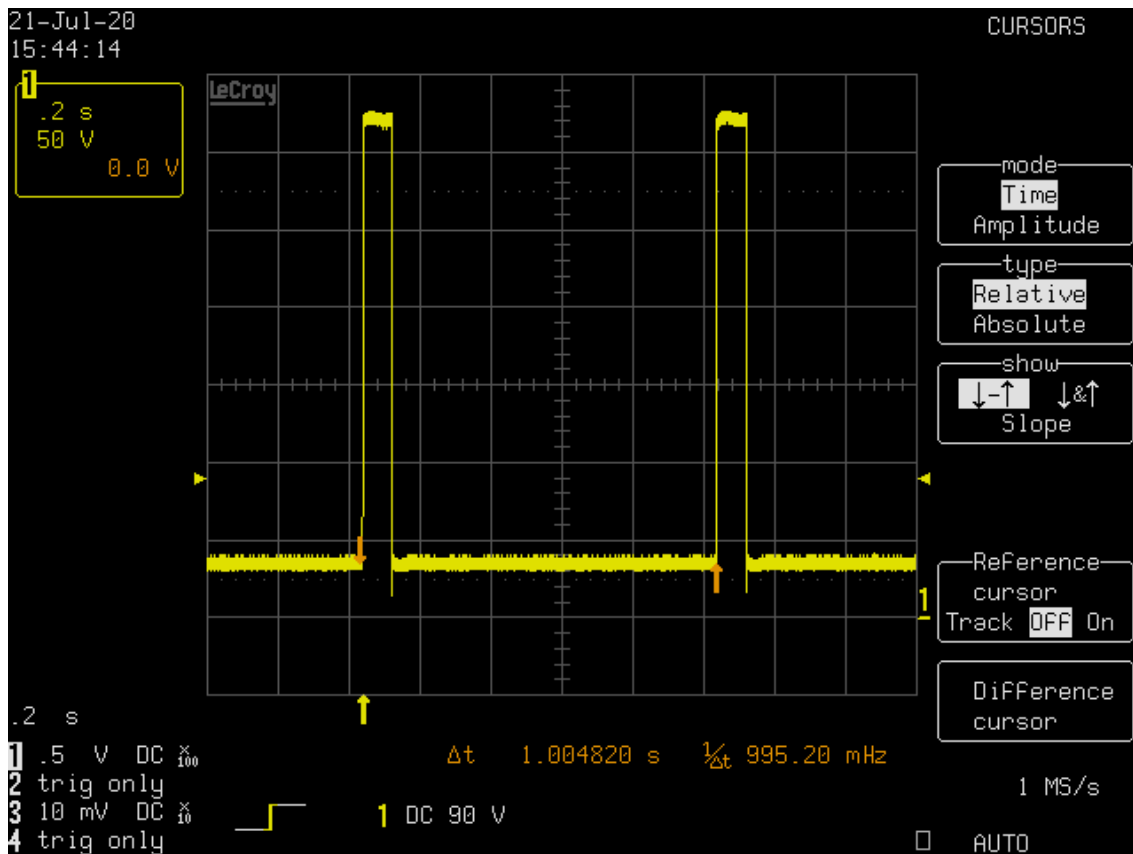
Pila o špičkovém napětí 300 V a frekvenci 1 Hz



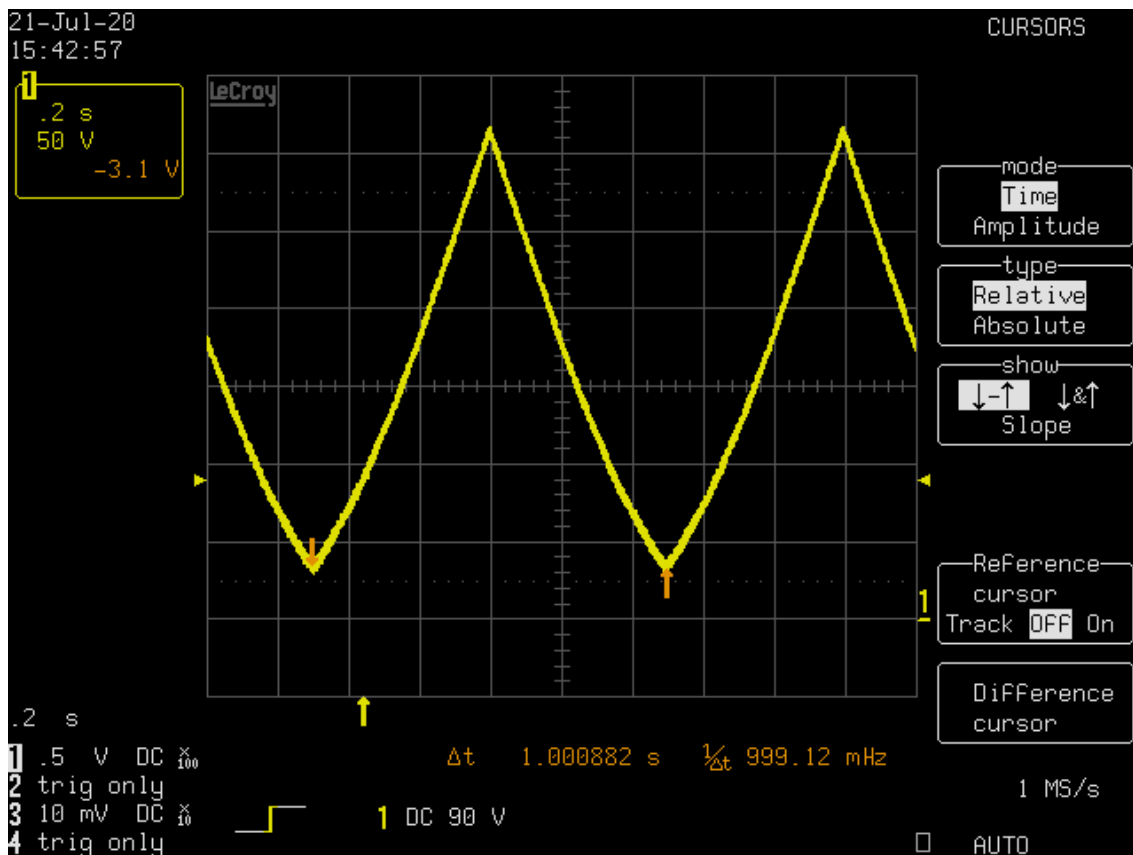
Rampa o špičkovém napětí 300 V a frekvenci 1 Hz



Sinus o špičkovém napětí 300 V a frekvenci 1 Hz



Obdĺník o špičkovém napětí 300 V a frekvenci 1 Hz (střída 10%)



