

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2015**

**Patrik Todorov**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra mikroelektroniky**

Studijní program: Komunikace, multimedia a elektronika

Studijní obor: Aplikovaná elektronika



**Bakalářská práce**

**Realizace mobilního zdroje elektrické energie**

**Autor práce:** Patrik Todorov

**Vedoucí práce:** Prof. Ing. Pavel Zahradník, CSc.

**Praha**  
**Květen 2015**

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra mikroelektroniky

## ZADÁNÍ B AKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **T O D O R O V Patrik**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Obor: Aplikovaná elektronika

Název tématu: **Realizace mobilního zdroje elektrické energie**

### Pokyny pro vypracování:

Prostudujte literaturu týkající se přenosných zdrojů elektrické energie poháněných spalovacím motorem. Navrhněte a realizujte přenosný zdroj elektrické energie poháněný benzínovým spalovacím motorem. K řízení zdroje použijte vhodný mikroprocesor. Ověřte funkci realizovaného zdroje. Zhodnotte dosažené parametry.

### Seznam odborné literatury:

- [1] John B. Heywood, Two-Stroke Cycle Engine: It's Development, Operation and Design, CRC Press 1999. ISBN-10: 1560328312, ISBN-13: 978-1560328315
- [2] [www.parallax.com](http://www.parallax.com) [on-line]
- [3] [www.ti.com](http://www.ti.com) [on-line]
- [4] [www.linear.com](http://www.linear.com) [on-line]

Vedoucí: **Prof. Ing. Pavel Zahradník, CSc.**

Platnost zadání: 5. 1. 2016



Podpis zakryt

Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.  
vedoucí katedry

V Praze dne 19. 9. 2014

Podpis zakryt

Prof. Ing. Pavel Řípka, CSc.  
děkan

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou prací na téma „Realizace mobilního zdroje elektrické energie“ vypracoval samostatně, pouze s přispěním vedoucího této práce a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem č. 1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování, nebo zveřejňování této práce, nebo jejích částí, se souhlasem katedry zadávající a katedry obhajoby, v souladu s § 60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, ve znění pozdějších předpisů.

V Praze dne: 22. 5. 2015

.....  
podpis



## Anotace

Tato práce se zabývá návrhem a realizací přenosného napájecího zdroje, poháněného spalovacím motorem. Nejprve je proveden rozbor některých existujících a v praxi používaných řešení, nastíněny jsou principy a směry, kterými se lze ubírat. Po teoretickém úvodu je pozornost věnována formulaci cílů a definici požadavků, které budou na prototyp kladeny. Navazuje proces postupného návrhu, který byl rozdělen do několika samostatných větších kapitol. První se zabývá převážně mechanickým uspořádáním. Jsou zde popsány jednotlivé komponenty účastnící se přeměny energie a další, které umožňují řádný chod stroje. Následující kapitola se zaměřuje na návrh výkonových a řídicích elektronických obvodů, přičemž řešení jednotlivých funkčních celků – modulů, je zde rozčleněno do samostatných podkapitol. Pojednáno je také o způsobu chování navržené řídicí jednotky. Popis vyhotovení plošných spojů a cíle sledované při jejich návrhu je ponechán do kapitoly předposlední, na kterou navazuje závěrečné zhodnocení výsledků.

## Klíčová slova

Elektrocentrála, Agregát, Spalovací motor, Generátor, Pružná spojka, Usměrňovač, Měnič, Spínaný zdroj, BUCK, Budič, Proudový senzor, AD převodník, FLYBACK, Stabilizátor napětí, Mikrokontrolér, EEPROM, RTC, USB, Servomotor, Magnetický enkodér, LCD, Dotekový panel, Baterie, Nabíječ

## Summary

This bachelor work deal with proposal and realization mobile power supply, powered by combustion engine. Introduction describes some of the existing solutions. Are outlined principles and development tendencies which can proceed. Subsequently, the work deals with the definition of requirements and design of the device itself. This part is segmented into three separate chapters. The first is mainly engaged in the mechanical side of device. Describes the various components which are involved in energy conversion process and other that ensuring the proper operation of the machine. The second chapter focuses on the design of control and power electronic circuits. Solutions to the various functional units is here divided into separate sections. The third chapter discusses the design of PCB, whereupon follows final upward revaluation.

## Key words

Electric generator, Engine generator, Combustion engine, Generator, Flexible coupling, Rectifier, Inverter, Switching power supply, BUCK, Driver, Current sensor, AD converter, FLYBACK, Voltage regulator, Microcontroller, EEPROM, RTC, USB, Servomotor, Magnetic encoder, LCD, Touch screen, Battery, Charger

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu této práce Prof. Ing. Pavlu Zahradníkovi CSc za pomoc a vedení při jejím vzniku.

Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za oporu během studia.

## OBSAH

<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b> . . . . .	<b>9</b>
<b>1. Úvod</b> . . . . .	<b>11</b>
<b>2. Teoretický rozbor</b> . . . . .	<b>12</b>
2.1 Rozdělení MPSM, vlastnosti a funkce . . . . .	12
2.2 Princip funkce MPSM . . . . .	15
2.3 Konstrukce generátorů střídavého napětí . . . . .	16
2.4 Buzení generátorů a regulace výstupního napětí . . . . .	20
<b>3. Stanovení požadavků na prototyp agregátu</b> . . . . .	<b>26</b>
<b>4. Mechanická část agregátu</b> . . . . .	<b>28</b>
4.1 Spalovací motor . . . . .	28
4.1.1 <i>Popis a parametry použitého motoru</i> . . . . .	28
4.1.2 <i>Princip funkce spalovacího motoru</i> . . . . .	30
4.1.3 <i>Postup uvedení do provozu a ukončení provozu</i> . . . . .	30
4.1.4 <i>Upevnění motoru</i> . . . . .	30
4.2 Ovládání škrtkové klapky karburátoru . . . . .	32
4.2.1 <i>Možné způsoby provedení</i> . . . . .	32
4.2.2 <i>Výběr servomotoru a jeho parametry</i> . . . . .	33
4.2.3 <i>Ovládání lanka bovdeny servomotorem</i> . . . . .	34
4.2.4 <i>Upevnění servomotoru</i> . . . . .	34
4.3 Generátor . . . . .	35
4.3.1 <i>Výběr generátoru a jeho parametry</i> . . . . .	35
4.3.2 <i>Upevnění generátoru</i> . . . . .	39
4.4 Napojení generátoru na hnací hřídel motoru . . . . .	40
4.4.1 <i>Možné způsoby řešení napojení</i> . . . . .	41
4.4.2 <i>Pružná spojka</i> . . . . .	41
4.4.3 <i>Návrh a výroba spojovacího nástavce</i> . . . . .	42
4.5 Řešení celkového mechanického uspořádání stroje . . . . .	43
4.5.1 <i>Odhlučnění</i> . . . . .	44
4.5.2 <i>Svorky výstupního napětí</i> . . . . .	44
4.5.3 <i>Nouzový vypínač</i> . . . . .	45
4.5.4 <i>Celkový pohled na výsledné mechanické uspořádání</i> . . . . .	45
<b>5. Elektronická část realizovaného agregátu</b> . . . . .	<b>47</b>
5.1 Zvolený koncept a rozdělení na moduly . . . . .	47
<b>6. Výkonová jednotka</b> . . . . .	<b>49</b>
6.1 Trojfázový usměrňovač . . . . .	50
6.1.1 <i>Výběr diod pro usměrňovač</i> . . . . .	52
6.1.2 <i>Filtrace výstupního napětí usměrňovače</i> . . . . .	55
6.1.3 <i>Výkonová ztráta usměrňovače a chlazení diod</i> . . . . .	59
6.2 Výkonový DC/DC měnič . . . . .	62
6.2.1 <i>Pracovní cyklus měniče a pulzně šířková modulace</i> . . . . .	62
6.2.2 <i>Topologie a princip funkce měniče</i> . . . . .	63
6.2.3 <i>Řízení měniče a volba pracovního kmitočtu</i> . . . . .	67
6.2.4 <i>Výběr tranzistorů a diod</i> . . . . .	69
6.2.5 <i>Návrh a výroba tlumivky</i> . . . . .	71
6.2.6 <i>Určení vstupní filtrační kapacity měniče</i> . . . . .	76
6.2.7 <i>Určení výstupní filtrační kapacity měniče</i> . . . . .	77
6.2.8 <i>Budiče tranzistorů MOSFET</i> . . . . .	80
6.2.9 <i>Výkonová ztráta měniče a chlazení součástek</i> . . . . .	86

6.3	Měření napětí	94
6.3.1	<i>Výběr A/D převodníku</i>	94
6.3.2	<i>Princip funkce ADC</i>	94
6.3.3	<i>Obvod pro měření napětí</i>	95
6.3.4	<i>Snímaná napětí a jejich úprava</i>	96
6.3.5	<i>Komunikace s převodníkem po SPI sběrnici.</i>	96
6.4	Měření proudu	97
6.4.1	<i>Princip funkce proudového senzoru</i>	97
6.4.2	<i>Obvod pro měření proudu</i>	98
6.5	Návrh napájecího zdroje pro výkonovou jednotku	98
6.5.1	<i>Výběr a popis funkce řídicího obvodu.</i>	99
6.5.2	<i>Impulsový transformátor.</i>	100
6.5.3	<i>Proudový snímací rezistor.</i>	100
6.5.4	<i>Výběr tranzistoru.</i>	101
6.5.5	<i>Výběr usměrňovacích diod</i>	101
6.5.6	<i>Zpětnovazební rezistor</i>	101
6.5.7	<i>Vstupní a výstupní filtrační kapacity.</i>	102
6.5.8	<i>Určení velikosti předzátěže.</i>	102
6.5.9	<i>Návrh tlumícího ochranného obvodu</i>	102
6.5.10	<i>Přechodová odezva.</i>	104
6.5.11	<i>Dělič podpětového zámku</i>	104
6.5.12	<i>Měkký start</i>	105
6.5.13	<i>Rezistor teplotní kompenzace</i>	105
6.5.14	<i>Stabilizátor a reference.</i>	105
6.5.15	<i>Celkové zhodnocení navrženého napaječe</i>	106
6.6	Obvod spínače zapalování motoru	107
6.7	Celkové zapojení výkonové jednotky	107
<b>7.</b>	<b>Řídicí jednotka</b>	<b>108</b>
7.1	Mikrokontrolér Parallax Propeller P8X32A	109
7.2	Programová paměť Propelleru	110
7.2.1	<i>Zapojení EEPROM paměti</i>	110
7.2.2	<i>Rozdělení paměťového prostoru</i>	111
7.2.3	<i>Komunikace po I2C sběrnici</i>	111
7.3	Programování Propelleru	113
7.3.1	<i>Zapojení převodníku UART↔USB</i>	113
7.4	Rozšíření I/O portů Propelleru	114
7.4.1	<i>Zapojení expanderu</i>	114
7.4.2	<i>Nastavení registrů expanderu.</i>	115
7.5	Obvod reálného času	115
7.5.1	<i>Zapojení RTC obvodu.</i>	115
7.5.2	<i>Nastavení registrů RTC obvodu</i>	116
7.6	Modul LCD displeje	116
7.6.1	<i>Kontrolér LCD Displeje</i>	117
7.6.2	<i>Kontrolér dotekového panelu</i>	118
7.7	Akustická indikace	118
7.8	Ovládání relé zapalování	118
7.9	Napěťový hlídač	119
7.10	Reset sekvencí	120
7.11	Lineární stabilizátory napětí	120
7.12	Ostatní části řídicí jednotky	121
7.13	Popis chování řídicí jednotky	122

<b>8. Servomotor a snímání polohy</b> .....	<b>126</b>
8.1 Řízení polohy servomotoru .....	126
8.2 Magnetický enkodér .....	126
8.2.1 <i>Princip funkce magnetického enkodéru</i> .....	127
8.2.2 <i>Zapojení magnetického enkodéru</i> .....	128
8.2.3 <i>Nastavení napětí analogového výstupu</i> .....	128
8.2.4 <i>Komunikace po SSI sběrnici a OTP registr</i> .....	129
8.2.5 <i>Umístění enkodéru a magnetu uvnitř servomotoru</i> ...	130
<b>9. Napájecí jednotka</b> .....	<b>131</b>
9.1 Napáječ řídicí jednotky a nabíječky baterií .....	131
9.2 Nabíječka baterií .....	131
9.3 Obvod výběru napětí pro řídicí jednotku .....	132
<b>10. Návrh a výroba plošných spojů</b> .....	<b>133</b>
<b>11. Závěr</b> .....	<b>134</b>
<b>12. Literatura a použité zdroje</b> .....	<b>135</b>
<b>13. Seznam obrázků</b> .....	<b>144</b>
<b>14. Seznam tabulek</b> .....	<b>147</b>
<b>15. Seznam příloh</b> .....	<b>148</b>

## Seznam použitých symbolů a zkratek

A/D, AD	Analog to Digital
AC	Alternating Current
ACK	Acknowledgement
ADC	Analog to Digital Converter
AVR	Automatic Voltage Regulation
BiCMOS	Bipolar CMOS
BSS	Base Station Subsystem
CLK	Clock
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CMR	Common Mode Rejection
COG	Chip On Glass
COM	Communication Port
CS	Chip Select
DAC	Digital to Analog Converter
DAVR	Digital AVR
DC	Direct Current
DI, DIN	Data Input
DO, DOUT	Data Output
DPS	Deska plošných spojů
DS	Drain–Source
DSP	Digital Signal Processor
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EM	Electro Magnetic
EMI	Electromagnetic Interference
ESL	Equivalent Series Inductance
ESR	Equivalent Series Resistance
GS	Gate–Source
ESL	Equivalent Series Inductance
ESR	Equivalent Series Resistance
GSM	Groupe Spécial Mobile
HEXFET	Hexagonal Field Effect Transistor
I/O	Input/Output
iAVR	Intelligent AVR
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit
IC	Integrated Circuit
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IZS	Integrovaný Záchranný Systém
LCD	Liquid Crystal Display
LDO	Low Drop Out
LED	Light Emitting Diode
LPG	Liquefied Petroleum Gas
MIPS	Million Instruction Per Second
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MPSM	MZEE Poháněné Spalovacím Motorem
MSB	Most Significant Bit
MZEE	Mobilní Zdroje Elektrické Energie
NF	Nízko Frekvenční
NiCd	Nickel-Cadmium (Battery)
NiMh	Nickel-Metal Hydride (Battery)
NTC	Negative Temperature Coefficient
OHV	Over Head Val
OS	Operation System
OTP	One Time Programmable

OZ	Operační Zesilovač
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Access Memory
RISC	Reduced Instruction Set Computing
ROM	Read Only Memory
rpm	Revolutions Per Minute
RTC	Real Time Clock
S&H	Sample And Hold
SAR	Successive Approximation Register
SCL	Serial Clock
SDA	Serial Data
SMD	Surface Mount Device
SMO	Stejnoseměrný Mezilehlý Obvod
SMT	Surface Mount Technology
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
SS	Stejnoseměrné (napětí, proud)
SSI	Synchronous Serial Interface
SSR	Solid State Relay
THT	Through Hole Technology
TN	Twisted Nematic
TTL	Transistor Transistor Logic
TVS	Transient Voltage Suppression
UART	Universal Asynchronous Receiver / Transmitter
UPS	Uninterruptible Power Supply
USB	Universal Serial Bus
VN	Vysoké Napětí

## Úvod

Mobilní zdroje elektrické energie poháněné spalovacím motorem (dále jen MPSM), mají za úkol umožnit napájení elektrospotřebičů i v místech, kde není z nějakého důvodu dostupné napětí z běžné rozvodné sítě, nebo v situacích kdy dojde k jeho výpadku. Zkráceně se tato zařízení často označují jako elektrocentrála, motorgenerátor, nebo nepřesně jen generátor, přičemž v této práci bude nejčastěji užíváno výrazu agregát. Jsou dnes běžně dostupné a nacházejí uplatnění v mnoha oborech lidské činnosti. Díky tomu, že jejich cena již poklesla na přijatelnou úroveň, stále častěji je mohou využívat i jednotlivé osoby. Nejlevnější MPSM lze dnes pořídit řádově za několik tisíc korun.

Většinou bývají určeny k provozu v takzvaném ostrovním režimu, jako samostatná lokální distribuční síť, často jen krátkého rozsahu. Oproti jiným druhům mobilních zdrojů elektrické energie mohou nepřerušovaně napájet připojené spotřebiče i po delší časový interval, pouze v závislosti na doplňování provozních kapalin, zajištění řádného přívodu vzduchu a odvodu spalin. Možnou nevýhodou je značný hluk, vibrace a nutnost spalin odvádět mimo uzavřené prostory, což se také ukázalo být jednou z největších nepřijemností v průběhu realizace.

