



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Generátor vysokonapětového pulzu

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

Autor práce: **Bc. Lukáš Hliněný**
Vedoucí práce: Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

The high voltage pulse generator

Diploma thesis

Study programme: N2612 – Electrical Engineering and Informatics
Study branch: 3906T001 – Mechatronics

Author: **Bc. Lukáš Hliněný**
Supervisor: Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.
Institute of Mechatronics and Computer Engineering



Zadání diplomové práce

Generátor vysokonapětového pulzu

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Hliněný**
Osobní číslo: M19000170
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Mechatronika
Zadávací katedra: Ústav mechatroniky a technické informatiky
Akademický rok: **2021/2022**

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku vysokonapětových zdrojů a 32bitových jednočipových procesorů ARM.
2. Navrhněte přístroj pro generování nevýkonového napětového pulzu 200 – 500 V / 5-100 us pro ultrazvukový měnič s možností nastavení jednotlivých parametrů pulzu pomocí klávesnice a displeje. Pulz aktivujte z předního panelu nebo pomocí externího logického vstupu.
3. Přístroj realizujte.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby dokumentace
40–50 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] LYSENKO, Vladimír. *VN zdroje: zdroje vysokého napětí pro experimenty, pokusy a měřicí přístroje, ochranné pomůcky*. Praha: BEN – technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-235-0.
- [2] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje*. Praha: BEN – technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-56-2.
- [3] Firemní literatura firem ST (procesory ARM STM32), Vishay, Infineon, NXP (vysokonapěťové prvky).

Vedoucí práce:

Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání práce:

12. října 2021

Předpokládaný termín odevzdání:

16. května 2022

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Josef Černožorský, Ph.D.
vedoucí ústavu

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

15. května 2022

Bc. Lukáš Hliněný

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Lubomírovi Slavíkovi, Ph.D. za trpělivé vedení mé diplomové práce a také za cenné rady, které mi pomohli při zpracování této práce. Zvláště chci poděkovat svému dlouholetému příteli Ing. Michalovi Kočí za konzultace a podporu při realizaci této práce. Zároveň chci poděkovat své rodině za podporu při realizaci této práce a také za podporu po celou dobu mého studia.

Abstrakt

Tato práce pojednává o návrhu, realizaci a reálném testování speciálního generátoru krátkých vysokonapěťových pulzů. Vyrobený generátor bude sloužit jako budič piezoelektrického vysílače pro dlouhodobé monitorování horninového masivu. Před samotnou realizací bylo pomocí experimentu otestováno několik driverů pro zajištění velmi rychlého sepnutí a rozepnutí výstupních tranzistorů v řádu nanosekund. Generátor je zhotoven jednak ve verzi autonomního přístroje, jednak v provedení na DIN lištu jako součást geofyzikální aparatury SGI 1. Srdcem navrhovaného zařízení je mikrokontrolér řady STM32. Součástí realizace je návrh zapojení a plošného spoje, osazení vybranými součástkami, naprogramování a testování. Výsledné zařízení umožňuje manuální ovládání, vzdálené ovládání pomocí externího pulzu nebo po sběrnici USB.

Klíčová slova

Generátor pulzů, mikrokontrolér s jádrem ARM, driver pro řízení můstku, push-pull spínač, DC/DC konvertor, tranzistory MOSFET, univerzální sériová sběrnice (USB)

Abstract

This thesis aims to design, implement, and test a unique generator of short high-voltage pulses. The fabricated generator will serve as a driver for the piezoelectric transmitter for long-term monitoring of rock. Several H-bridge drivers were tested before realizing the main board to ensure very fast switching on and off of the output transistors in nanoseconds. The generator is made in two versions, a separate device and a DIN rail version as part of the geophysical apparatus SGI 1. The generator control provides a microcontroller series STM32. The generator design includes preparing PCB (printed circuit board), soldering of selected components, programming of MCU, and testing. The final device allows manual control and remote control via external pulse or USB.

Keywords

Pulse generator, microcontroller with ARM core, bridge control driver, push-pull switch, DC/DC converter, transistor MOSFET, universal serial bus (USB)

Obsah

Seznam obrázků	12
Seznam tabulek	16
1 Úvod.....	17
2 Analýza trhu	18
2.1 Pulzní přijímač Olympus 5077PR	18
2.2 Ultrazvukový defektoskop EPOCH 650.....	20
2.3 Elektrický pulzní generátor přepětí EOS-500	20
2.4 Pulzní generátor AVL-3A-C	21
2.5 Generátor přechodných pulzů 8282-1	22
2.6 Vyhodnocení analýzy	22
3 Teoretický rozbor	23
3.1 Spínací prvky.....	24
3.1.1 Tranzistory BJT.....	25
3.1.2 Tranzistory MOSFET.....	26
3.1.3 Tranzistory IGBT	29
3.2 Mikrokontroléry.....	30
3.2.1 Mikrokontroléry AVR.....	33
3.2.2 Mikrokontroléry PIC	33
3.2.3 Mikrokontroléry ARM	33
3.3 Napájecí zdroje	35
3.3.1 Lineární regulátory	35
3.3.2 Spínané regulátory.....	36
3.4 Operační zesilovače pro měření	39
3.4.1 Invertující zesilovač	39
3.4.2 Neinvertující zesilovač – sledovač napětí	39
3.5 Ultrazvukové měniče.....	40
3.5.1 Kontaktní převodník.....	40
3.5.2 Snímač příčné vlny s kolmým dopadem	40
4 Postup a realizace	41
4.1 Blokové schéma.....	41

4.2	Volba spínacího prvku a jeho testování	42
4.2.1	Výběr tranzistoru	42
4.2.2	Výběr driveru (budiče).....	43
4.2.3	Testovací přípravek.....	44
4.2.4	Výsledky testování.....	46
4.3	Volba mikrokontroléru.....	48
4.4	Volba způsobu napájení	49
4.5	Návrh schéma zapojení	52
4.5.1	Zapojení mikrokontroléru	52
4.5.2	Zapojení napájecí části.....	53
4.5.3	Návrh výkonové části	53
4.5.4	Volba hlavního kondenzátoru	54
4.5.5	Návrh zapojení USB komunikace.....	55
4.6	Ovládací panel.....	56
4.7	Návrhy plošných spojů.....	56
4.7.1	Hlavní deska	56
4.7.2	Ovládací panel	57
4.8	Osazení testovacího vzorku.....	58
4.9	Programování	59
4.9.1	Konfigurace MCU v CubeMX	59
4.9.2	Program.....	59
4.9.3	Ovládání pomocí USB	61
4.10	Měření výstupních průběhů.....	62
4.10.1	Měření generovaného pulzu.....	63
4.10.2	Kontrolní měření odezvy na generovaný pulz	64
4.10.3	Měření doby náběhu a doběhu pulzu	65
4.10.4	Srovnání realizovaného generátoru s Olympus 5077PR	66
4.11	Měření EMC	66
4.12	Finální kompletace	67
4.12.1	Generátor pulzů v krabičce pro montáž na DIN lištu	68
4.12.2	Generátor pulzů v krabičce Bopla	68
	Závěr	71

Použitá literatura	72
Přílohy	74
I. Kompletní schéma zapojení MCU	74
II. Kompletní schéma zapojení napájecí části	75
III. Kompletní schéma zapojení vysokonapěťové části.....	76
IV. Výkres předního čela krabičky Bopla	77
V. Výkres zadního čela krabičky Bopla	78
VI. Kalkulace – Hlavní deska	79
VII. Kalkulace – Ovládací modul	81
VIII. Kalkulace – Kompletace do krabiček	81
IX. Kalkulace – Testovací přípravek	82
X. Obsah přiloženého CD.....	83

Seznam symbolů, zkratek a termínů

AC	střídavý (Alternating Current)
ARM	označení architektury procesorů
BNC	bajonetový konektor (Bayonet Neill Concelman)
BJT	bipolární tranzistor (Bipolar Junction Transistor)
DC	stejnoseměrný (Direct Control)
DC/DC	označení převodníku stejnosměrných napětí
DPS	označení pro desku plošných spojů
EMC	elektromagnetická kompatibilita
EOS	elektrické přepětí (Electrical Over-Stress)
FET	označení tranzistoru řízeného polem (Field Effect Transistor)
GND	označení pro zemní svorku (zem)
GPIO	univerzální vstup / výstup (General-Purpose Input/Output)
LCD	displej z tekutých krystalů (Liquid Crystal Display)
LED	elektroluminiscenční dioda (Light-Emitting Diode)
MCU	mikrokontrolér
MIPS	milión instrukcí za sekundu (Million Instructions Per Second)
MOS	označení struktury tranzistoru FET
NPN	označení druhu bipolárního tranzistoru
OSC	označení pro osciloskop
OUT	označení výstupní svorky
OZ	označení pro operační zesilovač
PWM	pulzně šířková modulace (Pulse Width Modulation)
PNP	označení druhu bipolárního tranzistoru
RISC	redukovaná instrukční sada (Reduced Instruction Set Computer)
RESET	označení nulovacího impulsu
SELV	oddělené malé napětí (Separated Extra Low Voltage)
UART	sběrnice sloužící k asynchronnímu sériovému přenosu dat
USB	univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Havarijní stav mostních konstrukcí na průtahu Libercem (zdroj: www.zdopravy.cz)	17
Obrázek 2 - Ručně řízené pulzní přijímače 5072PR, 5073PR a 5077PR (zdroj: www.olympus-ims.com)	18
Obrázek 3 - Zapojení modelu 5077PR v měření průchozího přenosu (zdroj: www.olympus-ims.com)	19
Obrázek 4 - Výstupní obdélníkový pulz z 5077PR (zdroj: www.olympus-ims.com)	19
Obrázek 5 - Ultrazvukový defektoskop EPOCH 650 (zdroj: www.olympus-ims.com)	20
Obrázek 6 - Pulzní generátor přepětí EOS-500 (zdroj: www.esdemc.com)	20
Obrázek 7 - Ukázkový pulz (100 V, 10 μ s) pulzního generátoru EOS-500 (zdroj: www.esdemc.com)	21
Obrázek 8 - Generátor pulzů z řady AVL-3 (zdroj: www.brltest.com)	21
Obrázek 9 - Generátor přechodných pulsů 8282-1 (zdroj: www.solar-emc.com)	22
Obrázek 10 - Základní blokové schéma	23
Obrázek 11 - Základní konfigurace spínačů: a) Pull-Down, b) Pull-Up, c) Push-Pull (zdroj: moodle.fel.cvut.cz)	24
Obrázek 12 - Rozdělení základních typů tranzistorů (7 str. 99)	25
Obrázek 13 - Schématická značka a struktura tranzistoru NPN a PNP (5 str. 72)	25
Obrázek 14 - Tranzistor MOSFET s indukovaným (a, c) a zabudovaným (b, d) kanálem (7 str. 135)	26
Obrázek 15 - Vertikální MOSFET (5 str. 91)	27
Obrázek 16 - Náhradní schéma tranzistoru MOSFET s parazitními vlastnostmi (5 str. 92)	27
Obrázek 17 - Typické zapojení MOSFET driveru v H/2 můstku (zdroj: www.infineon.com)	28
Obrázek 18 - Struktura a schématická značka tranzistoru IGBT (5 str. 96)	29
Obrázek 19 - Srovnání výstupních charakteristik tranzistoru IGBT a MOSFET (zdroj: www.powerselectronicsnews.com)	29
Obrázek 20 - Základní součásti mikrokontroléru (12)	30

Obrázek 21 - Harvardská (vlevo) a Von Neumannova (vpravo) architektura (12).....	31
Obrázek 22 - Schéma zapojení převodníku USB/UART (zdroj: www.ftdichip.com)	32
Obrázek 23 - Ukázka vnitřní struktury mikrokontrolérů AVR (vlevo) a PIC (vpravo) (zdroj: ww1.microchip.com).....	33
Obrázek 24 - Rozdělení rodiny procesorů ARM (zdroj: www.emcu.it)	34
Obrázek 25 - Srovnání jader Cortex-Mx (zdroj: www.arm.com).....	34
Obrázek 26 - Klasifikace napájecích zdrojů	35
Obrázek 27 - Blokové zapojení AC/DC napájecího zdroje s lineárním stabilizátorem .	35
Obrázek 28 - Schéma zapojení jednoduchého sériového stabilizátoru (zdroj: www.vovcr.cz)	36
Obrázek 29 - Blokové zapojení zdroje se spínaným regulátorem (zdroj: moodle.fel.cvut.cz).....	36
Obrázek 30 - Principiální zapojení nábojové pumpy (zdroj: www.analog.com)	37
Obrázek 31 - Principiální schéma zapojení snižujícího měniče napětí (zdroj: moodle.fel.cvut.cz).....	37
Obrázek 32 - Principiální schéma zapojení zvyšujícího měniče napětí (zdroj: moodle.fel.cvut.cz).....	38
Obrázek 33 - Schéma blokujícího DC-DC měniče (Flyback) (zdroj: moodle.fel.cvut.cz).....	38
Obrázek 34 – Neinvertující zesilovač a sledovač napětí (zdroj: eluc.ikap.cz)	39
Obrázek 35 - Kontaktní převodník (18 str. 8).....	40
Obrázek 36 - Snímače příčné vlny s kolmým dopadem (18 str. 17)	40
Obrázek 37 - Návrh blokového schéma.....	41
Obrázek 38 - Vnitřní schéma zapojení (vlevo) a pouzdro TO220FP (vpravo) (zdroj: www.st.com)	42
Obrázek 39 - Schéma zapojení Push-Pull spínače s driverem IRS2103.....	44
Obrázek 40 - Schéma zapojení Push-Pull spínače s driverem IX2113.....	44
Obrázek 41 - Schéma zapojení Push-Pull spínače s driverem NCP5181	44
Obrázek 42 - Návrh plošného spoje pro potřeby otestování driverů	45
Obrázek 43 - Vyrobený a osazený plošný spoj pro testování driverů	45
Obrázek 44 - Průběh z testování driveru NCP5181 (testování pulzu 30 V, 10 μ s).....	46

Obrázek 45 - Průběhy z testování driveru IRS2103 (vlevo testování pulzu 30 V, 10 μ s a vpravo pulzu 30 V, 1 μ s).....	47
Obrázek 46 - Průběhy z testování driveru IX2113 (vlevo testování pulzu 30 V, 10 μ s a vpravo pulzu 30 V, 1 μ s).....	47
Obrázek 47 - Průběhy z testování driveru IX2113 (testování pulzu 400 V, 10 μ s)	47
Obrázek 48 - Pouzdro LQFP-64 (zdroj: www.digikey.com)	49
Obrázek 49 - Transformátor TSL200/002 (zdroj: www.tme.eu)	49
Obrázek 50 - Spínaný napájecí zdroj do zásuvky (vlevo) a na DIN lištu (vpravo) (zdroj: www.kondik.cz).....	50
Obrázek 51 - Ilustrační obrázek měniče HO1-P601V-3C (zdroj: www.mornsun-power.com)	50
Obrázek 52 - Základní zapojení DC-DC měniče HO1-P601V-3C (zdroj: www.mornsun-power.com)	51
Obrázek 53 - Převodní charakteristika ovládacího napětí na výstupní napětí (zdroj: www.mornsun-power.com)	51
Obrázek 54 - Schéma zapojení mikrokontroléru.....	52
Obrázek 55 - Schéma zapojení napájecí části	53
Obrázek 56 - Schéma zapojení výkonové části.....	53
Obrázek 57 - Schéma zapojení kritické části v programu LTspice.....	54
Obrázek 58 - Výstupní průběhy testovaných kondenzátorů	54
Obrázek 59 - Měření parametrů ultrazvukového převodníku V1548	55
Obrázek 60 - Schéma zapojení USB komunikace	55
Obrázek 61 - Schéma zapojení ovládacího panelu.....	56
Obrázek 62 - Návrh hlavního plošného spoje	57
Obrázek 63 - Plošný spoj ovládacího panelu	57
Obrázek 64 - Osazená hlavní deska	58
Obrázek 65 - Osazený ovládací panel	58
Obrázek 66 - Konfigurace mikrokontroléru STM32F410R8.....	59
Obrázek 67 - Vývojový diagram.....	60
Obrázek 68 - LabVIEW, ukázka programu	61
Obrázek 69 - LabVIEW, hlavní panel.....	62
Obrázek 70 – Testovací měření průchozího přenosu v betonovém obrubníku.....	62
Obrázek 71 - Výsledný průběh pulzu (400 V, 10 μ s) bez zátěže.....	63

Obrázek 72 - Výsledný průběh pulzu (400 V, 10 μ s) s připojeným převodníkem.....	63
Obrázek 73 - Generování záporného pulzu (−400 V, 10 μ s) otočením polarity	64
Obrázek 74 - Zaznamenaný průběh z převodníku	64
Obrázek 75 - Zaznamenaný průběh z převodníku s delší časovou základnou	65
Obrázek 76 - Měření doby náběhu pulzu (400 V, 10 μ s)	65
Obrázek 77 - Měření doby doběhu pulzu (400 V, 10 μ s).....	65
Obrázek 78 - Fotografie z měření EMC v bez odrazové komoře	66
Obrázek 79 - Výsledek měření EMI (vyzařování rušení do okolí).....	67
Obrázek 80 - Generátor pulzů v krabici pro montáž na DIN lištu	68
Obrázek 81 - Vyřezání předního čela laserem.....	68
Obrázek 82 - Přední panel generátoru pulzů	69
Obrázek 83 - Zadní panel generátoru pulzů.....	69
Obrázek 84 - Vnitřní uspořádání komponent v krabici Bopla	70
Obrázek 85 - Vnitřní zapojení komponentů v krabici Bopla	70

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Základní parametry tranzistoru STP10NK80ZFP	42
Tabulka 2 - Srovnání technických parametrů vybraných driverů	43
Tabulka 3 - Souhrn výsledků funkčnosti driverů	46
Tabulka 4 - Základní parametry mikrokontroléru STM32F410R8T6	48
Tabulka 5 - Parametry DC-DC měniče HO1-P601V-3C	51
Tabulka 6 - Příkazy pro USB komunikaci	61
Tabulka 7 - Srovnání parametrů realizovaného generátoru s Olympus 5077PR	66

1 Úvod

S nástupem moderních technologií začaly být kladeny vyšší nároky na bezpečný provoz různých nadzemních i podzemních konstrukcí. Nejčastějšími nadzemními konstrukcemi jsou mostní konstrukce. Nejen u nich je potřeba monitorovat stav jednotlivých nosníků, aby nedošlo k jejich zhroucení. V podzemí je ze stejného důvodu potřeba monitorovat stav horninového masivu, případně jejich podpěry. Pro monitorování se často využívají specializovaná zařízení, která ultrazvukovými signály objevují změny, případně vady zmíněných konstrukcí, pro zamezení havárie.



Obrázek 1 - Havarijní stav mostních konstrukcí na průtahu Libercem (zdroj: www.zdopravy.cz)

Často používanou metodou je měření průchozího přenosu ultrazvukovou vlnou. Takové měření využívá dvou ultrazvukových převodníků. První piezoelektrický převodník je pomocí generátoru pulzů vybuzen vysokým napětím. Druhý převodník zaznamená vzniklou odezvu, podle které numerologové zjistí stav měřeného materiálu. Zmíněný generátor pulzů je v současné době nedostatkovým zařízením, neboť původně používaná zařízení zastarala a nemají vhodnou náhradu. Nedostatek těchto generátorů dokazuje analýza trhu.

Na generátory vysokonapěťových pulzů jsou kladeny vysoké nároky, neboť musí být dodržena jejich bezpečnost i při generování krátkého pulzu o velikosti několikaset voltů. Používané převodníky vyžadují krátké pulzy, řádově desítky mikrosekund. Ačkoliv se může na první pohled zdát takový generátor pulzů jako jednoduché zařízení, opak je pravdou. Použité komponenty musí odolat rychlým dynamickým jevům, které mohou při generování nastat. V neposlední řadě musí být zařízení postaveno z moderních komponentů, které zaručí použitelnost v řádu několika let.

Úkolem této práce je navrhnout a realizovat funkční náhradu zastaralého pulzního generátoru a zároveň dosáhnout lepších parametrů, cenové dostupnosti a nabídnout moderní způsoby ovládání, například v podobě komunikace s počítačem po univerzální sériové sběrnici.

2 Analýza trhu

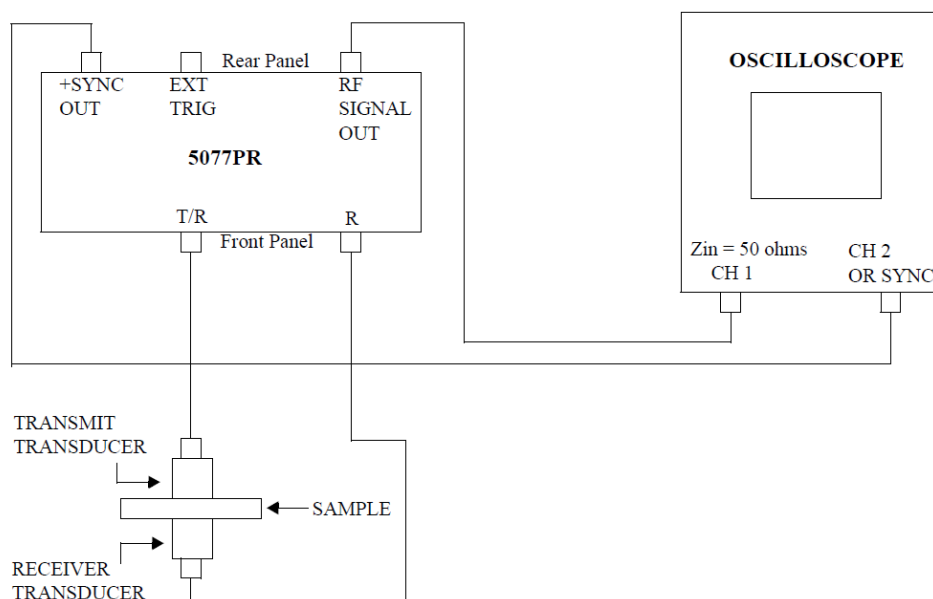
2.1 Pulzní přijímač Olympus 5077PR

Manuálně ovládané ultrazvukové pulzní přijímače Olympus jsou cenově dostupné, spolehlivé a zároveň dokonalým výchozím bodem pro ultrazvukovou detekci vad. Obdobnými větami lákal propagační list výrobce Olympus už v roce 2009. Bohužel jednotlivá zařízení této kategorie postupně zestárla a přestala vyhovovat normám Evropské Unie. Údajně se mají v zařízeních objevovat barvy obsahující látky, které jsou v EU zakázané. Olympus přestal tyto zařízení do EU dovážet. Model 5077PR je stále ještě využíván k buzení piezoelektrického vysílače pro dlouhodobé monitorování horninového masivu. Součástí těchto pulzních přijímačů je zesílení a úprava vzniklého elektrického signálu. Jelikož nebyl společností Olympus stanoven žádný přímý nástupce a nabídka podobných zařízení není příliš dobrá nebo vhodná (viz další podkapitoly analýzy trhu), vnikla potřeba realizovat zdánlivě podobné zařízení, které po důkladném otestování nahradí stávající zařízení v aplikaci generování budícího pulzu. Pro dokonalé nahrazení funkce budiče ultrazvukových převodníků je potřeba bližší seznámení s modelem 5077PR.



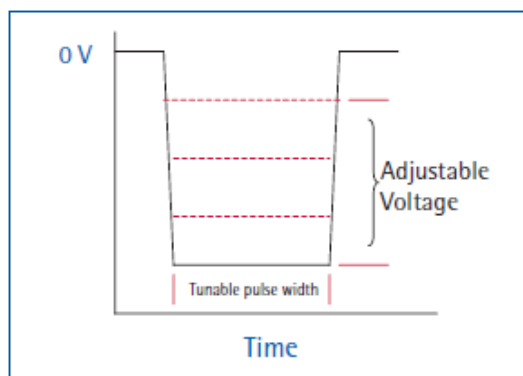
Obrázek 2 - Ručně řízené pulzní přijímače 5072PR, 5073PR a 5077PR (zdroj: www.olympus-ims.com)

Pulzní přijímače uvedené na obrázku jsou používány pro buzení ultrazvukových převodníků. Společně s osciloskopem jsou pulzní přijímač a převodník základními kameny ultrazvukového testovacího systému. Pulzní přijímač vytváří elektrický impuls budící převodník (měnič), který převádí elektrický signál na mechanickou energii a tím vytváří ultrazvukovou vlnu. V aplikacích průchozího přenosu prochází ultrazvuková vlna materiálem do druhého měniče, který funguje jako přijímač. Vzniklý mechanický impuls převede převodník na elektrický signál, který je následně zesílen a upraven přijímačem. Pro lepší představu, jak se takové měření vykonává, slouží Obrázek 3. (1)



Obrázek 3 - Zapojení modelu 5077PR v měření průchozího přenosu (zdroj: www.olympus-ims.com)

Model 5077PR využívá buzení obdélníkovými vlnami, které je zvláště užitečné v aplikacích zahrnujících testování tlustých nebo vysoce útlumových materiálů pomocí nízkofrekvenčních měničů, které obvykle zlepšují schopnost pronikání materiálem a zároveň poměr signálu k šumu. Zmíněný model nabízí buzení obdélníkovými vlnami s rychlým náběhem a poklesem pulzu. Napětí pulzu a šířka pulzu jsou přímo nastaveny, což umožňuje přesnou kontrolu tvaru pulzů. Vyladěním periody (šířky pulzu) obdélníkové vlny na polovinu střední frekvence převodníku se energie pulzu do převodníku při jeho přirozené rezonanční frekvenci zvýší. To může mít za následek zlepšenou amplitudu signálu. Účinek je nejzřetelnější u 5 MHz převodníků. (1)



Obrázek 4 - Výstupní obdélníkový pulz z 5077PR (zdroj: www.olympus-ims.com)

Závěrem je nutné se seznámit s parametry modelu 5077PR, který generuje negativní obdélníkové vlny o volitelné amplitudě -400 V , -300 V , -200 V a -100 V . Typická doba náběhu z 10 % na 90 % je přitom menší než 10 ns (max. 20 ns sestup). Zařízení umožňuje 10 pevných přednastavených šířek pulzu (od 0,1 MHz do 20 MHz) s možností jemného doladění pro každou šířku. Měření v módu pulzní echo nebo průchozí přenos. Externí opakovací frekvence pulzu je 0 kHz až 5 kHz (v závislosti na nastavené délce pulzu). Synchronizační výstupní impuls má 3 V při impedanci 50 Ω . (1)

2.2 Ultrazvukový defektoskop EPOCH 650

V předchozí podkapitole bylo zmíněno, že model 5077PR nemá přímou náhradu, to je samozřejmě pravda. Nicméně nyní pro ultrazvuková měření rychlosti a útlumu v geologických vzorcích nabízí Olympus zařízení EPOCH 650.



Obrázek 5 - Ultrazvukový defektoskop EPOCH 650 (zdroj: www.olympus-ims.com)

Jak můžeme vidět na obrázku výše, EPOCH 650 je moderním zařízením, které umožňuje komplexní měření prakticky na jakémkoliv místě, parametrově mu nelze nic vytknout, samozřejmě tomu odpovídá i pořizovací cena. Samotný Olympus na stránkách pořizovací cenu neuvádí, nicméně různí internetový prodejci jej nabízejí od 7.000 USD (cca 165 000 Kč). Cenu zřejmě značně navýšila možnost přímého zobrazení naměřených dat na displej. Nutno říct, že takové zařízení není příliš vhodné k ponechání v rozvaděči pro dlouhodobé měření, není k tomu zkrátka určené.

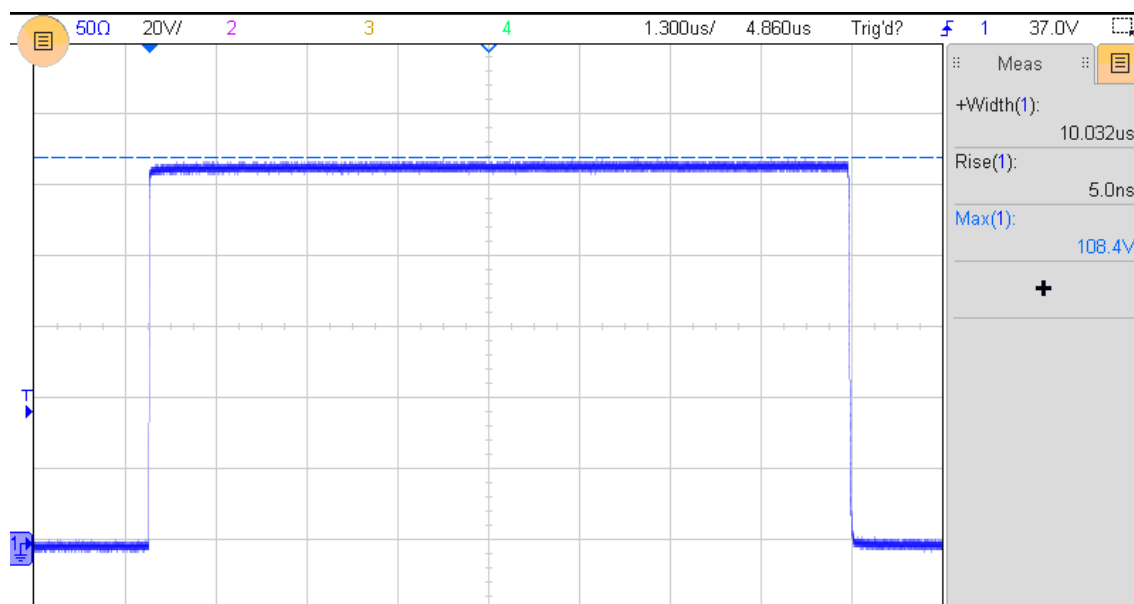
2.3 Elektrický pulzní generátor přepětí EOS-500

Model EOS-500 je pulzní generátor s výstupní impedancí 50 Ω určený pro obecné testování zařízení elektrickým přepětím (EOS) s plynule nastavitelnou šířkou pulzu v rozsahu nanosekund až milisekund. Výhodou může být kompaktní design a dotyková obrazovka. Se zařízením lze provádět automatizované měření. (2)



Obrázek 6 - Pulzní generátor přepětí EOS-500 (zdroj: www.esdemc.com)

Výstupní napětí lze nastavit od 10 V do 500 V bez připojené zátěže, ovšem při impedanci 50 Ω lze výstupní napětí nastavit pouze do 250 V. Tolerance výstupního napětí je $\pm 0,5\%$. Šířka pulzu lze nastavit od 100 ns do 1 ms. Ukázkový pulz je uveden na obrázku níže. Nevýhodou mohou být větší rozměry (347 x 300 x 145 mm). (2)



Obrázek 7 - Ukázkový pulz (100 V, 10 μ s) pulzního generátoru EOS-500 (zdroj: www.esdemc.com)

Model EOS-500 splňuje požadavky pro buzení ultrazvukových převodníků, ale jeho rozměry znesnadňují měření mimo laboratoř. Výrobce ESDMC na svých internetových stránkách neuvádí cenu ani možnost její poptávky, lze tedy soudit že daný model již nelze zakoupit.