Trojúhelníkový průběh o špičkovém napětí 300 V a frekvenci 1 Hz

9.2 Schéma zapojení

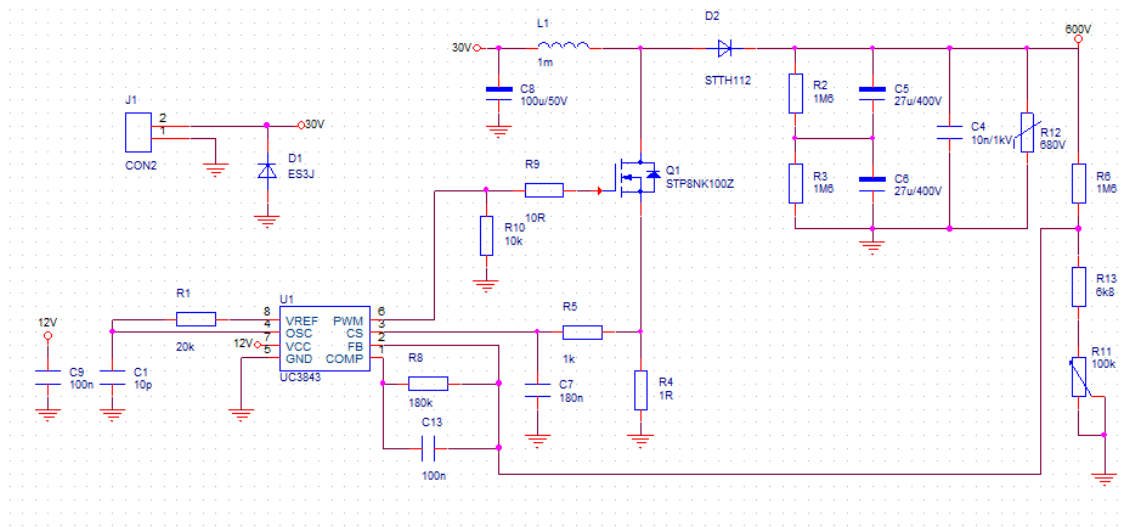


Schéma zapojení zvyšujícího měniče na 600 V

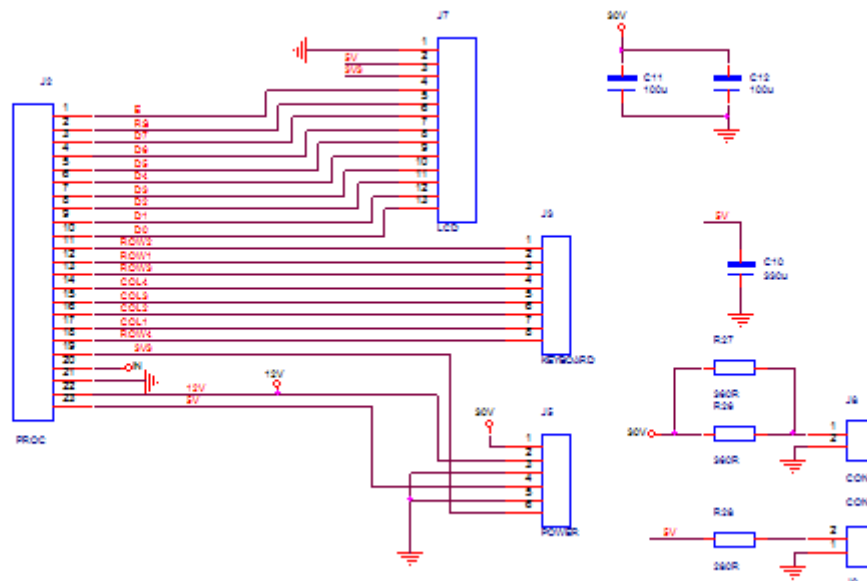


Schéma zapojení připojovacích konektorů

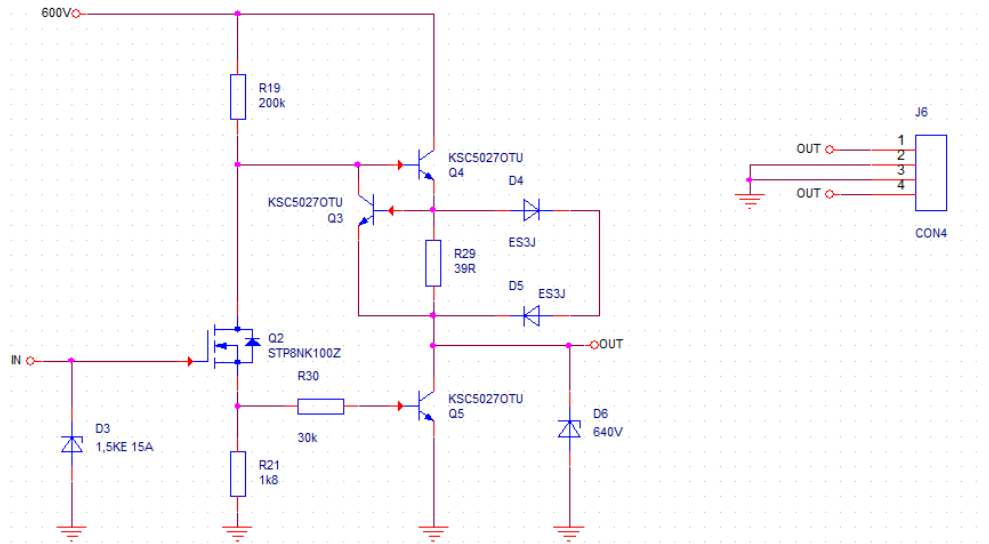


Schéma zapojení výkonového zesilovače

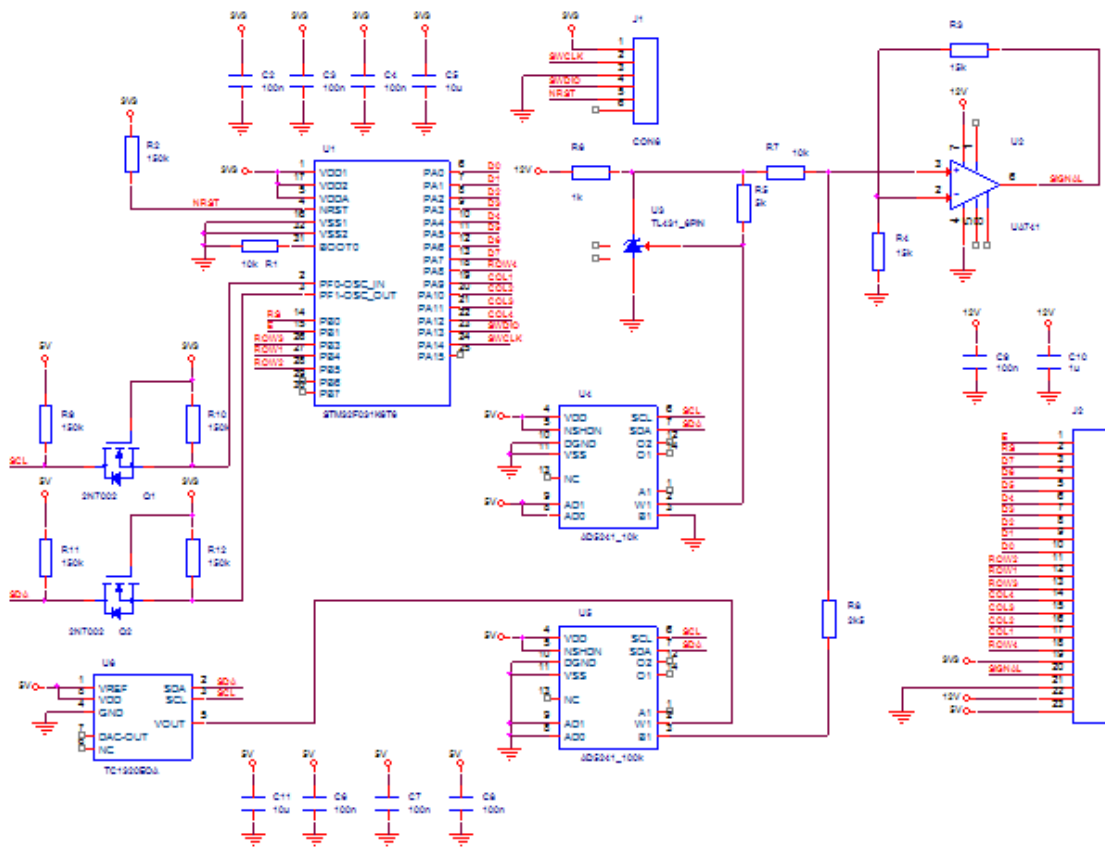


Schéma zapojení generátoru

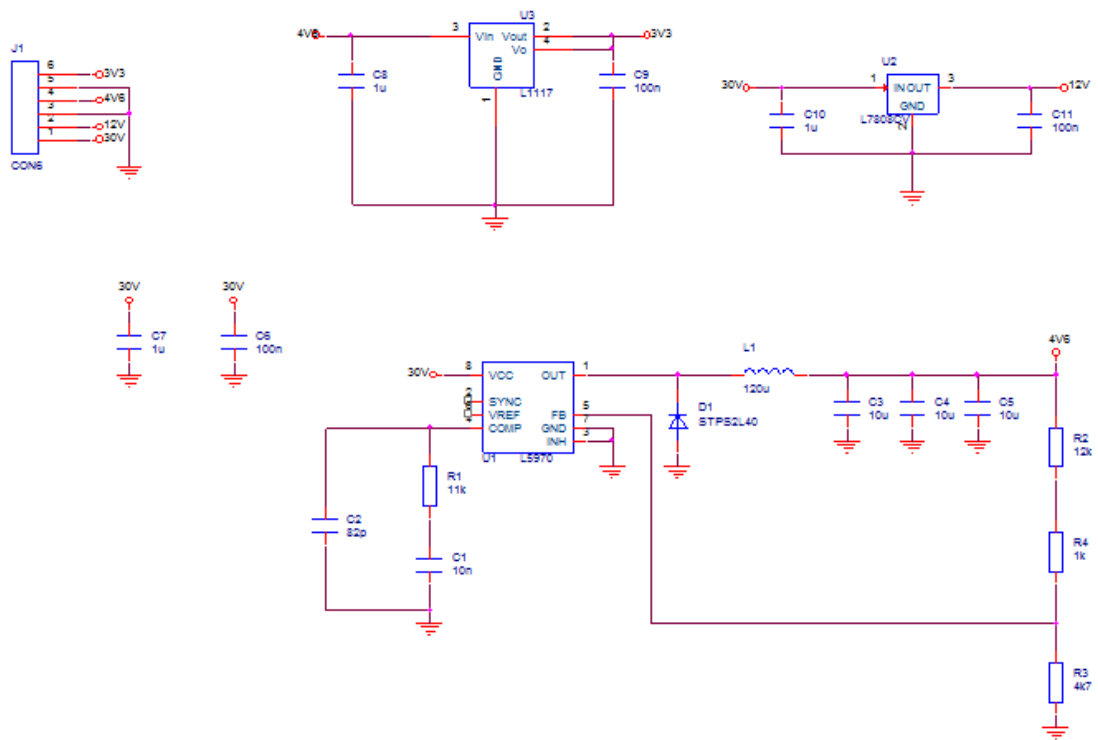


Schéma zapojení napájecího modulu

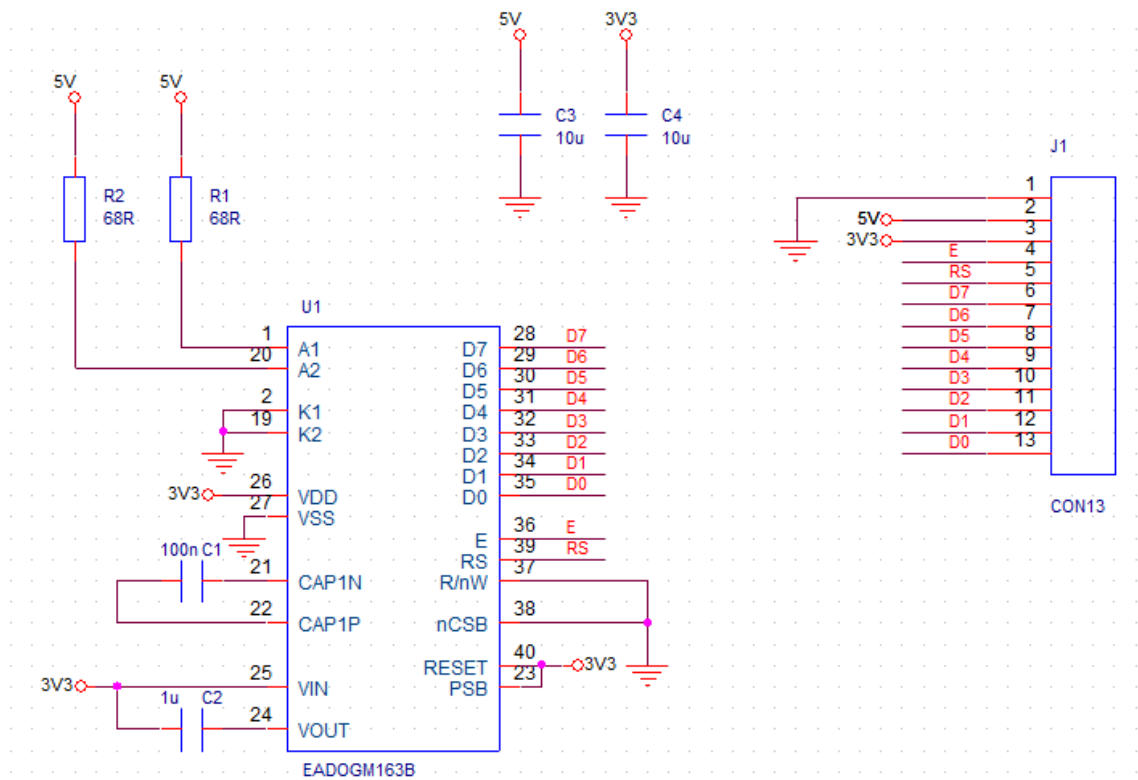


Schéma zapojení LCD

9.3 Seznam součástek

Základní deska

Položka	Reference	Hodnota	Popis
1	R1	20 k Ω	R0805
2	R2	1,6 M Ω	R1206
3	R3	1,6 M Ω	R1206
4	R4	1 Ω	R2512
5	R5	1 k Ω	R0805
6	R6	1,6 M Ω	R1206
7	R8	180 k Ω	R0805
8	R9	10 Ω	R0805
9	R10	10 k Ω	R0805
10	R11	100 k Ω	trimr
11	R12	680 V	varistor
12	R13	6,8 k Ω	R1206
13	R19	200 k Ω	THT 3W