Kompletní výčet oblastí využití MPSM by byl rozsáhlý, ale především je to stavebnictví, telekomunikace, různé práce v terénu, kultura, rekreační účely. Nepostradatelné jsou pro IZS a armádu. Užitečná hodnota je tedy značná a proto má smysl se touto problematikou zabývat. Také je vhodné podotknout, že většina dopravních prostředků je zároveň MPSM, neboť obsahují baterii, jež je dobíjena z alternátoru, poháněného spalovacím motorem.

Výrobci MPSM dnes existuje velký počet. K některým, z jejichž materiálů bylo čerpáno v teoretickém úvodu této práce, patří firmy jako Honda, Hitachi, Mitsubishi, Honeywell, Yamaha, Subaru, Hyundai, Einhell, Hecht, Güde, Metallwarenfabrik [1–20].

Pro úplnost lze uvést, že druhou skupinu s odlišným zaměřením, tvoří stacionární zdroje elektrické energie poháněné spalovacím motorem, kterým zde nebude pozornost věnována.

Tato práce si klade za cíl nejprve zmapovat existující známá technická řešení MPSM a poté se pokusit navrhnout vlastní koncepci s inovativním přístupem, který nějakým způsobem obohatí danou oblast. Druhým krokem by mělo být návrh zrealizovat postavením funkčního prototypu.



# 1. Teoretický rozbor

Vzhledem k tomu jak jsou dnes MPSM rozšířené a obecné principy funkce známé, bude možné při studiu tématu zaměřit pozornost směrem k dostupným informacím. Před návrhem prototypu je užitečné dozvědět se více o jejich konstrukci, vlastnostech a obvyklých funkcích. Podrobněji se lze zorientovat prostudováním internetových stránek výrobců [1-20] a na nich volně dostupných specifikačních listů, návodů a katalogů, ale také za pomoci hůře dostupných servisních manuálů a part listů [21-34], ze kterých lze získat množství podrobných poznatků.

## 1.1 Rozdělení MPSM, vlastnosti a funkce

Po provedení průzkumu nabídky trhu bylo usouzeno, že základní rozdělení MPSM lze provést podle způsobu konstrukce. Dle tohoto kritéria, lze všechny agregáty rozdělit na provedení kufříkové a rámové.

První zmíněné jsou lehce přenosné, mají nízkou hmotnost (nejméně však okolo 10kg) a malé rozměry. Příklad takového agregátu je na **Obr. 2.1**. Veškeré ústrojí je velmi kompaktně uspořádáno včetně palivové nádrže tak, aby se vešlo do malého objemu. Generátor i spalovací motor zde bývají sloučeny do jednoho celku. To



**Obrázek 2.1** : Ukázka provedení kufříkového agregátu – Honda EU20i (převzato z [3])

lze provést díky použití multipólových vysokofrekvenčních alternátorů s permanentními magnety, které svou hmotností zároveň nahrazují klasický setrvačnick. Díky této koncepci se zařízení zjednodušuje, snižuje hmotnost a zvyšuje účinnost. Z vnější strany se nachází většinou celoplastový kryt s rukojetí na přepravu v horní části. Všechny komponenty jsou tedy zcela uzavřeny, což snižuje hladinu produkovaného hluku (nejméně však okolo 83dB). Mobilita je vykoupena malými dostupnými výkony, které se pohybují maximálně v řádu jednotek kW. To je předurčuje k použití spíše ve spojení s běžnou spotřební elektronikou, která ale často bývá citlivější na nedokonalosti napájecího napětí a proto v kufříkových agregátech většinou bývá použit kvalitnější způsob jeho regulace.

U rámových agregátů jsou všechny součásti umístěny v konstrukci svařené z kovových trubek. Ukázka tohoto provedení je na **Obr. 2.2**. Zařízení je celkově robustnější, bývá určeno do náročnějších podmínek. Mobilita je zajištěna buď držadly na přenos, nebo samotným rámem, který může obsahovat i podvozek. Dostupné výstupní výkony se pohybují i přes 20kW. Pokud v tomto případě nejde o kapotovaný model, hlučnost v provozu je opravdu značná.

Důležitým aspektem je typ použitého paliva a jeho spotřeba. Od toho se odvozuje doba provozu na jedno doplnění, což může být až desítky hodin. Chlazení MPSM bývá vždy vzduchové.

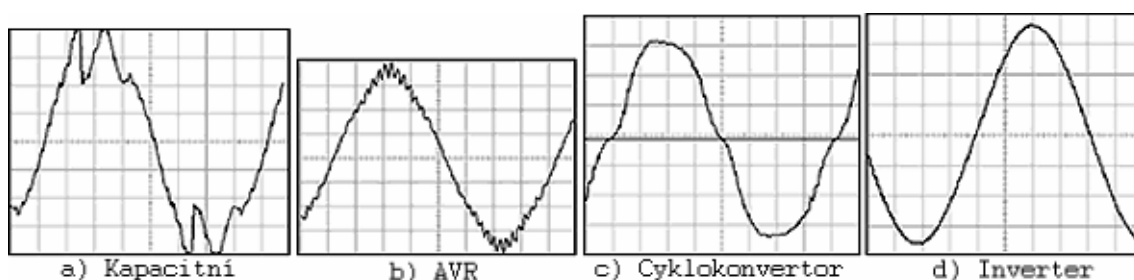
Zřejmě nejdůležitější parametr je typ dostupného napájecího napětí. Existují agregáty s čistě jen střídavým výstupem jako model na **Obr. 2.2**, ale i takové co poskytují pouze napětí stejnosměrné, například [21].



**Obrázek 2.2** : Ukázka provedení rámového agregátu – Honda ECT7000P (převzato z [2])

V případě prvním mají využití univerzální, ve druhém bývají především určeny pro dobíjení baterií. Nejběžnější jsou v dnešní době agregáty kombinované. U těch většinou platí, že SS výstup je pouze doplňkový a poskytuje výrazně menší maximální výkon než AC výstup. Velikost SS napětí zde bývá pevně nastavena. V závislosti na modelu je nejčastější hodnota 12V, méně často 24V nebo 48V. Stabilizaci SS napětí lze očekávat pouze od agregátů čistě stejnosměrných, kde bývá jeho velikost v některých případech i nastavitelná. U kombinovaných agregátů SS výstup nikdy stabilizován není a hodnota napětí může mít značnou toleranci [29]. Pokud jde o AC výstup, může být buď jeden, nebo i několik separátních, s napětím o velikosti odpovídající normě platné pro rozvodnou síť dané země. Častá bývá možnost přepínat mezi vícero standardy, například 120V/60Hz, 230V/50Hz. K dispozici může být dále zásuvka třífázového napětí 380V, 400V.

Důležitým parametrem je stabilita výstupního střídavého napětí a kmitočtu, která závisí na typu použité regulace. U stejnosměrných agregátů je směrodatná především tolerance a zvlnění napětí.



**Obrázek 2.3** : Orientační charakter deformace harmonického průběhu napětí některých používaných typů regulací AC agregátů (převzato a upraveno z [1])

Lze se setkat s několika druhy regulace, které zde budou blíže popsány. Názvy jsou uvedeny tak jak je výrobci označují:

- a) Capacitive [30] – Kapacitní regulace se vyskytuje velmi často, protože je nejjednodušší a její implementace nejlépejší. Pro značné množství aplikací má uspokojivé výsledky. Pracuje na principu rezonance mezi kondenzátorem a budícím vinutím generátoru, což bude dále vysvětleno. Průběh střídavého napětí je značně doformován, jak je vidět na **Obr. 2.3 a)**. Tato regulace není schopna rychle reagovat na změny zatěžovacího proudu, takže napětí může poklesnout i o desítky procent pod jmenovitou hodnotu. Je tedy vhodná pro nenáročné odporové spotřebiče jako zdroje světla a tepla. Také zcela postačí pro menší spotřebiče induktivní povahy, jako drobné stavební nářadí a podobně.
- b) AVR [34] – Z celkového množství agregátů na trhu se vyskytujících je automatická napěťová regulace dnes zřejmě nejběžněji používaná. Řídí buzení generátoru v závislosti na velikosti vyráběného napětí, čímž ho stabilizuje téměř bez ohledu na zatížení. Výsledný průběh vypadá mnohem lépe, jak je ukázáno na obrázku **Obr. 2.3 b)**. Při výskytu skokové zátěže dochází k mnohem menšímu poklesu napětí než u regulace kapacitní. Umožňuje napájet i citlivější elektroniku, ale bohužel může docházet k jejímu rušení vlivem výskytu vyšších harmonických frekvencí. Existují i modernější varianty, jako DAVR nebo iAVR [23, 24], kde je dosaženo rychlejší a přesnější odezvy regulátoru, díky nahrazení jednoduchých analogových zapojení integrovanými obvody.

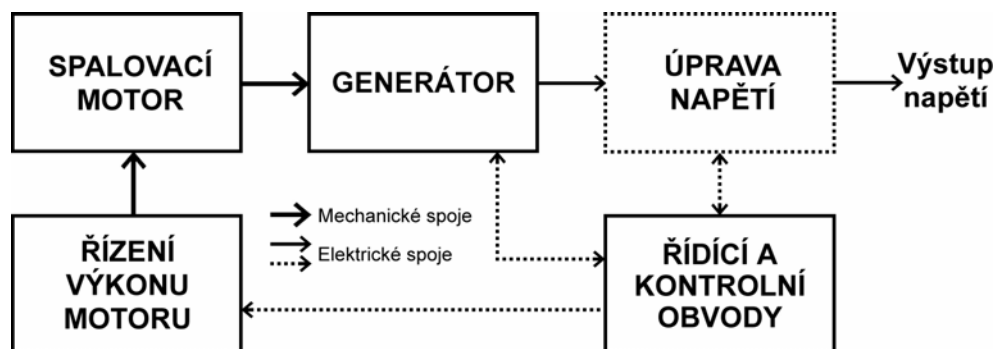
- c) Cycloconverter [22] – Cyklokonvertor převádí energii na výstup střídavého napětí přímo z vinutí generátoru. Pracuje tedy bez stejnosměrného mezilehlého obvodu (SMO), stejně tak jako obě předchozí regulace. Jedná se v podstatě o řízený usměrňovač pracující v režimu měniče, pomocí kterého je možné kontrolovat střední hodnotu výstupního střídavého napětí. Generátor má většinou trojfázové vinutí zapojené do hvězdy s vyvedeným středem. Pro každou fázi jsou zapotřebí dva můstky spínačů. Výstup je stabilizován uspokojivě, jak se lze na **Obr. 2.3 c)** přesvědčit. Řízení spínačů provádí mikrokontrolér. Regulace pomocí cyklokonvertoru umožňuje snížit celkovou hmotnost agregátu, díky menšímu počtu komponent a použití menšího generátoru. Nevýhodou je, že frekvence a stabilita výsledného napětí je značně závislá na konstantních otáčkách spalovacího motoru.
- d) Inverter [29] – Takto výrobci agregátů obecně označují spínané měniče s využitím SMO, které dokáží vnitřně konvertovat stejnosměrné nízké vstupní napětí na sinusový průběh vyšší amplitudy. Takový měnič může být jednoduše řešen jako transformátor se dvěma spínači, které na primární vinutí přivádí napětí střídavě v jedné a druhé polaritě. Regulace výstupního napětí je prováděna řízením spínačů specializovanými obvody, nebo přímo mikrokontrolérem. To je sice komplikované, ale výsledkem je nejlepší vyhlazení výstupního napětí, jak je vidět na **Obr. 2.3 d)**. Jedná se o perspektivní způsob regulace, která často na výstupu poskytuje přesnější harmonický průběh než lze naměřit v běžné rozvodné síti.
- e) Compound [32] – Kompaundní regulace se používá především u agregátů s třífázovým výstupem. Využívá proudového transformátoru k řízení buzení generátoru. Je užitečná pro použití se spotřebiči, které mají náročný rozběh. Jako například kompresory, čerpadla a cirkulárky, které potřebují dodat velký rozběhový proud a jejich funkci neovlivní krátkodobý pokles napětí. Obvykle je také schopna reagovat na nerovnoměrné zatížení fází.
- f) AC/DC Converter [21] – Takto bývá označována regulace u agregátů s výstupem pouze SS napětí. Skládá se z usměrňovače a DC/DC měniče, jehož řízení je zajištěno pomocí vhodného IO. Jedná se tedy opět o spínaný měnič s rozdílem oproti inverteru, že výstupní napětí je stejnosměrné. Tento způsob regulace/stabilizace bude blíže rozebrán v kapitole 6.2.

Přítomnost ochranných a kontrolních prvků, jako pojistek, jističů, vypínače motoru, provozní kontrolky (minimálně zapnutí a přetížení výstupu) je vždy samozřejmá. Oproti tomu kontrolka olejového čidla u nejlevnějších agregátů vždy přítomna není. Velké množství funkcí je volitelné a vyskytuje se v závislosti na výrobci a modelu. Může to být například: tlačítko startování místo ručního startéru, možnost paralelního chodu více agregátů stejného typu, počítadlo motorhodin, digitální zapalování místo tranzistorového, automatické ovládání sytiče u benzínových motorů, hlídání teploty bloku motoru, ukazatele velikosti výstupního napětí, proudu a frekvence, měřič otáček motoru, měření napětí palubní baterie (je-li přítomna), monitoring systémových závad. Dále se u některých modelů agregátů vyskytuje prepínač automatu plynu. Tato funkce se snaží šetřit palivo tím, že nastavuje otáčky motoru podle velikosti připojené zátěže. Aktivuje se volitelně, protože v kombinaci s některými druhy velmi proměnlivé zátěže může způsobovat potíže.

Uvedený přehled je poměrně podrobný a k vytvoření základní představy o dnešních možnostech běžných agregátů postačující. Další informace o vlastnostech a funkcích MPSM je možné dohledat na internetových stránkách výrobců [1–20].

## 1.2 Princip funkce MPSM

Před návrhem a stavbou prototypu agregátu je vhodné zmapovat stav technického vývoje ještě podrobněji. Po prostudování dostupné literatury bylo zjištěno, že všechny MPSM pracují na stejném principu, který je znázorněn pomocí blokového schématu na **Obr. 2.4**.



Obrázek 2.4 : Princip funkce elektrocentrály

Klíčová část je spalovací motor, který převádí chemickou energii paliva nejprve na tepelnou a následně na kinetickou, jakožto točivý moment klikové hřídele. Ta je pevně mechanicky napojena na hřídel rotoru generátoru, který prostřednictvím točivých magnetických polí vyrábí střídavé elektrické napětí. To může být dále zpracováno obvody upravující jeho charakter a velikost, případně provádějící stabilizaci s žádanou přesností. Většinou je zde využito SMO, to znamená že napětí je nejprve usměrněno a poté opět zrekonstruováno do požadovaného průběhu. Agregáty s AC výstupem, které mají tento blok, bývají většinou vhodné k napájení i spotřební elektroniky a citlivých přístrojů. Pokud ho nemají, což je docela časté, hlavní vinutí generátoru je přes povinné ochranné a kontrolní prvky připojeno přímo k výstupním svorkám. Lze se s tím setkat spíše u agregátů vyšších výkonů.

Pokud to umožňuje druh použité regulace, bývá nějakým způsobem zajištěno řízení výkonu spalovacího motoru a to minimálně z důvodu ekonomiky provozu. Je zde tedy přítomen akční člen, který přímo ovládá palivovou škrtící klapku. To může být provedeno buď mechanicky, pomocí odstředivého regulátoru otáček s umístěním většinou na setrvačniku. Nebo elektronicky pomocí krokového motoru, který bývá přímo součástí karburátoru. V takovém případě musí být přítomna i elektronika schopna motor ovládat, čímž se celé zařízení o něco komplikuje.

Další znázorněný funkční blok, který musí být přítomen vždy, obsahuje elektronické zapojení, udržující alespoň přibližně velikost výstupního napětí na jmenovité hodnotě. Je to regulátor používající některého z uvedených druhů regulací. Často bývá lokalizován přímo v tělesu generátoru. U agregátů nejjednodušší konstrukce je tvořen pouze jedním kondenzátorem. Jinak to mohou být složitější analogová zapojení, nebo přímo separátní řídicí jednotka s mikrokontrolérem, která má většinou na starost více komplexní kontrolu chodu stroje.

Pokud jde o spalovací motor, používají se zde modely se zvýšenou spolehlivostí, navržené pro dlouhodobý provoz, v naprosté většině čtyřtákní. Bližší popis bude obsažen v kapitole 4.1. Dvoudobé motory jsou sice jednoduché, malé a lehké [39], ale málo účinné a neekologické. Navíc nutnost míchat v předepsaném poměru olej do paliva je poněkud diskvalifikuje. Proto se s nimi lze setkat spíše výjimečně u levných malých agregátů [10]. Většina výrobců dnes používá motory s ventilovým rozvodem typu OHV, které mají při nízkých otáčkách dobré vlastnosti, jsou úsporné, spolehlivé, s vysokou životností. Firma Honda má v nabídce k tomuto účelu motory řady GX [35].