2.4 Pulzní generátor AVL-3A-C

Model AVL-3AH-C generuje pulzy o špičkovém napětí do 450 V s maximální dobou náběhu 1 ns. Šířka výstupních impulsů je variabilní pomocí jedno-otáčkových potenciometrů od 5 ns do 100 ns. Frekvence opakování pulsů je variabilní od 50 Hz do 5 kHz pomocí interního hodinového oscilátoru. Generátor lze také spouštět externě pomocí pulzu na úrovni TTL. Výsledné pulzy jsou pro buzení ultrazvukových převodníků příliš krátké, potřebujeme pulz se šířkou okolo 10 μ s. Takový pulz nelze tímto modelem vygenerovat, tudíž měření průchozího přenosu s tímto zařízením by nebylo možné. (3)



Obrázek 8 - Generátor pulzů z řady AVL-3 (zdroj: www.brltest.com)

2.5 Generátor přechodných pulzů 8282-1

Generátor přechodných pulzů Solar model 8282-1 byl navržen pro provádění testů citlivosti na přepětové špičky. Generátor tedy splňuje požadavky vojenských specifikací EMI. Model 8282-1 poskytuje špičkové napětí až 600 V při délkách pulzů 0,15 μ s, 5 μ s a 10 μ s. Výrobce bohužel neuvádí obrázek průběhu výstupního pulzu, nicméně z jeho popisu je patrné, že se rozhodně nejedná o obdélníkový průběh, neboť výrobce uvádí, že výstupní napětí strmě stoupá na nastavenou špičkovou amplitudu a poté exponenciálně klesá až k překročení nuly. Opakovací frekvenci generovaných impulzů lze nastavit pomocí ovládacího panelu na libovolnou frekvenci od 0,5 do 50 pulzů za sekundu. Pomocí tlačítka na panelu lze generovat jeden impuls. Tento model zvládá proud až 50 A. (4)



Obrázek 9 - Generátor přechodných pulzů 8282-1 (zdroj: www.solar-emc.com)

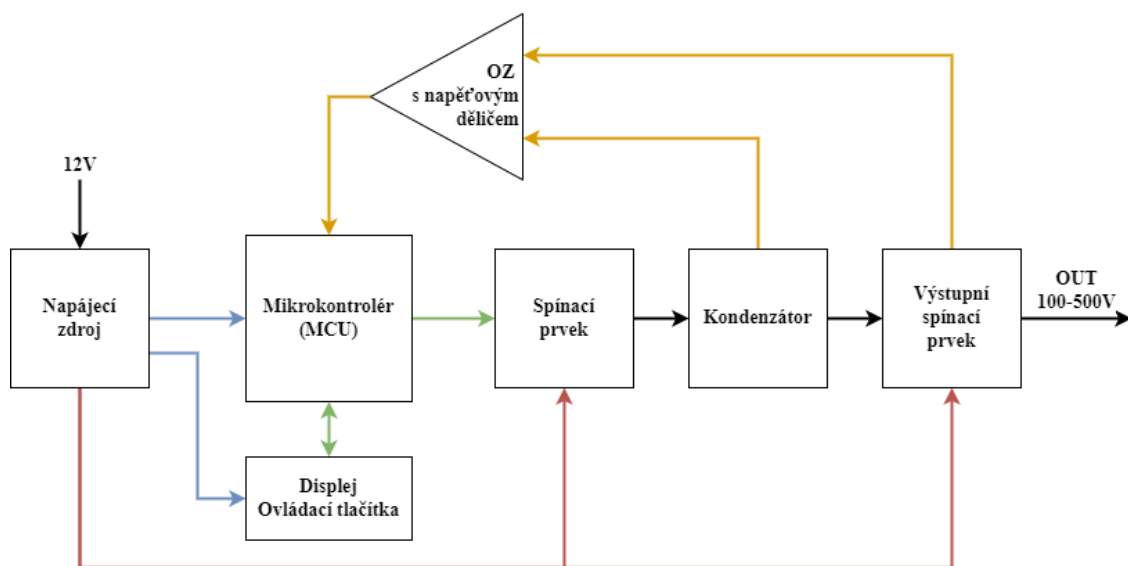
Zařízení není vhodné pro měření průchozího přenosu. Parametrově lze generovat požadovaný pulz pro převodník, ovšem jeho tvar není obdélníkový. Zařízení je navíc zbytečně výkonné, což má za následek velkou hmotnost (13,6 kg) a větší rozměry (311 x 211 x 330 mm). Ani v tomto případě neuvádí výrobce Solar Electronics Company na svých internetových stránkách cenu. Ovšem bazarová cena tohoto zařízení se pohybuje okolo 725 USD (cca 17000 Kč), což je vůči ostatním zanedbatelná částka.

2.6 Vyhodnocení analýzy

Analýza obsahuje pouze zařízení, která alespoň vzdáleně odpovídají základním požadavkům. Z analýzy trhu vychází najevo, že pulzní přijímač 5077PR nemá přímou náhradu. Výše uvedená zařízení buď nevyhovují svými rozměry a hmotností, nebo tvarem pulzu, případně nesplňují jiné požadované parametry. Pulzních generátorů lze v nabídce prodejců najít mnoho, ovšem často jsou taková zařízení nedostupná, nebo pouze na poptávku. Vzhledem k tomu, že se jedná o sofistikovaná zařízení, nelze je běžně zakoupit jako třeba laboratorní generátor funkcí. Pro zajištění náhrady pulzního přijímače 5077PR je potřeba navrhnout a realizovat vlastní generátor.

3 Teoretický rozbor

V mnoha oblastech vědy a techniky existuje potřeba generovat výkonné elektrické impulzy, například za účelem buzení piezoelektrického vysílače pro dlouhodobé monitorování horninového masivu. Přímé generování pulzů s použitím jednostupňového systému je možné pro pulzy do 1 kV, poněvadž lze předejít technickým potížím vyplývajících z extrémních vysokonapětových, elektrodynamických a tepelných účinků.



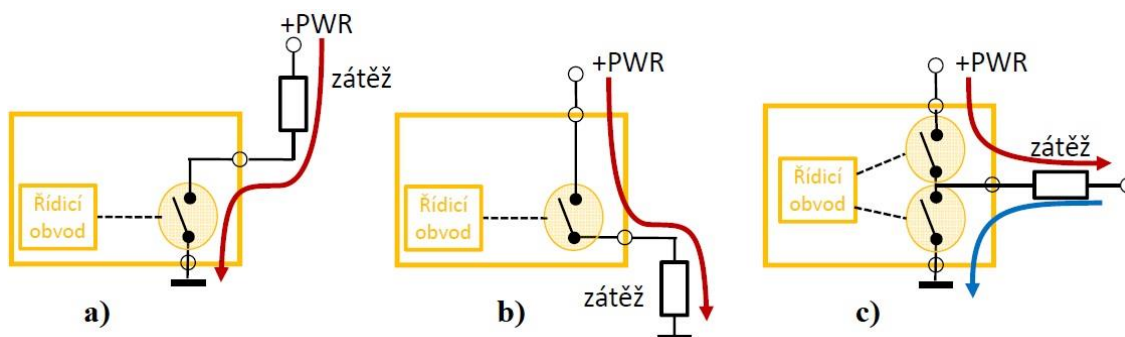
Obrázek 10 - Základní blokové schéma

Dnešním zaběhlým standardem pro menší aplikace je řízení všech komponentů pomocí jednoho mikrokontroléru. Tento způsob využijeme i pro řízení generátoru. Pro generování vysokonapětových pulzů je důležitá volba spínacích prvků. Následně je též důležitý i výběr napájecího zdroje, který musí zvládnout pokrýt celý zvolený napětový rozsah. Pro generování pulzu potřebujeme akumulovat energii v kondenzátoru. V následujících podkapitolách rozebereme podrobně jednotlivé části blokového schéma.

3.1 Spínací prvky

Úvodem rozebereme rozdělení spínacích prvků a jejich obecné vlastnosti. Spínací prvky rozdělujeme dle jejich provedení na mechanické a polovodičové. Do oblasti mechanických spínačů spadá ruční spínač, relé a stykač. Výhodou takových spínačů je proudová a napěťová přetížitelnost, nízký úbytek napětí a galvanické oddělení. Naopak značnou nevýhodou je dlouhá doba pro sepnutí/rozepnutí a omezené množství spínacích cyklů. Oproti tomu polovodičové spínače, zastoupené nejčastěji tranzistory, tyristory nebo diodou přináší vysokou rychlost spínání (řádově až 10^{-7} sekund) a prakticky neomezené množství cyklů během své životnosti, a to i při znatelně nižší ceně při srovnatelných hodnotách. Nevýhodou je pak nízká odolnost vůči přetížení, úbytek napětí v propustném směru, které se projeví ve formě tepelných ztrát, samotný prvek nespíná symetricky a v poslední řadě, nelze jimi zajistit galvanické oddělení. (5)

Vlastnosti ideálního polovodičového spínače jsou krásnou představou, ale realita je mnohdy velmi odlišná. Velmi často jsou vlastnosti ovlivňovány vlivem teploty. Nyní se podíváme na jednotlivé stavy reálného polovodičového spínače a popíšeme jeho vlastnosti. Stav vypnuto je omezen maximálním přípustným závěrným napětím, jehož hranice se vlivem teploty a časové degradace snižuje. Nesmíme zapomenout na svodový proud. Stav zapnuto je omezen proudem při sepnutí, zejména v souvislosti s úbytkem napětí, který vede ke vzniku výkonových ztrát. Pro oba stavy je důležitá i polarita, protože polovodičový spínač obvykle vede nebo blokuje jen v jednom směru. Proces samotného spínání a vypínání probereme postupně v následujících podkapitolách. (5)

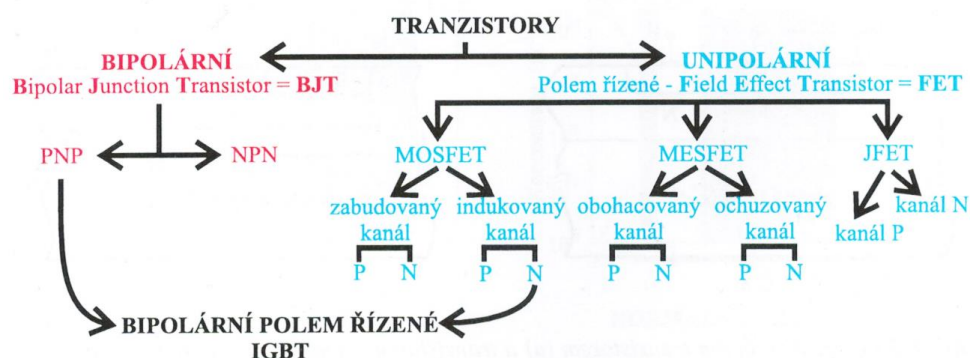


Obrázek 11 - Základní konfigurace spínačů: a) Pull-Down, b) Pull-Up, c) Push-Pull (zdroj: moodle.fel.cvut.cz)

Zátěž lze spínat několika různě umístěnými spínači. Nejčastější umístění tranzistorového spínače je Pull-Down (Obrázek 11a). Toto umístění je vhodné z důvodu použití jednoduchého řídicího obvodu a označujeme jej Open Collector. Zapojení Pull-Up (Obrázek 11b) se využívá nejčastěji při použití relé, jelikož odděluje napájení a zátěž. Pro tranzistorové spínače se tato konfigurace příliš nevyužívá, jelikož je nutné použití složitějších řídicích obvodů. Zapojení Push-Pull (Obrázek 11c) kombinuje obě předešlé konfigurace a využívá se v aplikacích kde je nutné zátěž připojovat ke kladnému i zápornému pólu napájení. Například řízení směru otáček motoru, nabití/vybití kapacitní zátěže nebo pro urychlení komunikace po metalickém vedení. (6)

(7)

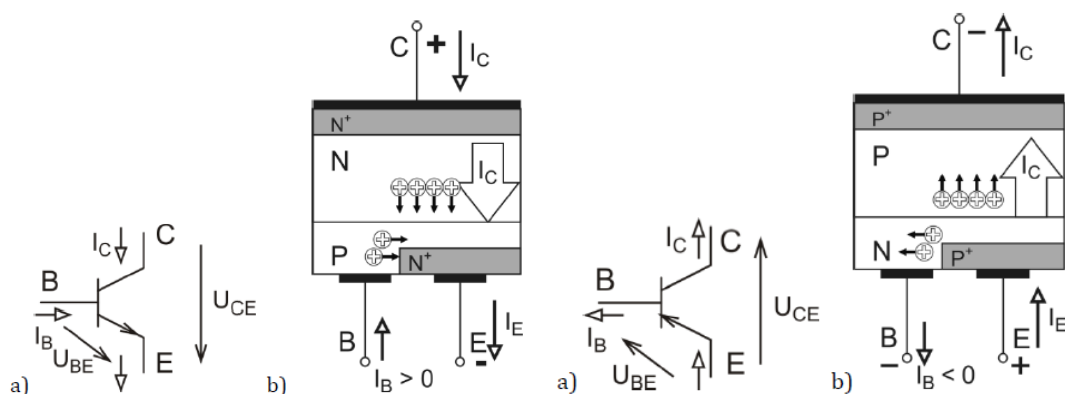
Jak již bylo zmíněno, jedním ze zástupců polovodičových spínačů jsou tranzistory, které řadíme mezi prvky s řízeným vypnutím (tzv. celořízené). Tranzistory rozdělujeme na bipolární (BJT), unipolární (FET) a kombinované (IGBT).



Obrázek 12 - Rozdělení základních typů tranzistorů (7 str. 99)

3.1.1 Tranzistory BJT

Bipolární tranzistor je tvořen dvěma P-N přechody, které tvoří tři různě dotované vrstvy. Podle uspořádání vrstev rozdělujeme tranzistory na NPN a PNP. Přívody k jednotlivým vrstvám označujeme jako Emitor (dodává nositele náboje), Kolektor (zachycuje nositele náboje) a Báze (neboli základna), která tvoří řídicí orgán. Průtok proudu z emitoru do kolektoru lze ovládat velikostí proudu do báze. Pro správnou funkčnost je nutná správná dotace jednotlivých vrstev. Emitor musí být nejvíce dotovaná oblast tranzistoru s největší koncentrací volných nositelů náboje. (7) (8)

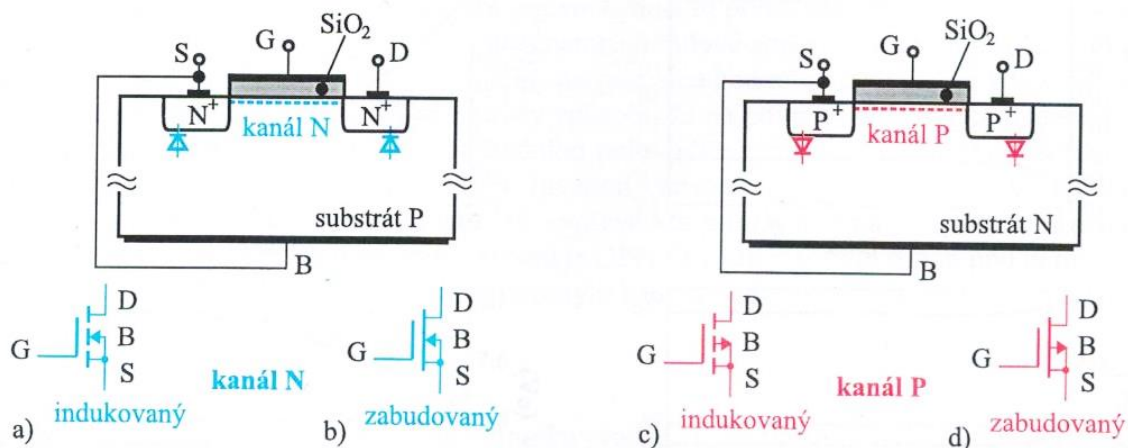


Obrázek 13 - Schématická značka a struktura tranzistoru NPN a PNP (5 str. 72)

Výkonové BJT disponují zesilovacím činitelem h_{FE} v rozsahu $10 \div 15$. Nízký zesilovací činitel způsobuje vysoký proud do báze tranzistoru. Další nevýhodou bipolárního tranzistoru je využití obou typů nosiče náboje, jelikož při vypnutí je nutné odsát všechny volné nosiče náboje. Díry mají řádově nižší pohyblivost, a tudíž jejich odsátí trvá mnohem delší dobu a prodlužují dobu vypnutí tranzistoru. Z těchto důvodů je použití výkonových bipolárních tranzistorů pro rychlé spínání napětí v řádu stovek voltů a vysokých proudů velmi komplikované a pravděpodobně by vedlo k nevalnému výsledku. Mnohem vhodnějším spínacím prvkem budou unipolární tranzistory, které si popíšeme v následující podkapitole. (5) (7)

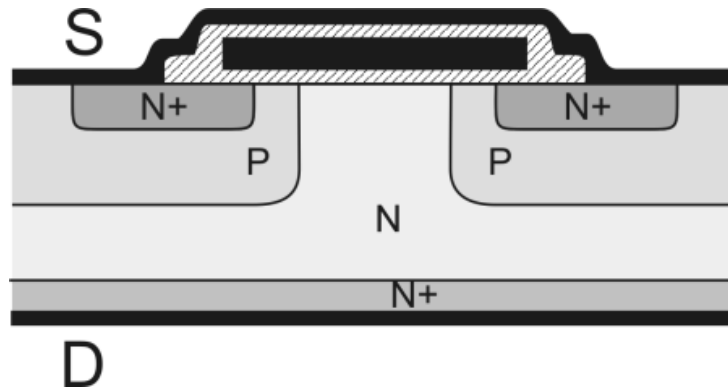
3.1.2 Tranzistory MOSFET

Tranzistor MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET) je polem řízený tranzistor, který má řídicí napětí odděleno od kanálu vrstvou skutečného izolantu (oxid křemíku). Díky tomuto oxidu má téměř nekonečný vstupní odpor, a tudíž minimální proud do řídicí elektrody (Gate). Princip MOSFET tranzistoru je již dlouho znám, jelikož využívá Coulombův zákon o vzájemném působení dvou nabitých částic. Princip byl popsán ještě před objevení BJT tranzistorů, ale nebyla známa vhodná technologie pro vytvoření velmi tenkého oxidu. V zásadě rozlišujeme dva typy dle vodivosti kanálu. Existuje-li vodivý kanál bez vnějšího napětí, jedná se o MOSFET se zabudovaným kanálem. Pokud je pro vytvoření vodivého kanálu potřeba přivést napětí, jedná se o MOSFET s indukovaným kanálem. Ve spínacích obvodech se obvykle využívá MOSFET s indukovaným kanálem, jelikož není nutné záporné napětí pro jeho zavření a při vypnutí řídicí elektroniky vypne. Vodivý kanál vzniká mezi elektrodami Source a Drain po přiložení napětí mezi Gate a Source. Tím dojde k přitažení náboje opačné polarity (u N-MOSFET elektrony a u P-MOSFET díry) a vytvoření tzv. inverzní vrstvy v substrátu. Inverzní vrstva znamená, že v polovodiči typu P, kde je větší koncentrace děr, vznikne oblast s větší koncentrací elektronů neboli polovodič typu N. Typy laterálních MOSFET tranzistorů jsou na následujícím obrázku, které se využívají v nízko-výkonových aplikacích a integrovaných obvodech. Šipka ve schématické značce znázorňuje kladný směr toku proudu substrátovou diodou. Jelikož má vést proud pouze kanálem a má být řízen napětím, je nutné zabránit průtoku proudu substrátovými diodami. Proto se substrát B připojuje na source S, čímž je substrátová dioda zkratována. (7)



Obrázek 14 - Tranzistor MOSFET s indukovaným (a, c) a zabudovaným (b, d) kanálem (7 str. 135)

Pro tranzistory s vysokým výkonem není laterální uspořádání příliš vhodné z důvodu dlouhého kanálu a tím velký odpor v sepnutém stavu. Z tohoto důvodu se využívá vertikální uspořádání, které snižuje délku kanálu a tím odpor v sepnutém stavu. Dále tím odpadá nutnost zapojení substrátu B k Source. Další výhodou tohoto uspořádání je antiparalelní dioda zapojená mezi Drain a Source. Dnešní tranzistory využívají různá uspořádání, která zlepšují vlastnosti tranzistorů, například snížení odporu v sepnutém stavu, nebo zrychlení funkčnosti. Jedná se například o VMOS, DMOS, Cool MOS, aj. (8) (9)



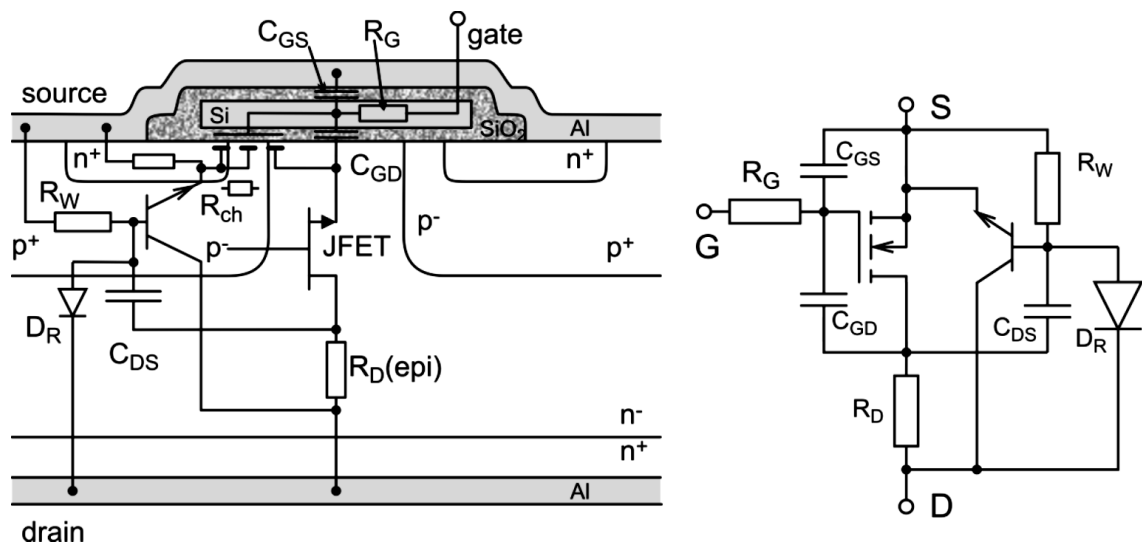
Obrázek 15 - Vertikální MOSFET (5 str. 91)

Další důležitý parametr je maximální pracovní napětí mezi Drain a Source. Toto napětí je ovlivněno tloušťkami jednotlivých vrstev tranzistoru. Z tohoto důvodu nelze jednotlivé vrstvy polovodičů příliš zmenšovat, což ale způsobuje velký odpor v sepnutém stavu. U výkonových MOSFETů je tento problém řešen paralelním zapojením velkého množství jednotlivých buněk (řádově 10^5 až 10^{10}). Paralelní zapojení snižuje odpor počtem zapojených stejných tranzistorů, ale kapacity jednotlivých Gate se sčítají, čímž vzniká znatelně vysoká vstupní kapacita (řádově jednotky až desítky nano Farad). Vysoká vstupní kapacita C_{vst} klade vysoké nároky na drivery výkonových MOSFET tranzistorů, jelikož tyto tranzistory již není možné ovládat přímo řídicí elektronikou. (9)

$$C_{vst} = C_{GS} + C_{GD} \quad (1)$$

$$C_{výst} = C_{DS} + C_{GD} \quad (2)$$

Mezi další parazitní vlastnosti lze zařadit antiparalelní BJT tranzistor zapojený mezi Source a Drain. Pokud by došlo k sepnutí BJT tranzistoru, došlo by k tvrdému zkratu a zničení MOSFET tranzistoru. Tomuto lze zabránit snížením odporu R_W , aby napětí bylo nižší než prahové napětí U_{BE} . (5)



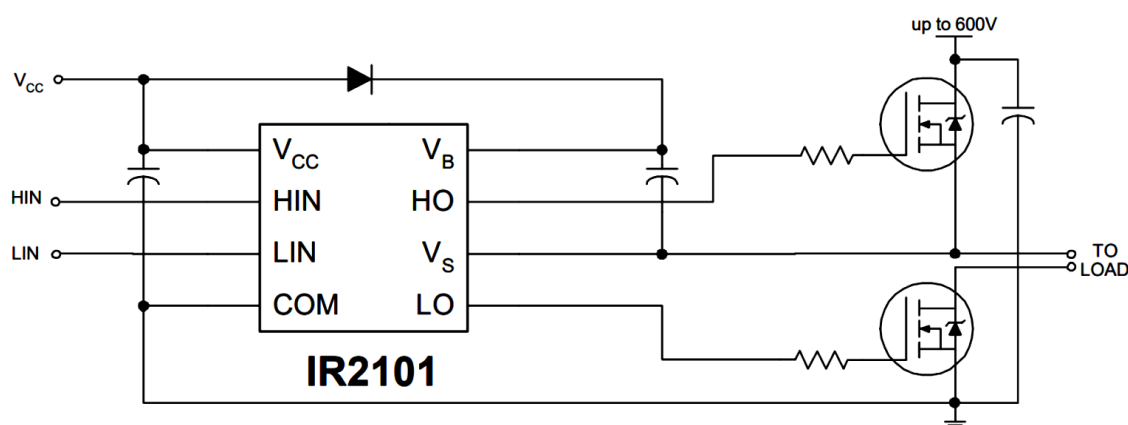
Obrázek 16 - Náhradní schéma tranzistoru MOSFET s parazitními vlastnostmi (5 str. 92)

3.1.2.1 Driver pro tranzistor MOSFET

Drivery MOSFETů slouží pro rychlé dodání náboje do řídicí elektrody Gate a dostatečného napětí pro sepnutí tranzistoru do vodivostního režimu. Špičkový proud, který je nutný dodat do Gate lze vypočítat pomocí vzorce níže. (6)

$$I_G = \frac{C_{vst} * U_{GS}}{t} \quad (3)$$

Z uvedeného vzorce lze odvodit, že potřebný proud pro běžné výkonové tranzistory se pohybuje v jednotkách až desítkách ampér při době sepnutí do 10 ns. Tuto hodnotu lze snížit prodloužením doby sepnutí. Prodloužením doby sepnutí se zvyšují ztráty při přechodu mezi vypnutým a sepnutým stavem, což není vhodné řešení pro rychlé aplikace, například generování PWM nebo krátkých pulzů.