14	R21	1,8 k Ω	THT 3W
15	R29	39 Ω	THT 3W
16	R26	360 Ω	R1206
17	R27	360 Ω	R1206
18	R28	280 Ω	R1206
19	R30	30 k Ω	R1206
20	C1	10 pF / 50V	C0805
21	C4	10 nF / 1kV	keramický kondenzátor
22	C5	27 uF / 400 V	hliníkový elektrolytický kondenzátor
23	C6	27 uF / 400 V	hliníkový elektrolytický kondenzátor
24	C7	180 nF / 50V	C0805
25	C8	100 uF / 50 V	hliníkový elektrolytický kondenzátor
26	C9	100 nF / 50V	C0805
27	C10	330 uF / 50V	hliníkový elektrolytický kondenzátor
28	C11	100 uF / 50 V	hliníkový elektrolytický kondenzátor
29	C12	100 uF / 50 V	hliníkový elektrolytický kondenzátor
30	C13	100 nF / 50V	C0805
31	L1	1 mH / 0,74 A	MSS1260
32	D1	ES3J	600 V / 3A; SMC
33	D2	STTH112	1200 V / 1 A; SMA
34	D3	1,5KE 15A	Transil 16 V; DO - 201
35	D4	ES3J	600 V / 3A; SMC
36	D5	ES3J	600 V / 3A; SMC
37	D6	BZW06-273	Transil 640 V; DO - 15; 2x transil seriově
38	Q1	STP8NK100Z	1000 V / 6,5 A; TO - 220