Co se týká paliva, je možné primárně volit mezi motorem benzínovým a naftovým. Na trhu lze nalézt i agregáty poháněné například LPG, nebo dokonce kombinací paliv. Naftové agregáty se vyrábějí s vyššími výstupními výkony, přibližně od 5kW a většinou jsou určeny k delšímu nasazení. Benzínové se vyrábějí s velkými i malými výkony, které začínají na hodnotách okolo 500W.

K výrobě elektrické energie se používají nejčastěji synchronní točivé stroje v generátorickém režimu, neboli alternátory. Někteří výrobci se také specializují na použití asynchronních generátorů [13, 27].

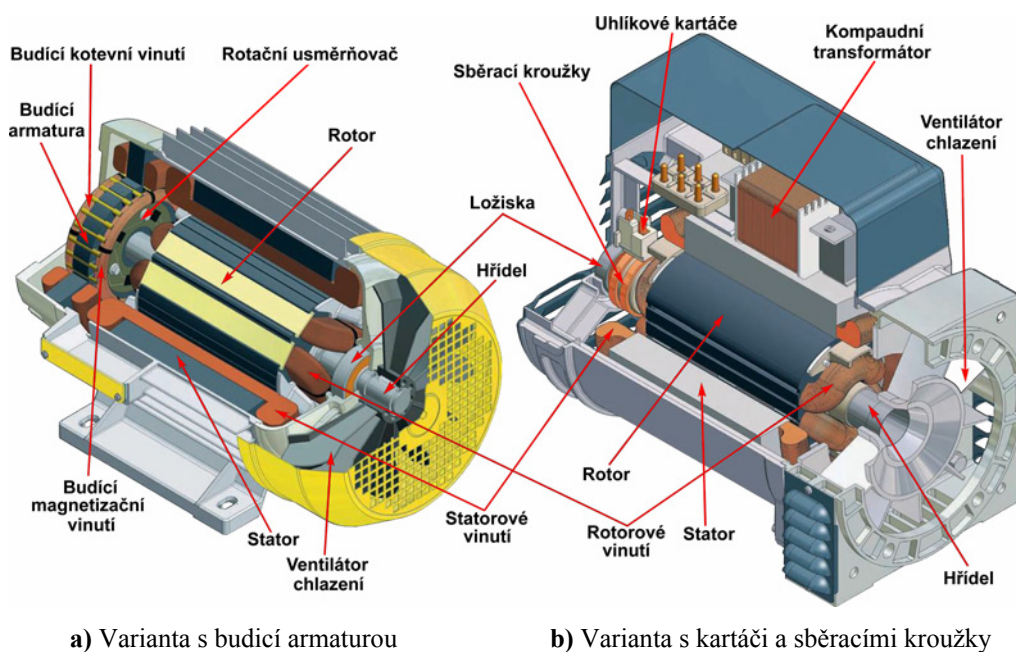
### 1.3 Konstrukce generátorů střídavého napětí

K bližšímu popisu různých způsobů regulace výstupního napětí používaných v agregátech, což bude cílem další kapitoly, je potřeba nejprve stručně osvětlit konstrukci a způsob funkce generátorů. Regulace napětí totiž ve většině případů úzce souvisí s jejich buzením.

Generátory jsou točivé stroje, které převádí mechanickou energii na elektrickou, k čemuž v zásadě využívají Lorentzova zákona a Zákona elektromagnetické indukce. Skládají se ze dvou hlavních komponent, kterými je stator a rotor. Je vhodné nejprve ujasnit několik podstatných pojmů [156]:

1. Téměř každý točivý stroj, může pracovat ve třech režimech: motorovém, brzděném a generátorickém.
2. Synchronní otáčky jsou takové, při kterých se rychlost otáčení magnetického pole rotoru shoduje s rychlostí otáčení magnetického pole statoru.
3. Kotva je vždy točivá, ve kterém se indukují elektrické napětí.

Na **Obr. 2.5** jsou v řezu znázorněny dvě odlišné konstrukční varianty synchronního generátoru, které se ještě s několika obměnami mohou v MPSM vyskytnout.



a) Varianta s budící armaturou                      b) Varianta s kartáči a sběracími kroužky  
**Obrázek 2.5** : Řez synchronním generátorem (převzato a upraveno z [26])

Stator je pevná nepohyblivá část, tvořena kovovými prstenci tloušťky okolo 0,5mm, které mají po svém vnitřním obvodu meandrovitě vyseknuty zuby. Ty po navrstvení prstenců do svazků ve tvaru válce vytvoří podélné drážky pro uložení statorového vinutí.

Protože se v případě statoru jedná o magnetický obvod s časově proměnným polem, musejí být prstence vyrobeny z izotropní křemíkové oceli a od sebe vzájemně odizolovány lakem, kvůli omezení ztrát v železe. Podrobněji o konstrukci a funkci synchronního motoru/generátoru pojednává literatura [156, 157].

Vinutí statoru generátoru v různých agregátech se může skládat z následujících cívek a komponent:

1. Hlavní kotevní vinutí – Musí být navinuto vždy, protože poskytuje elektrickou energii pro hlavní výstupní svorky agregátu. Může být tvořeno až několika cívkami, zapojenými samostatně, či pospojovanými sériově. Jejich řazením je často řešena možnost volby velikosti výstupního střídavého napětí 110/120/220/240V. Cívky mohou také tvořit jedno či více trojfázových vinutí uspořádaných většinou do hvězdy, eventuelně s vyvedeným středem. V takovém případě jsou navinuty tak, aby jejich prostorové uspořádání bylo vzájemně pootočeno o  $120^\circ$ , čímž je dosaženo fázového posuvu generovaného napětí o tentýž úhel. Na hlavním kotevním vinutí se většinou také nacházejí odbočky pro měření velikosti vyráběného napětí regulační jednotkou, což může být řešeno i samostatnými cívkami.
2. Kondenzátorová neboli excitační cívka – Zajišťuje buzení alternátoru dodávkou potřebné energie rotoru a umožňuje provádět přibližnou regulaci.
3. Pomocná cívka (bývá označována „sub-coil“) – Může mít různou funkci. Podílet se na excitaci rotoru, poskytovat napájecí napětí pro řídicí elektroniku, sloužit jako měřicí cívka generovaného napětí.
4. Budící magnetizační vinutí – Používá se u bezkartáčových variant. Dodává energii do budící armatury rotoru.
5. Cívka pro účel získání napětí k nabíjení vestavěného akumulátoru.
6. Cívka poskytující napětí pro stejnosměrný výstup, v případě kombinovaných agregátů. V dokumentacích bývá označována „dc-coil“.
7. Součástí statoru mohou být také držáky s uhlíkovými kartáči.

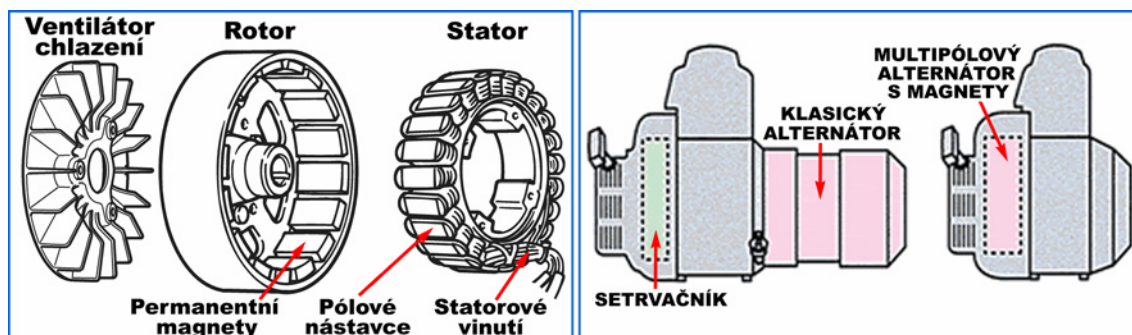
Většinou dvoupólový rotor je umístěn uprostřed statoru kde vykonává točivý pohyb. Má zde funkci rotujícího permanentního magnetu. Jeli nabuzen, při jeho otáčení se v cívkách statorového vinutí indukují střídavá napětí. Jádro rotoru se skládá z hřídele opatřené z obou stran ložisky. Na té je nalisován magnetický obvod vyrobený většinou z jednoho kusu zušlechtné oceli, ve kterém je uloženo rotorové vinutí. Po rozběhu se rotor otáčí synchronně s magnetickým polem statoru, od čehož je odvozen název tohoto točivého stroje. To je příčinou, že v něm nevznikají ztráty v železe a proto nemusí být vyroben z magneticky měkkého materiálu jako stator.

Rotor může nést některé z následujících cívek a komponent:

1. Hlavní magnetizační cívka – Vytváří časově neproměnné magnetické pole.
2. Budící armatura – Skládá se z budící kotevní cívky a rotačního usměrňovače. Je znázorněno na **Obr. 2.5 a**). Vyrábí potřebné stejnosměrné napětí pro magnetizační cívku.
3. Sběrací kroužky, jenž u kartáčové varianty přivádějí stejnosměrné napětí na rotor. Je znázorněno na **Obr. 2.5 b**).



Další typ synchronního generátoru se nachází na **Obr. 2.6 a)**. Spolu se zlevňováním a zlepšováním vlastností permanentních magnetů, začínají klasické generátory nahrazovat multipólové alternátory buzené permanentními magnety. Je to skvělé řešení pro menší a střední výkony. Mají vysokou účinnost, nízkou hmotnost, malé rozměry a jednoduchou konstrukci.



a) Konstrukce alternátoru s permanentními magnety (převzato a upraveno z [28]) b) Dopad na velikost soustrojí motor-generátor (převzato a upraveno z [1])

**Obrázek 2.6 :** Multipólový alternátor s permanentními magnety a rotačním pláštěm

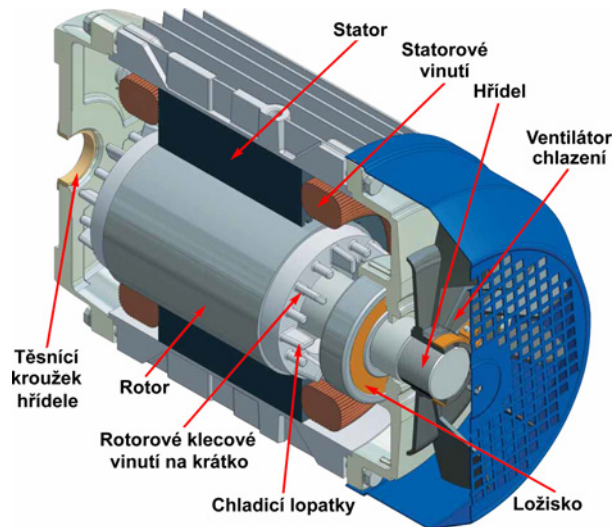
Největší účinnosti lze dosáhnout s použitím magnetů s příměsí vzácných zemin jako Ne, Sm, Co, které jsou magneticky stabilní a mají vysokou koercitivní sílu. Díky nutné povrchové úpravě, například poniklováním, jsou též velmi odolné proti korozi. Nevýhoda je, že při překročení Curiovy teploty ztrácí své magnetické vlastnosti a to může být v kombinaci se spalovacím motorem problematické. Proto se často používají magnety feritové, které mají Curiovu teplotu podstatně vyšší. Další nevýhoda spočívá v tom, že magnety nesnesou hrubé zacházení a při nárazu se snadno lámou. Při neopatrné manipulaci s generátorem také existuje riziko odlepení z rotoru.

Jak je na obrázku vidět, stator s velkým počtem vyniklých pólů (běžně 24) je zde umístěn uprostřed a rotační plášť s přilepenými magnety tvoří obal. Tato konstrukce umožňuje zcela se zbavit jakýchkoliv točivých obvodů na rotoru, včetně kroužků a kartáčů, čímž vzrůstá spolehlivost, zmenšuje se hmotnost a profil celého alternátoru. Magnetů může být na rotoru taktéž velké množství. Je tím dosaženo vysokého napětí a frekvence i při nízkých otáčkách. Posoudit jaký má dopad použití tohoto alternátoru na velikost agregátu, lze na **Obr. 2.6 b)**. Stator obvykle obsahuje pouze jedno či více samostatných trojfázových vinutí. U agregátu s AC i DC výstupem bývá pro stejnosměrný výstup navinuta samostatná cívka a případně cívka pro napájení řídicí elektroniky. O těchto generátorech se více zmiňuje informační zdroj [28].

Konstrukčně poněkud odlišným typem točivého stroje, který lze k výrobě elektrické energie v MPSM použít také, je asynchronní generátor, jehož řez se nachází na **Obr. 2.7**. Realizovaný prototyp ho nepoužívá, proto zmínka zde o něm je pouze doplňující a popsán bude pouze stručně.

Stator je vyroben stejným způsobem jako u synchronního generátoru. Většinou obsahuje trojfázové vinutí. Rotor je v tomto případě tvořen magnetickým obvodem vyrobeným z materiálu jako stator. Má stejné podélné drážky pro umístění vinutí, ovšem na svém vnějším povrchu. V nich jsou místo klasického vinutí umístěny tyče z vodivého materiálu, které jsou na obou stranách rotoru mechanicky pevně spojeny vodivými kroužky. Takové konstrukci se říká klecové vinutí na krátko. Kroužky a konce tyčí jsou patrné na **Obr. 2.7**, kde lze rozpoznat i lopatky přispívající k chlazení rotoru. Výhodou tohoto generátoru je jednoduchá a levná konstrukce, spolehlivost a dlouhá životnost. Je to proto, že rotor jako v předchozím případě neobsahuje žádné rotační polovodiče ani kartáče a jediné jeho vinutí bývá navíc tlakově odlito z hliníku, který je oproti mědi mnohem levnější.

Další výhodou spočívá v odolnosti proti chodu do zkratu, díky čemuž zvládne dodat spotřebičům i velký rozběhový proud.



**Obrázek 2.7 :** Řez asynchronním generátorem (převzato a upraveno z [27])

Oproti synchronnímu generátoru, kde točivé magnetické pole vytváří buzený rotor, zde točivé pole vzniká díky statoru, jehož třífázové hlavní vinutí musí být během provozu napájeno vzájemně fázově posunutými jalovými proudy. Bližší popis způsobu buzení dále obsahuje kapitola 2.4. Podrobnější srozumitelné vysvětlení principu funkce asynchronního alternátoru je poměrně zdlouhavé a lze ho případně dohledat v literatuře [156, 157].

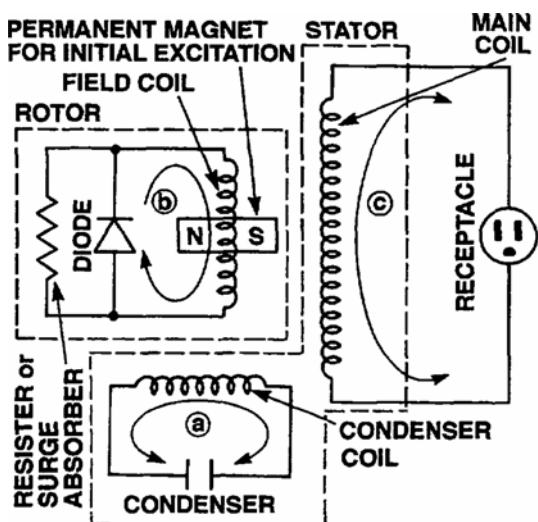


## 1.4 Buzení generátorů a regulace výstupního napětí

Regulace výstupního napětí často úzce souvisí s buzením generátoru a to především u agregátů s AC výstupem. Rotor synchronního generátoru může být buzen v zásadě dvěma způsoby. Stejnoseměrným napětím, nebo permanentními magnety. Dále bude blíže rozebrán způsob první.

Výroba energie závisí na vytvoření a udržení statického magnetického pole rotoru. K tomu je potřeba napájet hlavní magnetizační cívku stejnosměrným napětím, které musí být na otáčející se rotor nějak přivedeno. Dá se to realizováno buď pomocí kartáčů na statoru a sběracích kroužků na rotoru, nebo bezkontaktně pomocí budící magnetizační cívky na statoru a budící armatury na rotoru. Lze se setkat s několika základními variantami konstrukce a zapojení synchronního generátoru, potažmo několika odlišnými způsoby regulace výstupního napětí.