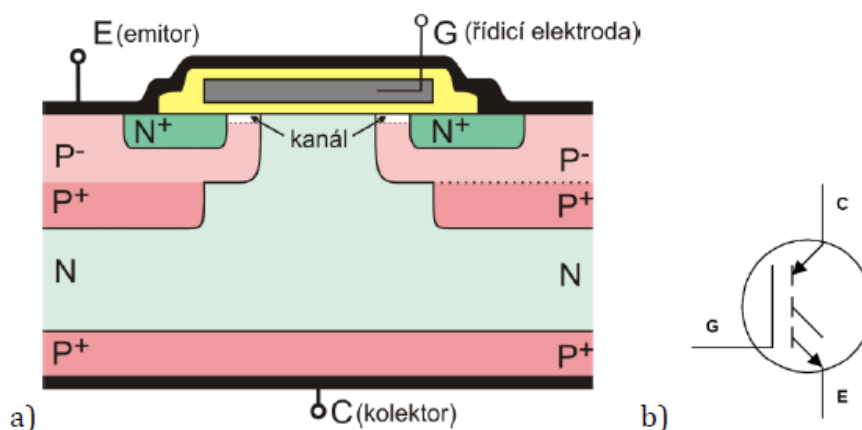


Obrázek 17 - Typické zapojení MOSFET driveru v H/2 můstku (zdroj: www.infineon.com)

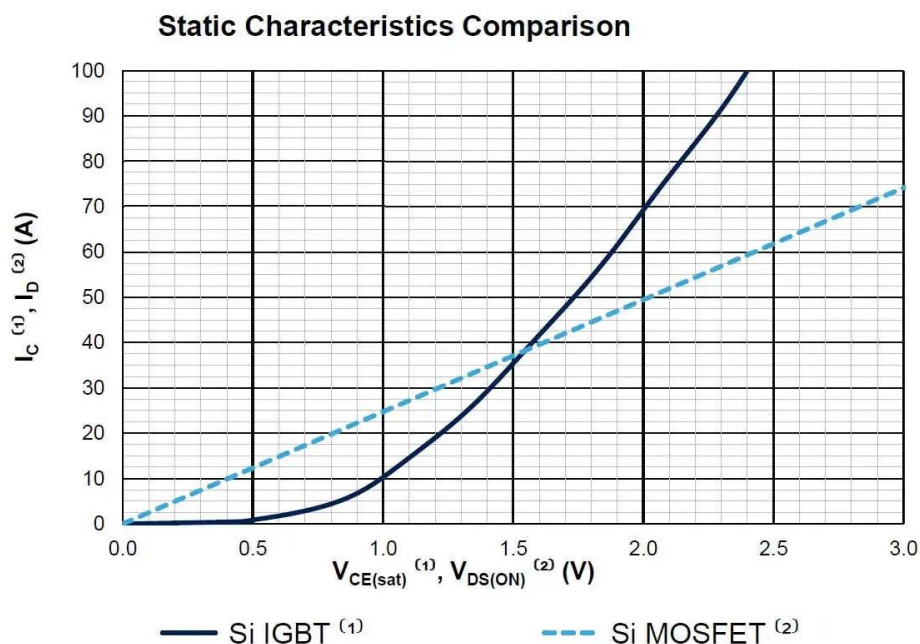
Typické zapojení driveru řídicí H/2 můstek je uveden na Obrázek 17. V tomto zapojení jsou použity dva N-MOSFET tranzistory, a to z důvodu vhodnějšího použití N-typového tranzistoru před P-typovým. N-typové tranzistory mají rychlejší spínací charakteristiku. Typický driver je plně integrovaný a vyžaduje minimum externích součástek, typicky kondenzátor a diodu. Kondenzátor slouží k uchování energie, která je využita pro sepnutí tranzistoru. Pro řízení horního tranzistoru je nutné vytvořit napětí, které je o velikost prahového napětí (typicky 20÷25 V) vyšší než napětí na výstupu. Napětí je zvyšováno z napájecího napětí pomocí integrované nábojové pumpy, jejíž principiální zapojení je uvedeno na obrázku níže. V kapitole 3.3.2.1 je podrobněji rozebrán princip funkce nábojové pumpy, součástí je i obecné schéma zapojení. (10)

3.1.3 Tranzistory IGBT

Tranzistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Tranzistor) kombinuje výhody obou předchozích typů. Jedná se o BJT řízený MOSFET tranzistorem. Struktura tranzistoru IGBT je uvedena na obrázku níže a vychází z vertikálního MOSFET tranzistoru, která je doplněna o P vrstvu u kolektoru, vytvářející PNP tranzistor řízený proudem ze Source tranzistoru MOSFET. Výhodou je téměř nulový proud do řídicí elektrody Gate a nižší ztráty v sepnutém stavu u výkonových aplikacích. Tranzistor IGBT využívá vůči MOSFET větší plochu struktury a ztráty jsou definovány jako velikost saturačního napětí (cca 1÷3 V) krát proud strukturou. Tudiž při vyšších proudech mají nižší ztráty vůči MOSFET tranzistorům (viz Obrázek 19). Nevýhodou tohoto tranzistoru, obdobně jako u BJT, jsou delší doby sepnutí a rozepnutí z důvodu využití obou nosičů náboje. (7)



Obrázek 18 - Struktura a schématická značka tranzistoru IGBT (5 str. 96)

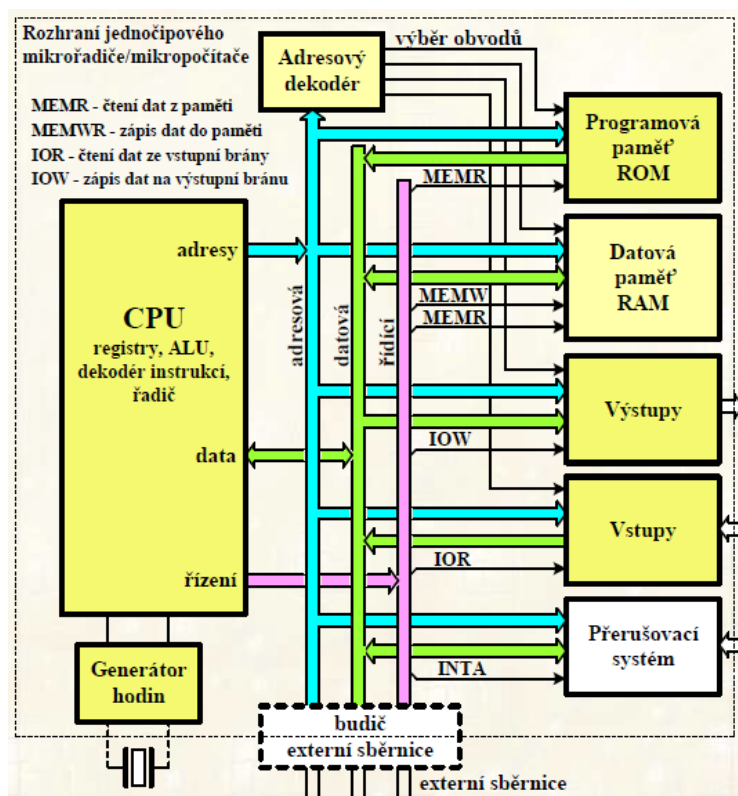


Obrázek 19 - Srovnání výstupních charakteristik tranzistoru IGBT a MOSFET (zdroj: www.powerelectronicsnews.com)

3.2 Mikrokontroléry

Rozmach využití mikroprocesorů v široké škále aplikací ukázal, že jsou tyto součástky mnohem univerzálnější, než se původně mohlo zdát. Své uplatnění našli i v řídicích aplikacích, kde výrazným způsobem zjednodušili vývoj a snížili cenu hardware. Postupnou integrací mikroprocesorů, pamětí, různých rozhraní, časovačů, převodníků, aj. vznikl jednočipový mikropočítač (mikrokontrolér, mikrořadič, anglicky embedded microcontroller). Svou architekturou jsou mikrokontroléry přizpůsobeny pro řízení různých procesů. (11)

Předpokladem pro nabytí výhod mikrokontroléru je použití toho nejjednoduššího mikrokontroléru, který je pro danou aplikaci použitelný. Zasluhou tomu výrobci mikrokontrolérů (Intel, STMicroelectronics, Microchip, aj.) nabízí širokou škálu konfigurací lišící se šířkou sběrnice, kapacitou pamětí, periferiemi, počtem vstupů/výstupů atd. (11)

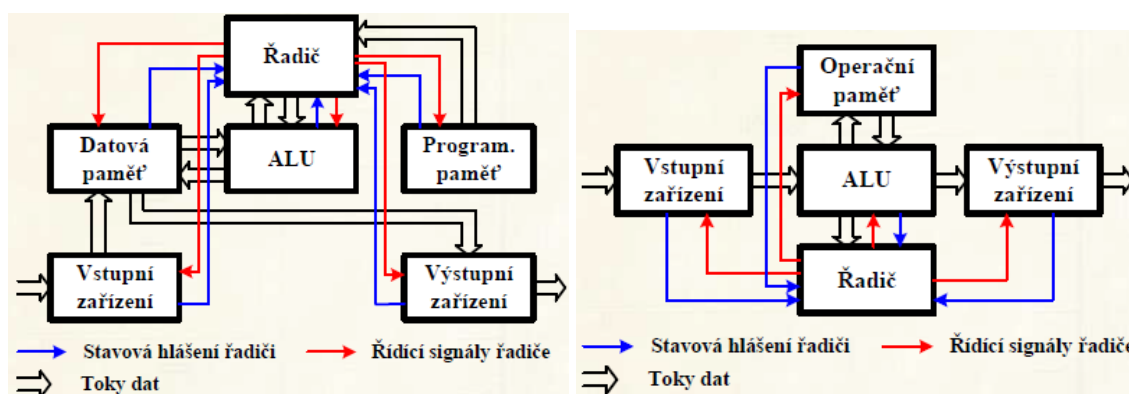


Obrázek 20 - Základní součásti mikrokontroléru (12)

Mikrokontrolér slučuje několik částí, které jsou nezbytné pro správnou funkčnost systému. Každý systém obsahuje minimálně centrální procesorovou jednotku (CPU), programovou paměť (nejčastěji FLASH nebo ROM) a vstupně-výstupní jednotku. Zmíněné komponenty jsou nezbytné, ale současné mikrokontroléry obsahují celou řadu dalších komponentů, které umožňují všestranné použití. Mezi nejčastější komponenty patří datová paměť (RAM), přerušovací systém umožňující složitější programy, ADC a DAC převodníky usnadňující komunikace s okolím, časovače a čítače, externí sběrnice (SPI, I²C, USB, aj.) a generátory hodin (takt CPU, RTC, takt časovačů nebo převodníků). (12)

Nejzákladnější rozdělení mikrokontrolérů je dle šířky sběrnice. Jedná se o sběrnici spojující základní komponenty typu paměť, početní jádro, vstupně-výstupní jednotku, aj. Nejrozšířenějšími typy jsou 8-bitové a 32-bitové. Použití daného typu závisí na složitosti, náročnosti a rychlosti zpracování dané aplikace, ale také na konkrétním uživateli. Pro základní aplikace nevyžadující rychlé zpracování postačují 8-bitové mikrokontroléry, pro složitější aplikace (grafický display, rozšířené GUI, připojení k internetu atd.) je nutné použít 32-bitové mikrokontroléry, které zvládnou zpracovat větší množství dat v jednom taktu. (12)

Dalším rozdělením mikrokontrolérů je dle uspořádání pamětí. Uspořádání rozdělujeme na Von Neumanovskou architekturu, Harvardskou architekturu a modifikovanou Harvardskou architekturu. Nejjednodušším typem je Von Neumanova, která slučuje programovou a datovou paměť. Toto uspořádání umožňuje dynamickou úpravu programu při běhu procesoru. Dynamická změna programu může být výhodou, ale nese s sebou bezpečnostní riziko úpravy nevhodné části programu, které následně vyžadují nahrání nového firmware. Oproti tomu Harvardská architektura obsahuje dvě oddělené paměti, programovou a datovou. Měnitelná datová paměť se po ukončení programu obvykle smaže a nezpůsobí chybu programu, který je uložen v neměnitelné programové paměti. Další výhodou tohoto uspořádání je vyšší rychlost, jelikož lze přistupovat k oběma pamětím současně. Nejnovějším typem je modifikovaná Harvardská architektura, která je využita u většiny dnešních mikrokontrolérů (ARM a AVR). Dvě oddělené paměti spojuje do jedné, která má pevně oddělenou programovou a datovou část. Nevýhodou modifikovaného uspořádání je neschopnost přistupovat k oběma pamětím současně. (11) (12)

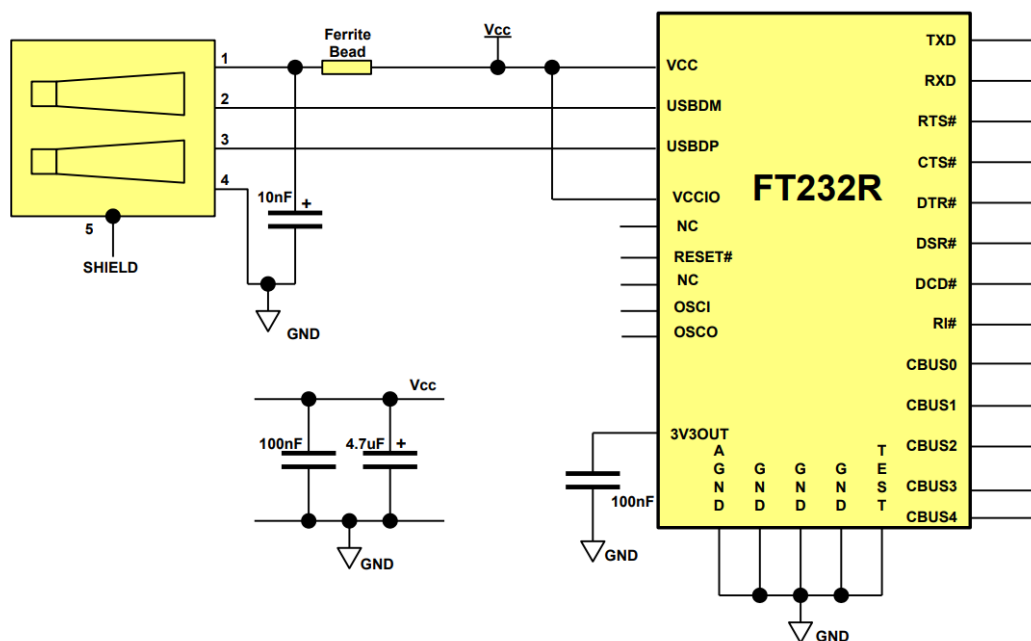


Obrázek 21 - Harvardská (vlevo) a Von Neumannova (vpravo) architektura (12)

Architekturu mikrokontrolérů lze též rozdělit podle velikosti instrukční sady. Instrukční sada obsahuje všechny instrukce, které procesor zpracovává. Redukovaná instrukční sada (RISC) obsahuje pouze nejn nutnější instrukce a je využívána u většiny jednoduchých mikrokontrolérů. Výhodou RISC je jednodušší procesor, rychlejší zpracování programu a tím nižší spotřebu elektrické energie. Nevýhodou RISC je složitější zpracování náročnějších operací (násobení, dělení nebo zaokrouhlování) a tím komplexnější překladače programu. Komplexní instrukční sada (CISC) rozšiřuje základní instrukce o komplexnější instrukce nebo kombinuje základní instrukce do jednoho mikroprogramu (např. dělení nahrazuje jednou instrukcí). Instrukce umožňují

jednodušší programování, ale vyžadují složitější procesor a vyšší časovou náročnost. Dnešní mikrokontroléry nejčastěji využívají kombinaci obou architektur. Architekturu RISC doplňují o některé rozšířené instrukce, které usnadňují programování a nezpomalují běh programu. (11) (12)

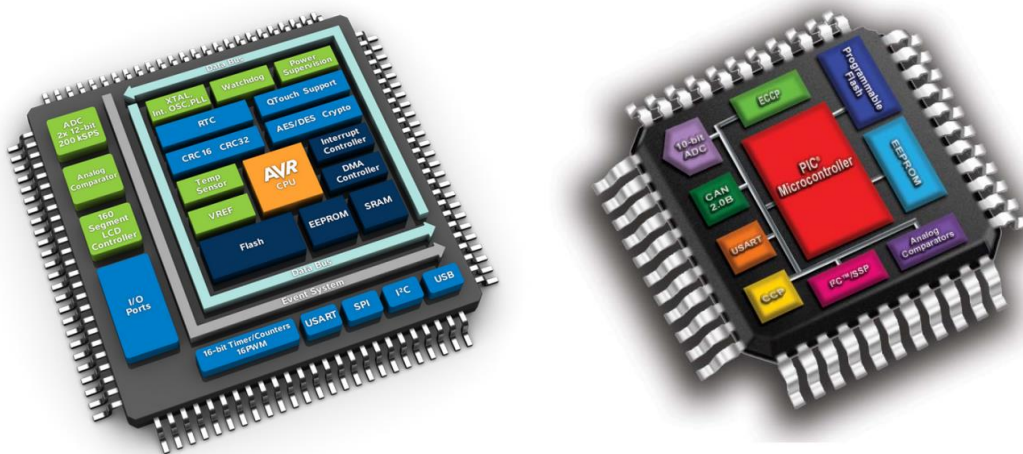
Pro interakci s okolím mikrokontrolér využívá vstupně-výstupní jednotku, kterou lze rozšířit o převodníky, sběrnice, přímé připojení časovačů, aj. Standartně jednotka využívá digitální úrovně pro komunikaci s okolím. Většina přírodních signálů není striktně určena napětíovými úrovněmi, a proto je nutné signál převést pomocí ADC nebo DAC převodníků, případně komparátorů. Nejen z tohoto důvodu většina mikrokontrolérů obsahuje ADC převodník. Na rozdíl od přírodních signálů lze využít pro komunikaci s dalším systémem digitální signál, který se přenáší pomocí sběrnice. Typ sběrnice volíme dle typu komunikace, vzdálenosti mezi systémy a rychlostí přenosu dat. Nejjednodušším typem sběrnice pro přenos dat na krátké vzdálenosti je paralelní sběrnice, kterou lze obsluhovat například další periferie na jednom plošném spoji (display, klávesnice, paměti, externí převodníky atd.) Při přenosu na delší vzdálenosti dochází k výraznému indukovaní rušivých signálů, což znemožňuje využití jednoduché paralelní sběrnice a je nutné využít složitějších reprezentací signálu. Nejstarší průmyslovou sběrnici využívající vyšší symetrické napětí je RS232. Rozhraní USB využívající diferenciální přenos nahradilo sběrnici RS232 jelikož využívá pouze 5 V signály přenášené pomocí dvou kroucených vodičů, které snižují indukované rušení. USB není součástí standartní výbavy mikrokontrolérů a je nutné využít externí převodník na jiný typ sběrnice obsažené v mikrokontroléru. Mezi nejpoužívanější převodníky lze zařadit CH340 nebo FTDI FT232, které převádí USB na univerzální sériovou linku (UART). Principiální zapojení převodníku je uvedeno na obrázku níže. (12) (13)



Obrázek 22 - Schéma zapojení převodníku USB/UART (zdroj: www.ftdichip.com)

3.2.1 Mikrokontroléry AVR

Mikrokontroléry AVR s modifikovanou Harvardskou architekturou využívají 8-bitovou sběrnici a rozšířenou RISC architekturu. První strukturu navrhla firma Atmel (dnes divize Microchip) v roce 1996 a menšími úpravami je využívána do dnes. Architektura AVR umožňuje takt procesoru od jednotek kHz do 32 MHz. Zmíněný kmitočet je vhodný pro většinu aplikací, jelikož mikrokontroléry AVR najdou využití především v základních aplikacích, například minutka, regulátory nebo jednoduché senzorové systémy. Velkého rozmachu dosáhlo díky vývojovému kitu Arduino, který představuje 8-bitové mikrokontroléry široké veřejnosti. S nástupem 32-bitových mikrokontrolérů firma Atmel představila zcela novou architekturu AVR32, které má konkurovat mikrokontrolérům ARM. AVR32 se nesetkala s úspěchem a využívá se pouze pro speciální aplikace. (12)



Obrázek 23 - Ukázka vnitřní struktury mikrokontrolérů AVR (vlevo) a PIC (vpravo) (zdroj: ww1.microchip.com)

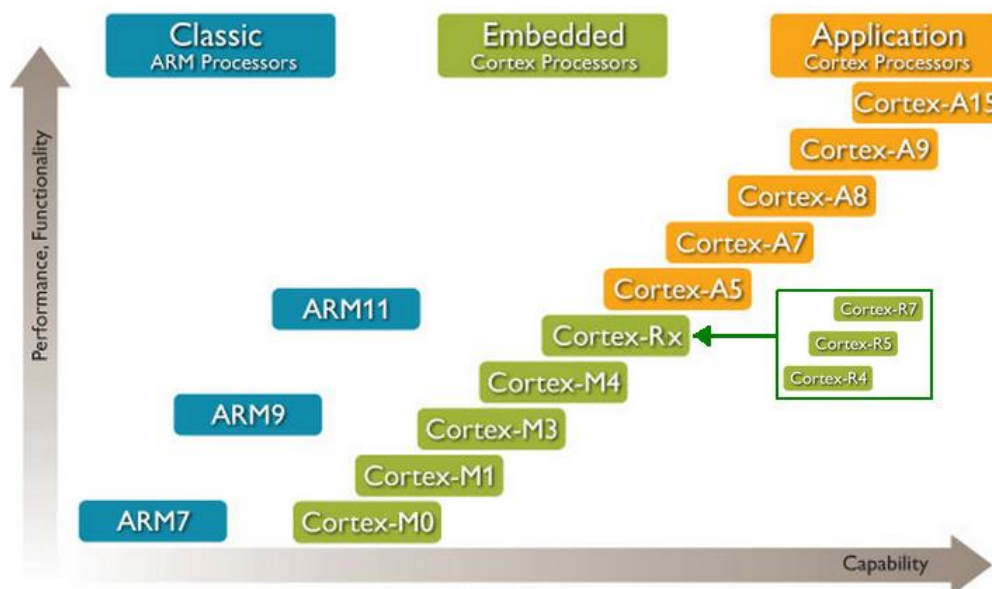
3.2.2 Mikrokontroléry PIC

Mikrokontroléry PIC s modifikovanou Harvardskou architekturou a RISC instrukční sadou vyvinuté společností Microchip Technology zahrnují 8-bitové, 16-bitové a 32-bitové mikrokontroléry. Prvním komerčně používaným mikrokontrolérem byla 8-bitová verze PIC představená v roce 1990. Výhodou rodiny PIC je univerzální nasazení pro téměř jakoukoliv aplikaci. Obdobně jako AVR, mikrokontroléry PIC lze nalézt u několika vývojových kitů. Nejznámějším vývojovou deskou je MIKROE, která se nejčastěji využívá pro studijní účely. (14)

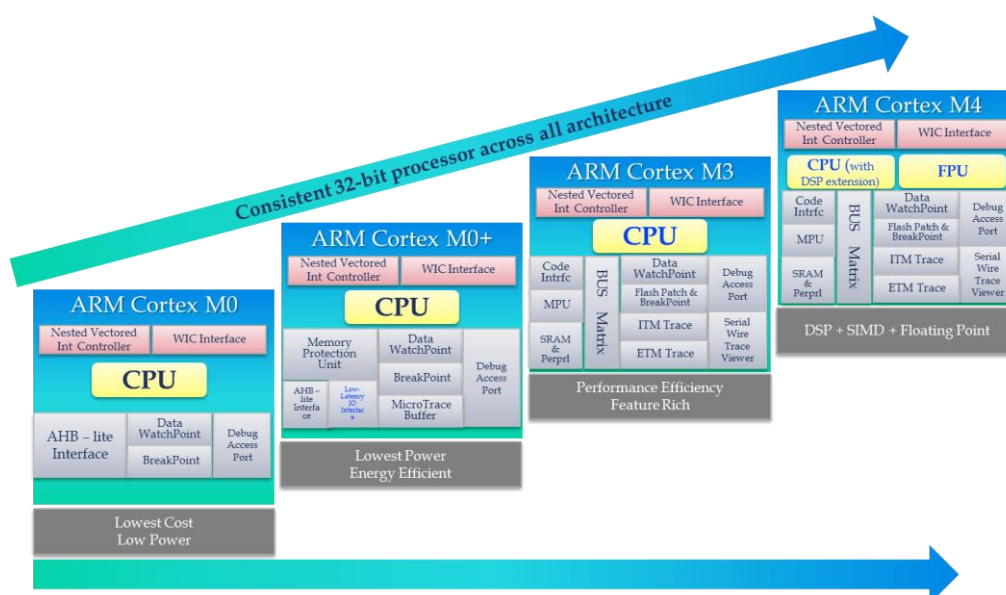
3.2.3 Mikrokontroléry ARM

Mikrokontroléry ARM (Advanced RISC Machines) využívají jádro navržené firmou ARM Holdings, která byla založena v roce 1990 společnostmi Acorn Computers, Apple Computers a VLSI Technology. Výrobci mikrokontrolérů nakupují jádra ve formátu RTL v jazyku Verilog, následně přidávají vlastní komponenty, celý systém optimalizují a vyrobí. Při vhodné optimalizaci lze jádro taktovat na frekvenci až 2 GHz, která zajišťuje dostatečný výpočetní výkon pro náročné aplikace. Dle použití jádra

rozlišujeme 3 základní skupiny. První skupina klasických ARM procesorů mají uplatnění ve formě standartních procesorů, například v mobilních telefonech nebo v MacBook. Druhá skupina vestavěných procesorů je vhodná pro použití v mikrokontrolerech. Poslední skupina aplikačních procesorů vhodná pro vysoce výkonné aplikace. Vzhledem k uvedeným skupinám bude provedena rešerše pouze pro jádra Cortex-Mx. (15)



Obrázek 24 - Rozdělení rodiny procesorů ARM (zdroj: www.emcu.it)

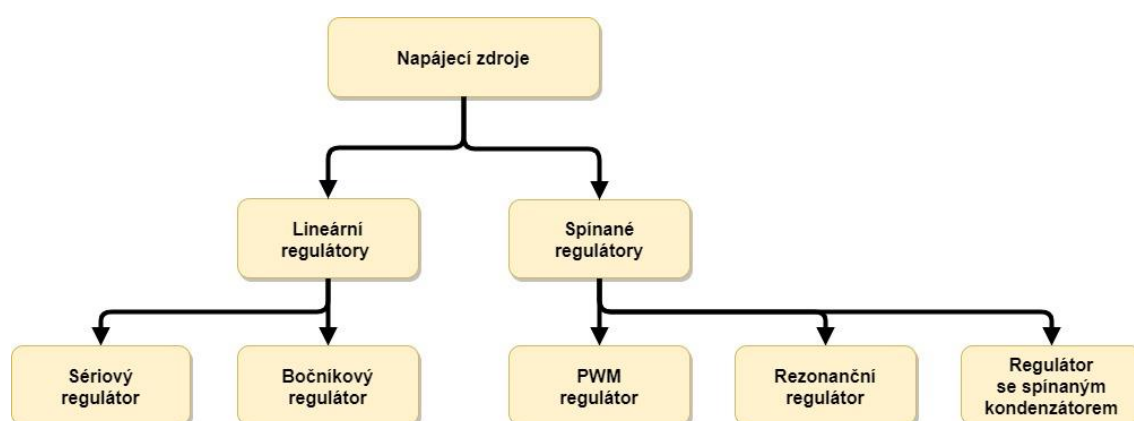


Obrázek 25 - Srovnání jader Cortex-Mx (zdroj: www.arm.com)

Řada Cortex-Mx zahrnuje širokou skupinu jader pro mikrokontroléry od nízko-příkonových a nízko-výkonových M0 až po velmi výkonné M4. Uspořádání pamětí závisí na komplexnosti jádra. Jádro M0 a M1 využívají Von Neumannovu architekturu, M3 a M4 modifikovanou Harvardskou architekturu. Do podvědomí odborné veřejnosti se mikrokontroléry ARM dostali zejména vlivem vývojové desky Nucleo. Složitější programování a menší množství knihoven prozatím neumožňuje široké rozšíření těchto mikrokontrolérů mezi méně odbornou veřejnost. (16)

3.3 Napájecí zdroje

Napájecí zdroje jsou nedílnou součástí všech elektronických zařízení. K napájení se mimo jiné využívá síťových napájecích zdrojů, jejichž nedílnou součástí je síťový transformátor s usměrňovačem. Výběr vhodného zdroje napětí je velmi důležitou procedurou při návrhu samotného zařízení. V porovnání vhodných kandidátů nám pomáhají základní vlastnosti, mezi které patří jmenovité napětí a proud, typ, činitel stabilizace, teplotní a časová stabilita, účinnost, zvlnění, izolační pevnost a vnitřní odpor. Jedním z požadavků může být i parametr, zda zdroj má ochranu proti přehřátí, proti přepětí, před přetížením nebo proti zkratu. (6)

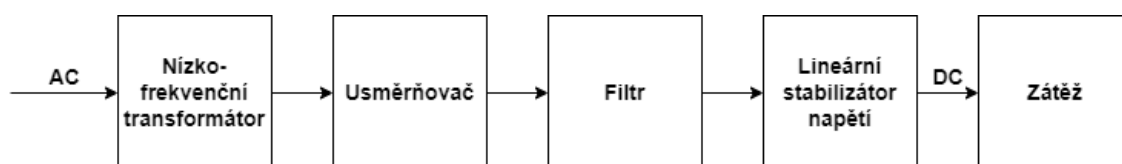


Obrázek 26 - Klasifikace napájecích zdrojů

Jak Obrázek 26 napovídá, pro regulaci stejnosměrného napětí využíváme spínané nebo případně i lineární regulátory (též stabilizátory). Spínané regulátory mají výhodu v možnosti použití před i za oddělovacím transformátorem. Další výhody a nevýhody probereme v následujících podkapitolách. (6)

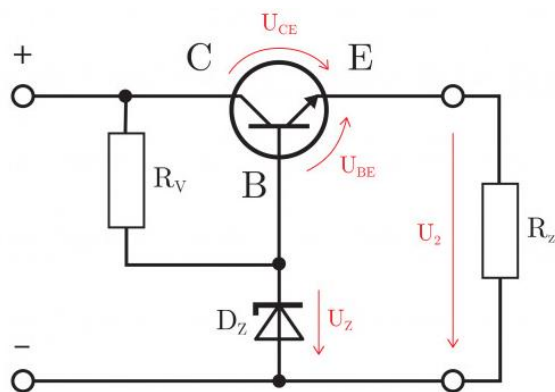
3.3.1 Lineární regulátory

Lineární regulátory (spojité regulátory, lineární stabilizátory) mají výhodu ve velkém činiteli stabilizace, což vede k malému zvlnění výstupního napětí a nízkému šumu. Principiálně zde dochází ke stabilizaci napětí vlivem změny odporu regulátoru v souladu se vstupním napětím a zátěží. Fakt, že tyto stabilizátory fungují jako proměnlivý odpor nás vede na jejich hlavní nevýhodu, kterou je malá účinnost. Navíc pro správný chod těchto stabilizátorů je potřeba zajistit, aby regulované napětí bylo nižší než vstupní napětí. Pomocí děliče napětí udržují konstantní výstupní napětí, čímž vznikají značné tepelné ztráty. Vzhledem k uvedenému jsou tyto stabilizátory méně vhodné pro stabilizaci velkých proudů nebo velkých rozdílů napětí. (6)



Obrázek 27 - Blokové zapojení AC/DC napájecího zdroje s lineárním stabilizátorem

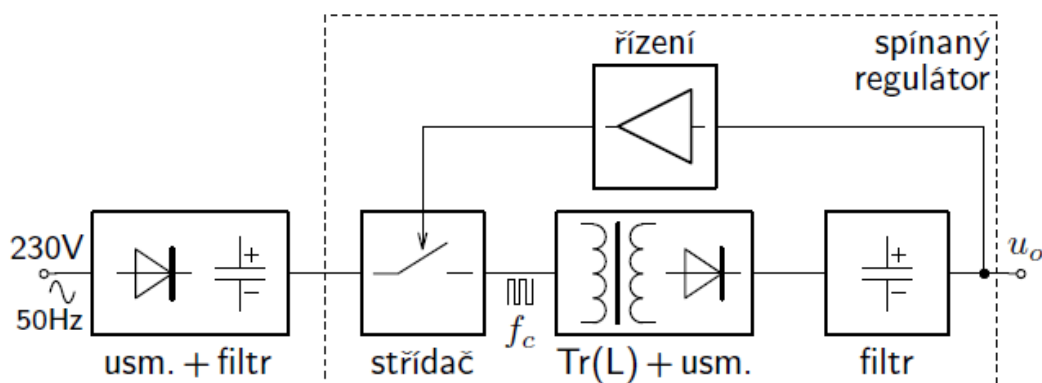
Vedle nejjednodušších bočnickových regulátorů pracujících pouze se Zenerovou diodou, jsou pro stabilizaci napětí většinou používány sériové regulátory, kde je bočník doplněn o emitorový sledovač. Takový stabilizátor má činitel stabilizace v řádu několika jednotek procent. Lepších výsledků lze dosáhnout zpětnovazebním zapojením. Rozšířením o zpětnou vazbu vznikne tzv. třísvorkový stabilizátor, jehož nejznámějším zástupcem jsou stabilizátory řady 78xx. (6)



Obrázek 28 - Schéma zapojení jednoduchého sériového stabilizátoru (zdroj: www.vovcr.cz)

3.3.2 Spínané regulátory

Spínané regulátory (spínané stabilizátory, spínané měniče) využívají nespojitě regulace vstupního napětí. V principu všechny tyto regulátory mají velkou kapacitu filtračního kondenzátoru, na kterém se během periodického spínání udržuje konstantní napětí, ale zásluhou vysoké frekvence střídavého napětí je kapacita nižší než u usměrňovačů síťového napětí. Oproti spojitým stabilizátorům mají spínané vyšší účinnost, umožňují změnu polarity výstupního napětí, a v některých variantách zapojení zajistí i galvanické oddělení zdroje energie, či zvýšení výstupního napětí nad úroveň vstupního. Další výhodou oproti lineárním stabilizátorům je výrazně nižší vstupní proud oproti výstupnímu (platí pro zvyšující měniče napětí). Rychlé periodické spínání je zároveň jejich nevýhodou, neboť způsobuje větší zvlnění a rušení. Rušení se musí eliminovat pomocí EMC filtru. (6)



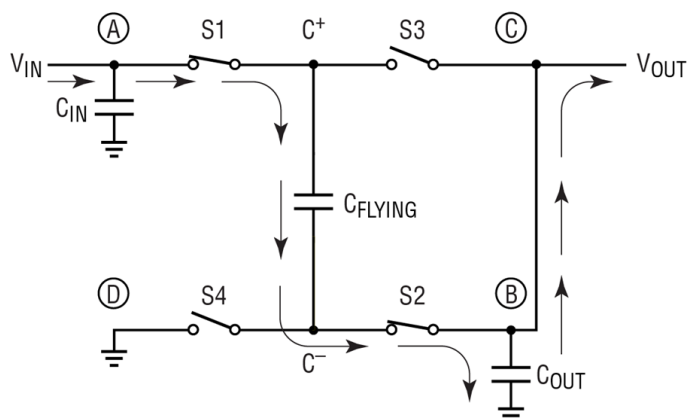
Obrázek 29 - Blokové zapojení zdroje se spínaným regulátorem (zdroj: moodle.fel.cvut.cz)

Spínané regulátory rozdělujeme na měniče se spínanými kondenzátory neboli nábojové pumpy a měniče s induktorem nebo transformátorem.