39	Q2	STP8NK100Z	1000 V / 6,5 A; TO - 220
40	Q3	KSC5027OTU	800 V / 3 A; TO - 220
41	Q4	KSC5027OTU	800 V / 3 A; TO - 220
42	Q5	KSC5027OTU	800 V / 3 A; TO - 220
43	U1	UC3843	PWM controller; DIP - 8
44	J1		Konektor pro připojení napájení
45	J2		Konektor pro připojení procesoru
46	J3		Konektor pro připojení klávesnice
47	J5		Konektor pro připojení napájecího modulu
48	J6		Konektor pro připojení umělého svalu
49	J7		Konektor pro připojení LCD
50	J8		Konektor pro připojení cívky relé
51	J9		Konektor pro připojení LED

Napájecí modul

Položka	Reference	Hodnota	Popis
1	C1	10 nF / 50 V	C0805
2	C2	82 pF / 50 V	C0805
3	C3	10 uF / 16 V	C1206
4	C4	10 uF / 16 V	C1206
5	C5	10 uF / 16 V	C1206
6	C6	100 nF / 50 V	C0805
7	C7	1 uF / 50 V	C1206
8	C8	1 uF / 50 V	C1206
9	C9	100 nF / 50 V	C0805
10	C10	1 uF / 50 V	C1206
11	C11	100 nF / 50V	C0805
12	D1	STPS2L40	40 V / 2 A; SMB
13	J1		Konektor pro připojení k základní desce
14	L1	120 uH / 1,6 A	MSS1260
15	R1	11 kΩ	R0805
16	R2	12 kΩ	R0805
17	R3	4,7 kΩ	R0805
18	R4	1 kΩ	R0805
19	U1	L5970	Kontroler pro snižující měnič; SO-8
20	U2	L7812CV	Lineární stabilizátor 12V; TO-220
21	U3	L1117	Lineární stabilizátor 3,3 V; SOT-223

Generátor

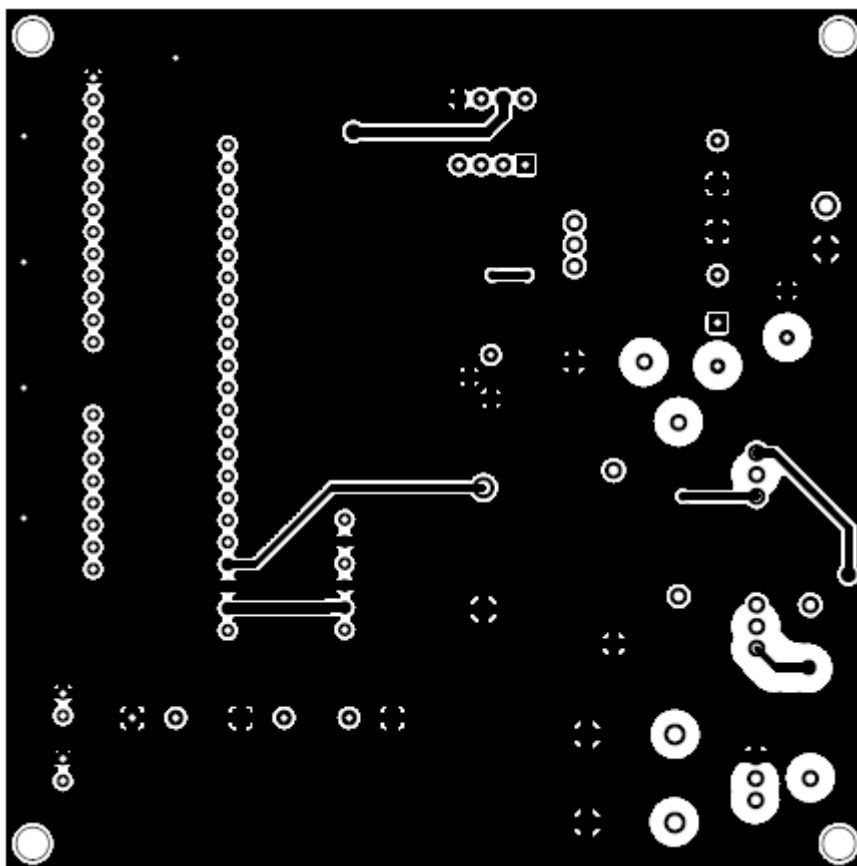
Položka	Reference	Hodnota	Popis
1	C2	100 nF / 50 V	C0805
2	C3	100 nF / 50 V	C0805
3	C4	100 nF / 50 V	C0805

4	C5	10 uF / 16 V	C1206
5	C6	100 nF / 50 V	C0805
6	C7	100 nF / 50 V	C0805
7	C8	100 nF / 50 V	C0805
8	C9	100 nF / 50 V	C0805
9	C10	1 uF / 50 V	C1206
10	C11	10 uF / 16 V	C1206
11	J1		Programovací konektor mikrokontroléru
12	J2		Konektor pro připojení k základní desce
13	Q1	2N7002	60 V / 300 mA; SOT-23
14	Q2	2N7002	60 V / 300 mA; SOT-23
15	R1	10 kΩ	R0805
16	R2	150 kΩ	R0805
17	R3	15 kΩ	R0805
18	R4	15 kΩ	R0805
19	R5	5 kΩ	R0805
20	R6	1 kΩ	R0805
21	R7	10 kΩ	R0805
22	R8	2,5 kΩ	R0805
23	R9	150 kΩ	R0805
24	R10	150 kΩ	R0805
25	R11	150 kΩ	R0805
26	R12	150 kΩ	R0805
27	U1	STM32F031K6T6	mikrokontrolér; LQFP32
28	U2	UA741	operační zesilovač; SO-8
29	U3	TL431	napěťové reference; SO-8
30	U4	AD5241	digitální potenciometr; 10 kΩ; SOIC-14
31	U5	AD5241	digitální potenciometr; 100 kΩ; SOIC-14
32	U6	TC1320EOA	D/A převodník; SO-8

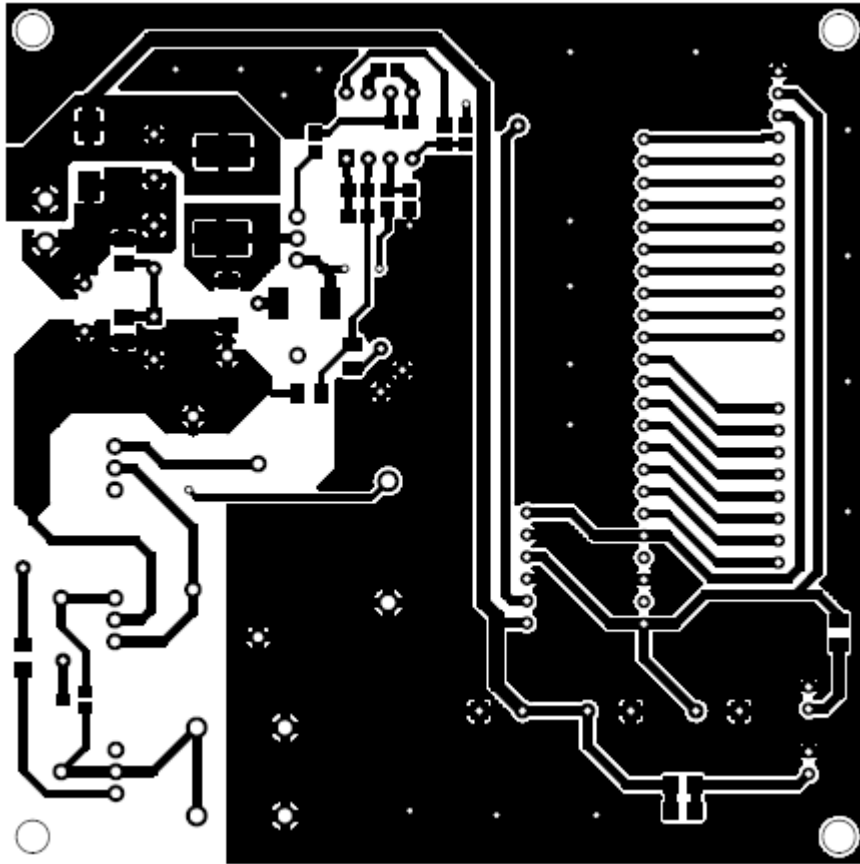
LCD

Položka	Reference	Hodnota	Popis
1	C1	100 nF / 50 V	C0805
2	C2	1 uF / 50 V	C1206
3	C3	10 uF / 16 V	C1206
4	C4	10 uF / 16 V	C1206
5	J1		Konektor pro připojení ovládacích vodičů
6	R1	68 Ω	R1206
7	R2	68 Ω	R1206
8	U1	EADOGM163B	display