V nejjednodušším případě se používá samobudící zapojení, jehož schéma je ukázáno na **Obr. 2.8**. Skládá se z obvodu na rotoru a na statoru. Na rotoru je navinuto magnetizační vinutí, k němu je připojena paralelně usměrňovací dioda a tlumič, zde



**Obrázek 2.8** : Buzení synchronního generátoru SS napětím – využití samobudícího obvodu rotoru (převzato a upraveno z [30])

rezistor. Obvod rotoru může být různě složitý, například zdvojený, s více diodami v sérii a různě koncipovanými tlumiči. Má ale vždy stejný účel a to vytvoření rotačního časově neproměnného magnetického pole protínající statorové vinutí. Na statoru je navinuto excitační vinutí, ke kterému je přímo připojen bipolární kondenzátor. Aby se výroba energie správně rozběhla, rotor musí vykazovat nenulový remanentní magnetismus, nebo musí obsahovat malý permanentní magnet.

Podle [28, 30] funguje zapojení takto. Jak se začíná rotor z klidového stavu roztáčet, indukuje se v excitačním vinutí (**condenser coil**) malé napětí, které nabíjí kondenzátor. Energie se následně rezonancí přelévá mezi kondenzátorem a excitačním vinutím (**smýčka a**). Díky tomu, se kolem něj vytvoří časově proměnlivé magnetické pole, které indukuje napětí do magnetizační cívky rotoru (**field coil**). Toto střídavé napětí je následně usměrňovací diodou upraveno na stejnosměrné. Protože je obvod uzavřený (**smýčka b**), prochází tedy magnetizační cívkou proud, což vyvolá indukci, kterou se posílí magnetické pole rotoru. Děj se periodicky opakuje, dokud nedojde k ustálení počtu otáček generátoru a k dosažení maximální intenzity magnetického pole rotoru. V tu chvíli je již na hlavním vinutí (**main coil**) ustálené střídavé napětí a k výstupním svorkám může být připojen spotřebič.

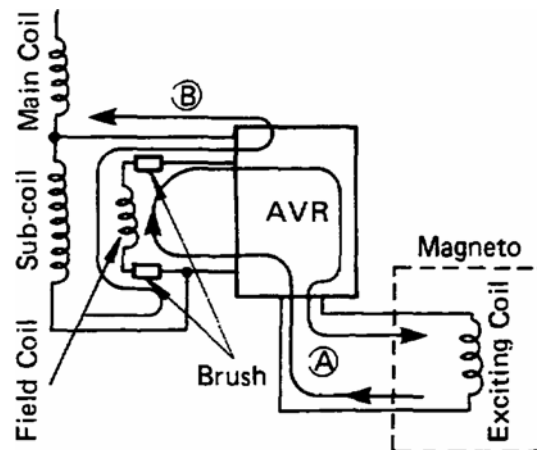
Regulace napětí pracuje následovně. Proud který teče do spotřebiče skrz hlavní vinutí (**smýčka c**), vyvolá magnetický indukční tok ve statoru, který zvýší proud tekoucí excitačním vinutím. Následkem toho se zvětší hustota magnetického toku a proud tekoucí do magnetizační cívky. Tím je posíleno pole rotoru a úbytek napětí ve hlavním vinutí se dorovná. Dojde-li k poklesu zatěžovacího proudu, nastane proces inverzní. Tomuto způsobu udržování velikosti napětí se říká **kapacitní regulace** a vyskytuje se ve velkém počtu dnes prodávaných agregátů. Zapojení ale také spoléhá na stabilní otáček spalovacího motoru, protože od těch je odvozena frekvence i maximální amplituda výstupního napětí.

Fyzicky může generátor v tomto případě vypadat jako na **Obr. 2.5 a)** bez budící armatury. Excitační, neboli kondenzátorová cívka by zde byla součástí vinutí statoru.

Dalším příkladem je buzení s pomocí „externího“ stejnosměrného napětí, jehož velikost je ovládána AVR regulační jednotkou. Je to pouzdro tvaru kruhové výseče s plošným spojem, vyplněné zalévací hmotou s lokalizací přímo v tělese generátoru.

Schéma takového řešení ukazuje **Obr. 2.9**.

Jak je vidět, počáteční energie pro excitaci rotoru je získána z „magneta“ (podrobněji kapitola 4.1.1), což je pouze jeden možný přístup. Excitační vinutí může být navinuto přímo na statoru generátoru. Tím se situace mírně zjednoduší a počáteční energie je pak získána opět díky malému permanentnímu magnetu zapouzdřenému uvnitř rotoru. Jednotka AVR snímá velikost generovaného napětí na pomocné cívce (**sub-coil**), která je buď částí hlavního vinutí (**main-coil**), nebo je navinuta samostatně. Pokud je hlavních vinutí více, většinou se snímá napětí na všech. Generátor v tomto případě může vypadat jako na **Obr. 2.5 b)**, bez kompaundního transformátoru.



**Obrázek 2.9** : Buzení synchronního generátoru SS napětím – využití AVR jednotky a generátoru s kartáči a sběracími kroužky (převzato a upraveno z [31])

Zapojení funguje následovně [28, 31].

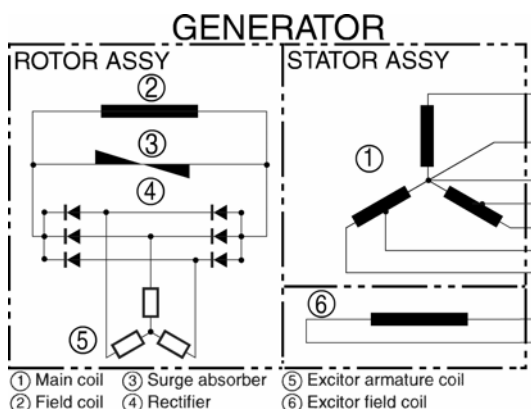
Jak se generátor začíná roztáčet, v excitačním vinutí se vytváří malé napětí, které je vedeno do AVR jednotky kde se usměrní. Vzniklé stejnosměrné napětí je pak vedeno přes kartáče a sběrací kroužky do hlavního magnetizačního vinutí na rotoru. Obvod je nyní uzavřen a začíná téci proud (**smyčka A**). Z rotoru se tím stává elektromagnet a protože se již otáčí, ve všech cívkách statorového vinutí se začíná generovat napětí. Napětí z pomocné cívky je usměrněno v AVR jednotce a využito k posilování proudu jenž teče přes magnetizační cívku (**smyčka B**). To zvýší intenzitu magnetického pole rotoru. Proces se opakuje a po nějaké době dojde na hlavní cívce k ustálení napětí na jmenovité hodnotě.

Regulace probíhá tímto způsobem. Poté co je připojena zátěž, začíná se zvyšovat výstupní proud. Spalovací motor se tím zatíží a výstupní napětí poklesne, protože rychlost otáček motoru se zmenší. Napětí poklesne na úkor vnitřního odporu hlavního vinutí, což jednotka AVR detekuje na snímací cívce a automaticky zvýší proud tekoucí do magnetizačního vinutí. Výsledkem je, že intenzita magnetického pole rotoru se zvětší a napětí na hlavním vinutí se dorovná, aby bylo možné na výstup dodat potřebný zatěžovací proud. Pokud napětí stoupne v důsledku odlehčení zátěže, AVR jednotka provede zásah opačný. Informační zdroj [31] uvádí, že tento proces se odehrává nespojitě a k regulaci je zde využito tyristoru. Pozůstatky tohoto děje lze pozorovat na průběhu **Obr. 2.3 b)**.

Druhý příklad buzení pomocí AVR je ukázán na **Obr. 2.10**. AVR jednotka zde není zobrazena, protože zapojení je obdobné. Jedná se o elegantní způsob jak se zbavit uhlíkových kartáčů, které se obušují a musejí být kvůli opotřebení vyměňovány. Generátor s tímto uspořádáním může vypadat přesně jako na **Obr. 2.5 a)**.

Magnetizační vinutí rotoru (2) je napájeno stejnosměrným napětím z budící armatury, která se skládá v tomto případě z třífázového excitačního vinutí (5), šestipulsního usměrňovače (4) a svodiče přepětí (3).

Třífázové budící vinutí mají většinou agregáty s výkonem nad 10kW. Jde zřejmě o nejsložitější zapojení obvodu rotoru s jakým se lze u běžných MPSM setkat.



**Obrázek 2.10 :** Buzení synchronního generátoru SS napětím – využití AVR jednotky a generátoru s budící armaturou (převzato a upraveno z [33])

ovládá výstupní napětí podle velikosti zatěžovacího proudu, což je lepší pro použití s induktivní zátěží. Když je totiž na výstup připojena induktivní zátěž s velkým požadovaným startovacím proudem, proudová změna je větší než napěťová a přesná regulace může být jinak obtížná.

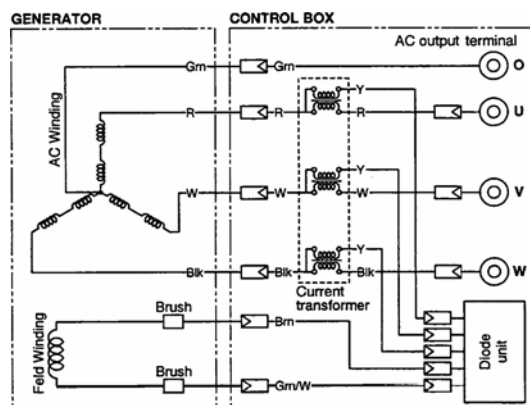
Podle [32] funguje zapojení takto. V rotoru je opět umístěn malý permanentní magnet. Když se začíná roztáčet, indukuje se napětí v hlavním vinutí. Poté co je připojena zátěž, začne protékat primárním vinutím transformátoru proud, což způsobí vznik toku magnetizačního proudu v sekundárním vinutí, v poměru k velikosti proudu skrz primární vinutí. Tento magnetizační proud prochází skrz diody v usměrňovací jednotce, dále přes kartáče a kroužky do magnetizačního vinutí rotoru, kde vytvoří velmi silné pole. Pokud se velikost zátěže zmenší, proud do rotoru se také zmenší a generované napětí zůstane konstantní. Tomuto způsobu regulace se říká **kompaundní**.

Jak již bylo naznačeno, zcela odlišná situace nastává u multipólových alternátorů s permanentními magnety, které nahrazují rotorové vinutí. V těchto případech mají na velikost a frekvenci výstupního napětí vliv pouze otáčky motoru a použitý měnič, který do buzení generátoru nemá možnost nijak zasahovat. Z výše uvedených to může být cyklokonvertor, inverter, nebo AC/DC měnič.

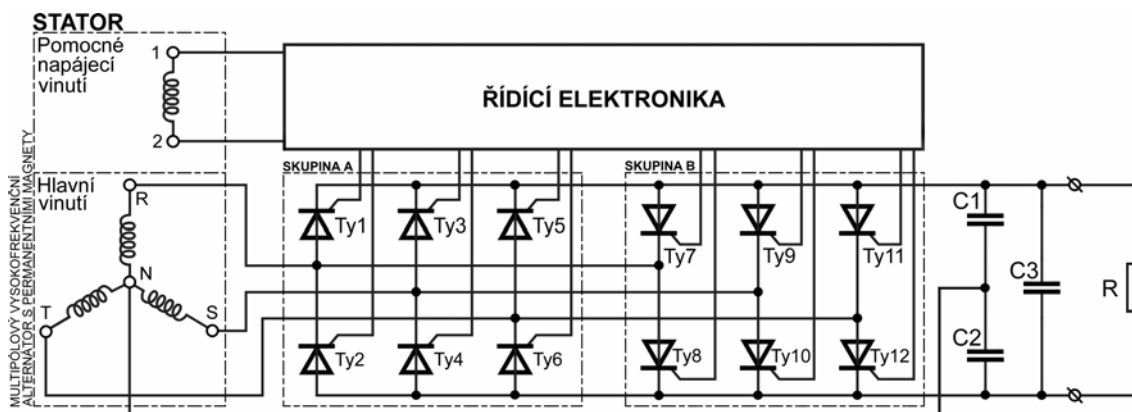
Základní varianta **cyklokonvertoru** je ukázána na **Obr. 2.12**. Každá fáze generátoru, má k dispozici dva můstky tyristorů pracující v antiparalelním zapojení. Můstky jsou rozděleny do dvou skupin, **A** a **B**. Jedna vytváří kladnou púlperiodu výstupního napětí a druhá zápornou. Úhel otevření tyristorů je řídicí elektronikou spojitě nastavován tak, aby se výsledné napětí co nejvíce přiblížilo harmonickému průběhu. Tento proces lze nejlépe pochopit na **Obr. 2.13**. Výsledné napětí se dále vhodným způsobem filtruje, aby bylo dosaženo co nejhladší křivky, jak bylo ukázáno na **Obr. 2.3 c**). Řídicí elektronika musí být napájena ze samostatného vinutí.

Na statoru je umístěno hlavní vinutí (1) které má opět odbočky pro měření napětí. Budící armatura rotoru je umístěna uprostřed excitačního magnetizačního vinutí (6), což je vidět na **Obr. 2.5 a**). Pomocí něj jednotka AVR řídí pole rotoru. Počáteční excitace může být provedena opět pomocí permanentního magnetu, nebo díky palubní baterii, která zajistí potřebnou energii. Princip funkce je stejný jako v předchozím případě.

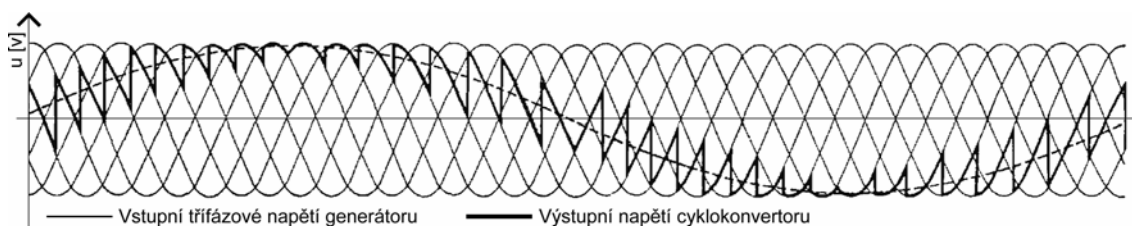
Příklad dalšího druhu regulace je uveden na **Obr. 2.11**. Na rozdíl od AVR, kde je řízení prováděno v závislosti na změně velikosti generovaného napětí, tento způsob



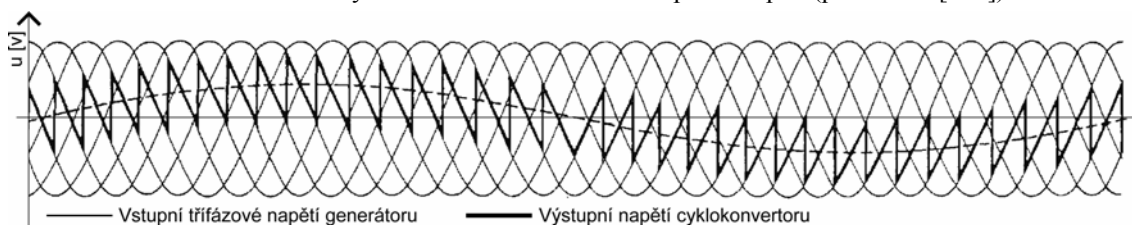
**Obrázek 2.11 :** Buzení synchronního generátoru SS napětím – využití proudového transformátoru (převzato a upraveno z [32])



Obrázek 2.12 : Příklad zapojení cyklokonvertoru



Obrázek 2.13 : Cyklokonvertor – 100% ze vstupního napětí (převzato z [152])

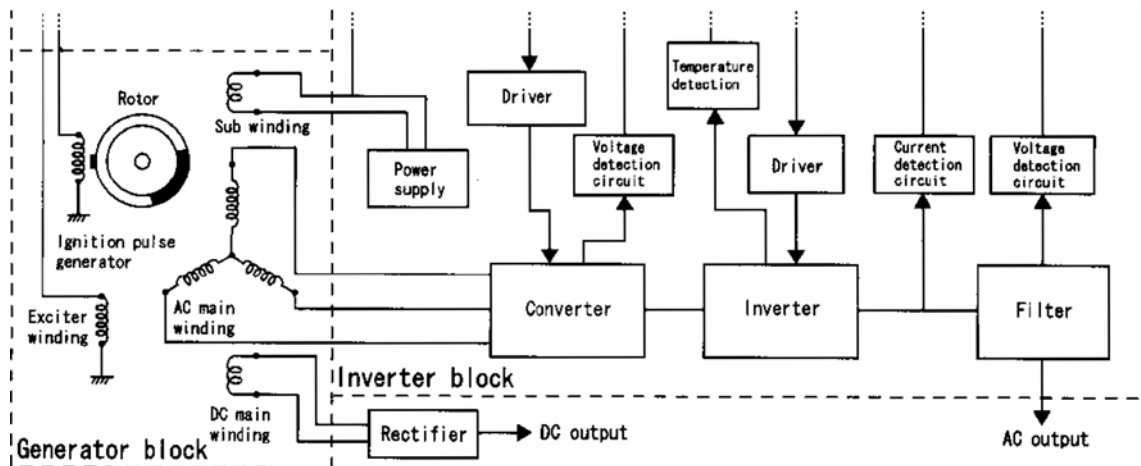


Obrázek 2.14 : Cyklokonvertor – 50% ze vstupního napětí (převzato z [152])

Je evidentní, že výstupní napětí může maximálně dosahovat amplitudy napětí vstupního a proto agregáty s tímto typem regulace musí mít zajištěno řízení na konstantní otáčky motoru, při kterých generátor poskytuje napětí vyšší. Na **Obr. 2.13** a **2.14** je ukázáno, jakým způsobem funguje regulace. Cílové amplitudy se dosahuje vhodným řízením úhlu otevření jednotlivých tyristorů. Stejným způsobem lze udržovat také frekvenci. Aby byla regulace dostatečně jemná a plynulá, frekvence vstupního třífázového napětí musí být mnohonásobně vyšší než požadovaná. Podle [28] může střádatvé napětí generátoru dosahovat frekvence až 500Hz. Velmi podrobně a přehledně se cyklokonvertorům věnuje monografie [152].