3.3.2.1 Nábojové pumpy

Měniče bez induktoru neboli nábojové pumpy jsme již zmínili v kapitole 3.1.2.1 v souvislosti s driverem pro tranzistory MOSFET, kde se tohoto principu hojně využívá.

Principem těchto měničů je ukládání energie do kondenzátorů. Požadovaného výstupního napětí se dosáhne pravidelným přepínáním topologie kondenzátorů. První topologie nabije kondenzátory vstupním napětím. Ve druhé topologii (Obrázek 30) se kondenzátory v jiném pořadí připojí na výstup. Tímto postupem lze opakovaně dosahovat celých násobků vstupního napětí. (5) (17)

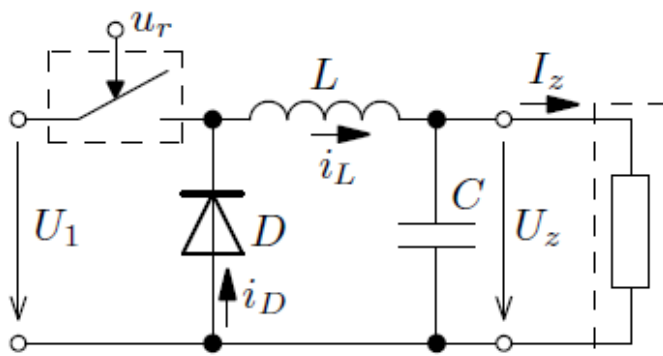


Obrázek 30 - Principiální zapojení nábojové pumpy (zdroj: www.analog.com)

Nábojové pumpy jsou vhodné pro aplikace vyžadující nízký výkon (odběr nízkého proudu), jednoduchost a nízkou cenu. Nevýhodou je obvykle nízká účinnost, která vlivem nízkého výkonu není tak podstatná. Nutno zmínit, že špičkové proudy potřebné pro nabíjení a vybíjení kondenzátorů mohou být relativně vysoké a vznikají při nich ztráty na sériových odporech. Nábojové pumpy se společně s řídicím obvodem často integrují do jednoho obvodu a společně s externími kondenzátory pak tvoří konstrukčně jednoduchý reálný obvod. Významným příkladem zapojení je dvoufázový napěťový zdvojovač nebo Dicksonova nábojová pumpa. (5) (17)

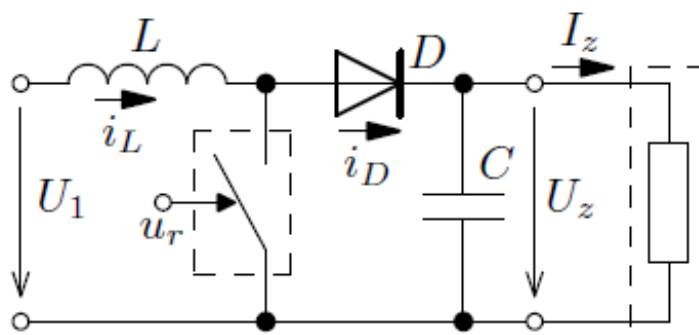
3.3.2.2 Spínané stabilizátory s induktorem

Tyto měniče rozdělujeme na snižující (buck), zvyšující (boost) a invertující. Kombinací zvyšujícího a snižujícího měniče vznikne „čuk“ nebo též buck/boost. Spínacím prvkem jsou zde obvykle tranzistory MOSFET řízeny pomocí PWM. (5) (6)



Obrázek 31 - Principiální schéma zapojení snižujícího měniče napětí (zdroj: moodle.fel.cvut.cz)

Pro generování vysokého napětí je zajímavý zvyšující měnič (boost, step-up). Takový měnič poskytne na výstupu vyšší nebo stejné napětí, než je napětí vstupní. V principu činnosti se využívá setrvačnosti neboli akumulacních schopností induktoru a kapacitoru. V ideálním případě jsou ztráty na jednotlivých prvcích zanedbatelné a účinnost přesahuje 90 %. (5) (6)



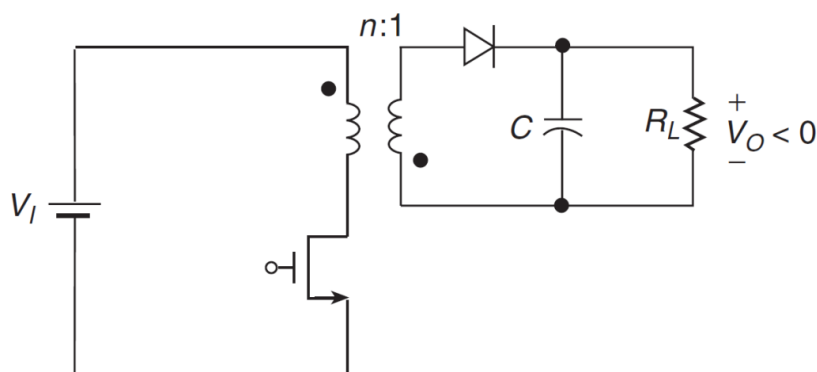
Obrázek 32 - Principiální schéma zapojení zvyšujícího měniče napětí (zdroj: moodle.fel.cvut.cz)

$$\frac{U_z}{U_1} = \frac{1}{1 - D} \quad (4)$$

Velikost výstupního napětí u zvyšujícího měniče lze měnit podle parametrů PWM signálu. Nejjednodušší změna parametrů je střída D . Výstupní napětí se zvyšuje s rostoucí střídou v ideálním případě dle vzorce 1.

3.3.2.3 Spínané stabilizátory s transformátorem

Jedná se o tzv. měničové zdroje (DC/DC převodníky) a nejčastěji se používají pro galvanické oddělení od napájecí sítě. Podle principu činnosti dále rozdělujeme na jednočinné a dvojčinné měniče. Mezi jednočinné řadíme blokující měnič (Flyback) nebo propustný měnič (Forward). Mezi dvojčinné řadíme měnič s paralelním napájením (Push Pull) nebo měnič s polovičním můstkem (Half Bridge). (6)



Obrázek 33 - Schéma blokujícího DC-DC měniče (Flyback) (zdroj: moodle.fel.cvut.cz)

Flyback je v podstatě izolovaný Buck/Boost měnič, který je nejrozšířenější typ ve spotřební elektronice (např. set-top-box) a to z důvodu jednoduchosti a nízké ceně. Oproti tomu je jeho nevýhodou velké rušení (EMI), velké zvlnění výstupního napětí a pro vyšší výkony (nad 200 W) je potřeba velkého transformátoru.

3.4 Operační zesilovače pro měření

Měření elektrických a neelektrických veličin je nedílnou součástí většiny elektrických zařízení. Takže nemůže být divu, že ani generátor pulzů nebude výjimkou. Jak úvodní blokové schéma napovídá, bude zde potřeba měřit napětí na kondenzátoru a na výstupním spínacím prvku. Jedním z předpokladů pro úspěšné generování pulzů je přesné měření bez zatížení generovaného pulzu. Takového měření lze docílit například pomocí operačního zesilovače.

Operační zesilovače jsou tou nejrozšířenější skupinou analogových obvodů, které nejčastěji používáme pro časově spojitě zpracování napětí nebo proudu. Výhodou těchto obvodů je vysoká kvalita parametrů za relativně nízkou cenu. Operačním zesilovačům, které využívají zpětnovazebního zapojení se zápornou zpětnou vazbou říkáme měřicí zesilovače. Od takových zesilovačů požadujeme přesné a stabilní zesílení, impedanční oddělení zdrojů signálů a potlačení rušivých signálů. (7) (6)

3.4.1 Invertující zesilovač

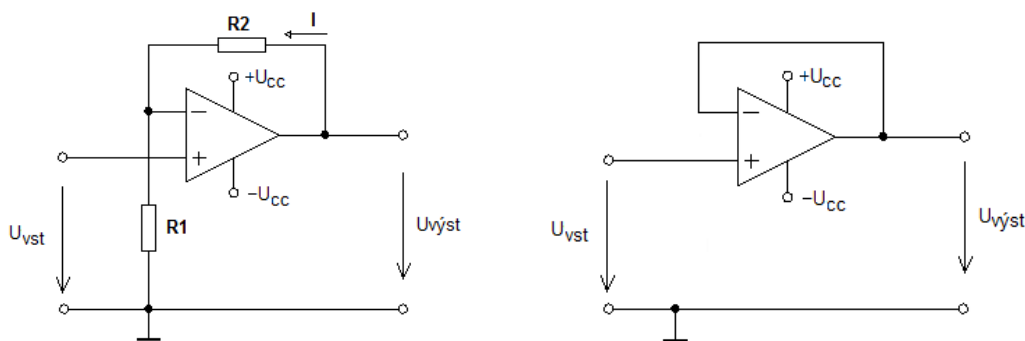
Nejběžnějším použitím operačního zesilovače je právě zapojení invertujícího zesilovače. V tomto zapojení přivádíme signál do invertujícího vstupu (–), zatímco neinvertující vstup (+) uzemníme. Pomocí rezistoru na vstupu a zpětnovazebního rezistoru spočítáme výstupní napětí, které je záporným násobkem vstupního napětí. Invertující zesilovače mají významné uplatnění v oblasti měření teploty termistory. (6)

3.4.2 Neinvertující zesilovač – sledovač napětí

Sledovač napětí je zvláštním případem neinvertujícího zesilovače se zesílením 1, který je často označován jako „impedanční transformátor“. Nejčastějším použitím je transformace zdroje s velkým vnitřním odporem (například dělič napětí, nebo piezoelement) na napěťový zdroj s malým vnitřním odporem. (6)

$$A_u = \frac{U_{výst}}{U_{vst}} = \frac{R_2 + R_1}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (5)$$

Z výše uvedené rovnice pro zesílení neinvertujícího zesilovače lze odvodit velikost odporů pro sledovač napětí. Odpor R_2 se musí blížit nule a zároveň odpor R_1 nekonečnu. (7) (8)



Obrázek 34 – Neinvertující zesilovač a sledovač napětí (zdroj: eluc.ikap.cz)

3.5 Ultrazvukové měniče

Jak již bylo zmíněno v úvodu, realizovaný generátor bude mimo jiné sloužit pro buzení piezoelektrického vysílače, tudíž je potřeba se s nimi seznámit. Velice rozsáhlou nabídku má výrobce Olympus. V následujících podkapitolách rozebereme snímače (převodníky), které jsou už nyní nasazeny.

3.5.1 Kontaktní převodník

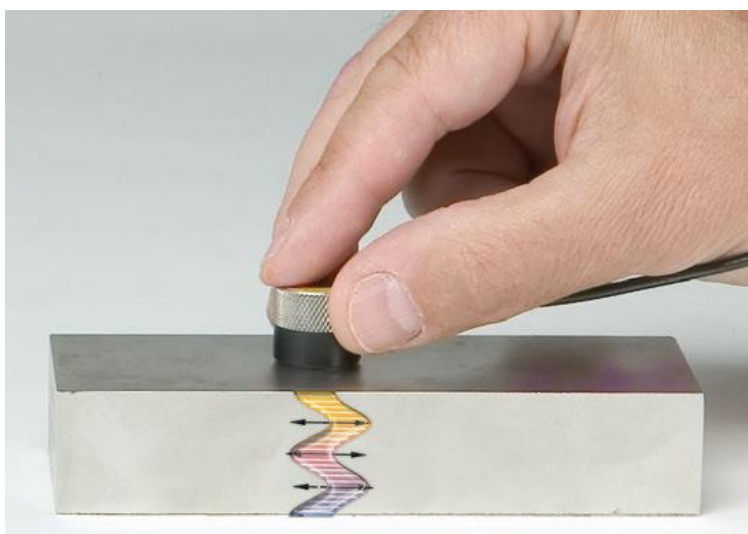
Kontaktní převodník je jednovrstvkový převodník podélných vln určený pro přímé testování široké škály materiálů. Převodník se využívá pro detekci vad, charakterizaci materiálů, kontrolu desek, aj. (18)



Obrázek 35 - Kontaktní převodník (18 str. 8)

3.5.2 Snímač příčné vlny s kolmým dopadem

Jedná se o skupinu kontaktních snímačů, které generují příčné vlny šířící se kolmo k testovanému materiálu. Poměr složek podélné a příčné vlny je velmi nízký (menší než -30 dB). Využití mají mimo jiné pro charakterizaci struktury materiálu. Do této kategorie spadá i kontaktní převodník V1548 ve standardním provedení pouzdra s pravoúhlým konektorem BNC, který bude s generátorem používán. (18)



Obrázek 36 - Snímače příčné vlny s kolmým dopadem (18 str. 17)

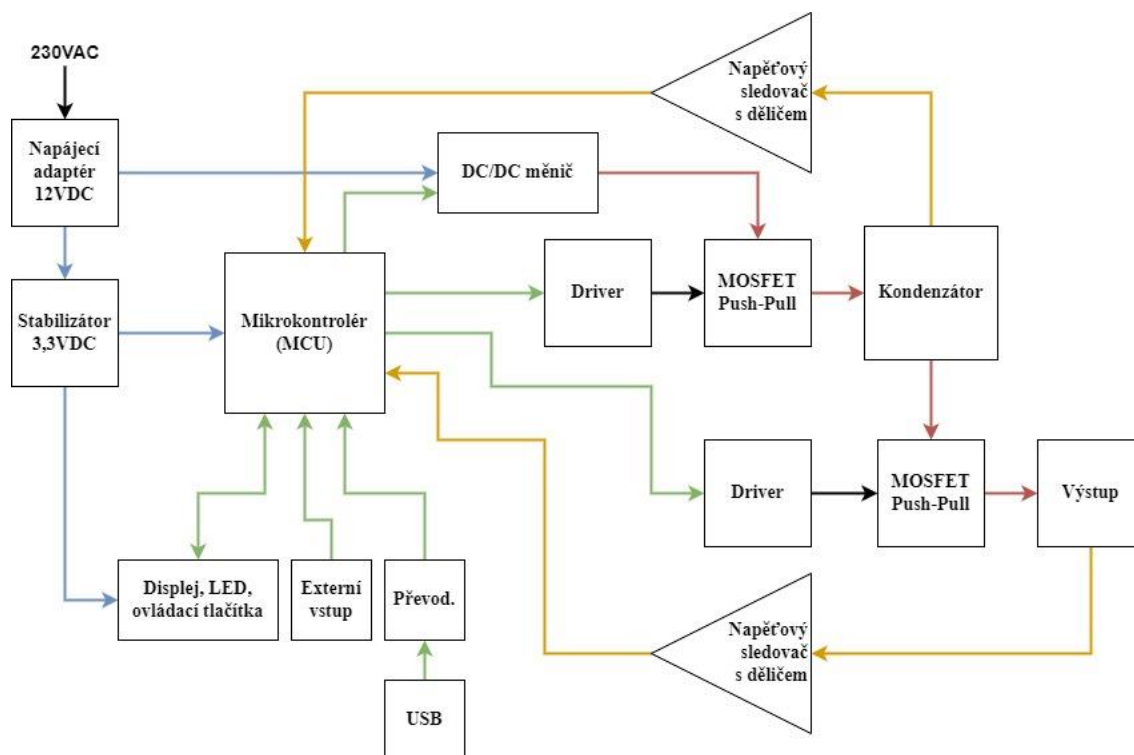
4 Postup a realizace

Teoretické znalosti, které jsme získali v předchozí kapitole, aplikujeme na řešení zadaného úkolu. Pro úspěšnou realizaci je potřeba postupovat dle následujících kroků:

- Návrh blokového schéma
- Pomocí testování vybrat nejvhodnější spínací prvek
- Volba vhodného mikrokontroléru
- Volba způsobu napájení
- Návrh schéma zapojení
- Návrh plošného spoje s ohledem na zvolené krabičky
- Osazení testovacího vzorku
- Základní naprogramování
- Měření výstupních průběhů
- Finální kompletace

4.1 Blokové schéma

V úvodu teoretického rozboru je uvedeno základní blokové schéma, které nyní náležitě upravíme do stavu vypovídajícímu potřebám této práce. Na obrázku níže vidíme blokové schéma s konkrétními komponenty potřebné pro realizaci základní desky. Modré cesty jsou pro napětí do 12 V_{DC} a červené pro napětí 100 V_{DC} ÷ 500 V_{DC}. Zelené cesty jsou řídicí signály z mikrokontroléru, a nakonec žluté slouží pro měření hodnot.



Obrázek 37 - Návrh blokového schéma

4.2 Volba spínacího prvku a jeho testování

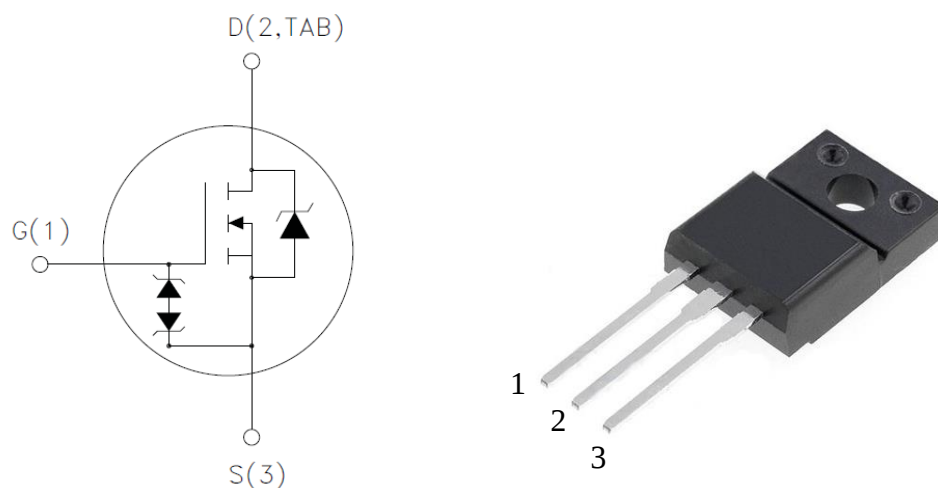
Volba spínacího prvku a jeho budiče není lehkou disciplínou, obzvlášť pokud potřebujeme rychle sepnout velké napětí. V následujících podkapitolách vybereme vhodný tranzistor, následně vytypujeme několik vhodných driverů (budičů), které otestujeme. Driver s nejlepšími výsledky bude použit pro finální návrh generátoru.

4.2.1 Výběr tranzistoru

Z teoretického rozboru je zřejmé, že nejvhodnějším spínacím prvkem pro tuto aplikaci je N-kanálový MOSFET. Tento typ tranzistorů s sebou sice nese jistá omezení v podobě velké vstupní kapacity, ovšem jejich výhody převažují. Konkrétně byl vybrán tranzistor STP10NK80ZFP v pouzdře TO220FP od výrobce STMicroelectronics. Parametry vybraného tranzistoru popisuje níže uvedená tabulka. Zmíněný tranzistor bude zapojený v režimu Push-Pull, protože potřebujeme zátěž (kondenzátor nebo výstup) připojovat ke kladnému i zápornému pólu napájení, viz Obrázek 11c.

Tabulka 1 - Základní parametry tranzistoru STP10NK80ZFP

Symbol	Parametr	Hodnota	Jednotka
U_{DSS}	Napětí Drain-Source	800	V
U_{GS}	Napětí Gate-Source	± 30	V
I_D	Proud do Drain	9	A
P_{TOT}	Celkový ztrátový výkon	40	W
$R_{DS(on)}$	Odpor v sepnutém stavu	max. 0,9	Ω
C_{iss}	Vstupní kapacita	2180	pF



Obrázek 38 - Vnitřní schéma zapojení (vlevo) a pouzdro TO220FP (vpravo) (zdroj: www.st.com)

4.2.2 Výběr driveru (budiče)

Obecně platí, že nelze výkonné tranzistory MOSFET ovládat přímo z mikrokontroléru, a to zejména kvůli jejich velké vstupní kapacitě, kterou je potřeba překonat. Tento problém snadno vyřešíme pomocí budiče tranzistorů (tzv. Gate driver), který vložíme mezi mikrokontrolér a tranzistor. Pro realizaci zapojení není potřeba přehršel součástek, bohatě postačí driver, kondenzátor a rychlá dioda. Driverů se vyrábí mnoho, každý výrobce těchto součástek nabízí stovky typů. Abychom si výběr usnadnili, je potřeba znát základní parametry, podle kterých driver vybereme. Víme, že budeme generovat pulzy do 500 V, tudíž je nanejvýš vhodné vybírat drivery, které pracují s napětím minimálně 600 V (U_{OFFSET}). Další důležitý parametr je způsob zapojení tranzistorů, což jsme zvolili Push-Pull (u driverů se tato skutečnost značí „High and Low Side Gate Driver“). V poslední řadě potřebujeme znát proud, který musíme dodat pro rychlé sepnutí/rozeptnutí. K tomu nám poslouží rovnice 3, do které dosadíme parametry vybraného tranzistoru. Čas pro sepnutí určíme úměrně podle pulzu, který budeme generovat. Jelikož chceme standardně generovat délku pulzu okolo 10 μs , pak doba sepnutí/rozeptnutí měla být maximálně 100 ns. Po dosazení zmíněných hodnot do rovnice 3 dostaneme, že potřebný proud do řídicí elektrody vybraného tranzistoru bude minimálně 650 mA ($I_{\text{O+/-}}$).

Ze zvolených a vypočítaných požadavků na driver vybereme vhodné kandidáty. Konkrétně byl vybrán driver IRS2103 od výrobce Infineon Technologies, driver IX2113 od IXYS Integrated Circuits a nakonec driver NCP5181 od výrobce ON Semiconductor. Parametry uvedených driverů představí níže uvedená tabulka.

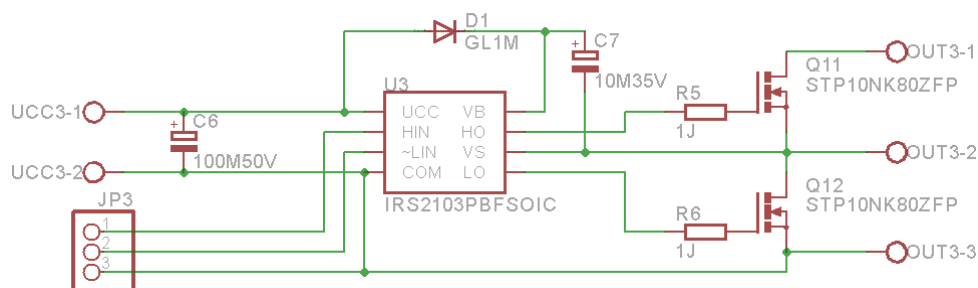
Tabulka 2 - Srovnání technických parametrů vybraných driverů

Parametr	IRS2103	IX2113	NCP5181
U_{OFFSET}	600 V	600 V	600 V
$I_{\text{O+/-}}$	0,13 A / 0,27 A	2 A / 2 A	1,1 A / 2,4 A
U_{OUT}	10 V ÷ 20 V	10 V ÷ 20 V	10 V ÷ 20 V
$t_{\text{on/off}}$ (typ.)	680 ns / 150 ns	113 ns / 100 ns	40 ns / 20 ns
Delay (max.)	520 ns	20 ns	100 ns

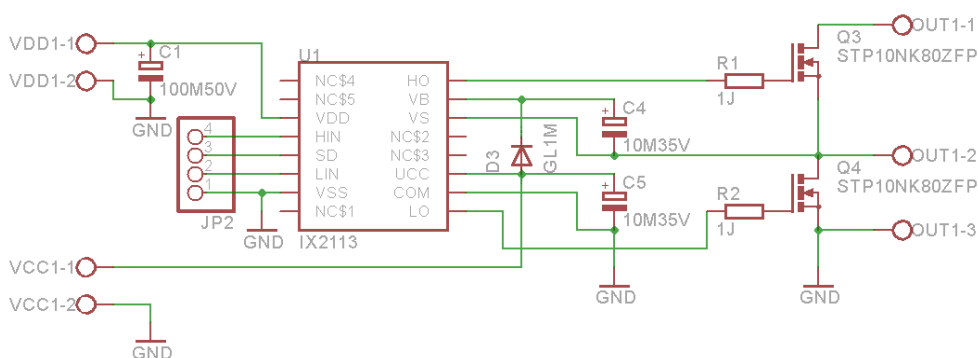
Z výše uvedené tabulky je patrné, že favoritem je driver IX2113, splňuje totiž základní požadavek na dodání proudu do řídicí elektrody Gate. Naopak parametrově slabším, ba možná i nedostatečným bude driver IRS2103 kvůli nízkému proudu, který zvládne do řídicí elektrody Gate dodat. Driver IRS2103 sice odporuje výše uvedenému požadavku na proud, ale v době výběru panovala pandemie COVID-19, která značně omezila dostupnost součástek na trhu, tudíž byl driver vybrán vlivem aktuální dobré dostupnosti. Driver NCP5181 splňuje základní požadavky a nemá příliš velká zpoždění ($t_{\text{on/off}}$ a Delay).

4.2.3 Testovací přípravek

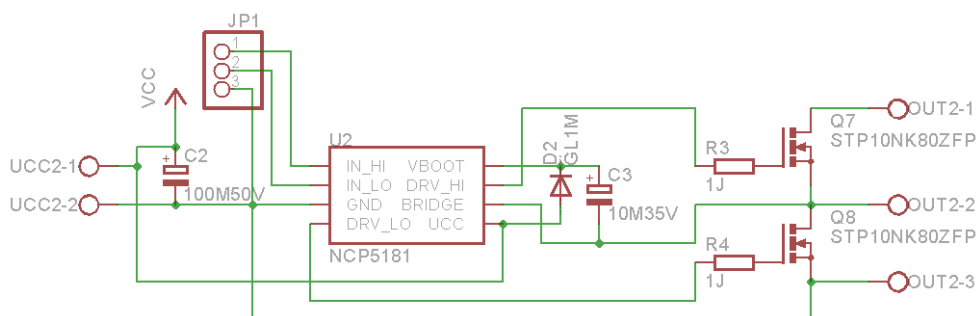
V předchozí podkapitole jsme vybrali jednotlivé komponenty, které utvoří potencionální spínač pro budoucí generátor pulzů. Dle doporučených zapojení driverů z technických listů výrobců (tzv. datasheet) byly navrženy tři nezávislé obvody. Jednotlivá schémata zapojení, které jsou uvedeny níže, byla nakreslena v software Eagle.



Obrázek 39 - Schéma zapojení Push-Pull spínače s driverem IRS2103

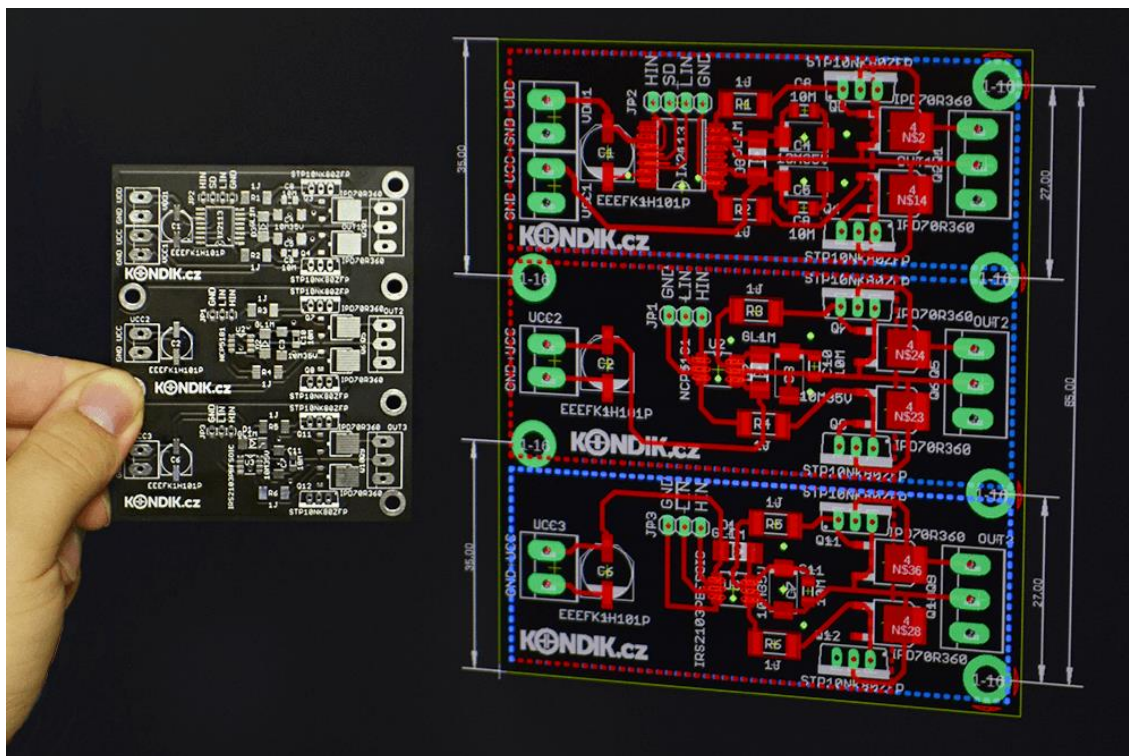


Obrázek 40 - Schéma zapojení Push-Pull spínače s driverem IX2113



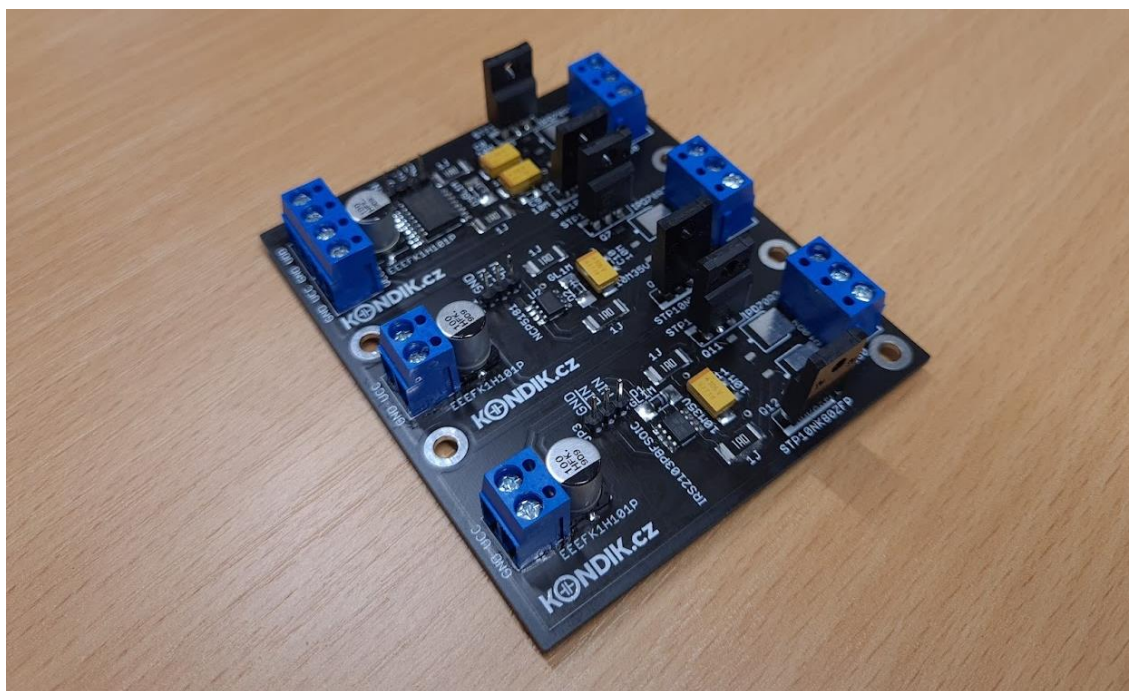
Obrázek 41 - Schéma zapojení Push-Pull spínače s driverem NCP5181

Jak můžeme na schématech vidět, jednotlivá zapojení se příliš od sebe neodlišují. Zapojení se vždy skládá z tranzistorů a jejich rezistorů, které omezují proud do řídicí elektrody Gate, dále pak z rychlé diody a kondenzátoru pro uchování náboje potřebného pro sepnutí tranzistoru. Pro potřebu důkladného otestování byl navržen plošný spoj obsahující všechny tři výše uvedené zapojení. Navržený a vyrobený plošný spoj můžete vidět na následujících obrázcích.