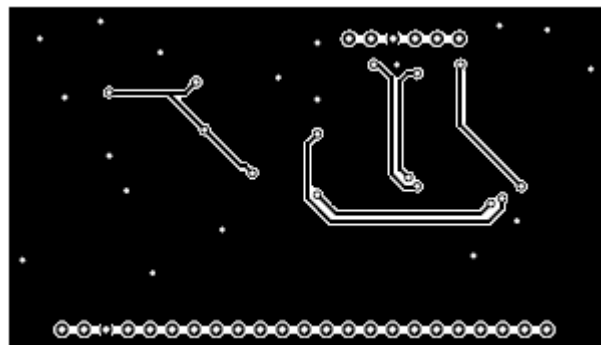
9.4 Motiv plošných spojů



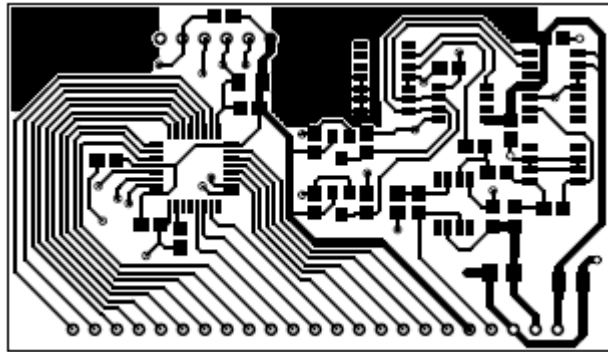
Základní deska spodní strana



Základní deska horní strana



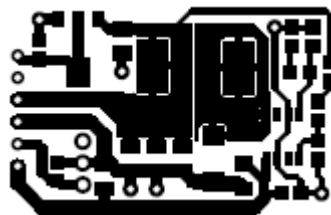
Generátor spodní strana



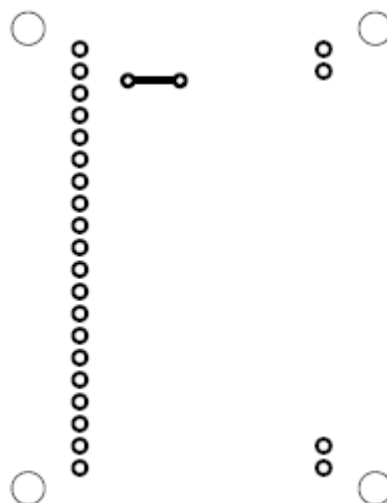
Generátor horní strana