Další typ regulátoru uvedený v kapitole 2.1 je **inverter**. Pod tímto pojmem si lze představit klasický DC/AC měnič napětí, neboli střídač. Různých druhů střídačů je velké množství a není zde prostor se o všech zmínit. Podrobně se jim věnuje řada literatury, například [153]. Smysl má uvažovat o měničích bez použití NF transformátorů, vzhledem k požadavku nízké hmotnosti celého zařízení, přestože u starších agregátů to není vyloučeno. Moduly měničů používané v MPSM jsou podobně jako AVR jednotky vyplněny zalévací hmotou, takže zapojení většinou není možné detailně analyzovat. Obecné principy jsou přesto známé a blokové schéma inverteru z praxe je ukázáno na **Obr. 2.15**.

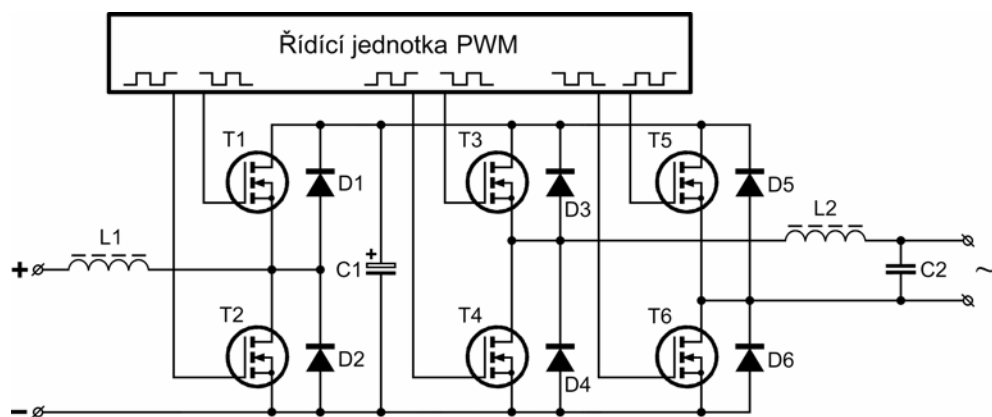
Podle [29] zapojení pracuje takto. Trojfázové napětí z hlavního vinutí generátoru je nejprve zpracováno pomocí řízeného usměrňovače (**Converter**), což je v podstatě AC/DC měnič. Tento blok je současně kombinován s vhodným typem DC/DC měniče, který upravuje velikost napětí v SMO v závislosti na mezních hodnotách usměrňovaného napětí, v porovnání s požadovanou amplitudou AC výstupu. Jedná se tedy o jakýsi první stupeň regulace.



Obrázek 2.15 : Princip inverteru (převzato a upraveno z [29])

Napětí je dále vedeno do bloku druhého stupně měniče (**Inverter**) což je spínaný zdroj, neboli střídač, který provede modulaci SS napětí ze SMO. Následuje blok výstupní filtrace (**Filter**), na kterém do značné míry závisí kvalita výstupního střídavého napětí. Dále je vidět, že celý proces výroby a zpracování energie je řídicí elektronikou snímán a kontrolován na všech úrovních.

Příklad zapojení jednoduchého inverteru se nachází na **Obr. 2.16**. První část až po kondenzátor C1 tvoří zvyšující spínaný zdroj. Předpokládá se tedy, že vstupní SS napětí je nízké. Tranzistory T1 a T2 jsou řízeny PWM signálem v protifázi. Dioda D2 je ochranná k tranzistoru T2, který je zde hlavním spínačem. Tranzistor T1 pomáhá vést proud rekuperační diodě D1, čímž zvyšuje účinnost. Tato první část zapojení pracuje takto. Je-li nejprve T2 otevřen, akumulární indukčnost L1 je tím pádem připojena přímo ke zdroji a shromažďuje energii do svého magnetického pole. Náboj uložený v kondenzátoru C1 je v tuto chvíli spotřebováván zátěží. Jakmile se T2 uzavře, dle Lenzova pravidla se objeví na L1 napětí opačné polarity, které je ovšem nyní v sérii s napájecím zdrojem. Obvod se uzavírá přes D1 a T1, který je v tuto chvíli již otevřen a nabíjí kondenzátor C1 na vyšší napětí než je napětí zdroje.



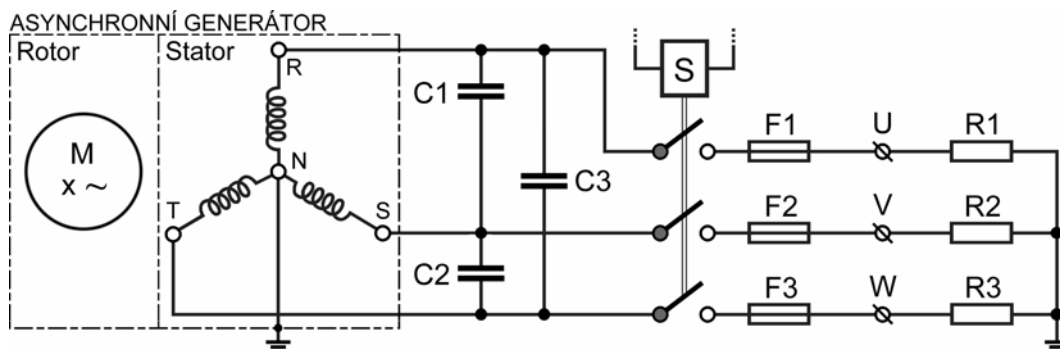
Obrázek 2.16 : Zjednodušené schéma zapojení inverteru

Druhá část zapojení se skládá z H můstku tvořeného čtyřmi spínacími tranzistory a ochrannými diodami D3 až D6. Současně jsou vždy otevírány T3, T6 a T4, T5. Polarita napětí objevujícího se před L2 je tedy periodicky komutována a tím na výstupu můstku vzniká obdélkový průběh s maximální amplitudou. Pomocí správného řízení tranzistorů je tímto způsobem vstupní SS napětí modulováno tak, aby jeho střední hodnota odpovídala sinusovému průběhu. Až teprve dobře navržený výstupní LC filtr, zde tvořený indukčností L2 a kondenzátorem C2 převede vzniklé velmi nepravidelné a pulzující napětí na hladký harmonický průběh.

Poslední typ regulace uvedený ve výčtu kapitoly 2.1, je AC/DC měnič. Ten se používá ve stejnosměrných agregátech. Jedná se v podstatě o část zapojení inverteru. Napětí z generátoru musí být každopádně nejprve usměrněno a následně, podobně jako v předchozím případě, zpracováno spínaným zdrojem – DC/DC měničem, který většinou bývá řízen mikrokontrolérem. Měnič může být schopen napětí pouze snížit, zvýšit, nebo provádět obojí, podle toho jak je navržen generátor, jaké poskytuje výstupní napětí a jak jsou řízeny otáčky motoru. Situace je zde o něco jednodušší, protože není nutné hlídat frekvenci výstupního napětí. Spínaných zdrojů schopných plnit tuto funkci je velké množství a není možné zde všechny uvádět. Tématu se věnuje mnoho autorů, například [154]. Obecně lze říci, že se využívá výhradně zapojení s akumulacími indukčnostmi. Někdy je přímo na výstup agregátu připojen vestavěný olověný akumulátor, který se trvale dobíjí. To sice zajistí mimořádnou tvrdost zdroje, ale znemožní nastavení jiné hodnoty výstupního napětí a výrazně zvýší hmotnost celého zařízení. Podrobněji se dále otázkou DC/DC měniče zabírá kapitola 6.2, při jeho návrhu.

V posledním bodě, zde bude naznačen způsob jakým jsou buzeny asynchronní generátory, které se v agregátech používají taktéž [27]. Aby mohl být provozován asynchronní stroj v ostrovním režimu bez přifázování k rozvodné síti, je potřeba splnit dvě podmínky. Zajistit, aby se rotor otáčel v nadsynchronních otáčkách, to jest aby točivé pole rotoru předbíhalo pole statoru. To se dá zařídit volbou vhodného počtu pólů rotoru, spalovacím motorem a regulací jeho otáček. Druhý požadavek je, aby byla zajištěna dodávka magnetizačního proudu do trojfázového vinutí statoru, který způsobí vytvoření točivého magnetického pole. Frekvence tohoto pole je závislá opět na rychlosti otáčení motoru a také na počtu pólových dvojic. Magnetizační proud je třeba dodat jako jalovou energii. To se provádí vhodným buzením, jak je ukázáno ve schématu na Obr. 2.17. Připojením kondenzátorů mezi fázemi je dosaženo toho, že jalová energie se během provozu bude přelévat tam a zpět z vinutí do kondenzátorů, čímž se napodobí podmínky připojení k rozvodné síti. U agregátů do 20kW se kapacita jednoho kondenzátoru pohybuje v řádu desítek uF.

Aby se zde výroba energie správně rozběhla, musí být kondenzátory nejprve nabity. To je zajištěno opět buď remanentním magnetizmem rotoru, nebo permanentním magnetem. Je také možné kondenzátory před spuštěním stroje nabít z externího zdroje stejnosměrného napětí, pokud systém obsahuje akumulátor. Agregáty s asynchronním alternátorem často obsahují složitější řídicí elektroniku, která hlídá provozní podmínky jako teplotu generátoru a připojuje zátěž až po úplném nabuzení generátoru. Regulace výstupního napětí je zde závislá buď na konstantních otáčkách motoru, nebo se používají složitější polovodičové regulátory.



Obrázek 2.17 : Ukázka možného způsobu buzení asynchronního alternátoru

## 2. Stanovení požadavků na prototyp agregátu

Rozhodlo se, že realizovaný agregát má být primárně určen k dobíjení olověných akumulátorů a tudíž musí obsahovat pouze výstup stejnosměrného napětí. Takových se na trhu vyskytuje mnohem méně [14-20], než těch s výstupem napětí střídavého. U kombinovaných agregátů výstup SS napětí obvykle neposkytuje větší proud než okolo 10A. Navíc jak lze dohledat v dokumentacích, nebývá určen pro trvalý provoz. Také napěťová tolerance bývá značná.

Obecně SS agregáty nacházejí uplatnění například v telekomunikacích, kde mohou dobíjet baterie zdrojů nepřerušovaného napájení BSS základnových stanic. Dále mohou napájet či dobíjet akumulátory objektů s rozvody malého SS napětí, jako jsou lodě, karavany, chaty. Lze s nimi oživovat dopravní prostředky a stroje v terénu. Dobíjet baterie v UPS měřících či monitorovacích stanic a podobně. Nové významné využití v dnešní době nachází v solárních systémech, které jsou někdy projektovány s tím, že v období s nedostatečným osvětlením se ekonomicky vyplatí, aby byly jejich akumulátory dobíjeny agregátem k pokrytí krátkodobých procentuelních rozdílů mezi spotřebou a vyráběnou energií.

Úspěšné řešení úlohy je podmíněno splněním těchto stanovených cílů:

- Dostupný trvalý výstupní výkon do 400W
- Přítomnost především stabilizovaného stejnosměrného napětí 13,8V
- Možnost v nějakém rozsahu ovlivnit velikost výstupního napětí
- Řízení celého stroje pomocí mikrokontroléru
- Zajistit automatickou regulaci výkonu spalovacího motoru
- Umožnění komfortního ovládání
- Možnost komunikace se zařízením i když motor není v chodu
- Vyhnout se v návrhu použití těžkého olověného akumulátoru
- Zajistit provozuschopnost systému i bez přítomnosti baterií
- Optimalizovat rozměry a hmotnost

Omezení výkonu horní hranicí 400W bylo zavedeno z důvodu zamezení přílišného přetěžování použitého spalovacího motoru, potažmo i generátoru. Opatrnost je zde na místě, protože nebylo předem známo, jak se pod zátěží budou obě spojené komponenty chovat. Navíc bylo potřeba uvážit neideální účinnost výkonového měniče a spotřebu veškeré ostatní přítomné elektroniky. Stěžejní části stroje byly přesto dimenzovány na výkon mnohem větší, z důvodů rezervy pro eventuelní pozdější navýšení, při použití jiného spalovacího motoru. Zvolená hodnota maximálního povoleného výstupního výkonu agregátu bude dále pro účely výpočtů značena:

$$P_{OUT/AGR/\max.} = 400W \quad (3.1)$$

Uvedené výstupní napětí bylo zvoleno proto, že nejběžněji používaný olověný akumulátor má svorkové napětí 12V. Jiných napětí se většinou dosáhne řazením 12V bloků. Napětí jednoho plně nabitého olověného článku je 2,3V [155]. Při počtu článků 6 v jedné baterii, je výsledná hodnota 13,8V. Toto napětí bude dále označeno jako nominální hodnota:

$$V_{OUT/AGR/DC/nom.} = 13,8V \quad (3.2)$$

Ale bylo by také vhodné zařídit, aby se hodnota výstupního napětí dala v nějakém rozsahu nastavit, protože řízení pomocí mikrokontroléru s navrženým způsobem regulace to bez nutnosti jakýchkoliv dodatečných úprav zapojení umožní.

Pouze se díky tomu při návrhu měniče mírně zvýší některé nároky na součástky a zkomplikuje vývoj firmwaru. Teoreticky by nastavení nižšího napětí na výstupu agregátu mohlo být užitečné v situaci při napájení odporové zátěže, například obvodu s osvětlením, čímž by se dosáhlo úspory paliva. Bude tedy zapotřebí stanovit také minimální a maximální velikost výstupního stabilizovaného stejnosměrného napětí:

$$V_{OUT/AGR/DC/min.} = 10,0V \quad (3.3)$$

$$V_{OUT/AGR/DC/max.} = 15,0V \quad (3.4)$$

Uvedený rozsah byl zvolen spíše empiricky, přičemž vyplynul z možností použitého generátoru a měniče, při zachování rozumných parametrů. Realizovaný výkonový DC/DC měnič sice může na výstupu nastavit v podstatě jakékoliv napětí od nuly až téměř do aktuální velikosti generovaného napětí v SMO, ale pokud by měla být při nižším výstupním napětí zároveň dodržena rovnost (3.1), kladly by se tím neúměrné požadavky na proudové dimenzování některých součástek i samotných spojů na DPS.

Dále bude stanovena cílová maximální velikost zvlnění výstupního stejnosměrného napětí agregátu pro celý nastavitelný rozsah:

$$\Delta V_{OUT/AGR/DC/max.} = 100mV \quad (3.5)$$

Na základě ustanovení (3.1) a (3.3) lze určit největší proud jenž poteče do zátěže:

$$I_{OUT/AGR/DC/max.} = \frac{P_{OUT/AGR/max.}}{V_{OUT/AGR/DC/min.}} = \frac{400}{10} = 40A \quad (3.6)$$

Minimální proud sice nebude cíleně nijak omezen, ale zvolené zvlnění není možné z technických důvodů, které budou později vysvětleny, zaručit v celém rozsahu od 0 až do  $I_{OUT/AGR/DC/max.}$ . Je nutné stanovit minimální hodnota proudu do zátěže, při které bude ještě platnost ustanovení (3.5) zaručena:

$$I_{OUT/AGR/DC/min.} = 3,5A \quad (3.7)$$

Hodnota byla zvolena na základě zachování rozumných požadavků na použité součástky, z hlediska množství, velikosti a ceny, což bude osvětleno při návrhu měniče.

Díky tomu, že celé zařízení bude řízeno mikrokontrolérem, nabízí se možnost zabudovat některé základní ochranné a kontrolní funkce. Také bude možné zajistit plynulé řízení výkonu spalovacího motoru, což zaručí přísun jen takového množství energie, kolik je při dané velikosti připojené zátěže zapotřebí.