Obrázek 42 - Návrh plošného spoje pro potřeby otestování driverů

Obrázek 42 nemá aplikovanou rozlitou měď z důvodu lepší demonstrace návrhu. Plošný spoj byl vyroben v sérii pěti kusů společností JLCPCB. Výroba plošného spoje byla zároveň testem kvality a rychlosti výroby zmíněné společnosti. Vyrobený testovací přípravek může dále sloužit studentům pro seznámení se s problematikou driverů.



Obrázek 43 - Vyrobený a osazený plošný spoj pro testování driverů

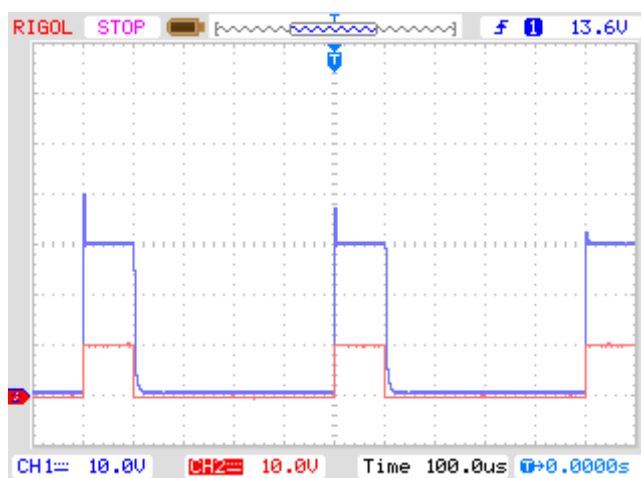
4.2.4 Výsledky testování

Cílem tohoto měření je vybrat vhodný driver. Měření probíhalo v několika fázích. V první fázi byl jako zdroj buzení použit běžně dostupný generátor funkcí v režimu generování pulzů, který spínal high-side tranzistor pro ověření spínání vysokého napětí. Délka pulzu byla nejprve 10 μ s a později 1 μ s. Tranzistory spínaly na výstup napětí 30 V z laboratorního zdroje. V druhé fázi byl místo laboratorního zdroje použit DC/DC měnič, který z napětí 12 V zvládne vytvořit napětí 100 V až 600 V. Výsledky měření pak shrnuje Tabulka 3 a níže uvedené obrázky zobrazují průběhy z testování, kde kanál 1 (CH1) je výstup z tranzistorů a kanál 2 (CH2) je buzení z generátoru funkcí.

Tabulka 3 - Souhrn výsledků funkčnosti driverů

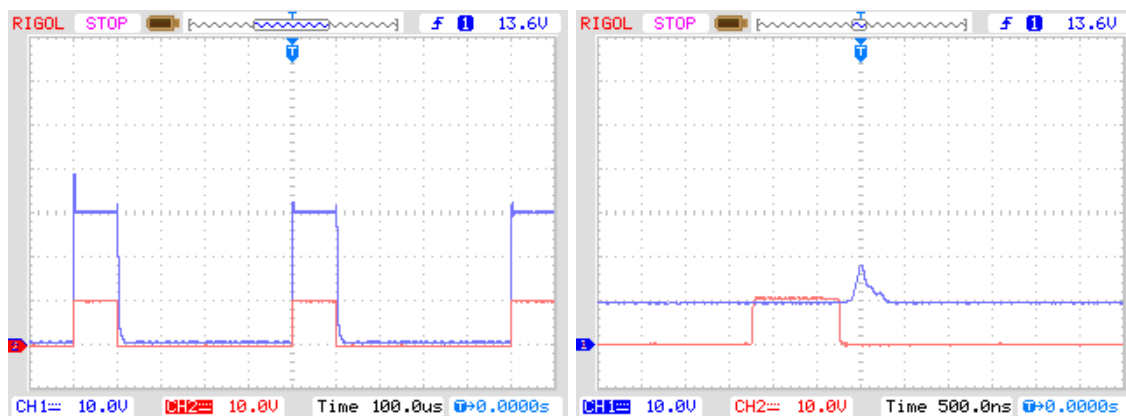
Test	IRS2103	IX2113	NCP5181
Pulz (30 V, 10 μ s)	funkční	funkční	funkční
Pulz (30 V, 1 μ s)	nefunkční	funkční	funkční
Pulz (100 V, 10 μ s)	netestováno	funkční	funkční
Pulz (250 V, 10 μ s)		funkční	nefunkční, destrukce driveru
Pulz (400 V, 10 μ s)		funkční	

Driver NCP5181 byl velkým zklamáním. Při testování pulzem o špičkovém napětí 250 V a délce 10 μ s došlo k proražení výstupních tranzistorů a zkratování napájecího napětí a nulového potenciálu. Zkratový proud způsobil destrukci celého driveru. Samozřejmě bylo provedeno hloubkové zkoumání příčiny, kontrola zapojení a proměření parametrů okolních součástek. Veškeré součástky byly v pořádku, tedy až na samotný driver. Jelikož bylo využito výrobcem doporučeného zapojení, byl poškozený kus nahrazen novým. Nový driver byl zničen při napětí 300 V.



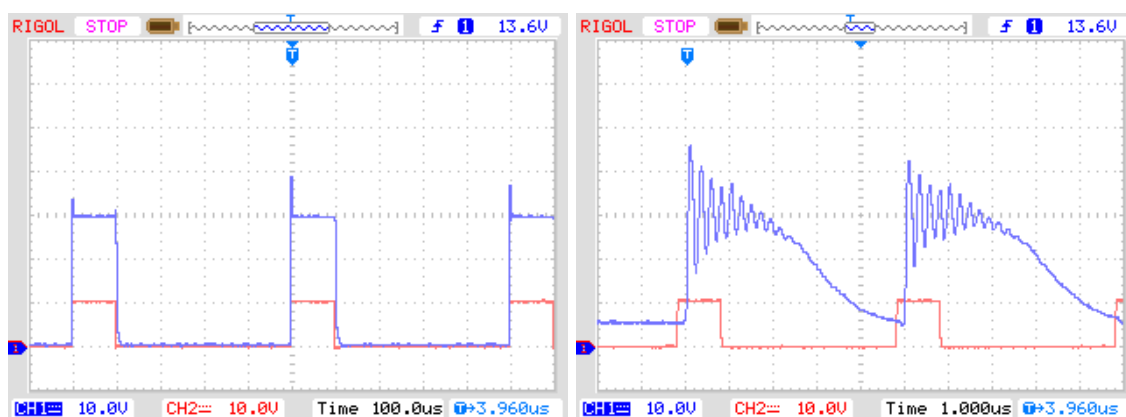
Obrázek 44 - Průběh z testování driveru NCP5181 (testování pulzu 30 V, 10 μ s)

Driver IRS2103 neměl již od začátku příliš dobré preference, ovšem bylo zapotřebí jej otestovat. Tento driver ale nedodal dostatečný proud pro sepnutí a rozepnutí tranzistoru při délce pulzu 1 μ s. Jelikož je hodnota 5 μ s minimální hodnotou potřebnou pro splnění zadání, není vhodné použít tento driver, neboť by navržený generátor neměl žádnou rezervu pro případné zdokonalení.

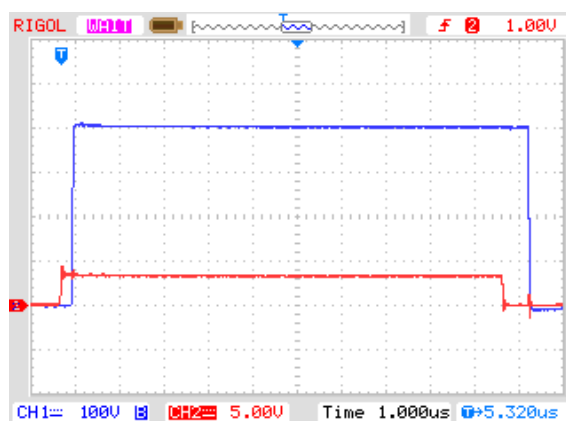


Obrázek 45 - Průběhy z testování driveru IRS2103 (vlevo testování pulzu 30 V, 10 μ s a vpravo pulzu 30 V, 1 μ s)

Z tabulky 3 vyplývá, že jediným použitelným driverem je IX2113, neboť obstál ve všech bodech testování. Průběhy z testování můžete vidět níže. Při testování pulzem o délce 1 μ s jsou vidět značné zátky způsobené regulací napětí laboratorního zdroje. Zároveň má pulz dlouhý doběh, způsobený spínáním pouze horního tranzistoru.



Obrázek 46 - Průběhy z testování driveru IX2113 (vlevo testování pulzu 30 V, 10 μ s a vpravo pulzu 30 V, 1 μ s)



Obrázek 47 - Průběhy z testování driveru IX2113 (testování pulzu 400 V, 10 μ s)

4.3 Volba mikrokontroléru

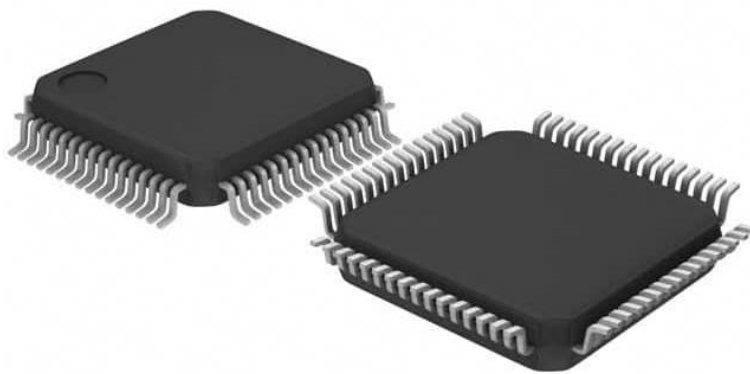
V teoretickém rozboru bylo představeno několik skupin mikrokontrolérů, jejich výhody a nevýhody, a případně i oblasti použití. Mikrokontroléry ARM mají v sobě velký potenciál, není tedy divu, že je jejich nasazení čím dál častější. Jádra Cortex M4 jsou určena pro aplikace, v nichž je vyžadováno zpracování digitálního signálu, který mohou velmi přesně zpracovat zásluhou 32bitové šířce sběrnice.

Pokud zrovna nevrcholí světová polovodičová krize, je jedním z největších výrobců mikrokontrolérů společnost STMicroelectronics. V nabídce této společnosti naleznete stovky typů mikrokontrolérů řady STM32 (32-bit ARM Cortex-M). Rodina STM32 se dále větví dle použití na vysoce výkonné (STM32F), mainstreamové (STM32G) a nízko-příkonové (STM32L).

Zmíněná světová krize výběr značně ztenčila, bylo potřeba rychle vybrat vhodný mikrokontroler z dostupných zásob a zároveň splňující všechny požadavky. Všeobecně známá a hojně využívaná je řada STM32F4, proto jsem vybral mikrokontrolér s označením STM32F410R8T6. Pro vybraný MCU lze použít rychlý krystal, jehož frekvence lze zvýšit násobičkou kmitočtu, což umožňuje generovat přesný krátký pulz. Dále MCU obsahuje AD i DA převodník a má dostatečný počet vstupů a výstupů. Další parametry obsahuje následující tabulka.

Tabulka 4 - Základní parametry mikrokontroléru STM32F410R8T6

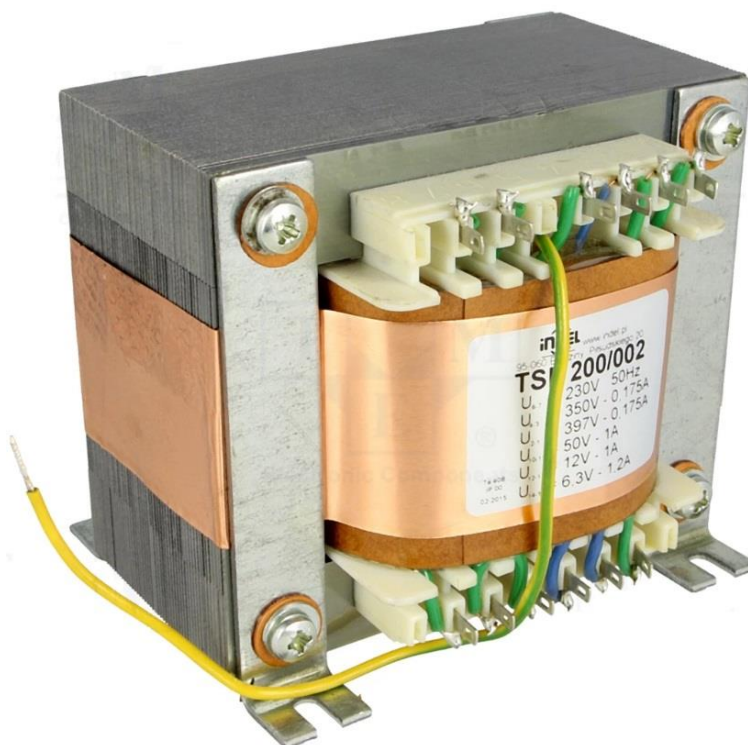
Parametr	Hodnota	Jednotka
Jádro	ARM Cortex M4	
Maximální frekvence CPU	100	MHz
Počet vstupů/výstupů	50	
Počet univerzálních časovačů	4	
Provozní napájecí napětí	1,7 ÷ 3,6	V
Rozlišení AD převodníku	12	bit
Rozlišení DA převodníku	12	bit
Šířka datové sběrnice	32	bit
Velikost datové SRAM	32	kB
Velikost programovací paměti	64	kB
Pouzdro	LQFP-64	



Obrázek 48 - Pouzdro LQFP-64 (zdroj: www.digikey.com)

4.4 Volba způsobu napájení

Výběr vhodného napájecího zdroje je pro tuto práci velmi důležitý. V teoretickém rozboru bylo představeno několik možností s využitím lineárních nebo spínaných regulátorů. Jednou z možných cest bylo použít běžně dostupný transformátor TSL200/002 od výrobce INDEL, který nabízí pět různých sekundárních napětí v rozmezí od 6,3 V_{AC} do 397 V_{AC}. Parametrově je tento transformátor více než dostatečný, neboť po usměrnění graetzovým můstkem nabídne napětí až 560 V_{DC}. Značnou nevýhodou je vyšší cena (cca 2700,00 Kč), vyšší hmotnost (cca 3,4 kg) a v poslední řadě rozměry, které kolidují s možností umístění celého zařízení na DIN lištu. Nevýhody v tomto případě překračují únosnou mez, a tak je namístě najít lepší řešení. Uvedený transformátor svými parametry spíše odpovídá použití v zařízení s elektronikami.



Obrázek 49 - Transformátor TSL200/002 (zdroj: www.tme.eu)

Mnohem lepší cestou je napájení pomocí síťových spínaných zdrojů s výstupním napětím 12 V_{DC}. Takové spínané zdroje jsou běžně dostupné v provedení adaptéru do síťové zásuvky a též v provedení pro montáž na DIN lištu. Napětí 12 V lze snadno upravovat pomocí stabilizátorů na další potřebné napětí, například 3,3 V pro MCU, aj.



Obrázek 50 - Spínaný napájecí zdroj do zásuvky (vlevo) a na DIN lištu (vpravo) (zdroj: www.kondik.cz)

K řešení tedy už zůstává pouze zdroj napětí, které potřebujeme spínat na výstup. Moderní návrhy pro tyto aplikace využívají spínaných stabilizátorů s induktorem, více viz kapitola 3.3.2.2 popisující mimo jiné zvyšující měnič (boost). Případně lze využít spínaných stabilizátorů s transformátorem neboli DC-DC převodníků, více viz kapitola 3.3.2.3 popisující mimo jiné jednočinný blokující měnič (Flyback). Po důkladném prozkoumání trhu byl nalezen neizolovaný DC-DC měnič HO1-P601V-3C. Jedná se o zboží, které není standardně na skladech distributorů, proto byly prostřednictvím českého zastoupení značky zakoupeny testovací vzorky.



Obrázek 51 - Ilustrační obrázek měniče HO1-P601V-3C (zdroj: www.mornsun-power.com)

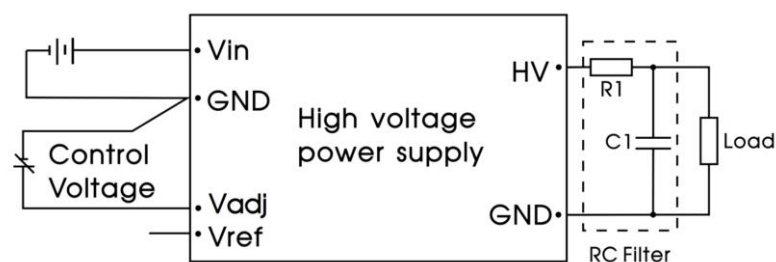
Měniče výrobce MORN SUN řady HO1-PxxxxV-xxB/C/F jsou vybaveny vstupní ochranou proti přepólování, ochranou proti přepětí řídicího napětí, výstupní ochranou proti zkratu, nadproudovou ochranou a kovovým stíněním pro lepší EMC vlastnosti. Měniče vykazují nízké zvlnění výstupního napětí, nízký časový a teplotní koeficient. Jedná se o měniče, které jsou speciálně navrženy pro aplikace v napájecích systémech, kde je vyžadováno vysoké napětí s nízkým zvlněním výstupu a výstupní napětíovou stabilitou. Tyto měniče jsou široce používány ve zdrojích pro fotonásobiče, hmotnostní spektrum, světelné spektrum, elektronový paprsek, iontový paprsek, aj.

Vybraný měnič HO1-P601V-3C vyžaduje pevné vstupní napětí a umožňuje regulovatelné výstupní napětí. Podrobné parametry vybraného měniče jsou uvedeny níže.

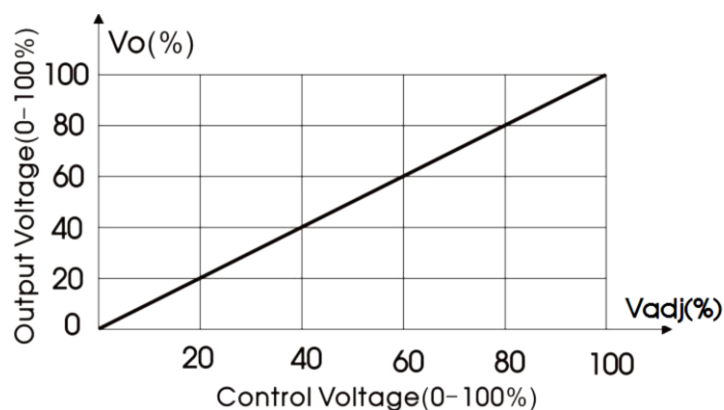
Tabulka 5 - Parametry DC-DC měniče HO1-P601V-3C

Parametr	Hodnota	Jednotka
Vstupní napětí	12	V DC
Vstupní proud (s/bez zátěže)	typ. 280/8 max. 300/12	mA
Rozsah výstupního napětí	0 ~ 600	V DC
Výstupní proud	max. 3	mA

Hlavní výhodou vybraného měniče je možnost řízení výstupního napětí prostřednictvím vstupu V_{adj}. Jelikož vybraný mikrokontrolér obsahuje DAC převodník, lze výstupní napětí měniče snadno ovládat přímo z MCU. Maximálního výstupního napětí (600 V) lze dosáhnout přivedením napětí 2,5 V na zmíněný vstup V_{adj}, přičemž převodní charakteristika je lineární. Prostřednictvím vstupu V_{ref} lze měnič ovládat manuálně proměnlivou hodnotou odporu, například pomocí potenciometru nebo trimru s hodnotou odporu 10 kΩ.



Obrázek 52 - Základní zapojení DC-DC měniče HO1-P601V-3C (zdroj: www.mornsun-power.com)

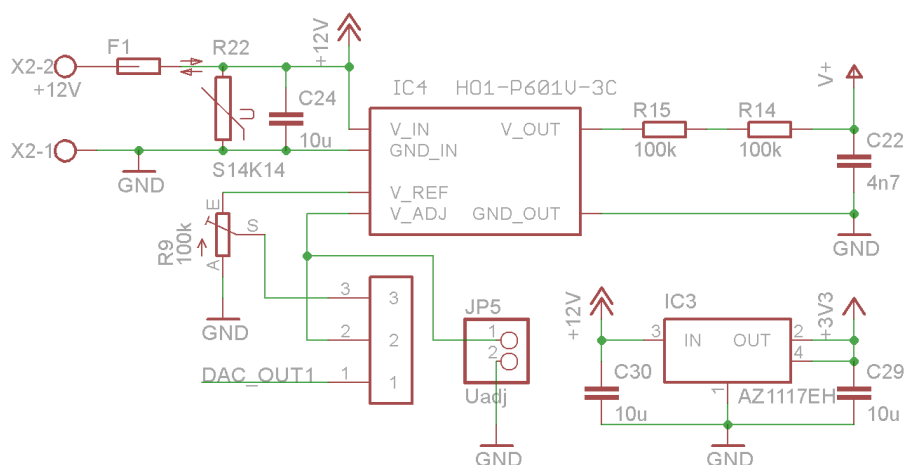


Obrázek 53 - Převodní charakteristika ovládacího napětí na výstupní napětí (zdroj: www.mornsun-power.com)

Výstupní zvlnění napětí měniče lze dále snížit připojením RC filtru na výstupní kontakty. RC filtr se skládá z rezistoru R1, pro který je doporučena hodnota 2 kΩ, a z kondenzátoru C1, pro který je doporučena hodnota 4,7 nF / 2 kV. Na vstupní napájecí kontakty se pak doporučuje připojit kondenzátor s kapacitou 100 uF / 50 V.

4.5.2 Zapojení napájecí části

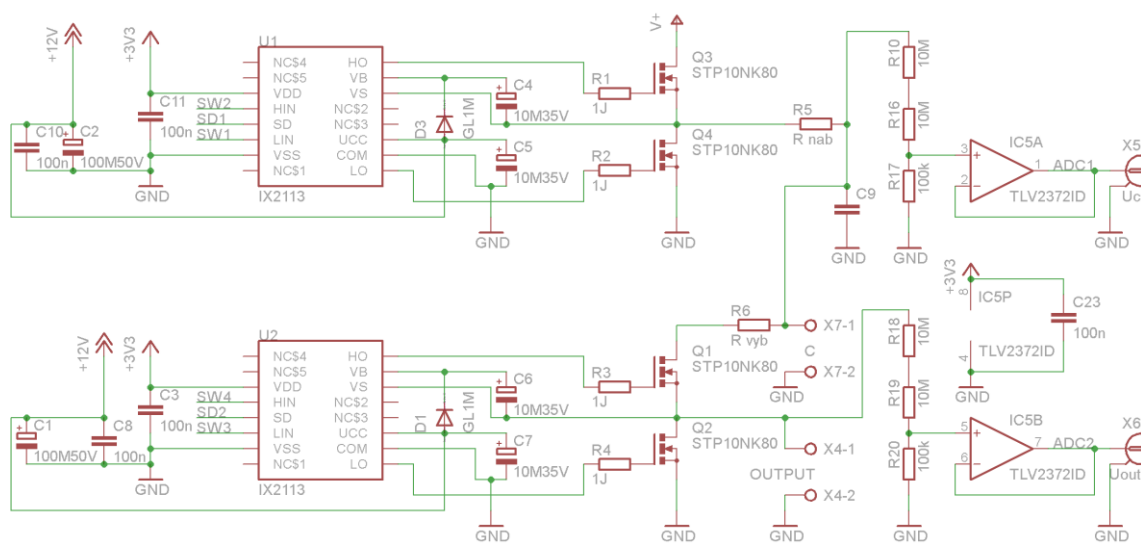
Nedílnou součástí každého systému je napájení. Pro napájení řídicí a výkonové části slouží jednoduchý lineární stabilizátor AZ1117 s výstupním napětím 3,3 V. Vysoké napětí (až 600 V) zajišťuje zvyšující měnič H01-P601V-3C popsany v kapitole 4.4. Nastavení výstupního napětí měniče zajišťuje DAC převodník mikrokontroléru nebo lze využít trimmer R9. Volbu zdroje řízení lze zvolit při osazování DPS proklamováním pinů. Vstupní pojistka F1 a varistor S14K14 zajišťují ochranu celého systému. Celý systém je napájen spínaným adaptérem s výstupním napětím 12 V_{DC}. Nedílnou součástí všech prvků jsou filtrační kondenzátory (např. C29 a C30) na vstupech i výstupech.



Obrázek 55 - Schéma zapojení napájecí části

4.5.3 Návrh výkonové části

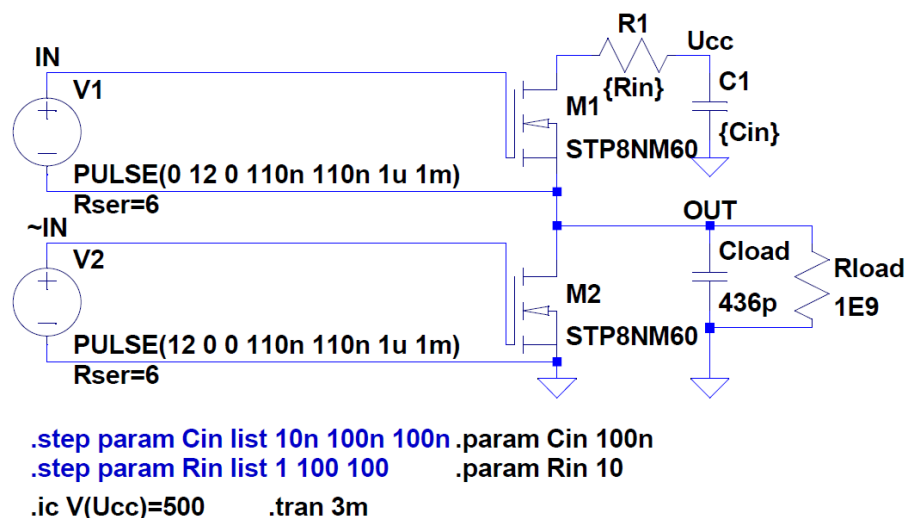
Výkonová část obsahuje Push-Pull zapojené tranzistory s řídicími drivers. Zapojení vychází z katalogu výrobce, který definuje doporučené hodnoty součástek. Podrobné informace o použitých driverech jsou uvedeny v kapitole 4.2.2. Pro sledování úrovně napětí slouží odporový dělič v poměru 1:201 s výstupem přes operační zesilovač, který je zapojen jako napěťový sledovač. Výstupy OZ jsou připojeny na BNC konektor.



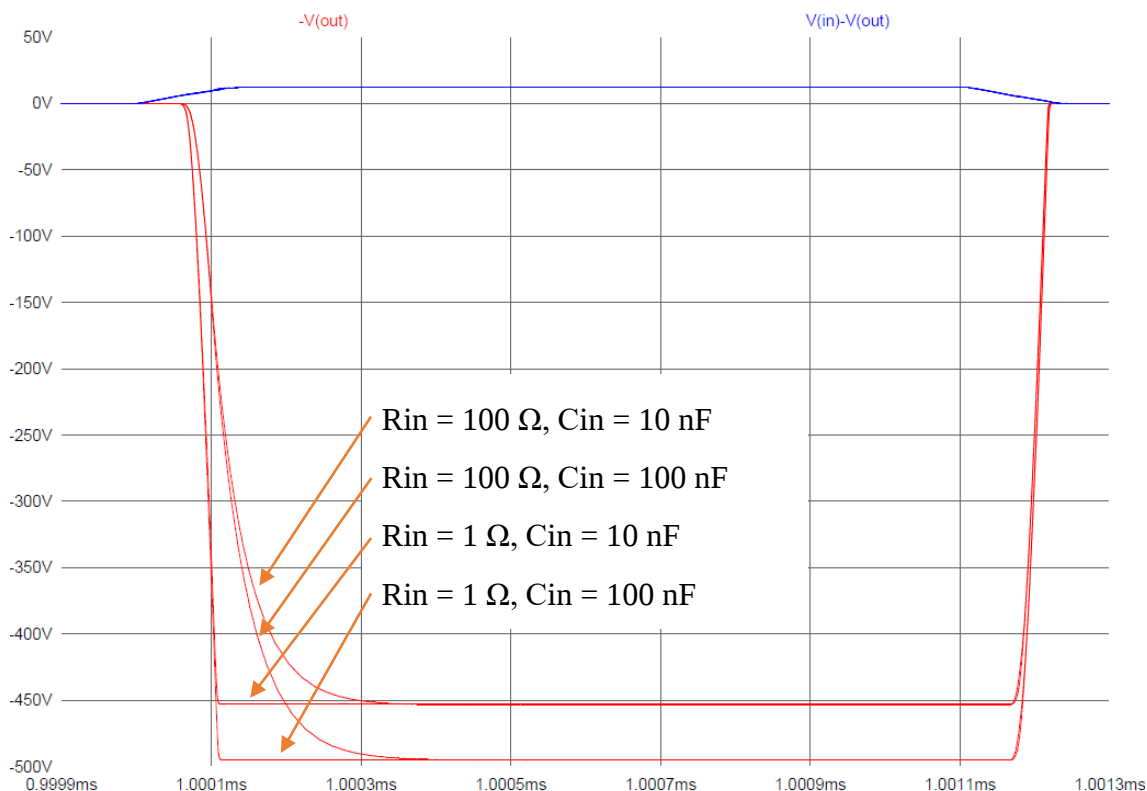
Obrázek 56 - Schéma zapojení výkonové části

4.5.4 Volba hlavního kondenzátoru

Hlavní kondenzátor C9 slouží k uchování energie potřebné pro vygenerování nastaveného pulzu. Volba vhodné hodnoty byla určena simulací v programu LTspice. Testovací schéma a výstupní průběhy jsou uvedeny níže. Hodnoty prvků zátěže odpovídají empiricky změřeným hodnotám ultrazvukového převodníku V1548.