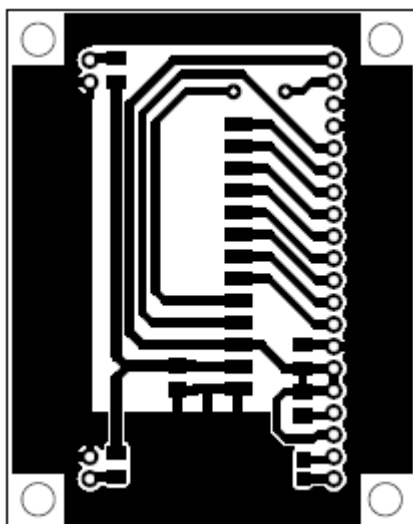
Napájecí modul spodní strana



Napájecí modul horní strana



LCD spodní strana



LCD horní strana

9.5 Schéma zapojení přístrojové krabice

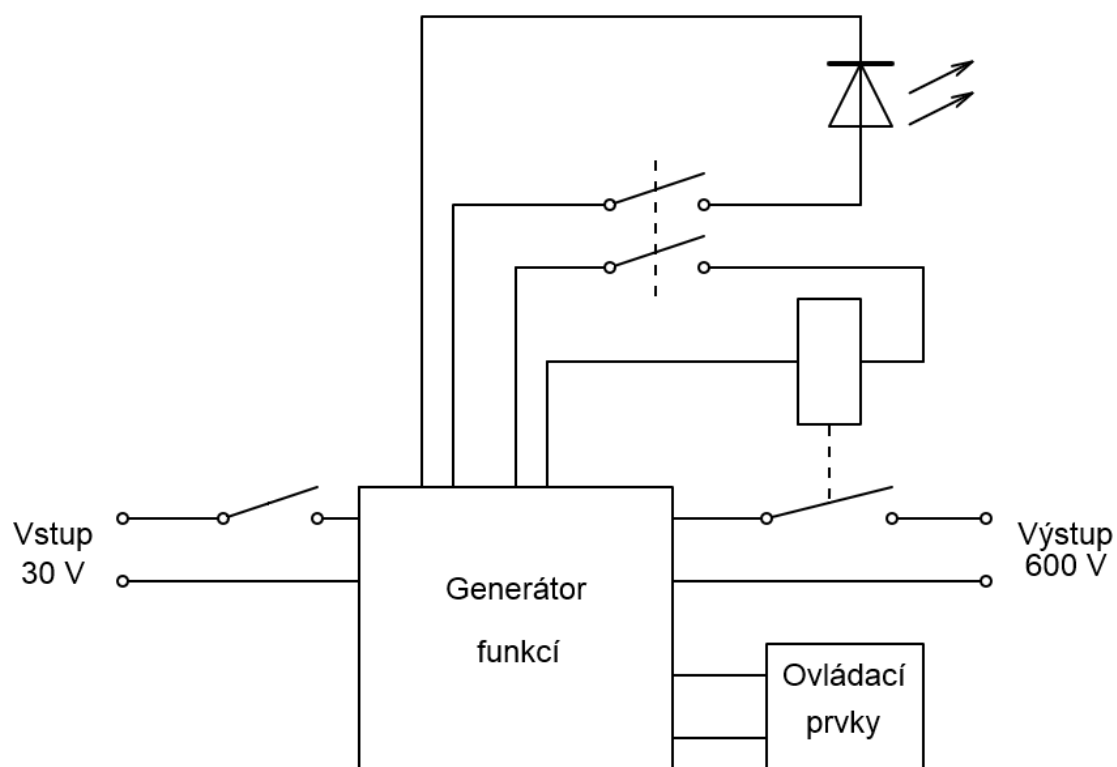
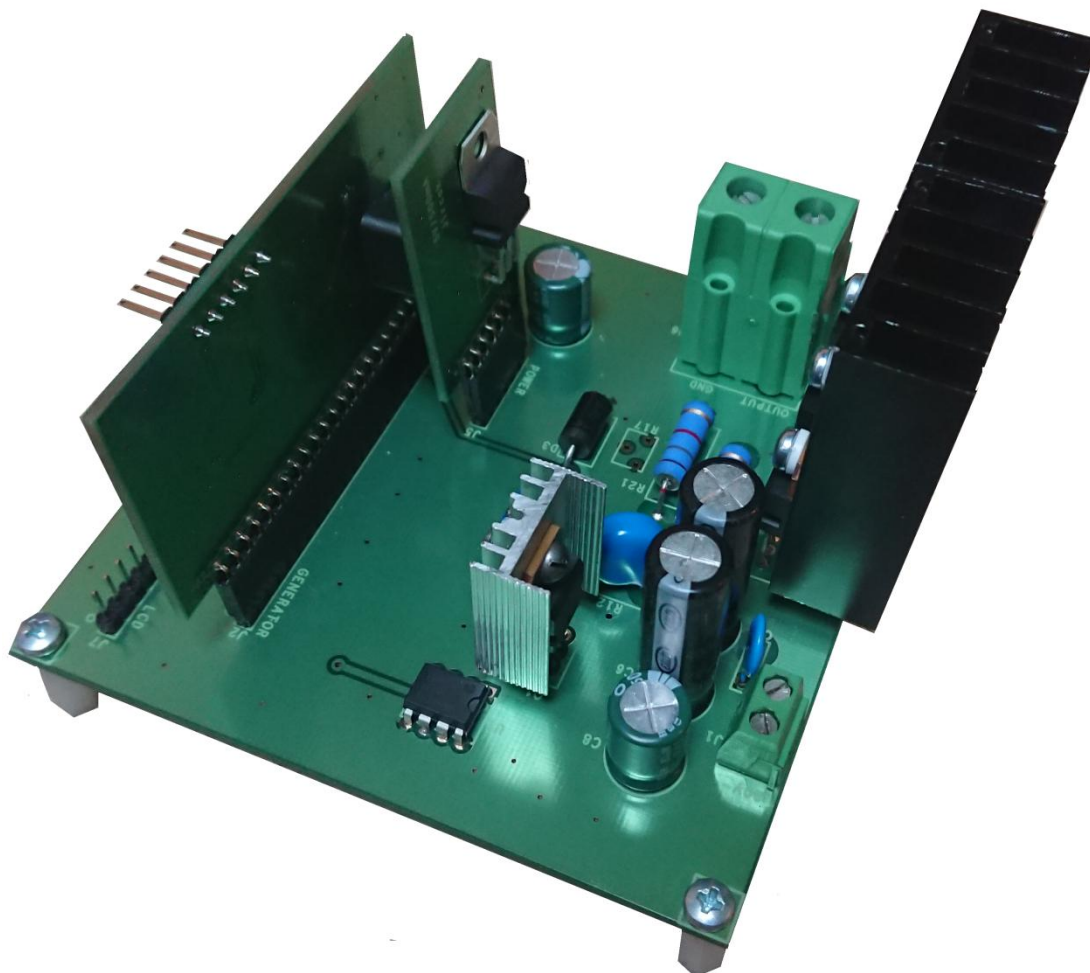
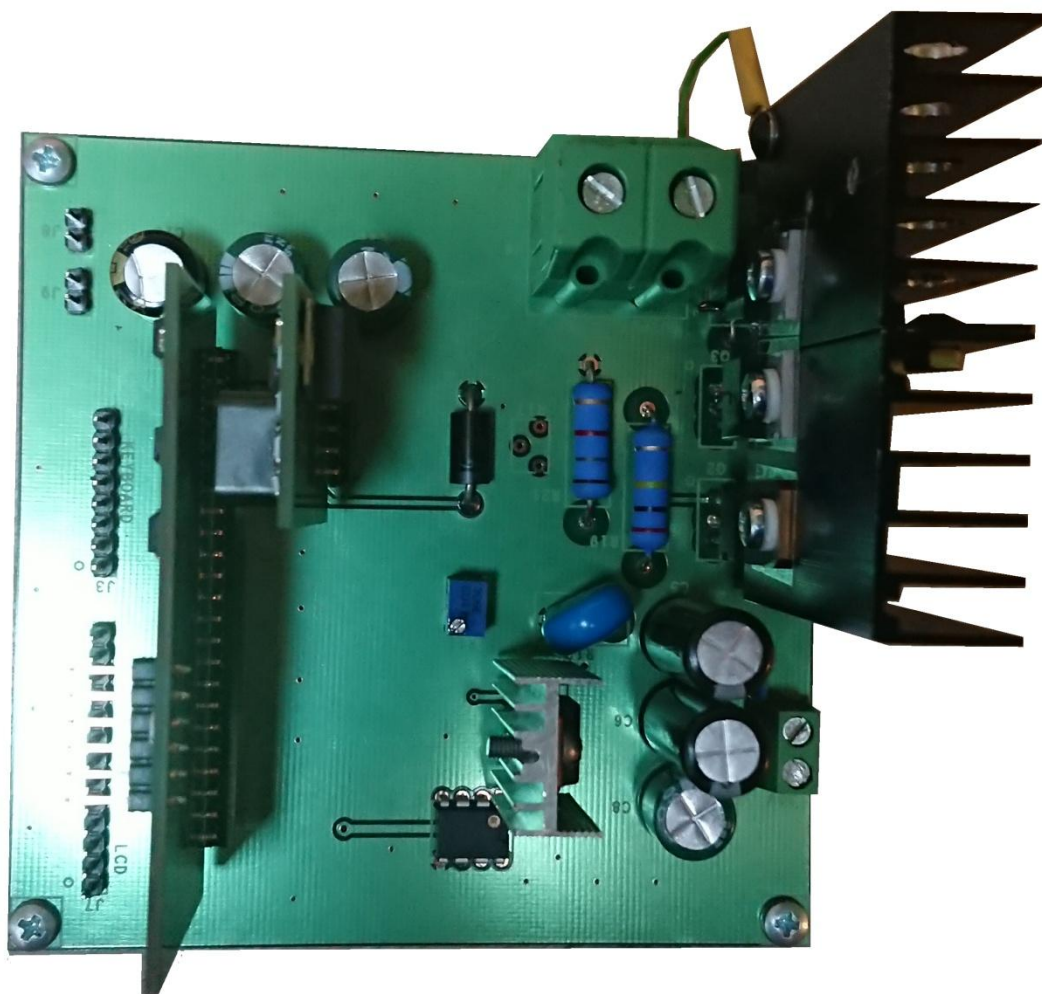