U většiny dnes komerčně nabízených agregátů, zprostředkovává komunikaci s uživatelem buď sada LED diod, nebo v nejlepším případě jednořádkový alfanumerický monochromatický TN displej s několika tlačítky. Tato minimalistická řešení jsou sice levná, ale pro uživatele nepřívětivá a zdaleka neumožňují rozvinout možnosti při řízení mikropočítačem. Zde tedy existuje určitý prostor k inovaci. Proto bylo rozhodnuto, využít k ovládání stroje barevný grafický LCD displej s dotekovým panelem, což sice výrazně zkomplikuje celý návrh ale umožní to komfortní interakci s uživatelem a poskytne dostatek prostoru pro případné budoucí vylepšení.

Dále bylo usouzeno, že mít možnost nastavovat a kontrolovat stav systému i v době kdy není spalovací motor v chodu je vlastnost nanejvýš užitečná. To vyústilo v potřebu přítomnosti vestavěného bateriového napájení. Ovšem vhodné bude vyhnout se použití olověného akumulátoru, který je objemný a má značnou hmotnost. Zároveň bude přínosné pokusit se zajistit, aby celková funkčnost agregátu nutně na přítomnosti bateriového napájení nezávisela, protože to by se mohlo ukázat jako nepraktické.



### 3. Mechanická část realizovaného agregátu

Před zahájením experimentů s výrobou elektrické energie, bude nejprve potřeba vyřešit otázku mechanického uspořádání celého stroje. Bez toho by nebylo možné zařízení řádně otestovat na vyšší výkon. Protože zde figurují nemalé torzní a odstředivé síly, nekryté točivé části a hořlavé palivo, bylo tomuto úkolu věnováno značné úsilí, aby se předešlo vzniku škody, či způsobení úrazu.

Všechny kovové konstrukční díly jenž budou níže postupně popsány, vyjma podkladové desky, která není nezbytnou součástí, jsou vyrobeny z duralu, nebo hliníku, pro zachování nízké hmotnosti a dobrého chladícího účinku. Konstrukční materiál byl koupen u firem Feron Praha a.s. [40] a Alucad Bohemia s.r.o. [41]. Spojovací materiál byl pořízen u firmy Fabory Czech s.r.o. [42]. Na všechny spoje se použily pouze vysokopevnostní kalené, případně nerezové šrouby. Výkresy konstrukčních částí byly vyhotoveny v programu Eagle.

#### 3.1 Spalovací motor

Jedna z nejdůležitějších komponent agregátu je spalovací motor. Protože se jedná o poměrně nákladnou položku, jeho výběr se musel podřídit tomu co již bylo k dispozici.

##### 3.1.1 Popis a parametry použitého motoru

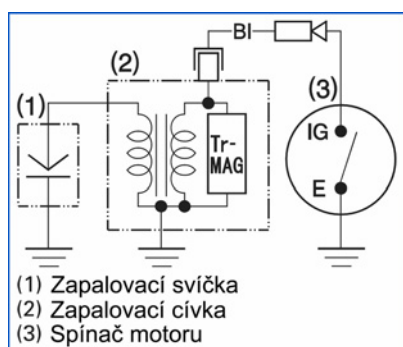
Použitý motor má typové označení HONDA GX25 a je to nejmenší z řady motorů které firma Honda v současnosti nabízí. Jeho vizuální podobu ukazuje **Obr. 4.1**. Jedná se o čtyřdobý jednoválcový vzduchem chlazený benzínový motor s ventilovým rozvodem typu OHC a odděleným nuceným mazacím systémem olejovou mlhou. Tento model se sice primárně používá v různých strojích jako čerpadlech, stavební, zahradní technice a podobně, ale při dodržení stanovených parametrů, bude pro zamýšlený účel také vyhovovat. Výrobce deklaruje [36], že je to nejlehčí čtyřtaktní motor na světě. Na svou kategorii má velmi nízkou spotřebu paliva i oleje a nízké emise. Bezvložkový válec motoru je vyroben z hliníkové slitiny s vysokým obsahem křemíku a píst má vysoce tvrdou povrchovou úpravu. Jako palivo slouží standardní bezolovnatý benzín Natural 95. Olej je doporučen SAE 10W-30 a dle návodu [37] by se měl měnit po každých deseti hodinách provozu. Zapalovací systém je zde tranzistorový s využitím magnetu.



**Obrázek 4.1** : Motor Honda GX25 – Vnější pohled (převzato a upraveno z [35])

K ovládání motoru jsou určeny tyto manipulační prvky: rukojeť startéru, páčka plynu – řídí množství paliva dávkovaného do válce, páčka sytiče – nastavuje bohatost směsi a je užitečná při studeném startu, ruční palivové čerpadlo – je potřeba použít před startem po delší době uskladnění, spínač motoru – zkratuje primární vinutí zapalovací cívky čímž dochází k okamžitému zastavení stroje. Další důležité části pro obsluhu jsou: plnicí otvor motorového oleje, plnicí otvor paliva, tlumič výfuku a vzduchový filtr. Uživatel by měl v předepsaných provozních a skladovacích intervalech kontrolovat a čistit některé součásti jako je vzduchový filtr, zapalovací svíčka, výfukový filtr, lapač jisker, a další. Harmonogram údržby je součástí návodu k použití [37]. Podrobnější parametry motoru udávané výrobcem jsou uvedeny v **Tab. 4.1**.

U spalovacích motorů je většinou k zajištění plynulého chodu nezbytná přítomnost setrvačníku. Zde tento úkol plní ventilátor chlazení, který je přišroubován na konec



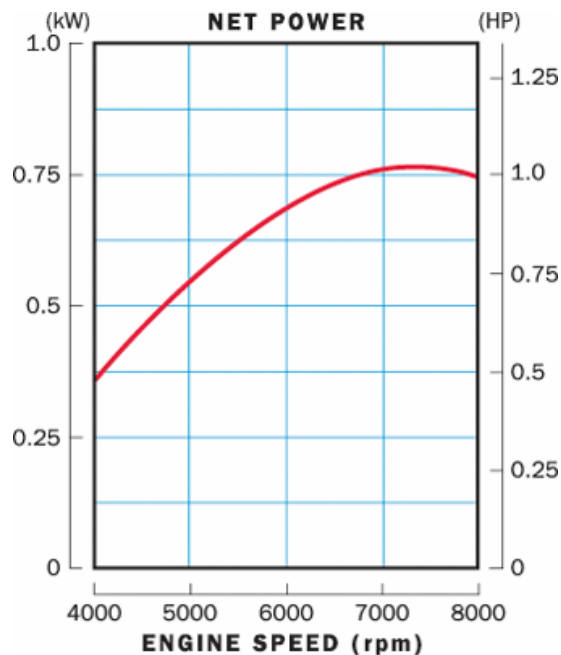
**Obrázek 4.2 :** Motor Honda GX25 – Schéma obvodu zapalování (převzato a upraveno z [37])

klikové hřídele, kde zároveň slouží jako výstup hnací síly. Mimo to se podílí na výrobě elektrické energie pro tranzistorový zapalovací systém. Na svém obvodu má totiž zalisovány dva velmi silné permanentní magnety, přičemž magnetický obvod zapalovací cívky je umístěn v těsné blízkosti jeho povrchu. V okamžiku průchodu magnetu při otáčení ventilátoru se v zapalovací cínce indukuje vysoké napětí, jenž je vedeno přímo na zapalovací svíčku. Takové řešení je obecně nazýváno „magneto“. Energetická soběstačnost zapalovacího systému je velmi výhodná, protože jinak musí být bateriové, což je méně praktické. Schéma zapalovacího obvodu je znázorněno na **Obr. 4.2**.

Z výkonové charakteristiky na **Obr. 4.3** je patrné, že největší výkon, přibližně 750 Watt, bude motor odevzdávat při otáčkách okolo 7000 rpm. Aby nebyl příliš přetěžován, je v plánu ho provozovat při výkonu přibližně o třetinu nižším.

Výrobce: Honda			
Model: GX25-ST3			
Parametr	Hodnota	Jednotka	Podmínky
Vrtání x Zdvih	35 x 26	mm	
Zdvihový objem	25	cm <sup>3</sup>	
Kompresní poměr	8,0 : 1	–	
Maximální výkon	0,72	kW	7 000 rpm
Maximální kroutící moment	1,0	Nm	5 000 rpm
Objem palivové nádrže	0,58	l	
Spotřeba paliva	0,54	l / h	7 000 rpm
Objem oleje	0,08	l	
Rozměry: Délka / Šířka / Výška	192/221/230	mm	
Suchá hmotnost	2,78	kg	

**Tabulka 4.1 :** Motor Honda GX25 – Základní parametry udávané výrobcem (převzato z [36])



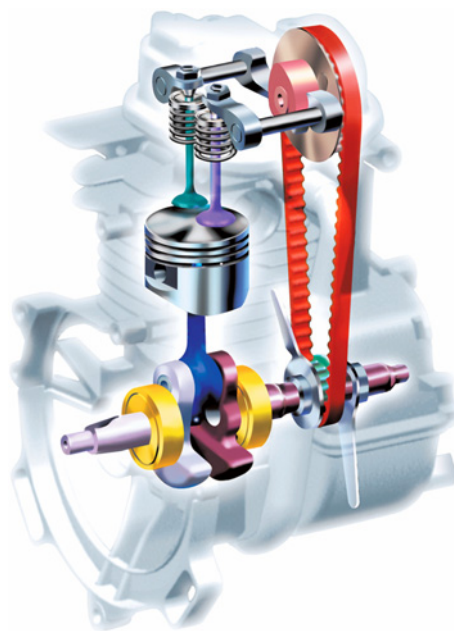
**Obrázek 4.3 :** Motor Honda GX25 – Výkonová charakteristika (převzato a upraveno z [36])

### 3.1.2 Princip funkce spalovacího motoru

Princip funkce čtyřdobého spalovacího motoru je obecně znám. Hlavní části jsou zvýrazněny na **Obr. 4.4**. Sací (fialová) a výfukový (tmavě zelená) ventil jsou ovládnány rozvodovým řemenem (červená). Ojnice (modrá) přenáší hnací sílu z pístu na klikovou hřídel (vínová), nesenou dvěma ložisky (žlutá).

Pracovní cyklus se skládá ze čtyř dějů:

1. Sání – Píst se pohybuje směrem dolů, sací ventil je otevřen a napouští palivo do spalovací komory. Výfukový ventil je uzavřen.
2. Komprese – Oba ventily jsou uzavřeny. Píst se pohybuje směrem nahoru, díky hybnosti soustrojí je palivo stlačeno a zapalovací svíčka ho jiskrou zažehne.
3. Expanze – Ventily jsou stále uzavřeny. Rozpínající se zplodiny zatlačí na píst, který se pohybuje opět směrem dolů a při tom koná práci.
4. Výfuk – Píst se z dolní polohy pohybuje opět nahoru, výfukový ventil dovolí spalinám uniknout. Tím je cyklus uzavřen a takto se opakuje.



**Obrázek 4.4 :** Motor Honda GX25 – Vnitřní konstrukční uspořádání (převzato z [36])

### 3.1.3 Postup uvedení do provozu a ukončení provozu

Postup pro nastartování motoru:

1. Pokud byl motor delší dobu mimo provoz, musí se několikrát zmáčknout váček ručního palivového čerpadla aby se dostal benzín hadičkou do karburátoru.
2. Zapnout spínač motoru, tedy rozpojit zkratovaný obvod jak je patrné z schématu na **Obr. 4.2**.
3. Posunout páčku plynu do minimální polohy, pokud v ní už není.
4. Při startování za studena je potřeba zavřít páčkou sytiče, jinak se motor vůbec nenastartuje, nebo po chvíli zhasne.
5. Zatáhnout švihem za startér, motor obvykle naskočí na první, maximálně třetí pokus.
6. Jak se motor po nastartování rozehřívá, sytič se musí pozvolna otevírat, pokud byl dříve uzavřen.

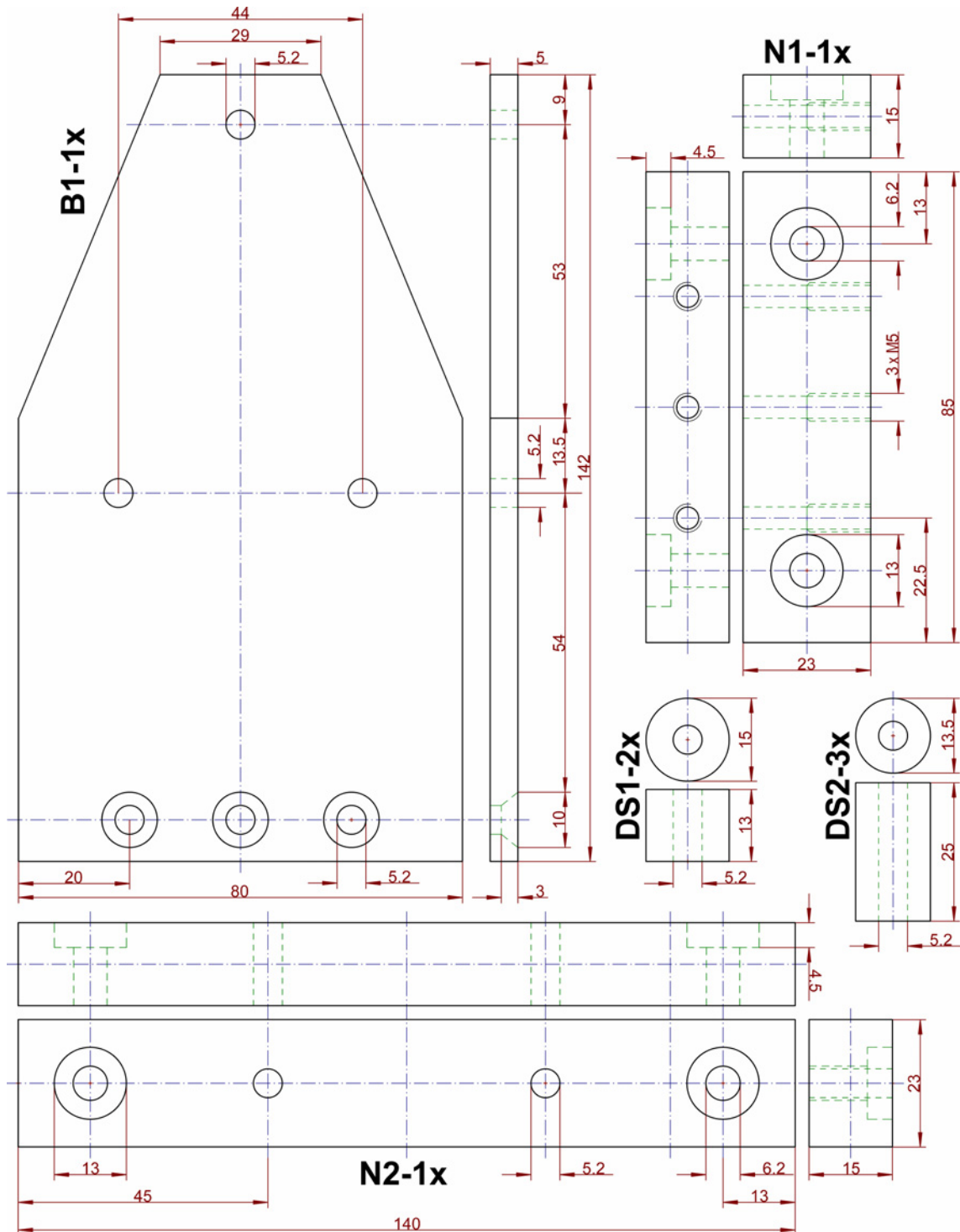
Postup pro ukončení činnosti motoru:

1. Posunout páčku plynu do minimální polohy. Při nouzovém zastavení lze tento krok přeskočit.
2. Vypnout spínač motoru, tedy zkratovat vinutí zapalovací cívky.

### 3.1.4 Upevnění motoru

Aby bylo možné začít s motorem nějak pracovat, musel se nejprve nalézt způsob jak ho upevnit ke stabilní a pevné podložce. Za tímto účelem byly vyrobeny dva nosníky. Nosník pod ventilátorem chlazení (**N1**) je k motoru uchycen dvěma šrouby M5, za pomoci dvou distančních sloupků (**DS1**). K tomu účelu jsou na spodní polovině bloku motoru, jenž je odlita z jednoho kusu hliníku, připraveny dvě pouzdra s vnitřním závitem. K uchycení druhého nosníku byla vyrobena bočnice (**B1**), která je skrz tři distanční sloupky (**DS2**) k bloku motoru připevněna přes kryt ručního startéru, za pomoci tří šroubů M4. Délka všech použitých šroubů byla na míru upravena.

Vyhotovení dílů bylo provedeno s velkou přesností. Výška bočnice **B1** a umístění děr pro její přišroubování k nosníku **N1** musela přesně korespondovat s výškou distančních sloupků **DS1** na nosníku **N2**. Cílem bylo, aby při položení motoru na rovnou plochu byl stabilně usazen ve vodováze. Tím se vyloučilo riziko, že po jeho upevnění k podložce nastane nežádoucí pnutí, které by při vibracích v provozu mohlo způsobit lom závitových pouzder v bloku motoru. Výkresy všech pro tento účel vyrobených dílců jsou znázorněny na **Obr. 4.5**. Distanční sloupky byly na míru vysoustruženy.