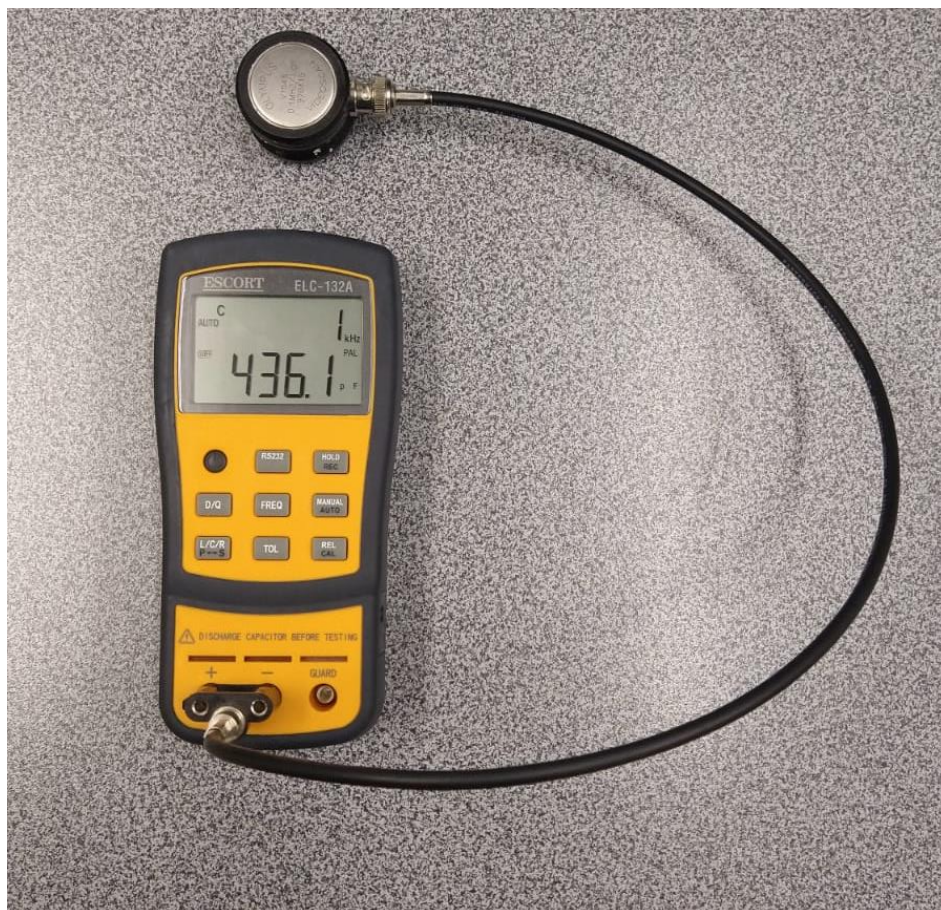


Obrázek 57 - Schéma zapojení kritické části v programu LTspice



Obrázek 58 - Výstupní průběhy testovaných kondenzátorů

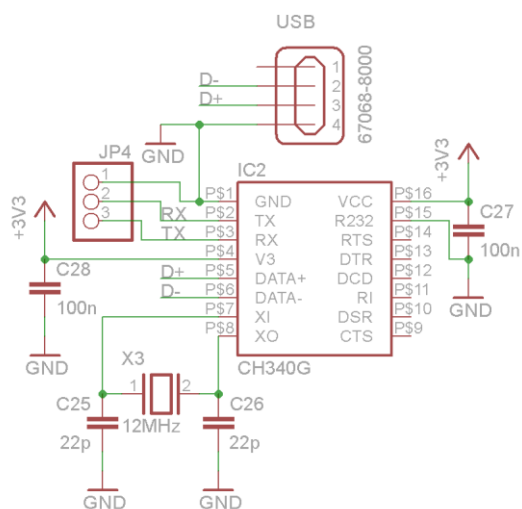
Ze simulace vyplývá, že nejvhodnější hodnoty jsou pro vybíjecí rezistor 1 Ω a pro kondenzátor 100 nF při minimálním napětí 600 V. Vyšší hodnota rezistoru nebo nižší hodnota kapacity způsobovaly zkreslení pulzu, což není pro danou aplikaci vhodné.



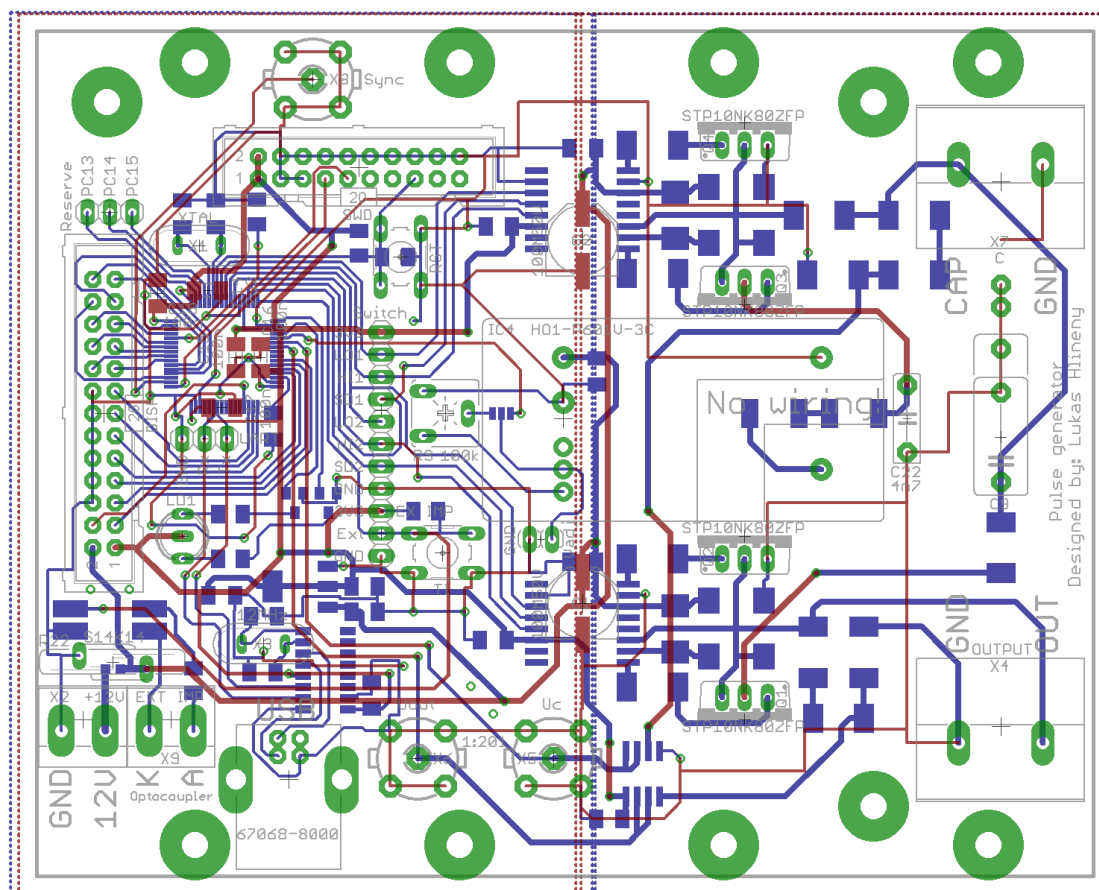
Obrázek 59 - Měření parametrů ultrazvukového převodníku V1548

4.5.5 Návrh zapojení USB komunikace

Komunikaci po univerzální sériové sběrnici zajišťuje převodník CH340G. Tento převodník pro svojí správnou činnost vyžaduje velmi málo externích součástek. Jedinou nutnou součástkou je hodinový krystal (X3) definující rychlost komunikace.



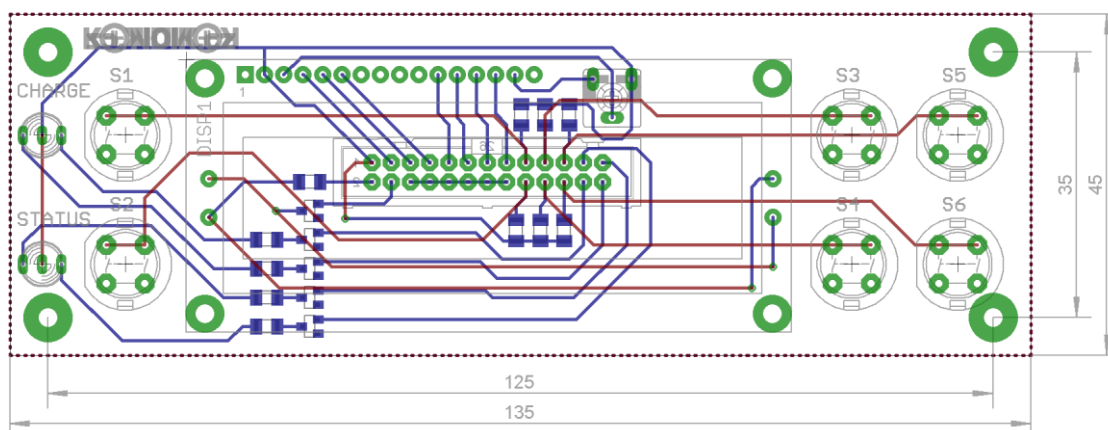
Obrázek 60 - Schéma zapojení USB komunikace



Obrázek 62 - Návrh hlavního plošného spoje

4.7.2 Ovládací panel

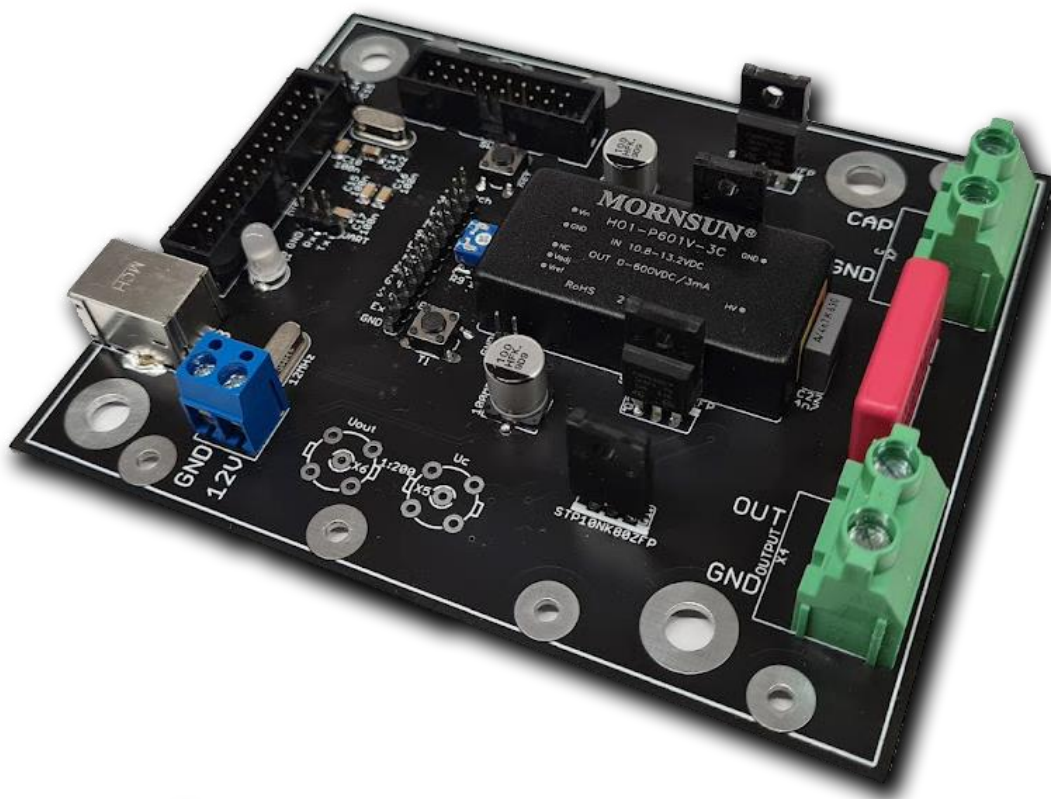
Na obrázku níže je zobrazen návrh ovládacího panelu. Ve středu plošného spoje dominuje LCD displej, který má po obou stranách ovládací tlačítka. Tlačítka umístěná blíže k displeji umožňují výběr nastavitelného parametru uživatelem. Tlačítka vpravo dále od displeje slouží k inkrementaci a dekrementaci hodnoty parametru. Indikační LED signalizují aktuální stav. Připojení k hlavní DPS zajišťuje IDC kabel.



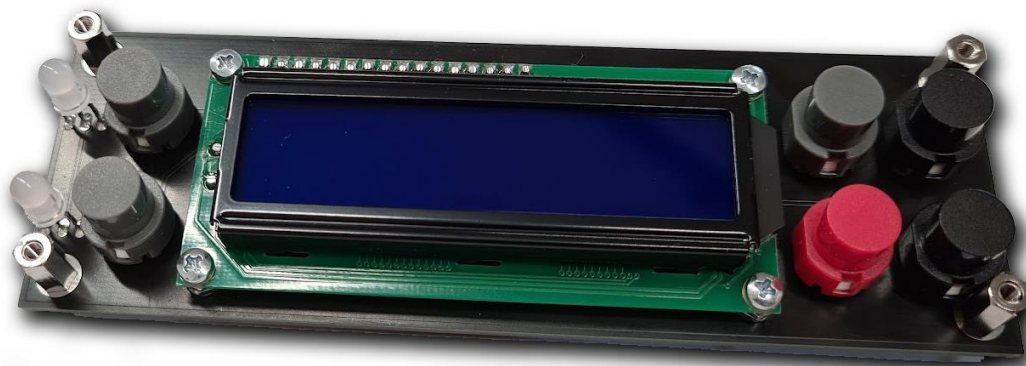
Obrázek 63 - Plošný spoj ovládacího panelu

4.8 Osazení testovacího vzorku

Pro navržené plošné spoje byly vygenerovány tzv. gerber data, podle kterých výrobce v Čínské lidové republice (JLCPCB) vyrobil navržené plošné spoje. Následně byly plošné spoje ručně osazeny příslušnými součástkami. BNC konektory sloužící pro měření výstupního napětí a napětí na kondenzátoru, nebyly osazovány. Výsledné osazené plošné spoje jsou na obrázcích níže.



Obrázek 64 - Osazená hlavní deska



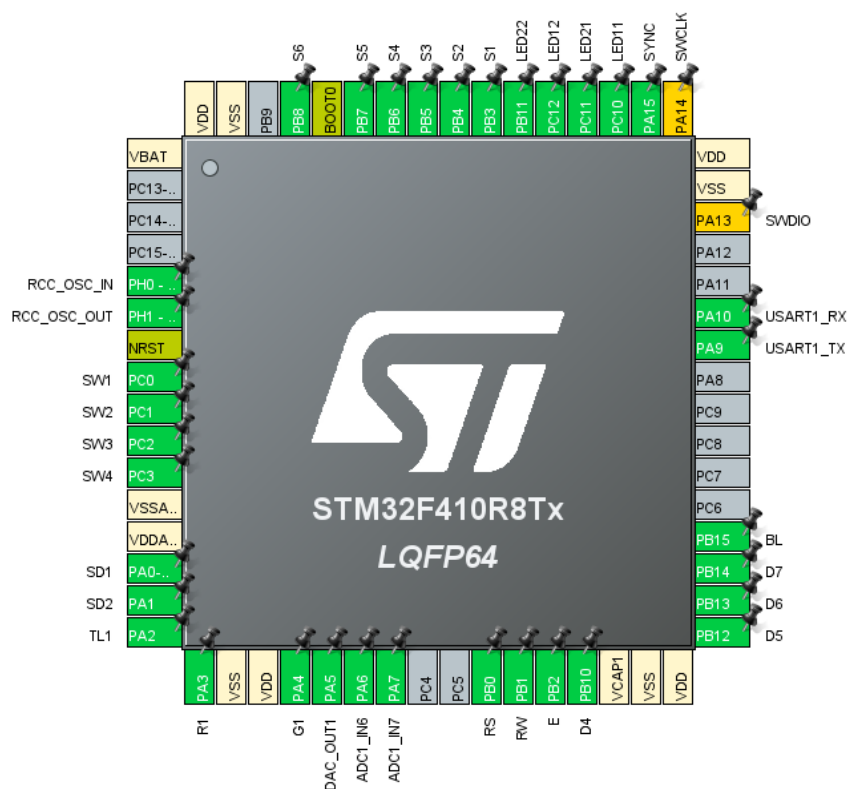
Obrázek 65 - Osazený ovládací panel

4.9 Programování

Nedílnou součástí každého mikrokontroléru je program, který definuje funkci jednotlivých částí. Mikrokontroléry STM32 využívají pro základní nastavení program STM32CubeMX, který umožňuje jednoduché nastavení základních komponent, pojmenování vstupů a výstupů dle uživatele, a vygenerování základního programu obsahující inicializaci komponent. Následně do těla programu byl dopsán celý program.

4.9.1 Konfigurace MCU v CubeMX

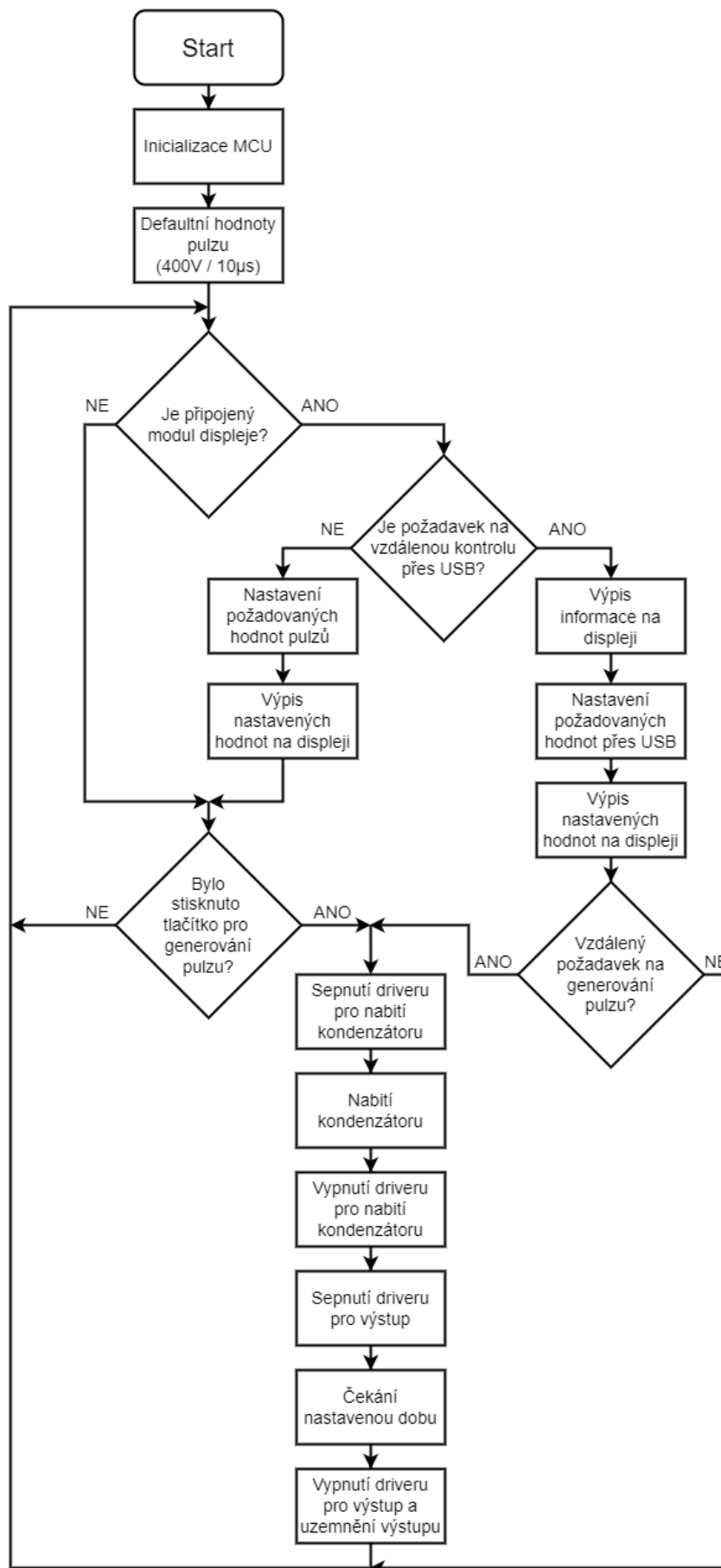
Základní nastavení a pojmenování výstupů definuje Obrázek 66. V programu se dále nadefinovalo nastavení hodin, násobiček kmitočtu, povolení hodin k daným komponentům a použitý krystal. Zmíněné nastavení hodin umožňuje přesné generování pulzů a zajišťuje funkčnost všech komponent. Dále se v programu nastavili všechny potřebné periferie, jako například ADC, DAC, UART atd.



Obrázek 66 - Konfigurace mikrokontroléru STM32F410R8

4.9.2 Program

Vygenerovaný program byl přenesen do softwaru Atollic TrueSTUDIO a doplněn o příkazy potřebné pro funkci systému. Program byl napsán v jazyce C, jehož vývojový diagram je uveden na obrázku níže. Pro zjednodušení programování bylo využito knihovny HAL, kterou vydal výrobce mikrokontroléru. Knihovna zajišťuje komunikaci mezi periferiemi a procesorem, jejich inicializaci a základní použití pomocí předem definovaných příkazů. Kompletní program je k dispozici na příloženém CD.



Obrázek 67 - Vývojový diagram

4.9.3 Ovládání pomocí USB

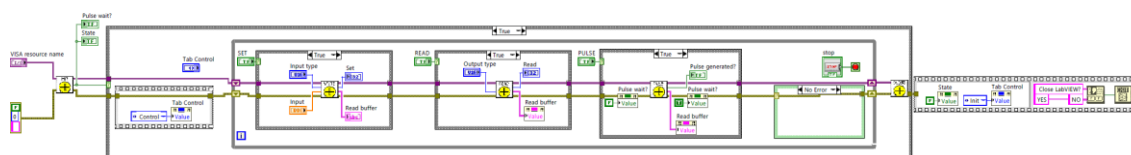
Výhodou tohoto zařízení je možnost komunikace přes univerzální sériovou sběrnici (USB). Komunikaci zajišťuje integrovaný obvod CH340, který převádí sériovou linku (UART) na straně mikrokontroléru, na USB-B konektor. Řízení mikrokontroléru zajišťují příkazy v ASCII kódu, které uvádí Tabulka 6 a zároveň jsou vypsány při inicializaci mikrokontroléru.

Tabulka 6 - Příkazy pro USB komunikaci

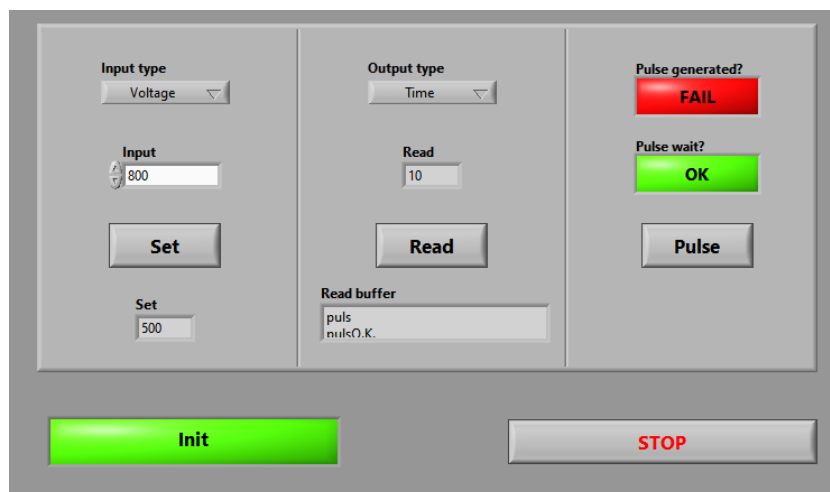
Příkaz	Odpověď	Popis
rmt?	USART initialization	Inicializace MCU
vol?	v***	Výpis napětí (V)
tim?	t***	Výpis délky pulzu (μs)
del?	d***	Výpis zpoždění (ms)
v***	s***	Nastavení napětí (V)
t***	s***	Nastavení délky pulzu (μs)
d***	s***	Nastavení zpoždění (ms)
puls	puls o.k.	Vygenerování pulzu
exit	exit	Ukončení komunikace

*** - Požadovaná hodnota

Komunikace probíhá při rychlosti 115200 bps s délkou 8 bitů odpovídající velikosti jednoho ASCII znaku. Příkazy lze odeslat pomocí příkazového řádku nebo využít pokročilejších programů určených pro průmysl (LabVIEW). Ukázkový program pro řízení generátoru pulzů skládající se z knihovních příkazů speciálně navržených pro tuto aplikaci. Knihovna obsahuje základní programy pro čtení a zápis na USB, inicializaci, deinicializaci, čtení hodnot z MCU, zápis hodnot do MCU a generování pulzů. Ukázkový program obsažený v knihovně umožňuje nastavení parametrů MCU, vyčtení parametrů pro kontrolu, nebo vygenerování pulzu včetně kontroly vygenerovaného pulzu.



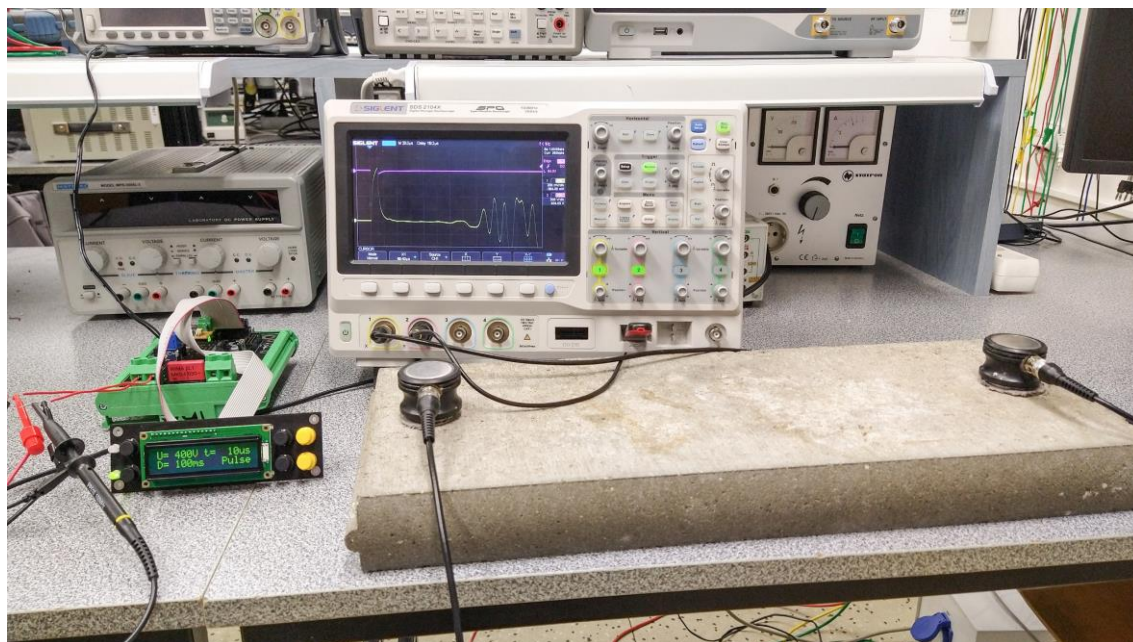
Obrázek 68 - LabVIEW, ukázka programu



Obrázek 69 - LabVIEW, hlavní panel

4.10 Měření výstupních průběhů

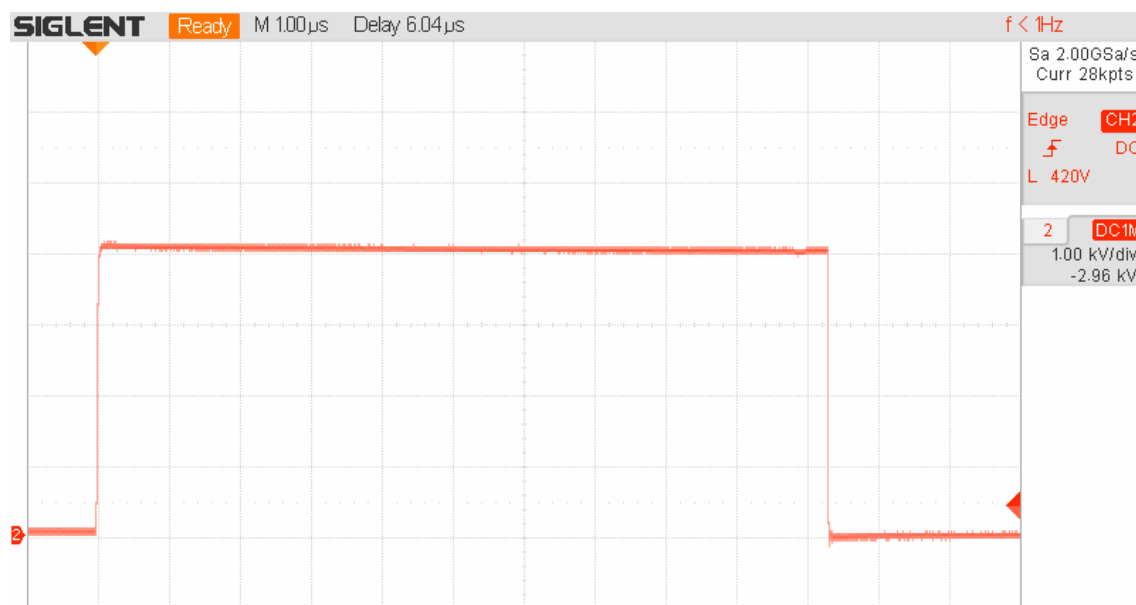
Funkčnost realizovaného generátoru byla ověřena základním měřením průchozího přenosu ultrazvukové vlny v prostředí betonového obručníku. Na fotografii níže je zobrazeno uspořádání měřicí soustavy. Na betonový obručník byly umístěny dva ultrazvukové převodníky V1548, jejichž vzdálenost byla 425 mm. Generátor vybudil pulzem (400 V, 10 μ s) první převodník a druhým převodníkem byla zaznamenána odezva na osciloskopu. Výsledné průběhy jsou zobrazeny na následujících obrázcích.