Schéma zapojení přístrojové krabice zařízení

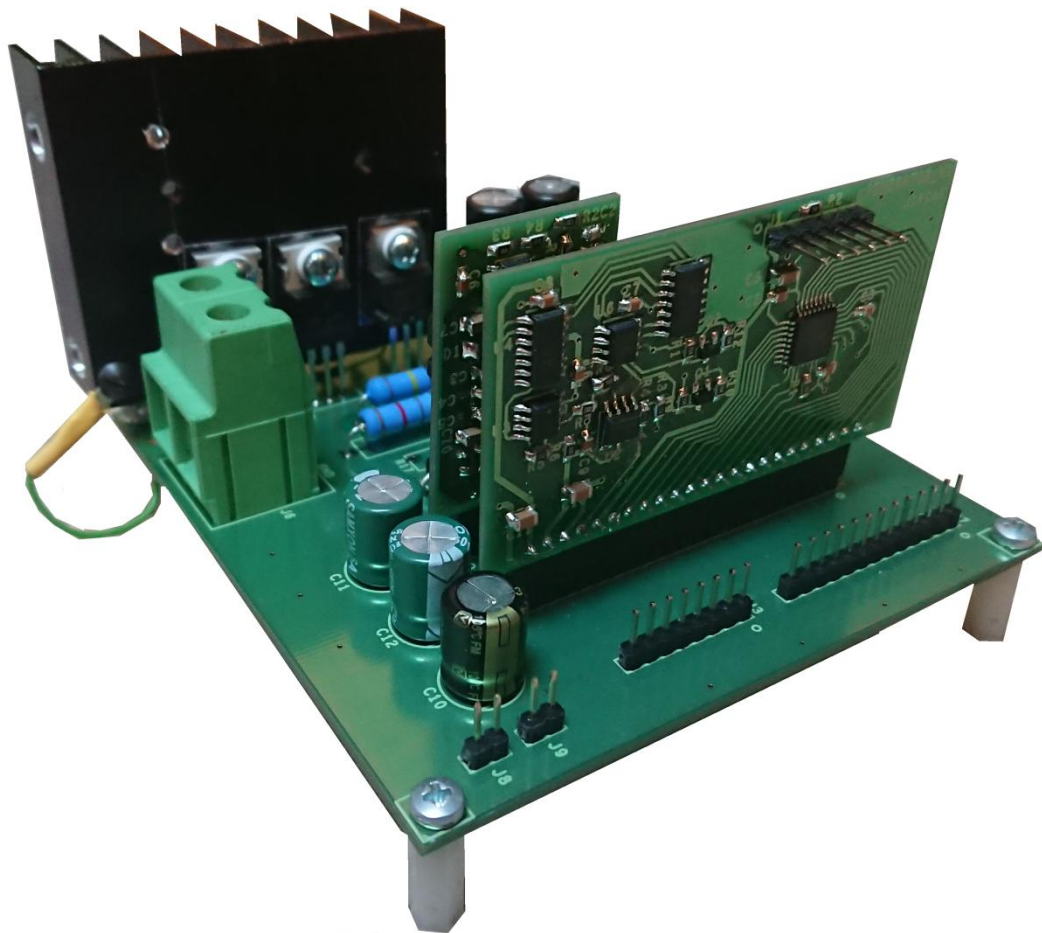
9.6 Fotografie desek plošných spojů



Boční pohled

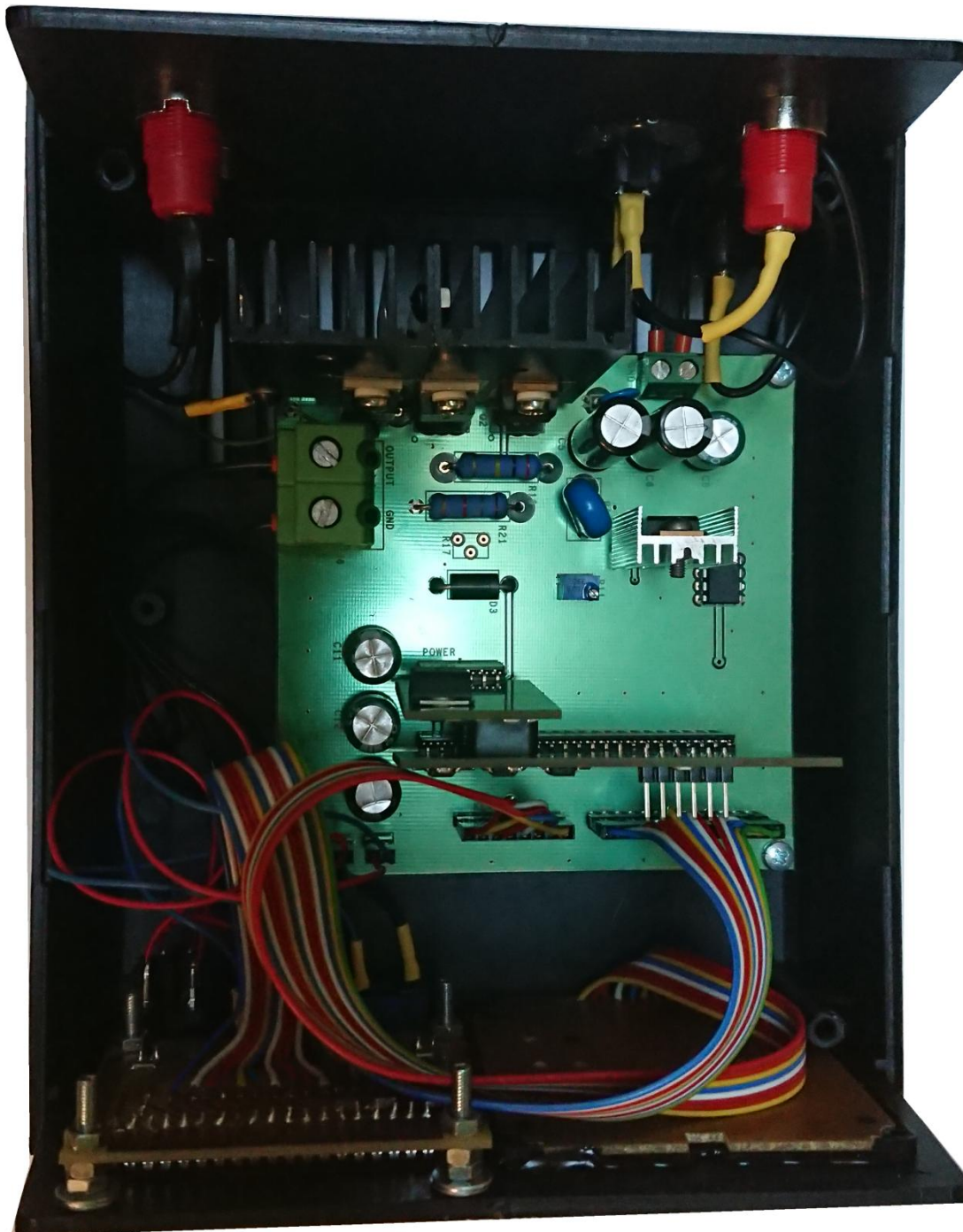


Horní pohled



Detail na DPS generátoru

9.7 Fotografie zařízení



Uspořádání přístrojové krabice



Přední pohled



Zadní pohled

9.8 Tabulky naměřených hodnot

Zatěžování snižujícího měniče napájecího modulu

U_n (V)	I_n (mA)	P_n (mW)	U_v (V)	I_v (mA)	P_v (mW)	η (%)
30,0	8,5	255,0	4,6	0,0	0,0	0,0
30,0	10,4	312,0	4,6	6,8	31,4	10,1
30,0	11,2	336,0	4,6	13,4	61,9	18,4
30,0	12,9	385,5	4,6	19,6	90,5	23,5
30,0	15,3	457,5	4,6	34,4	158,3	34,6
30,0	18,3	548,1	4,6	46,2	212,1	38,7
30,0	25,2	756,3	4,6	86,6	394,0	52,1
30,0	27,8	833,7	4,5	103,4	464,3	55,7
30,0	37,9	1136,1	4,4	155,0	683,6	60,2
30,0	53,2	1597,2	4,2	234,4	991,5	62,1
30,0	73,1	2191,8	4,2	332,0	1381,1	63,0
30,0	102,3	3069,6	4,1	493,0	2021,3	65,8

Zatěžování zvyšujícího měniče zesilovače

U _v (V)	I _v (mA)	U _n (V)	I _n (mA)	P _n (W)	P _v (W)	η (%)
610,0	0,0	30,0	43,0	1,3	0,0	0,0
608,0	3,4	30,0	126,0	3,8	2,0	54,0
606,0	6,7	30,0	198,0	5,9	4,1	68,8
605,0	10,1	30,0	272,0	8,2	6,1	74,9
603,0	13,4	30,0	348,0	10,4	8,1	77,4
600,0	15,4	30,0	392,0	11,8	9,3	78,7
599,0	18,8	30,0	480,0	14,4	11,3	78,3
596,0	22,7	30,0	584,0	17,5	13,5	77,2
585,0	28,6	30,0	792,0	23,8	16,7	70,5
518,0	35,4	30,0	900,0	27,0	18,4	68,0

Zatěžování sinového průběhu odporovou zátěží (1. část)

R (kΩ)	U1 (dBV)	U2 (dBV)	U3 (dBV)	U4 (dBV)	U5 (dBV)
500,0	41,0	15,4	5,4	-3,8	-1,8
180,0	40,2	14,6	5,4	-5,8	-3,8
90,0	39,8	14,2	5,2	-5,8	-3,8
60,0	39,6	13,3	4,9	-5,8	-3,8
31,0	39,0	10,2	3,4	-5,8	-4,6
25,0	38,6	6,2	6,2	-2,2	-7,0
20,0	36,2	6,2	-0,2	-8,6	-9,4
15,0	33,8	8,6	-8,6	-8,6	-13,4
10,0	31,4	7,4	-2,2	-3,8	-13,4
5,0	24,6	1,4	-7,0	-13,4	-9,8