Obrázek 4.5 : Výkresy konstrukčních částí vyrobených k upevnění spalovacího motoru



## 3.2 Ovládání škrtkící klapky karburátoru

Od počátku bylo zřejmé, že motor nemusí trvale pracovat na plné otáčky, ale bude je možné snižovat podle toho, jak velká zátěž je aktuálně na výstup připojena. Aby se dalo přesně řídit jeho výkon, musel se nalézt způsob, jakým lze ovládat škrtkící klapku karburátoru. K tomu je nutné použít vhodný elektronický akční člen.

### 3.2.1 Možné způsoby provedení

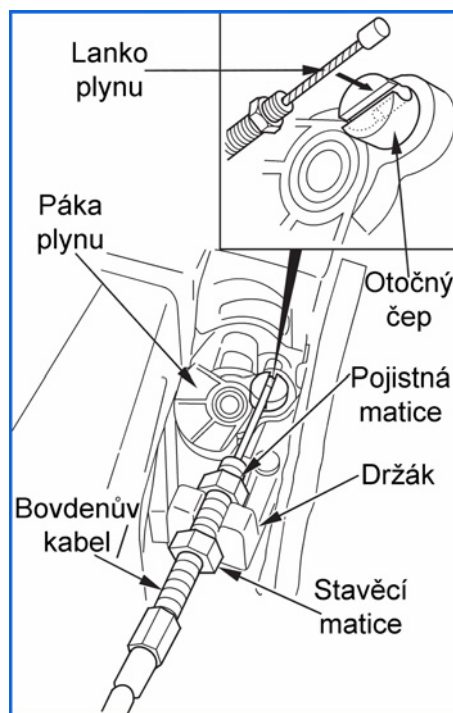
Jak již bylo zmíněno, komerčně dostupné agregáty mají regulaci otáček řešenu tak, že přímo součástí karburátoru je elektromotor. Zde je situace odlišná, protože plynová klapka použitého motoru je uzpůsobena k ovládní pomocí bovdeny, jak je ukázáno na **Obr. 4.6**. Bovden slouží k přenosu tažné síly na větší vzdálenost. Skládá se z ocelového lanka a obalu, který má tři vrstvy. Nejprve je plastová trubička, která má zajistit nízké tření při pohybu lanka uvnitř. Následuje ohebná ocelová spirála potažená svrchní ochrannou bužirkou. Bovden musí být z obou stran zakončen pevnou koncovkou, aby nedocházelo k pohybu obalu.

Důležitá skutečnost je, že páka plynu má v sobě zabudovanou pružinu. Ta působí proti síle ovladače a snaží se trvale nastavit volnoběžné otáčky. Zvažovala se možnost pružinu odstranit a umožnit tím snadnější polohování. Po prostudování konstrukčních plánů motoru [38] bylo zjištěno, že pružina je nerozebíratelně zanýtována mezi gumový vlnovec a horní plastový díl karburátoru. Navíc modeláři tento postup nedoporučují, kvůli možnému chvění plynu vlivem vibrací při vyšších otáčkách motoru. Také z bezpečnostních důvodů, pro případ selhání ovládací elektroniky se to zdá být nevhodné.

První navržené řešení bylo vyrobit vhodný nástavec a instalovat ovládací elektromotor přímo na držák, který je na **Obr. 4.6** označen. K propojení s otočným čepem by se poté mohlo použít pevné táhlo. Od toho se záhy ustoupilo, protože držák je z plastu a nemusel by vydržet váhu a provoz takového mechanismu. V blízkosti se navíc nachází kryt vzduchového filtru, který by bylo potřeba výrazně upravit, což se jevílo jako zbytečně invazivní zásah. Rozhodlo se tedy, že použít bude klasický způsob s využitím bovdenového lanka, přičemž elektromotor k jeho ovládní bude umístěn samostatně, mimo těleso motoru a pružina v karburátoru bude současně zajišťovat zpětné napnutí lanka při jeho uvolnění v kterékoliv poloze plynu.

Dále vyvstala otázka, jakým způsobem dosáhnout tažného pohybu lanka bovdeny. Při výběru vhodného ovládacího prvku se přímo nabízelo využití nějakého motoru s lineárním posuvem. Po prozkoumání této možnosti bylo zjištěno, že jsou dostupné lineární pohony buď příliš poddimenzované a bez dostatečné spolehlivosti, nebo naopak velmi robustní, určené pro průmysl, jejichž pořízení se jevílo značně nákladné.

Prozkoumána byla dále možnost takový pohon postavit s použitím vřetenové tyče, SS motoru, optického inkrementálního snímače, a dalších drobných mechanických dílů, které je v dnešní době možné na internetu zakoupit. Od toho bylo nakonec ustoupeno také, protože celá záležitost by se tím výrazně zkomplikovala.



**Obrázek 4.6** : Motor Honda GX25 – Ukázka připevnění lanka plynu (převzato a upraveno z [37])

Následně se zvažovala možnost použití servomotoru s točivým výstupem, který by byl vhodným způsobem převeden na lineární tažný pohyb. To se nakonec ukázalo jako správná cesta. Bylo potřeba rozhodnout, jaký servomotor k tomuto účelu využít. V úvahu připadaly různé průmyslové krokové motory, kterých je v nabídkách prodejců velké množství. Ovšem nejvhodnější se jevil běžný modelářský servomotor, který lze pořídit za rozumnou cenu a existuje v mnoha provedeních. Výhoda je, že má v sobě i převodovku a také je možné k němu v případě potřeby bez problému dokoupit náhradní díly. Lze ho navíc poměrně snadným způsobem ovládat, jak bude později popsáno.

### 3.2.2 Výběr servomotoru a jeho parametry

Před výběrem konkrétního modelu bylo nutné rozmyslet několik věcí. Za prvé potřebnou sílu k překonání protitahu pružiny a tření ocelového lanka uvnitř bovdeny. Potřebný tah byl změřen pomocí vlasce a cejchovaných závaží. Naměřená hodnota je **1.21 kg**. Servomotor bude tedy muset mít tah větší, nejlépe však několikrát kvůli rezervě a aby nepracoval na hranici svých možností. Dalším otázkou je reakční rychlost. Ta by měla být obecně co největší, ovšem není potřeba význam tohoto parametru nějak nadhodnocovat, protože s páčkou plynu stejně nelze pohybovat příliš prudce, aby se nepoškodila. Rychlosti posuvu o 60° se u těchto servomotorů pohybují v řádu desítek až stovek milisekund. Tedy i pomalý model zde bude zcela vyhovovat.

Poslední důležitý faktor je volba napájecího napětí. To lze vybírat z rozsahu přibližně od 3,3 do 15V. Vzhledem k plánované koncepci napájecího zdroje, byla zvolena nejběžnější hodnota a to 5V. Ostatní parametry jako hmotnost či velikost serva zde nehrají takovou roli.

Po prostudování nabídky na trhu bylo zjištěno, že možné je volit mezi digitálními a analogovými servomotory. Digitální jsou přesnější a rychlejší a obvykle také umožňují naprogramovat parametry jako výchozí a mezní polohy, rychlost posuvu a jiné. Bohužel jsou také výrazně dražší. Byla by to sice dobrá volba, ale vzhledem k tomu, že stroj bude řízen mikrokontrolérem, je možné libovolné chování naprogramovat i s použitím serva analogového. Vybraný model je **Hitec HS-625MG** a jeho provedení ukazuje **Obr. 4.7**. Parametry výrobce jsou uvedeny v **Tab. 4.2**. Tento model patří mezi kvalitnější, má kompletně kovové převody, silný motor, dvojité kuličkové ložisko a velký tah. Mělo by tedy být schopno plnit požadovaný úkol.



**Obrázek 4.7 :** Servomotor Hitec HS-625MG (převzato a upraveno z [47])

Motor Type:	3 Pole
Bearing Type:	Dual Ball Bearing
Speed (4.8V/6.0V):	0.18 / 0.15 sec @ 60 deg.
Torque oz./in. (4.8V/6.0V):	76 / 94
Torque kg./cm. (4.8V/6.0V):	5.5 x 6.8
Size in Inches:	1.59 x 0.77 x 1.48
Size in Millimeters:	40.39 x 19.56 x 37.59
Weight ounces:	1.94
Weight grams:	55.00

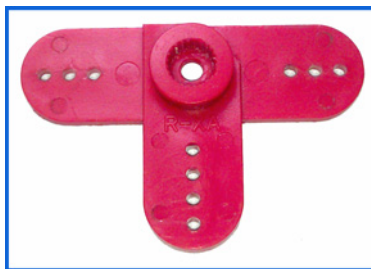
**Tabulka 4.2 :** Servomotor Hitec HS-625MG – Parametry výrobce (převzato z [47])

### 3.2.3 Ovládání lanka bovdenou servomotorem

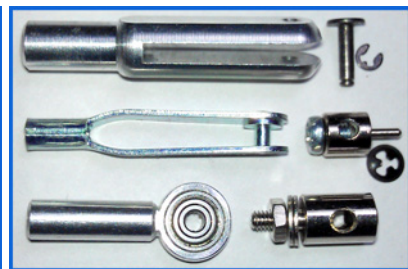
Dále vyvstala otázka, jak lanko plynu polohovat tak, aby byl za koncovkou bovdenou zajištěn jeho přímý plynulý pohyb, při kterém by po stranách nedocházelo k prodrání vnitřní kluzné bužírky. Nejprve byla zvažována možnost použití malé kladky, která je ukázaná na **Obr. 4.8**. Na ni by se lanko plynu namotávalo rovnoběžně s koncovkou bovdenového kabelu. Toto řešení by sice funkční bylo, ale zdálo se poněkud neohrabané. Průměr kladky by nesměl být moc malý, protože možnost ohybu ocelového lanka je omezena. Naopak pokud by byl moc velký vzhledem k tomu, že potřebná tažná ovládací délka je pouze přibližně **1 cm** a minimální krok polohy je omezen, snížila by se tím rozlišovací schopnost nastavení polohy. Hledaly se tedy jiné alternativy a nakonec bylo použito k tomuto účelu mírně přizpůsobené rameno na **Obr. 4.9**, ke kterému se dále muselo vhodným způsobem připevnit ocelové lanko plynu.



**Obrázek 4.8** : Kladka serva (převzata a upraveno z [51])



**Obrázek 4.9** : Rameno servomotoru

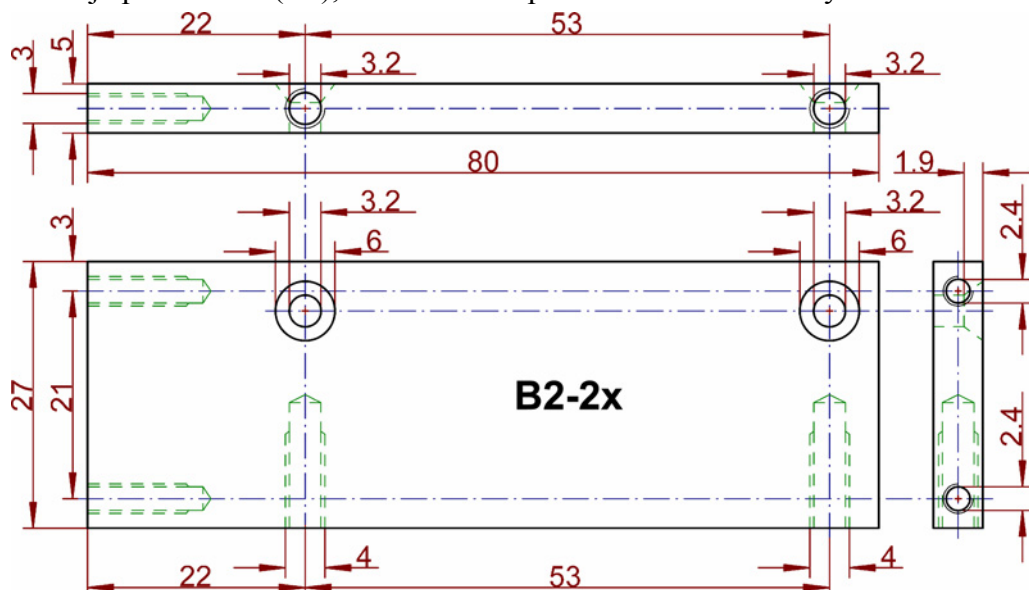


**Obrázek 4.10** : Možné způsoby připevnění lanka plynu k ramenu

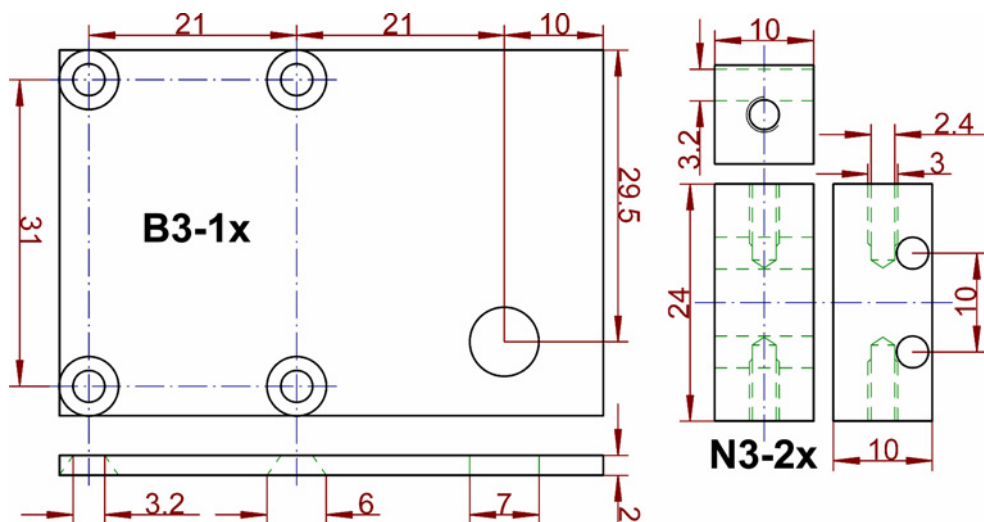
Z variant na **Obr. 4.10**, zakoupených u firmy MP-JET s.r.o. [49], se nejvíce osvědčila duralová vidlice se závlačkovým nýtem v horní části obrázku. Uchycení bylo provedeno v blízkosti osy otáčení, takže je zachována dostatečná jemnost nastavení kroku polohy. Díky pohyblivému spoji zůstává lanko téměř rovnoběžně s bovdenovým kabelem, takže k poškozování jeho vnitřní kluzné bužírky nedochází.

### 3.2.4 Upevnění servomotoru

Servomotor bylo potřeba dobře upevnit k podložce a v blízkosti páky zakončit bovdenový kabel. K tomuto účelu byly z hliníku vyrobeny dva malé nosníky (**N3**), ke kterým je servo přišroubováno čtyřmi šrouby M3. Nosníky jsou vsazeny mezi dvě bočnice (**B2**), které jsou ze spodní strany přichyceny k podložce čtyřmi šrouby M4. Poslední díl je přední čelo (**B3**), které slouží k přišroubování koncovky bovdeny.

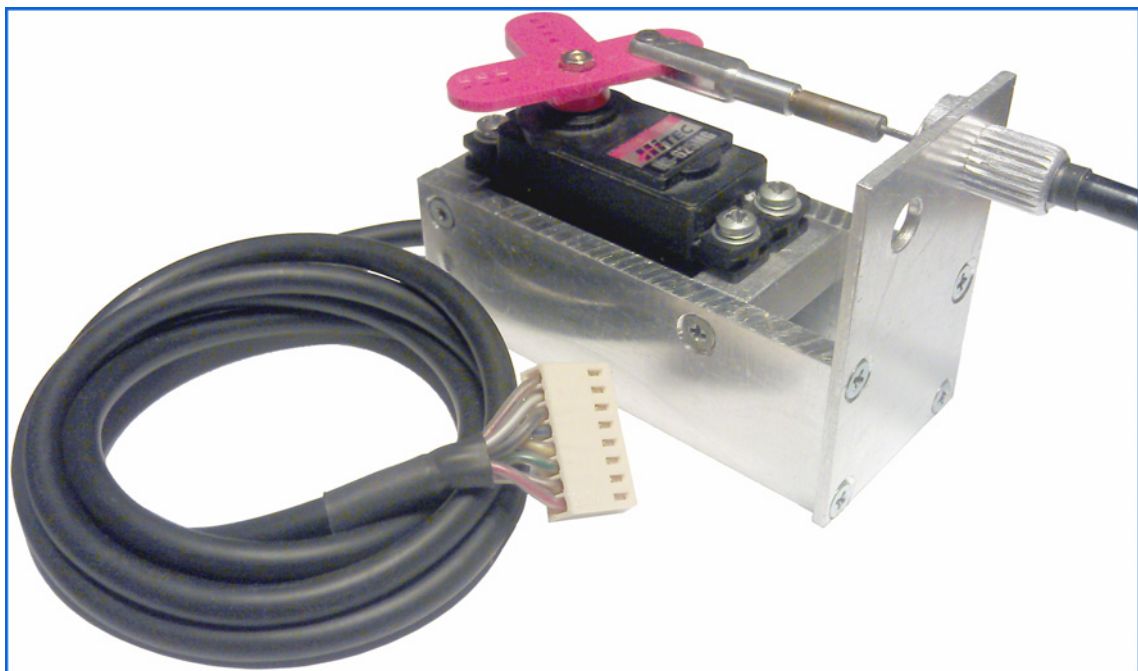


**Obrázek 4.11** : Výkresy konstrukčních částí vyrobených k upevnění servomotoru – část A



Obrázek 4.12 : Výkresy konstrukčních částí vyrobených k upevnění servomotoru – část B

Výkresy vyrobených dílců si lze prohlédnout na **Obr. 4.11** a **Obr. 4.12**. Celkové provedení ukazuje **Obr. 4.13**. Jak je vidět, servo má místo standardního třívodičového kabelu osmivodičový, což bude objasněno později. Konec ocelového lanka plynu byl s pomocí kyseliny solné napájen do mosazné koncovky se závitem M3, která je zašroubována do závitového pouzdra vidlice.