Obrázek 70 – Testovací měření průchozího přenosu v betonovém obručníku

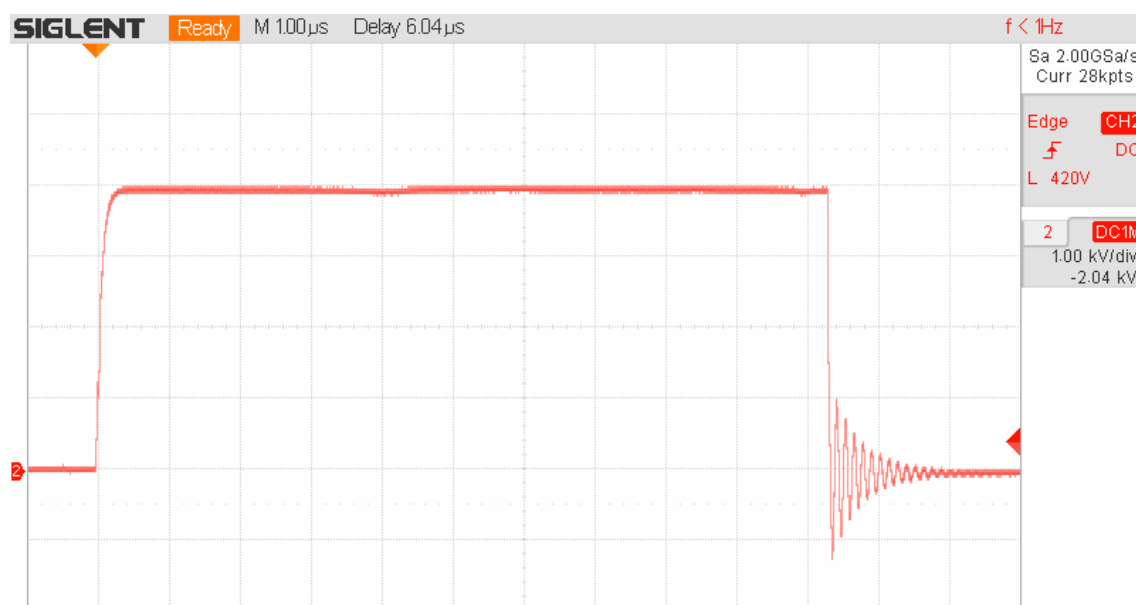
4.10.1 Měření generovaného pulzu

Před připojením ultrazvukového převodníku V1548 bylo potřeba ověřit funkčnost generátoru. Na níže uvedených obrázcích jsou záznamy vygenerovaných pulzů se špičkovým napětím 400 V a délkou 10 μ s, nejprve bez převodníku (Obrázek 71) a následně s připojeným převodníkem (Obrázek 72).



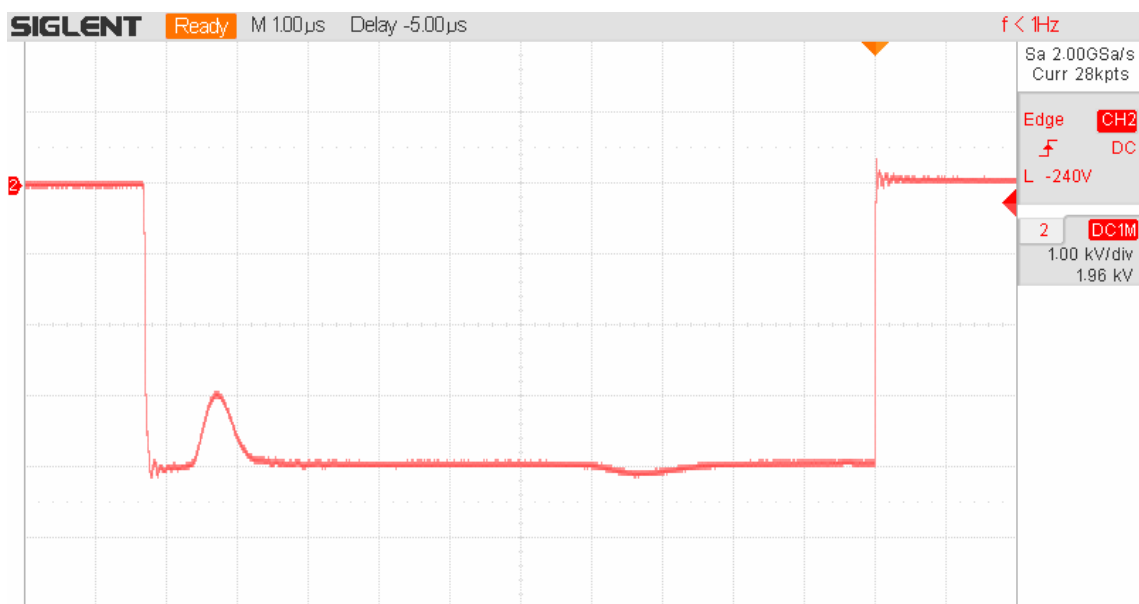
Obrázek 71 - Výsledný průběh pulzu (400 V, 10 μ s) bez zátěže

Výše vygenerovaný pulz měl být dlouhý 10 μ s, jeho reálná délka je 10,24 μ s. Chyba délky pulzu je nižší než 2,5 %, což vyhovuje dané aplikaci. Výhodou tohoto generátoru je výborná opakovatelnost pulzu se shodnou chybou. Prodloužení pulzu může být způsobeno zpožděním signálu vlivem kapacitních a induktivních vazeb anebo taktem procesoru.



Obrázek 72 - Výsledný průběh pulzu (400 V, 10 μ s) s připojeným převodníkem

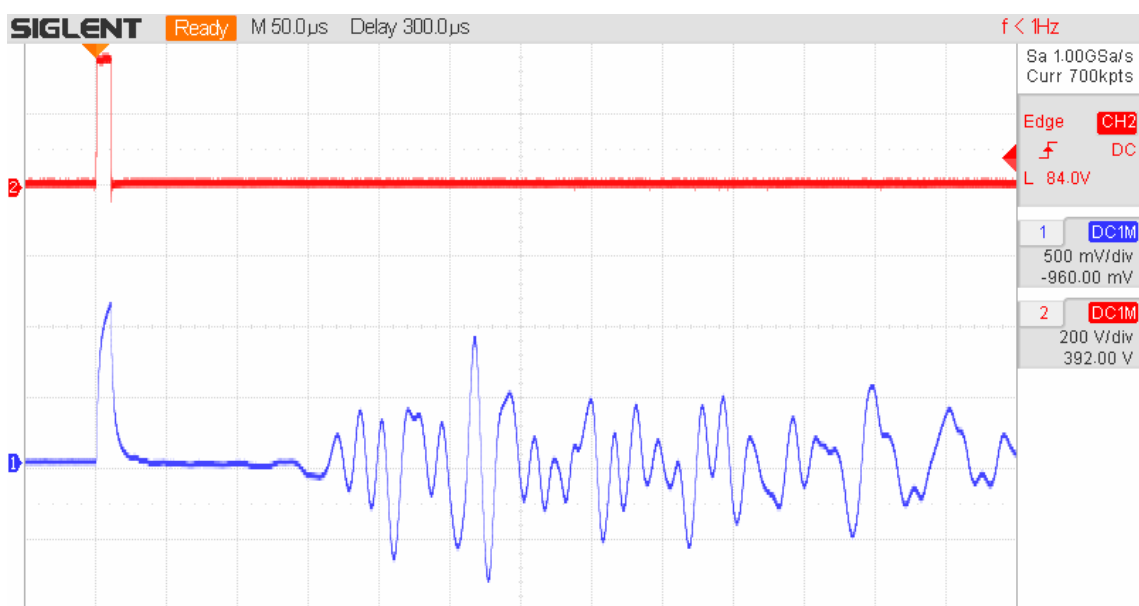
Připojení převodníku V1548 se na generovaném pulzu projevilo tlumeným kmitáním po doběhu pulzu. Tlumené kmitání způsobuje vlastní kapacita převodníku.



Obrázek 73 - Generování záporného pulzu (-400 V , $10\text{ }\mu\text{s}$) otočením polarity

Převodník V1548 požaduje pro svojí správnou funkci záporně orientovaný pulz. Pro vygenerování záporného pulzu pro převodník je nutné otočit polaritu na výstupních svorkách. Kontrolně vygenerovaný záporný pulz byl zaznamenán osciloskopem, viz Obrázek 73. Na zmíněném obrázku se výrazně projevila kapacitní vazba sondy a měřicího přístroje, která se u kladně orientovaného pulzu neprojevuje, neboť je uzemnění a stínění na stejném potenciálu.

4.10.2 Kontrolní měření odezvy na generovaný pulz



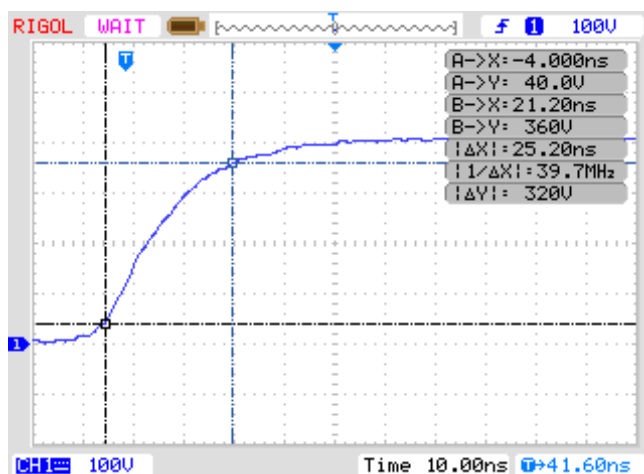
Obrázek 74 - Zaznamenaný průběh z převodníku

Experimentální měření průchozího přenosu ověřilo funkčnost pro danou aplikaci.

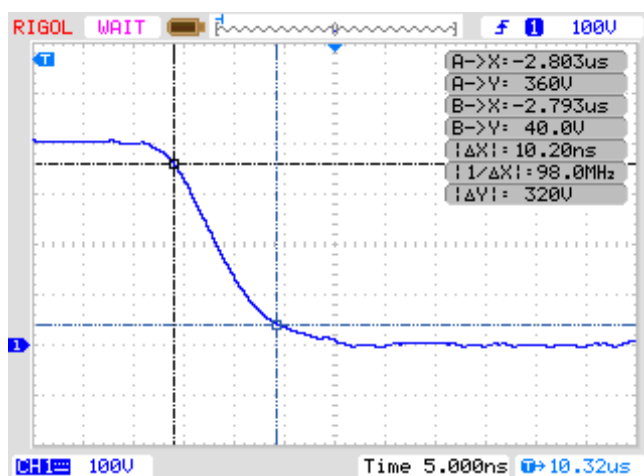


Obrázek 75 - Zaznamenaný průběh z převodníku s delší časovou základnou

4.10.3 Měření doby náběhu a doběhu pulzu



Obrázek 76 - Měření doby náběhu pulzu (400 V, 10 μ s)



Obrázek 77 - Měření doby doběhu pulzu (400 V, 10 μ s)

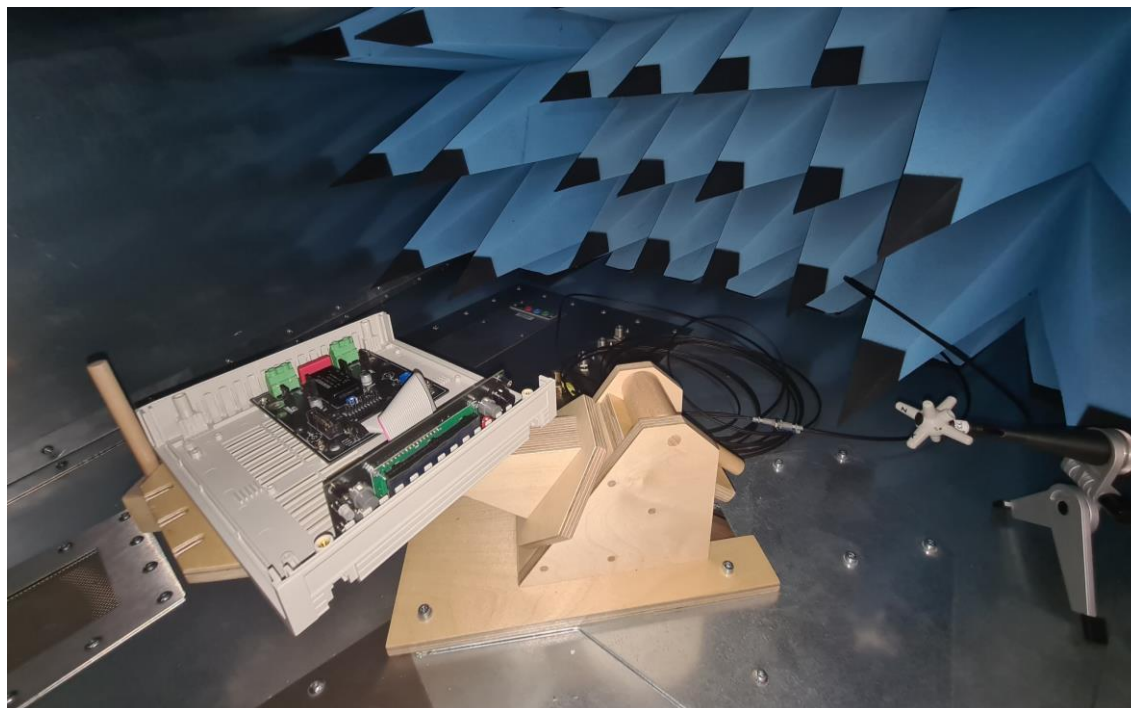
4.10.4 Srovnání realizovaného generátoru s Olympus 5077PR

Tabulka 7 - Srovnání parametrů realizovaného generátoru s Olympus 5077PR

	Olympus 5077PR	Realizovaný generátor
Napětí pulzu (bez zátěže)	100 V ÷ 400 V	100 V ÷ 500 V
Čas sepnutí (z 10 % na 90 %)	maximálně 20 ns	náběh ≤ 25 ns doběh ≤ 10 ns
Šířka pulzu	50 ns ÷ 10 μ s	5 μ s ÷ 100 μ s
Obnovitelná frekvence	0 kHz ÷ 5 kHz	0 Hz ÷ 0,25 Hz
Synchronizační pulz	3 V při 50 Ω	3,3 V (max. 20 mA)

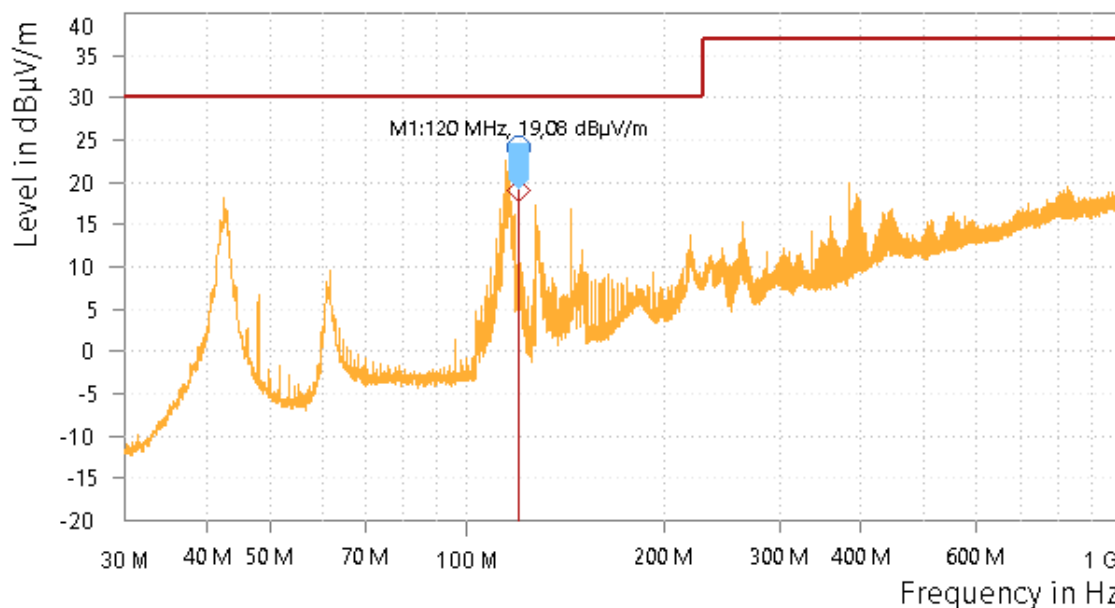
4.11 Měření EMC

Elektromagnetická komptabilita (EMC) je vlastnost všech elektrických přístrojů. EMC vykazuje odolnost přístroje vůči vnějšímu elektromagnetickému rušení (EMS – elektromagnetická susceptibilita) a zároveň udává hodnotu vyzařování elektromagnetického rušení do okolí (EMI – elektromagnetická interference). Měření EMC se provádí ve speciálních bez odrazových stíněných komorách, aby měření nebylo ovlivněno vnějšími vlivy (například radiové, televizní a GSM frekvence).



Obrázek 78 - Fotografie z měření EMC v bez odrazové komoře

Navržený a vyrobený přístroj byl změřen ve speciální nové EMC laboratoři na Fakultě Mechatroniky. Umístění zařízení v měřicí komoře je uvedeno na Obrázek 78. Vyrobený generátor byl uchycen speciálním otočnou hlavicí vyrobenou ze dřeva, aby nedocházelo ke zkreslení měření. Hlavice umožňuje měření ve všech osách. Zprůměrovaný výsledek měření EMI je na níže uvedeném Obrázek 79. Dle změřených dat vyhovuje realizovaný generátor s dostatečnou rezervou kmenové normě ČSN EN 61000-6-3, která udává hodnoty emisí elektromagnetického rušení pro prostředí obytné, obchodní a lehkého průmyslu. Na výsledku jsou zřejmé pracovní kmitočty generátoru a jejich vyšší harmonické.



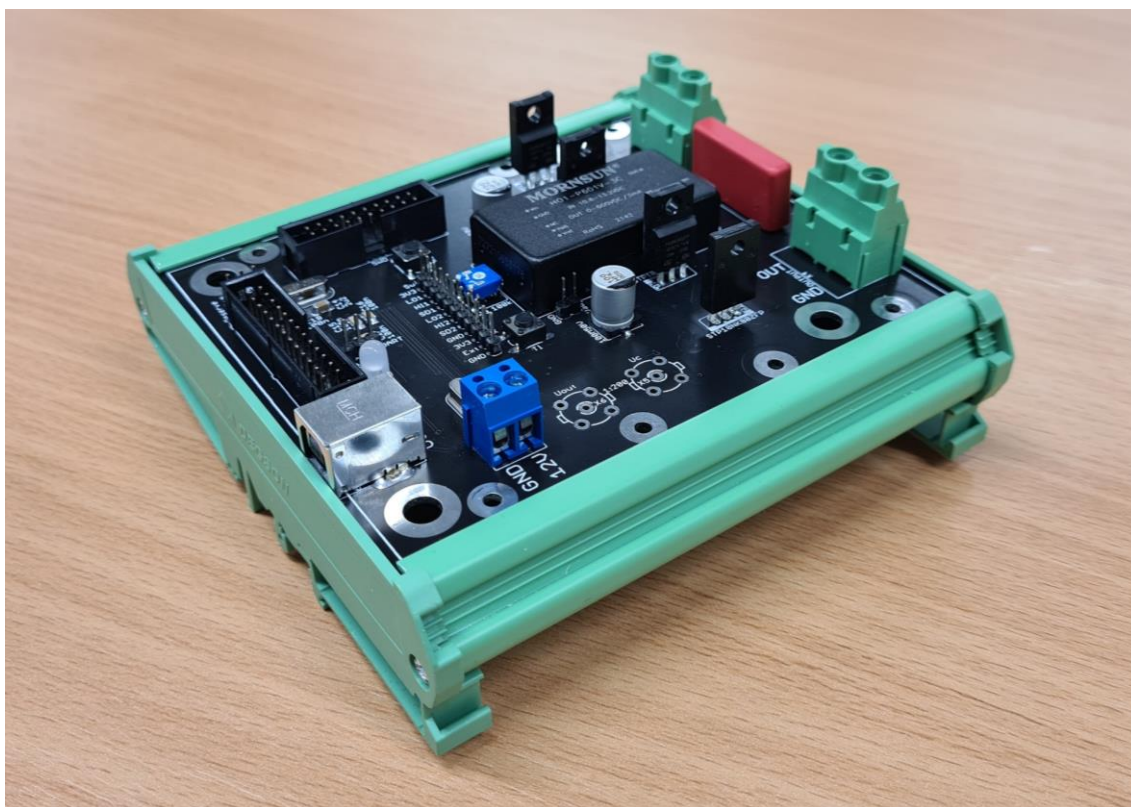
Obrázek 79 - Výsledek měření EMI (vyzařování rušení do okolí)

Druhou částí měření bylo testování generátoru na elektromagnetickou odolnost. Měření prokázalo, že realizovaný generátor vyhovuje normě ČSN EN IEC 61000-6-1 pro odolnost vůči vnějšímu elektromagnetickému poli s velikostí 10 V/m (80 MHz až 1 GHz). Tato hodnota odpovídá použití zařízení v průmyslovém elektromagnetickém prostředí. Zařízení vyhovělo funkčnímu kritériu A (Zkoušené zařízení musí pracovat nepřetržitě během zkoušky i po ní dle svého určení. Není dovoleno žádné zhoršení činnosti nebo ztráta funkce pod funkční úroveň stanovenou výrobcem.) (19)

4.12 Finální kompletace

Navržený generátor pulzů byl od počátku vyvíjen pro dvě provedení. Vyrobenou DPS lze umístit do přístrojové krabice s měnitelnými čely. Zároveň lze plošný spoj umístit do krabice vhodné pro montáž na DIN lištu v rozvaděči. Univerzálnost navrženého zařízení je největší výhodou vůči konkurenčním generátorům pulzu, jelikož lze zařízení použít jak v laboratoři, tak dlouhodobě v konkrétní aplikaci. Příkladem použití je dlouhodobé monitorování horninového masivu v dolech nebo monitorování mostních konstrukcí.

4.12.1 Generátor pulzů v krabičce pro montáž na DIN lištu



Obrázek 80 - Generátor pulzů v krabičce pro montáž na DIN lištu

4.12.2 Generátor pulzů v krabičce Bopla

Pro realizaci byla použita krabička Bopla UM 52011 L. Dle nákresu v programu SolidEdge V20 (viz přílohy) byla čela vyřezána laserem NOVA 35 umístěného v TULab.



Obrázek 81 - Vyřezání předního čela laserem

Přední čelo bylo osazeno panelem obsahující ovládací tlačítka, displej a indikační dvoubarevné LED. Barvy tlačítek byly vybrány dle jejich účelu. Šedá tlačítka vybírají parametr k nastavení, černá tlačítka slouží pro nastavení hodnoty vybraného parametru a pomocí červeného tlačítka lze manuálně vygenerovat pulz. Panel byl doplněn o informační polep, který výrazně zlepšil orientaci mezi tlačítky.



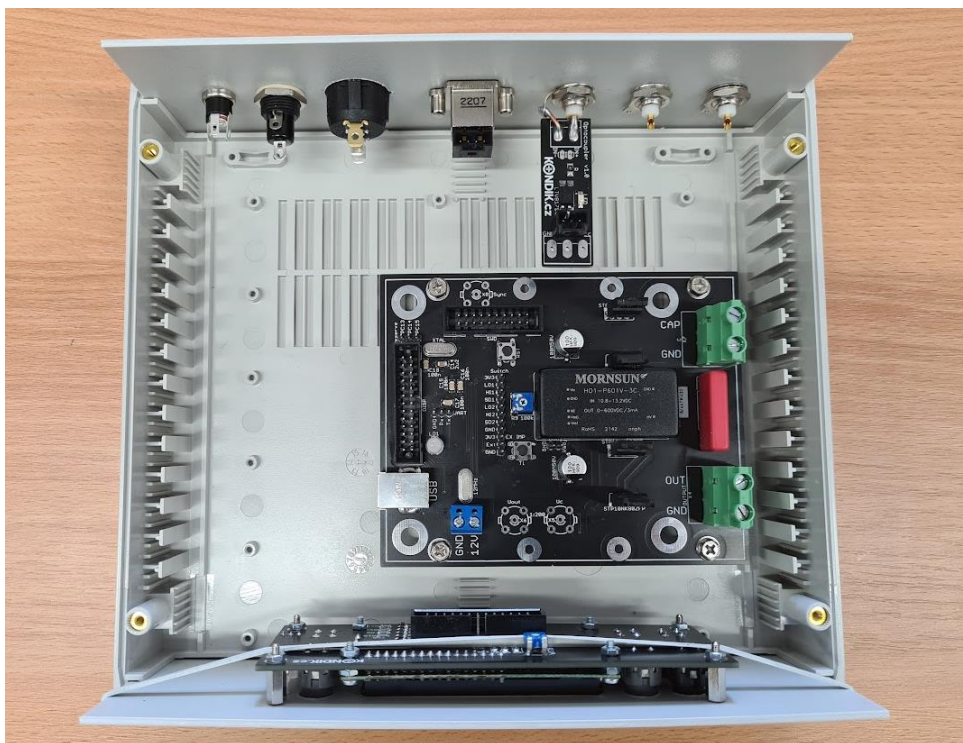
Obrázek 82 - Přední panel generátoru pulzů

Zadní panel byl osazen nezbytnými konektory pro funkčnost a použití generátoru. Napájení generátoru zprostředkovává standardní DC konektor s vnějším průměrem 5,5 mm a vnitřním průměrem 2,1 mm. Signálovou konektivitu zajišťují speciální BNC konektory s izolačním napětím do 500 V. Komunikaci s počítačem zajišťuje konektor USB 2.0 typu B.

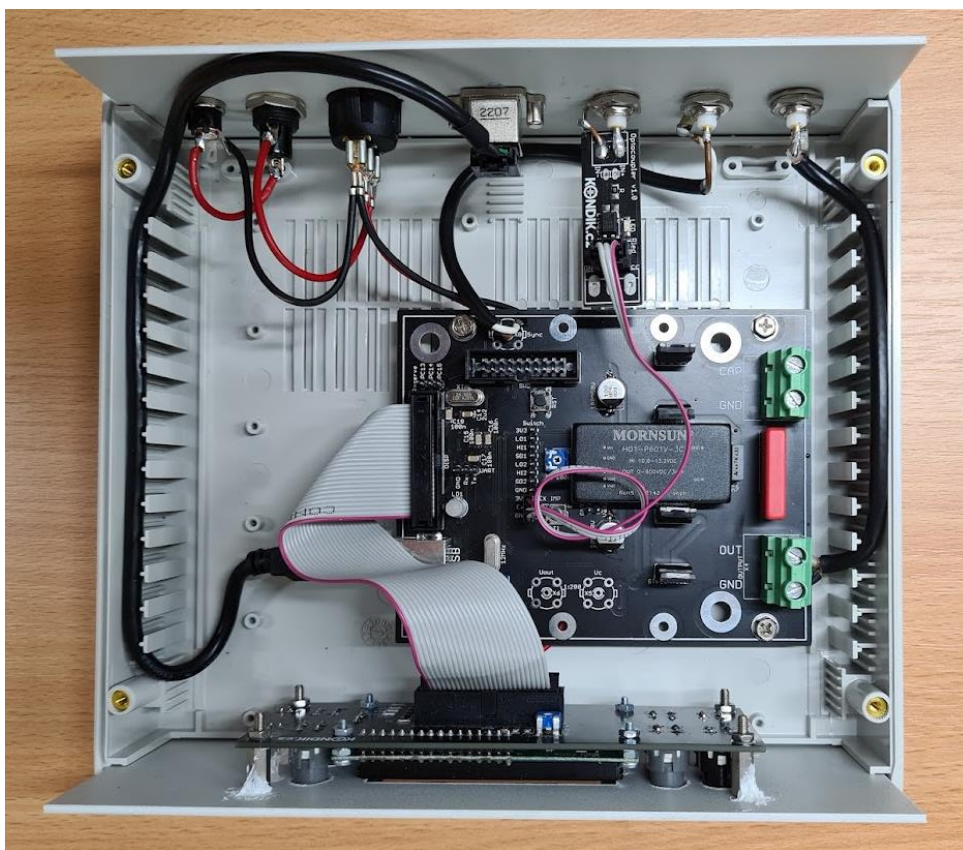


Obrázek 83 - Zadní panel generátoru pulzů

Posledním úkolem bylo vložení základní desky generátoru do krabičky. Deska je ke krabičce připevněna pomocí distančních sloupků. BNC konektor pro externí vstup byl vybaven jednoduchým obvodem s optočlenem pro ochranu základní desky.



Obrázek 84 - Vnitřní uspořádání komponent v krabičce Bopla



Obrázek 85 - Vnitřní zapojení komponentů v krabičce Bopla

Závěr

Zadané úkoly byly splněny v celém rozsahu. Výsledný generátor pulzů HPG 500 splňuje základní požadavky pro buzení ultrazvukových převodníků. Vznikla dvě finální provedení – varianta na lištu DIN, která umožní přímé zabudování do rozvaděče a varianta umístěná v přístrojové krabici, která umožní použít generátor jako samostatný přístroj. Zařízení je oproti konkurenci malé, lehké, a hlavně cenově dostupné.

HPG 500 umožňuje nastavit šířku pulzu od 5 μs do 100 μs a jeho amplitudu od 100 V do 500 V. Nastavení parametrů probíhá pomocí předního panelu obsahující tlačítka a displej. Generování pulzu je možné z čelního panelu nebo pomocí externího vstupu. Navíc oproti zadání je zabudována možnost přístroj ovládat pomocí sběrnice USB a ovládacího programu vytvořeném v prostředí LabVIEW.