Zatěžování sinového průběhu odporovou zátěží (2. část)

U1 (V)	U2 (V)	U3 (V)	U4 (V)	U5 (V)	THD (%)
112,2	5,9	1,9	0,6	0,8	5,6
102,3	5,4	1,9	0,5	0,6	5,6
97,7	5,1	1,8	0,5	0,6	5,6
95,5	4,6	1,8	0,5	0,6	5,3
89,1	3,2	1,5	0,5	0,6	4,1
85,1	2,0	2,0	0,8	0,4	3,6
64,6	2,0	1,0	0,4	0,3	3,6
49,0	2,7	0,4	0,4	0,2	5,6
37,2	2,3	0,8	0,6	0,2	6,9
17,0	1,2	0,4	0,2	0,3	7,7

Zatěžování sinového průběhu kapacitní zátěží (1. část)

C (nF)	U1 (dBV)	U2 (dBV)	U3 (dBV)	U4 (dBV)	U5 (dBV)
0,0	41,0	15,4	5,4	-3,8	-1,8
10,0	41,0	16,6	8,2	-8,6	-13,4
30,0	41,0	16,6	6,6	-5,0	-12,2
60,0	41,0	15,8	3,8	-3,0	-3,8
100,0	41,0	16,2	5,0	-3,8	-3,0
330,0	41,0	14,6	2,2	-1,8	-4,6
500,0	41,0	15,4	4,6	-4,2	-7,4
1000,0	39,8	6,6	15,0	3,0	3,0
1500,0	38,2	3,0	15,8	2,2	6,2
2000,0	35,4	-6,6	13,0	-10,6	4,2

Zatěžování sinového průběhu kapacitní zátěží (2. část)

U1 (V)	U2 (V)	U3 (V)	U4 (V)	U5 (V)	THD (%)
112,2	5,9	1,9	0,6	0,8	5,6
112,2	6,8	2,6	0,4	0,2	6,5
112,2	6,8	2,1	0,6	0,2	6,3
112,2	6,2	1,5	0,7	0,6	5,7
112,2	6,5	1,8	0,6	0,7	6,0
112,2	5,4	1,3	0,8	0,6	5,0
112,2	5,9	1,7	0,6	0,4	5,5
97,7	2,1	5,6	1,4	1,4	6,5
81,3	1,4	6,2	1,3	2,0	8,3
58,9	0,5	4,5	0,3	1,6	8,1

Zatěžování obdélníkového průběhu odporovou zátěží

R (kΩ)	Ušš (V)	tn (us)	ts (us)
500,0	306,0	16,0	9,0
180,0	302,0	16,8	9,6
90,0	300,0	17,4	9,8
60,0	294,0	17,8	10,2
31,0	276,0	20,0	10,4
25,0	268,0	20,4	10,4
20,0	212,0	19,6	8,8
15,0	158,0	15,6	7,2
10,0	120,0	10,0	6,0
5,0	56,0	7,2	4,8

Zatěžování obdélníkového průběhu kapacitní zátěží

C (nF)	Ušš (V)	tn (us)	ts (us)
0,0	306,0	16,0	9,0
10,0	306,0	132,0	156,0
30,0	306,0	368,0	424,0
60,0	306,0	760,0	860,0
100,0	306,0	2500,0	3600,0
330,0	306,0	7100,0	7600,0
500,0	306,0	11800,0	12400,0
1000,0	306,0	22000,0	22800,0
1500,0	306,0	32000,0	34790,0

Zatěžování pilového průběhu odporovou zátěží (1. část)

R (kΩ)	Ušš (V)	U1 (dBV)	U2 (dBV)	U3 (dBV)	U4 (dBV)	U5 (dBV)	U6 (dBV)	U7 (dBV)
500,0	296,0	36,6	29,4	26,2	24,6	22,2	19,8	19,0
180,0	296,0	37,0	29,0	26,6	24,6	22,0	20,2	19,0
90,0	296,0	36,2	29,0	26,2	24,2	22,2	19,8	18,6
60,0	284,0	36,2	29,0	26,2	24,6	22,2	19,8	18,6
31,0	288,0	35,8	28,6	25,8	23,8	21,4	19,0	18,2
25,0	258,0	34,6	27,8	25,0	22,6	20,6	18,2	18,2
20,0	224,0	32,6	25,8	23,8	21,0	19,0	16,6	16,2
15,0	170,0	33,0	26,2	23,4	21,4	19,4	17,0	15,8
10,0	128,0	27,0	20,6	18,6	15,8	13,8	11,0	11,0
5,0	46,0	20,2	13,8	11,0	8,2	8,2	5,8	3,8

Zatěžování pilového průběhu odporovou zátěží (2. část)

U1 (V)	U2 (V)	U3 (V)	U4 (V)	U5 (V)	U6 (V)	U7 (V)	THD (%)
67,6	29,5	20,4	17,0	12,9	9,8	8,9	64,8
70,8	28,2	21,4	17,0	12,6	10,2	8,9	61,3
64,6	28,2	20,4	16,2	12,9	9,8	8,5	65,9
64,6	28,2	20,4	17,0	12,9	9,8	8,5	66,3
61,7	26,9	19,5	15,5	11,7	8,9	8,1	65,4
53,7	24,5	17,8	13,5	10,7	8,1	8,1	68,4
42,7	19,5	15,5	11,2	8,9	6,8	6,5	70,8
44,7	20,4	14,8	11,7	9,3	7,1	6,2	69,0
22,4	10,7	8,5	6,2	4,9	3,5	3,5	74,0
10,2	4,9	3,5	2,6	2,6	1,9	1,5	73,1

Zatěžování pilového průběhu kapacitní zátěží (1. část)

C (nF)	Ušš (V)	U1 (dBV)	U2 (dBV)	U3 (dBV)	U4 (dBV)	U5 (dBV)	U6 (dBV)	U7 (dBV)
0,00	296,00	36,60	29,40	26,20	24,60	22,20	19,80	19,00
10,00	296,00	36,60	29,40	27,00	24,60	22,20	19,80	19,00
30,00	296,00	36,60	29,40	27,00	25,00	23,00	20,20	19,00
60,00	296,00	36,60	29,40	27,00	25,00	22,60	20,20	19,40
100,00	296,00	36,60	29,40	27,00	24,60	22,60	20,20	19,80
330,00	280,00	36,60	29,00	25,80	23,80	19,80	16,60	14,20
500,00	274,00	36,60	28,20	24,60	21,40	16,60	11,80	7,00
1000,00	246,00	36,20	26,20	20,20	11,80	2,60	2,60	2,60
1500,00	218,00	35,80	23,40	12,20	6,20	6,20	3,80	-5,80
2000,00	174,00	34,20	17,40	8,60	8,20	-1,40	-2,20	-7,00

Zatěžování pilového průběhu kapacitní zátěží (2. část)

U1 [V]	U2 [V]	U3 [V]	U4 [V]	U5 [V]	U6 [V]	U7 [V]	THD [%]
67,61	29,51	20,42	16,98	12,88	9,77	8,91	64,76
67,61	29,51	22,39	16,98	12,88	9,77	8,91	66,17
67,61	29,51	22,39	17,78	14,13	10,23	8,91	67,33
67,61	29,51	22,39	17,78	13,49	10,23	9,33	67,17
67,61	29,51	22,39	16,98	13,49	10,23	9,77	66,85
67,61	28,18	19,50	15,49	9,77	6,76	5,13	58,83
67,61	25,70	16,98	11,75	6,76	3,89	2,24	50,22
64,57	20,42	10,23	3,89	1,35	1,35	1,35	36,06
61,66	14,79	4,07	2,04	2,04	1,55	0,51	25,46
51,29	7,41	2,69	2,57	0,85	0,78	0,45	16,35