Pro řízení byl vybrán procesor ARM Cortex M4, který kromě komunikačních a výpočetních procesů řídí také vysokonapěťový měnič DC/DC pomocí DA převodníku, měří amplitudu výsledného pulzu pomocí AD převodníku a ovládá výkonovou část. Největším problémem v době nedostatku integrovaných obvodů na trhu bylo vybrat driver tranzistorů MOSFET, který by splňoval požadavky na rychlost náběhu pulzu při amplitudě 500 V. Celkový odběr zařízení nepřekračuje proud 220 mA při napájení 12 V, což umožňuje provoz na baterii pro použití přístroje v terénu.

Na závěr vývoje byl přístroj testován z hlediska elektromagnetické kompatibility EMS a EMI. Navržený generátor s rezervou vyhověl kmenové normě ČSN EN 61000-6-1 a ČSN EN IEC 61000-6-3.

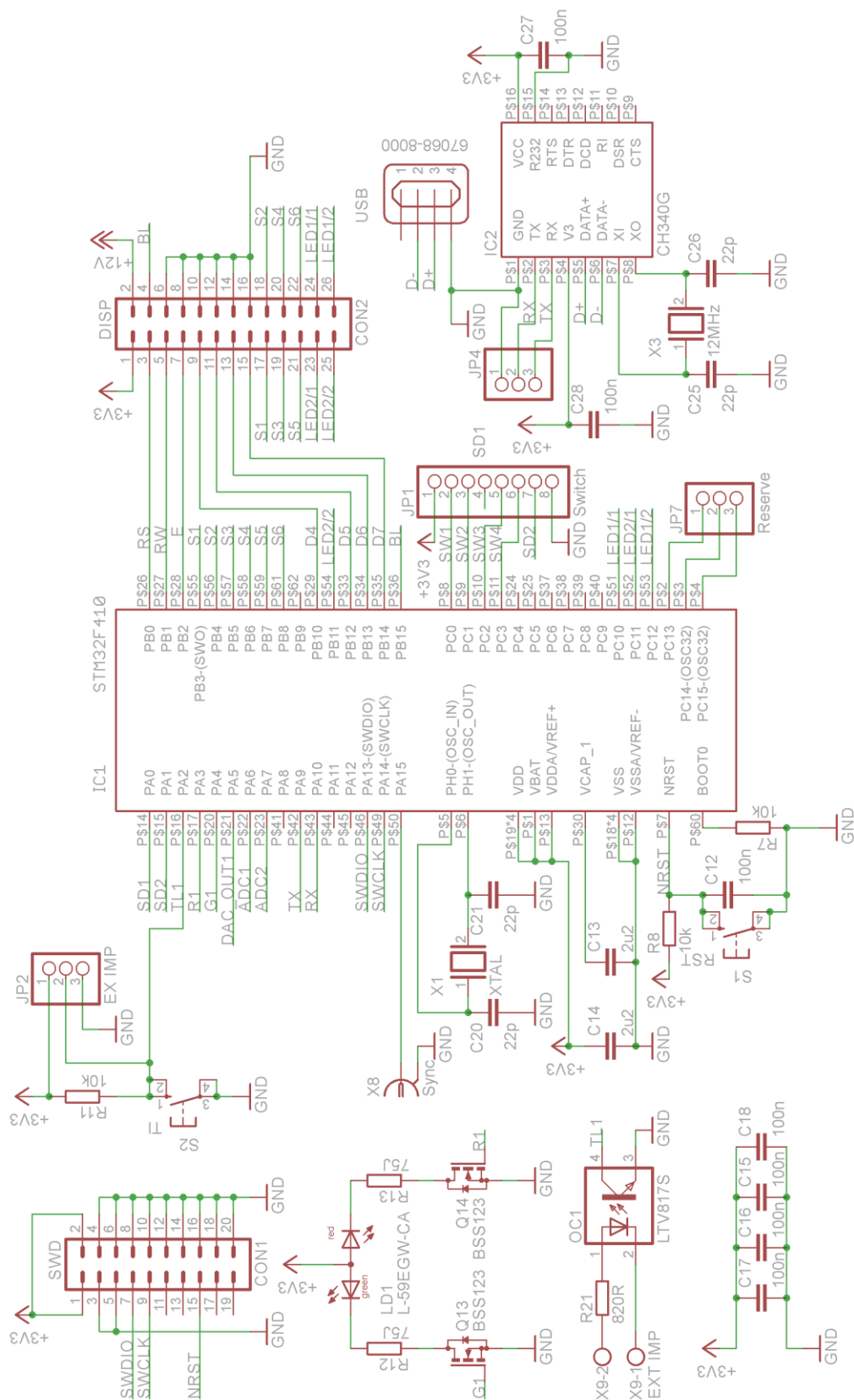
Prostorem pro zlepšení je doba náběhu pulzu, kterou by bylo možno snížit použitím tranzistorů typu gallium-arsenid nebo použitím driverů s větším výstupním proudem. Dalším parametrem pro zlepšení je opakovací frekvence vybuzení pulzu, jež lze řešit optimalizací firmware zařízení.

Použitá literatura

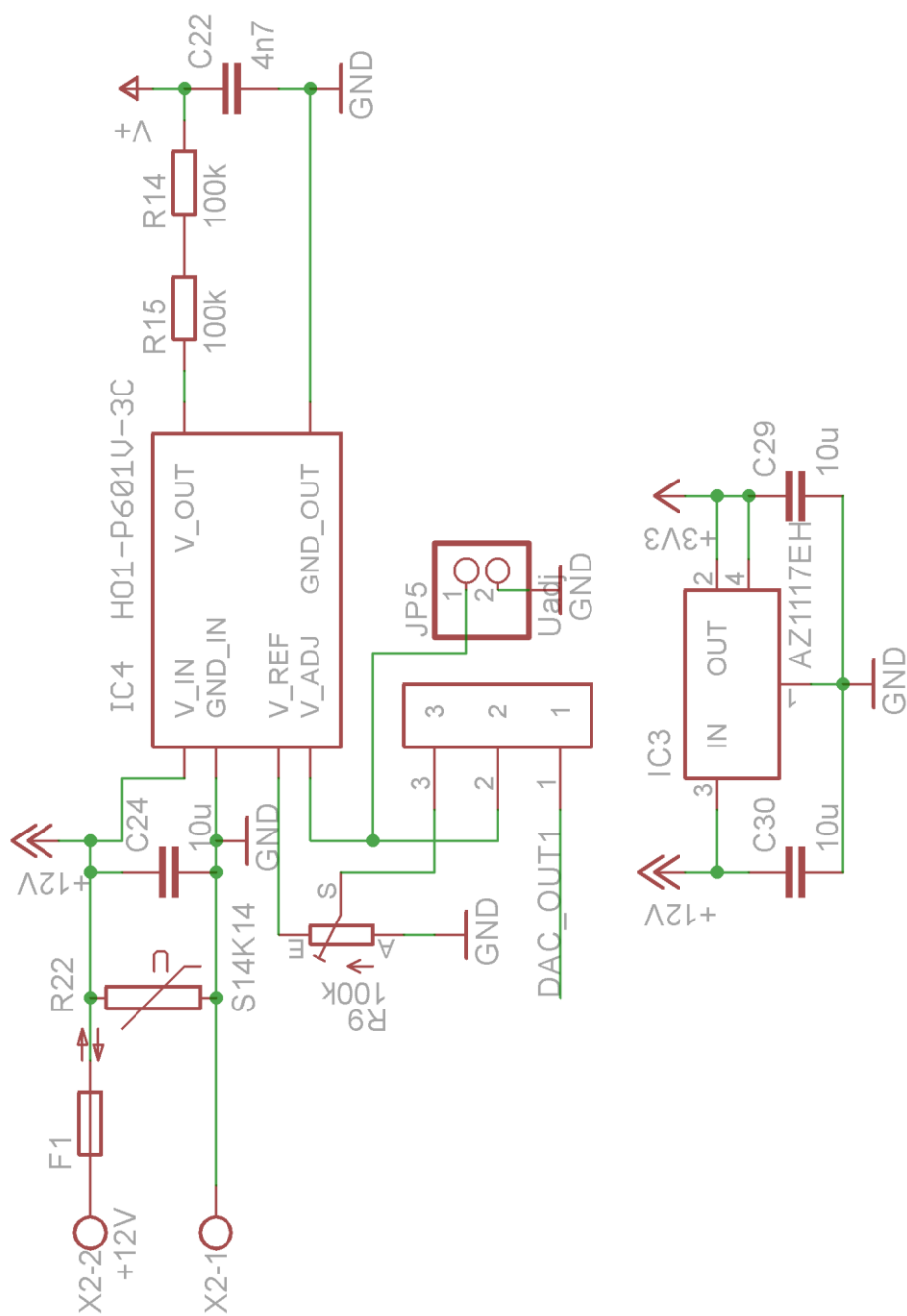
1. **OLYMPUS**. Manually Controlled Pulser-Receiver 5072PR, 5073PR, 5077PR. [Online] 2009. [Citace: 11. Listopad 2021.] <http://telab.vuse.vanderbilt.edu/docs/specs/Olympus-5072PR.pdf>.
2. **ESDEMC, Technology LLC**. Datasheet EOS-500. *EOS-500 Electrical Overstress Pulse Generator*. [Online] [Citace: 15. Březen 2022.]
3. **AVTECH**. AVL-3 SERIES. [Online] [Citace: 15. Březen 2022.] https://www.brltest.com/index.php?main_page=product_info&cPath=3_40_4006&products_id=6004.
4. **Solar, Electronics Company**. Model 8282-1 Transient Pulse Generator. [Online] [Citace: 1. Březen 2022.] <https://www.solar-emc.com/8282-1.html>.
5. **Černík, Martin**. *VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-160-3.
6. **Vedral, Josef a Fischer, Jan**. *Elektronické obvody pro měřicí techniku*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02966-2.
7. **Vobecký, Jan a Záhlava, Vít**. *Elektronika - součástky a obvody, principy a příklady*. Praha : Vydavatelství Grada, 2005. ISBN 978-80-247-1241-3.
8. **Frohn, Manfred, a další**. *Elektronika - polovodičové součástky a základní zapojení*. Praha : Nakladatelství BEN-Technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-123-3.
9. **Stengl, Jens Peer a Tihanyi, Jenő**. *Výkonové tranzistory MOSFET*. [překl.] Jan Humlhans. Praha : Nakladatelství BEN-Technická literatura, 1999. ISBN 3-7905-0619-2.
10. **Infineon**. Gate Driver ICs. *Infineon Technologies AG*. [Online] Infineon Technologies AG, 2022. [Citace: 9. Duben 2022.] <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/gate-driver-ics/>.
11. **Antošová, Marcela a Davídek, Vratislav**. *Číslicová technika*. České Budějovice : Nakladatelství KOPP, 2009. ISBN 978-80-7232-394-4.
12. **Skalický, Petr**. *Spínací a číslicová technika*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1994.
13. **Martinec, Tomáš**. *Počítače a mikropočítače*. Liberec : Inteligentní multimediální E-learningový portál, 2011. ESF CZ.1.07/2.2.00/07.0008.
14. **Hrbáček, Jiří**. *Komunikace mikrokontroléru s okolím - 1. díl*. Praha : Nakladatelství BEN-Technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-42-2.
15. **Váňa, Vladimír**. *ARM pro začátečníky*. Praha : Nakladatelství BEN-Technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-246-6.
16. **ARM, Limited**. Artificial Intelligence Enhanced Computing – Arm. *ARM*. [Online] 2022. [Citace: 17. Duben 2022.] <https://www.arm.com/>.

17. **Krejčířík, Alexandr.** *DC/DC měniče*. Praha : Nakladatelství BEN-Technická literatura, 2001. ISBN 80-7300-045-8.
18. **OLYMPUS.** Ultrasonic Transducers. [Online] 2016. [Citace: 10. Leden 2022.] <https://www.olympus-ims.com/en/ultrasonic-transducers/>.
19. **ČSN EN IEC 61000-6-1 ed. 3.** *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 6-1: Kmenové normy - Odolnost - Prostředí obytné, obchodní a lehkého průmyslu*. 2019.
20. **Maixner, Ladislav.** *Mechatronika*. Brno : Nakladatelství Computer Press, 2006. ISBN 80-251-1299-3.
21. **Láníček, Robert.** *Elektronika: obvody, součástky, děje*. 1. vyd. Praha : Nakladatelství BEN-Technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-25-2.
22. **Krejčířík, Alexandr.** *Napájecí zdroje 3*. Praha : Nakladatelství BEN-Technická literatura, 2002. ISBN 80-86056-56-2.
23. **Lysenko, Vladimír.** *VN zdroje*. Praha : Nakladatelství BEN-Technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-235-0.
24. **ČSN EN 61000-6-3 ed. 2.** *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 6-3: Kmenové normy - Emise - Prostředí obytné, obchodní a lehkého průmyslu*. 2007.
25. **STMicroelectronics.** Datasheet STM32F410R8. *STMicroelectronics*. [Online] 2022. [Citace: 2. Únor 2022.] <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f410r8.html>.
26. —. Datasheet STP10NK80ZFP. *STMicroelectronics*. [Online] 2012. [Citace: 10. Leden 2022.] <https://www.st.com/en/power-transistors/stp10nk80zfp.html>.
27. **IXYS.** Datasheet IX2113. *IX2113 600V High and Low Side Gate Driver*. [Online] 2014. [Citace: 5. 10 2021.] <https://cz.mouser.com/datasheet/2/240/IX2113-1548288.pdf>.

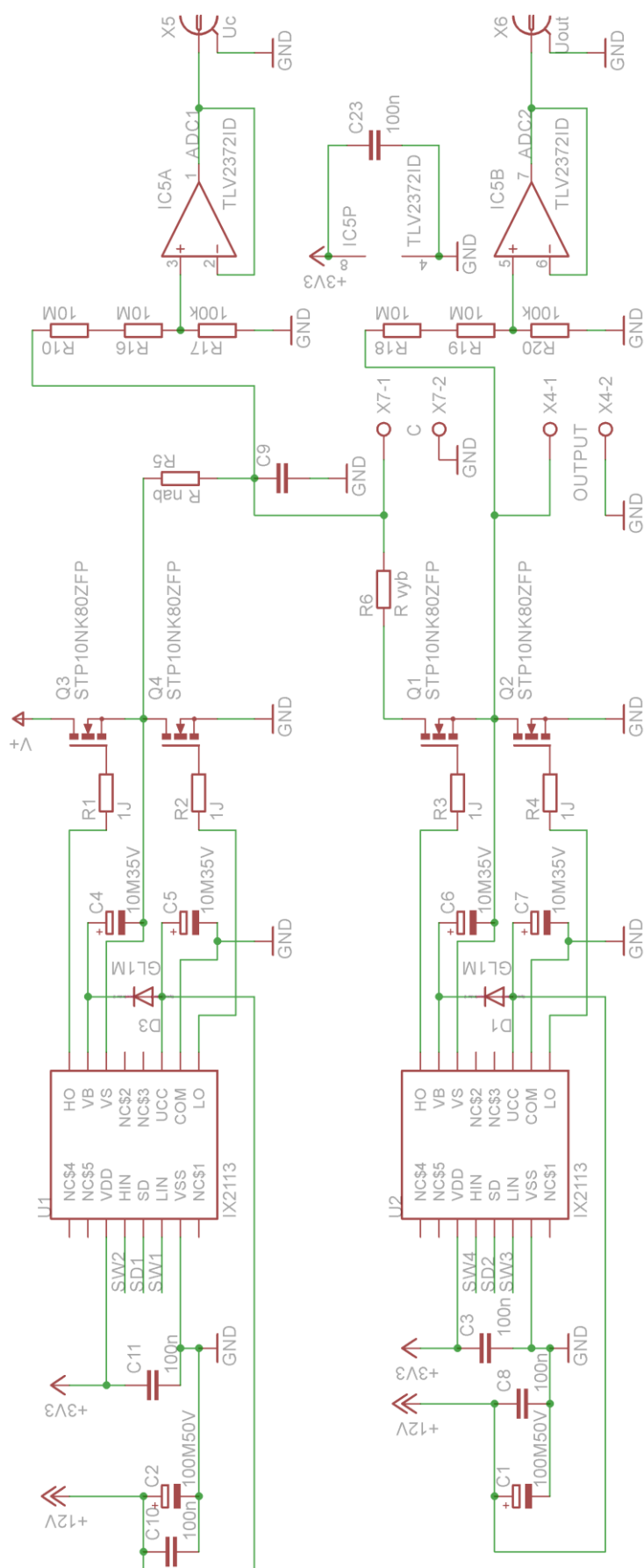
I. Kompletní schéma zapojení MCU



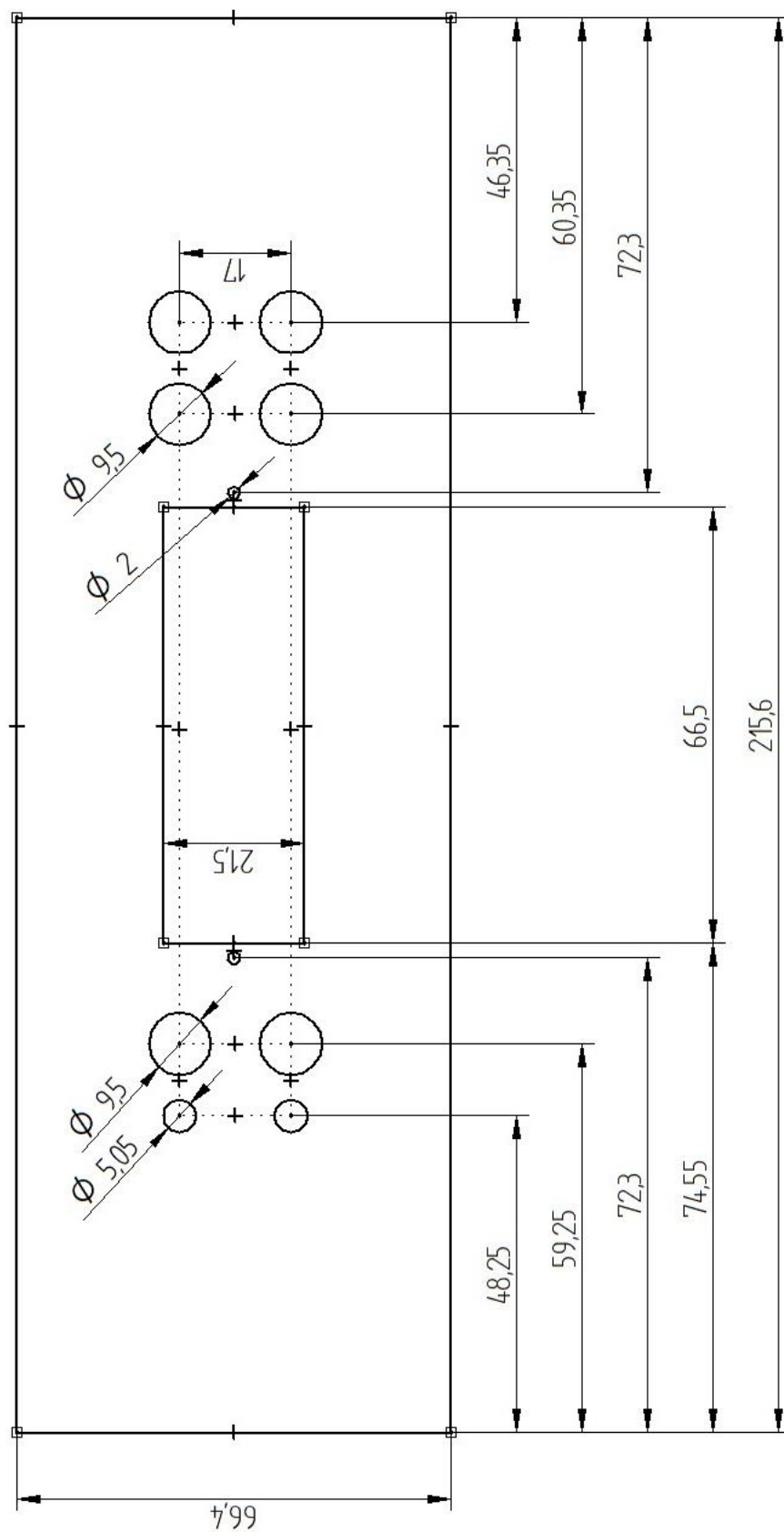
II. Kompletní schéma zapojení napájecí části



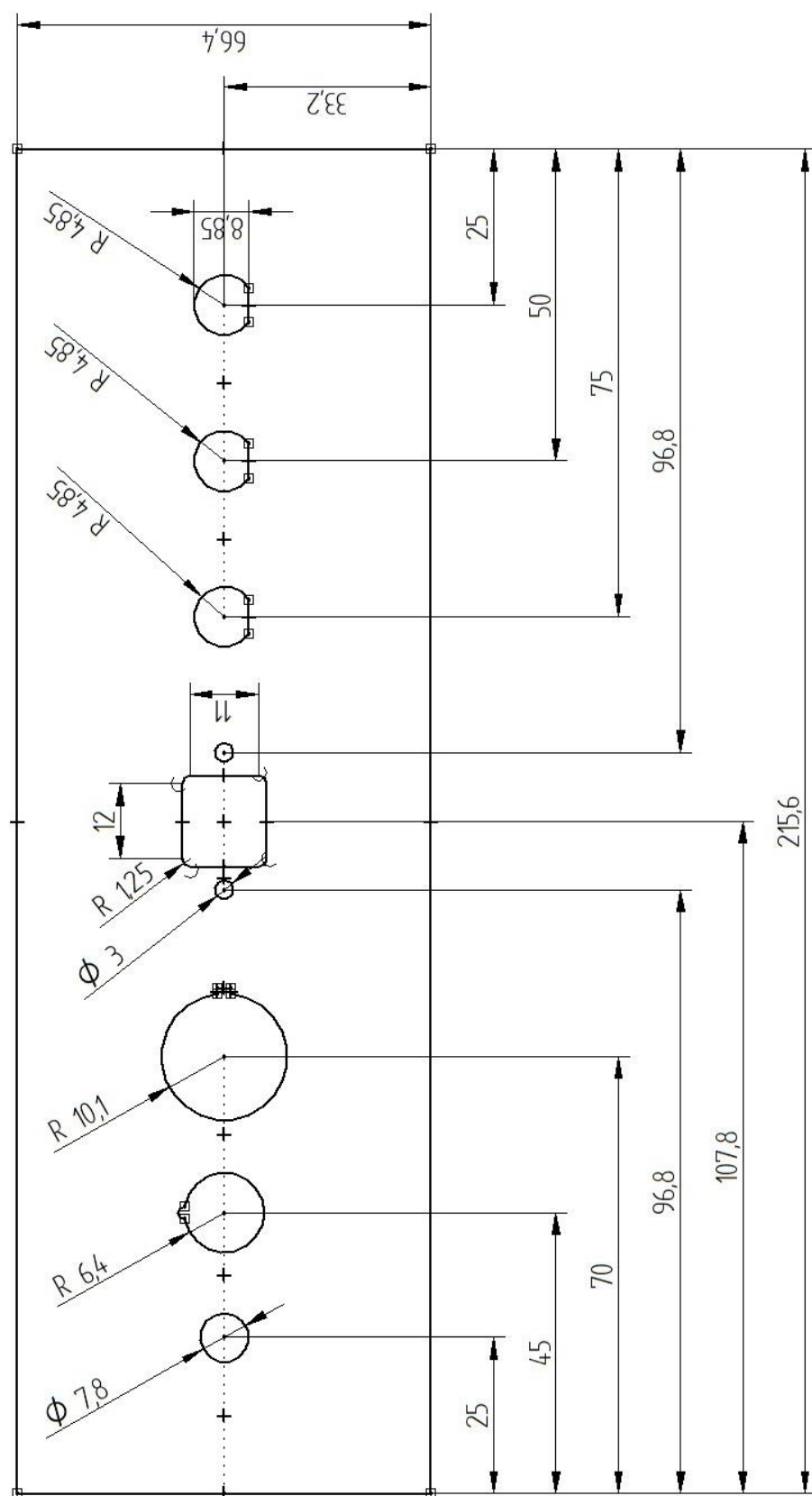
III. Kompletní schéma zapojení vysokonapěťové části



IV. Výkres předního čela krabičky Bopla



V. Výkres zadního čela krabičky Bopla



VI. Kalkulace – Hlavní deska

Označení	Součástka	Pouzdro	Cena
C1, C2	C elektrolyt 100 μ F 50 V	SMD, velikost F	26,00 Kč
C4, C5, C6, C7	C tantal 10 μ F 35 V	SMD, velikost D	40,00 Kč
C3, C8, C10, C11, C12, C15, C16, C17, C18, C23, C27, C28	C keramický 100 nF 50 V	SMD 1206	18,00 Kč
C9	C MKS4 100 nF 630 VDC	rozteč 22,5 mm	9,90 Kč
C13, C14	C keramický 2,2 μ F 50 V	SMD 1206	16,00 Kč
C20, C21, C25, C26	C keramický 22 pF 50 V	SMD 1206	12,00 Kč
C22	C R66 4,7 nF 630 VDC	rozteč 7,5 mm	3,00 Kč
C24, C29, C30	C keramický 10 μ F 25 V	SMD 1206	9,00 Kč
CON1	Konektor IDC 20pin vidlice do DPS		11,00 Kč
CON2	Konektor IDC 26pin vidlice do DPS		12,00 Kč
D1, D3	Dioda GL1M	MELF	3,00 Kč
F1	Pojistka F 1 A	SMD 0603	6,90 Kč
IC1	MCU STM32F410R8T6	LQFP64	199,00 Kč
IC2	Převodník CH340G	SOP16	49,00 Kč
IC3	Stabilizátor AZ1117EH	SOT223	9,90 Kč
IC4	Měnič HO1-P601V-3C		699,00 Kč
IC5	Operační zesilovač TLV2372ID	SOP08	69,00 Kč
JP1 – JP7	Kolíková lámací lišta	rozteč 2,54 mm	10,00 Kč
LD1	LED L-59EGW-CA	THT, pr. 5 mm	9,90 Kč

OC1	Optočlen LTV817S	SMD4	4,90 Kč
Q1 – Q4	Tranzistor STP10NK80ZFP	TO220FP	276,00 Kč
Q13, Q14	Tranzistor BSS123	SOT23	8,00 Kč
R1 – R4	Rezistor 1 Ω	SMD 2512	10,00 Kč
R5, R6	Rezistor 100 Ω	SMD 2512	5,00 Kč
R7, R8, R11	Rezistor 10 kΩ	SMD 1206	3,00 Kč
R9	Trimer CA6V 100 kΩ	CA6V	9,90 Kč
R10, R16, R18, R19	Rezistor 10 MΩ	SMD 2512	12,00 Kč
R12, R13	Rezistor 75 Ω	SMD 1206	5,00 Kč
R14, R15, R17, R20	Rezistor 100 kΩ	SMD 2512	10,00 Kč
R21	Rezistor 820 Ω	SMD 1206	1,00 Kč
R22	Varistor S14K14	rozteč 7,5 mm	6,90 Kč
S1, S2	Tlačítko B3F-1000		10,00 Kč
U1, U2	Driver IX2113	SO16	98,00 Kč
USB	Konektor USB B 67068-8000 zásuvka		25,00 Kč
X1	Krystal HC49US 20MHz	QS	9,90 Kč
X3	Krystal HC49US 12MHz	QS	9,90 Kč
X2, X9	Svorkovnice DG300-5.0-02P	rozteč 5 mm	9,00 Kč
X4, X7	Svorkovnice DG638-9.52-02P	rozteč 9,52 mm	30,00 Kč
X5, X6, X8	Konektor BNC 5-1634503-1		150,00 Kč
DPS	Plošný spoj (5 ks) + doprava		969,00 Kč
CELKEM s DPH:			2875,00 Kč

VII. Kalkulace – Ovládací modul

Označení	Součástka	Pouzdro	Cena
CHARGE, STATUS	LED L-59EGW-CA	THT, pr. 5 mm	19,80 Kč
DISP1	LCD displej RC1602B2-BIW-CSV		229,00 Kč
Q1 – Q5	Tranzistor BSS123	SOT23	20,00 Kč
R1	Rezistor 100 Ω	SMD 1206	0,50 Kč
R2	Trimer CA6V 10 kΩ	CA6V	9,90 Kč
R3 – R8	Rezistor 10 kΩ	SMD 1206	2,50 Kč
R9 – R12	Rezistor 75 Ω	SMD 1206	2,00 Kč
S1 – S6	Mikrospínač KS01-B		72,00 Kč
SV1	Konektor IDC 26pin vidlice do DPS		12,00 Kč
DPS	Plošný spoj (5 ks) + doprava		456,00 Kč
CELKEM s DPH:			823,70 Kč

VIII. Kalkulace – Kompletace do krabiček

Označení	Popis	Cena
DM100-120-14-100AH	Držák DPS na DIN lištu	199,00 Kč
Bopla UM 52011 L	Krabička s měnitelnými čely	819,00 Kč
Bopla 56051110	Čelní kryt ABS šedý	278,00 Kč
BNC, USB, DC, aj.	Komponenty pro zadní čelo	450,00 Kč
KOAX, IDC, aj.	Propojovací vodiče	150,00 Kč
EA 017-2UKE	Rámeček pro LCD displej	285,00 Kč
CELKEM s DPH:		2181,00 Kč

IX. Kalkulace – Testovací přípravek

Označení	Součástka	Pouzdro	Cena
C1, C2, C6	Kondenzátor EEEFK1H101P	SMD, velikost F	39,00 Kč
C3, C4, C5, C7	C tantal 10 μF 35 V	SMD, velikost D	40,00 Kč
D1 – D3	Dioda GL1M	MELF	3,00 Kč
JP1 – JP3	Kolíková lámací lišta	rozteč 2,54 mm	3,00 Kč
OUT1 – OUT3	Svorkovnice DG300-5.0-03P	rozteč 5 mm	20,00 Kč
Q3, Q4, Q7, Q8, Q11, Q12	Tranzistor STP10NK80ZFP	TO220FP	414,00 Kč
R1 – R6	Rezistor 1 Ω	SMD 2512	15,00 Kč
U1	Driver IX2113	SO16	49,00 Kč
U2	Driver NCP5181	SO8	49,00 Kč
U3	Driver IRS2103PBF	SO8	39,00 Kč
UCC2, UCC3, VCC1, VDD1	Svorkovnice DG300-5.0-02P	rozteč 5 mm	19,00 Kč
DPS	Plošný spoj (5 ks) + doprava		845,00 Kč
CELKEM s DPH:			1535,00 Kč

X. Obsah přiloženého CD

Program

diplomova-prace.pdf

labview_-_Pulse_generator.zip

Driver-testovani.brd

Driver-testovani.sch

Hlavni-DPS.brd

Hlavni-DPS.sch

Ovladaci-modul.brd

Ovladaci-modul.sch

zadni-celo.dxf

predni-celo.dxf