Obrázek 4.13 : Celkový pohled na mechanismus ovládání plynu spalovacího motoru

### 3.3 Generátor

K převedení točivého momentu hnací hřídele spalovacího motoru na elektrickou energii bude použit vícepólový synchronní generátor buzený permanentními magnety. Jak bylo spolu s principem funkce nastíněno v kapitole 2.3, jedná se pravděpodobně o nejlepší možné řešení.

#### 3.3.1 Výběr generátoru a jeho parametry

Na výběr bylo ze dvou generátorů, v zásadě obou pro daný účel použitelných. Jedná se o modelářské motory od výrobce **Aeolian**, typ **C6374-KV170** a **C6354-KV250**, které jsou primárně určeny k pohonu vrtule velkých leteckých modelů.



Zde tedy budou provozovány v režimu generátorickém. Muselo se rozhodnout, který pro zamýšlený účel vyhovuje více.

Buzení u obou obstarává 14 permanentních neodymových magnetů přilepených na rotačním plášti, který je připevněn pomocí masivních kuličkových ložisek z jedné strany ke statoru a z druhé strany přímo k hřídeli. Toto uspořádání se dá jinak dohledat také pod označením „outrunner“.

Stator má dvanáct vyniklých pólů a obsahuje souměrné trojfázové vinutí, zapojené do trojúhelníku. Větší počet párů magnetů rotoru než párů pólů statoru umožňuje

Výrobce: Aeolian			
Model:		C6374 - KV170	C6354 - KV250
Parametr	Jednotka	Hodnota	
Rychlost rotace	rpm / V	170	250
Kontinuální proud	A	100	90
Maximální proud	A	110	100
Proud bez	A	1,4	1,5
Napětí	V DC	14,8 – 37	14,8 – 37
Výkon	W	2940	2450
Odpor vinutí	mΩ	56	59
Maximální	%	98	98
Průměr hřídele	mm	10	10
Váha	g	909	616
Rozměry: Ø x	mm	63 x 74	63 x 54

**Tabulka 4.3** : Parametry generátorů udávané výrobcem (převzato z [46])

údajů v **Tab. 4.3**. Důležitý parametr je zde rychlost rotace v prvním řádku. Je to počet otáček na jeden volt napájecího napětí v motorovém režimu, který bývá stručně označován jako KV poměr:

$$KV = \frac{n_{GEN}}{V_{LL}} \quad (4.3.1)$$

kde:  $n_{GEN}$  ... jsou otáčky generátoru ( $\text{min}^{-1}$ )

$V_{LL}$  ... je maximální, nebo efektivní hodnota sdruženého napětí generátoru ( $V$ )

Protože výrobce bohužel nikde neuvádí, jestli udává KV poměr pro maximální či efektivní hodnotu sdruženého napětí, měřením na osciloskopu bylo ověřeno, že parametr koresponduje s hodnotou efektivní. Použitelnost generátorů byla posuzována především tak, aby na výstupu výkonového měniče agregátu mohlo být dosaženo základního požadovaného stejnosměrné napětí, dle (3.2). Nominální volnoběžné otáčky spalovacího motoru podle výrobce jsou [37]:

$$n_{GEN/teor./nom.} = 3100 \pm 200 \text{rpm} \quad (4.3.2)$$

Přičemž ani při zatížení v provozu by neměly trvale klesnout pod tuto hodnotu, protože magneto pak neposkytuje dostatek energie pro zapalování a motor se zastaví. Z toho lze určit jakou efektivní hodnotu napětí budou oba generátory teoreticky poskytovat při těchto otáčkách:

$$V_{C6374/LL/RMS/teor./nom.} = \frac{n_{GEN/teor./nom.}}{KV_{C6374}} = \frac{3100}{170} \cong 18,24V \quad (4.3.3)$$

$$V_{C6354/LL/RMS/teor./nom.} = \frac{n_{GEN/teor./nom.}}{KV_{C6354}} = \frac{3100}{250} = 12,40V \quad (4.3.4)$$

Při respektování tolerance 200 otáček se napětí zmenší až na:

$$V_{C6374/LL/RMS/teor./min.} = 17,06V \quad (4.3.5)$$

$$V_{C6354/LL/RMS/teor./min.} = 11,60V \quad (4.3.6)$$

Pro korektní výběr generátoru bude směrodatné, jaká je velikost napětí až v SMO, tedy za usměrňovačem. V kapitole 6.1 bude vysvětleno, že po usměrnění napětí stoupne přibližně 1,35 krát. S přihlédnutím k tomu jsou výsledné minimální teoretické hodnoty vyráběného SS napětí obou generátorů:

$$V_{SMO/C6374/teor./min.} = 1,35 \cdot V_{C6374/LL/RMS/teor./min.} = 1,35 \cdot 17,06 \cong 23,03V \quad (4.3.7)$$

$$V_{SMO/C6354/teor./min.} = 1,35 \cdot V_{C6354/LL/RMS/teor./min.} = 1,35 \cdot 11,60 = 15,66V \quad (4.3.8)$$

Ovšem konečné posouzení bude potřeba provést na základě konkrétních měření. Rozhodující jsou minimální provozní otáčky spalovacího motoru v praxi. Pomocí osciloskopu je lze určovat přímo měřením sdruženého napětí generátoru, protože jeho frekvence musí spolehlivě korespondovat s počtem otáček ve vztahu k počtu magnetů instalovaných na rotoru. Kmitočet výstupního napětí synchronního generátoru se spočte ze vztahu [156]:

$$f_{GEN} = \frac{n_{GEN} \cdot p_{GEN}}{60} \quad (4.3.9)$$

kde:  $f_{GEN}$  ... je frekvence sdruženého napětí generátoru (Hz)

$p_{GEN}$  ... je počet dvojic permanentních magnetů na rotoru, přičemž zde je:

$$p_{GEN} = 7 \quad (-)$$

Při volnoběhu spalovacího motoru bylo změřeno, že frekvence sdruženého napětí generátoru je přibližně:

$$f_{GEN/LL/meas./AV/nom.} \approx 358Hz \quad (4.3.10)$$

Z toho lze spočítat skutečné otáčky motoru při volnoběhu:

$$n_{GEN/meas./AV/min.} = \frac{f_{GEN/LL/meas./AV/nom.} \cdot 60}{p} = \frac{358}{7} \cdot 60 \cong 3069 \text{ min}^{-1} \quad (4.3.11)$$

Od nominální hodnoty (4.3.2) je zde tedy mírná odchylka, což není příliš překvapivé, protože volnoběžné otáčky závisí na řadě faktorech, jako zahřátí celého bloku motoru, potažmo teplotě oleje, palivu, odporu hnaného ústrojí bez zatížení, odporu vzduchu ventilátoru a dalších. Volnoběžné otáčky lze případně seřadit kalibračním šroubem, který je vyznačen na Obr. 4.6. Také bylo pozorováno, že s tím jak se motor postupně zahřívá, volnoběžné otáčky se samy plynule mírně zvyšují, což poněkud komplikuje měření. Zdá se, že jde o vlastnost motoru, která pravděpodobně další potíže při návrhu nebude způsobovat.

Po přihlédnutí k naměřeným volnoběžným otáčkám, by mělo teoreticky výsledné vyráběné SS napětí obou generátorů být:

$$V_{SMO/C6374/teor./nom.} = 1,35 \cdot \frac{n_{GEN/meas./AV/min.}}{KV_{C6374}} = 1,35 \cdot \frac{3069}{170} \cong 24,37V \quad (4.3.12)$$

$$V_{SMO/C6354/teor./nom.} = 1,35 \cdot \frac{n_{GEN/meas./AV/min.}}{KV_{C6354}} = 1,35 \cdot \frac{3069}{250} \cong 16,57V \quad (4.3.13)$$

Reálně byly při volnoběhu motoru bez zatížení naměřeny střední hodnoty zvlněného SS napětí:

$$V_{SMO/C6374/AV/meas./nom.} \approx 22,80V \quad (4.3.14)$$

$$V_{SMO/C6354/AV/meas./nom.} \approx 15,16V \quad (4.3.15)$$

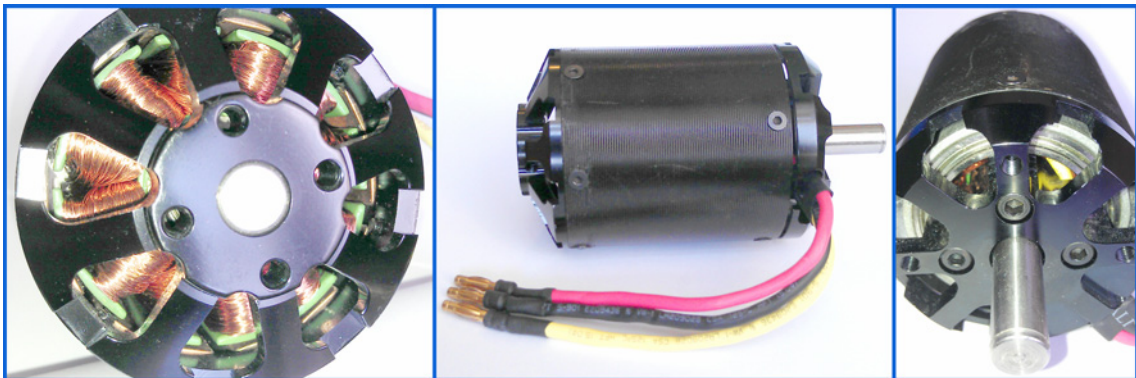
Rozdíly od teoretických hodnot jsou dány úbytky napětí na diodách usměrňovače.

Nyní je teprve možné regulérně rozhodnout, který generátor bude vhodné použít. Testování ukázalo, že pokud má navržený měnič s daným způsobem stabilizace, jenž bude později popsán, udržet na výstupu základní požadované napětí 13,8V i po připojení skokové zátěže během volnoběžných otáček, musí mít na svém vstupu rozhodně větší rezervu než přibližně 1,4V, kterou je schopen poskytnout generátor C6354-KV250. Je to proto, že po připojení zátěže ihned otáčky klesají a změnu výkonu spalovacího motoru není možné provádět skokově. Tato operace se skládá v přiblížení z řetězce událostí s nenulovým zpožděním. Pokud není k dispozici dostatečná napěťová rezerva, výsledkem je krátkodobý pokles pod požadovanou nastavenou hodnotu. Generátor C6374-KV170 se tedy v tomto ohledu jeví jako volba optimální, protože napěťová rezerva je zde mnohem větší, což také otevírá možnost povolit nastavení výstupního napětí vyššího, dle (3.4). S přihlédnutím k uvedeným faktům, byla v provozu při skokovém zatížení snaha naměřit také nejmenší hodnotu napětí v SMO:

$$V_{SMO/C6374/AV/meas./min.} \approx 17,50V \quad (4.3.16)$$

Což platí pouze za předpokladu, že je již motor dostatečně zahřátý.

V prototypu byl nejprve použit generátor C6354-KV250, kvůli jeho změření a současně pro prvotní testování elektroniky. Fotografie generátoru C6374-KV170, který byl namontován později a je osazen v hotovém výrobku, lze spatřit na Obr. 4.14.



Obrázek 4.14 : Motor/Generátor Aeolian C6374-KV170

Pro spolehlivý návrh elektroniky a dimenzování součástek, bude také potřeba znát nejvyšší možné napětí po usměrnění, které je buď i krátkodobě schopen zvolený generátor vyrobit. To přímo závisí na maximálních možných otáčkách spalovacího motoru. Nejvyšší plánované pracovní otáčky jsou okolo 6000 rpm. Pro případy kdy je motor normálně zatěžován je sice platná křivka na Obr. 4.3, ale během experimentování bylo pozorováno, že po odpojení velké zátěže mohou otáčky krátkodobě stoupnout skoro až na 11000 rpm. To je způsobeno především hybností celého ústrojí v reakci na náhlý běh bez zatížení a částečně reakčním časem regulátoru plynu. V průběhu této chvíle s délkou odhadem nejvýše okolo jedné sekundy, může generátor vyrobit napětí značné amplitudy.

Nejvyšší frekvence sdruženého napětí byla za provozu naměřena přibližně:

$$f_{GEN/LL/AV/meas./max.} \approx 1,258kHz \quad (4.3.17)$$

Z toho lze spočítat maximální otáčky motoru:

$$n_{GEN/AV/meas./max.} = \frac{f_{GEN/LL/AV/meas./max.}}{p} \cdot 60 = \frac{1258}{7} \cdot 60 \cong 10783 \text{ min}^{-1} \quad (4.3.18)$$

Teoretická maximální velikost SS napětí, jenž může generátor vyrobit pak bude:

$$V_{SMO/C6374/AV/teor./max.} = \frac{n_{GEN/AV/meas./max.}}{KV_{C6374}} \cdot 1,35 = \frac{10783}{170} \cdot 1,35 \cong 85,66V \quad (4.3.19)$$

Ve skutečnosti bylo naměřeno napětí opět o něco menší, konkrétně:

$$V_{SMO/C6374/AV/meas./nom.} \approx 78,40V \quad (4.3.20)$$

Rozdíl oproti teoretické hodnotě je nyní mnohem větší, což je zapříčiněno větším úbytkem napětí na diodách při větším závěrném napětí a zřejmě i méně přesným měřením frekvence, potažmo otáček. Za relevantní bude v tomto případě považována vypočtená hodnota, protože je větší. Po jejím zaokrouhlení lze prohlásit, že generované usměrněné napětí by za normálních okolností v žádném případě nemělo překročit:

$$V_{SMO/AV/max.} = 90V \quad (4.3.21)$$

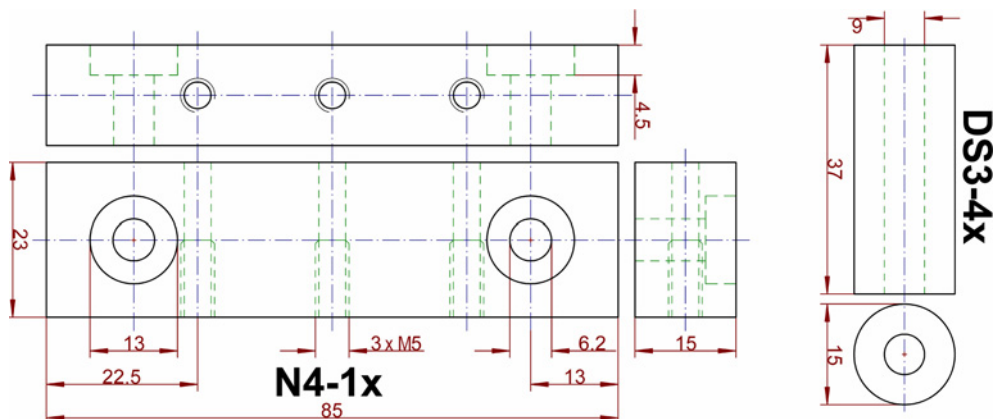
S touto hodnotou bude dále počítáno při návrhu veškeré elektroniky jako s nejvyšší jaká se může během bezporuchového provozu ve SS meziobvodu vyskytnout. Naopak nejmenší napětí v SMO, je již určeno měřením z rovnosti (4.3.16) a bude pro další výpočty zaokrouhleno na hodnotu:

$$V_{SMO/AV/min.} = 17V \cong V_{SMO/C6374/AV/meas./min.} \quad (4.3.22)$$

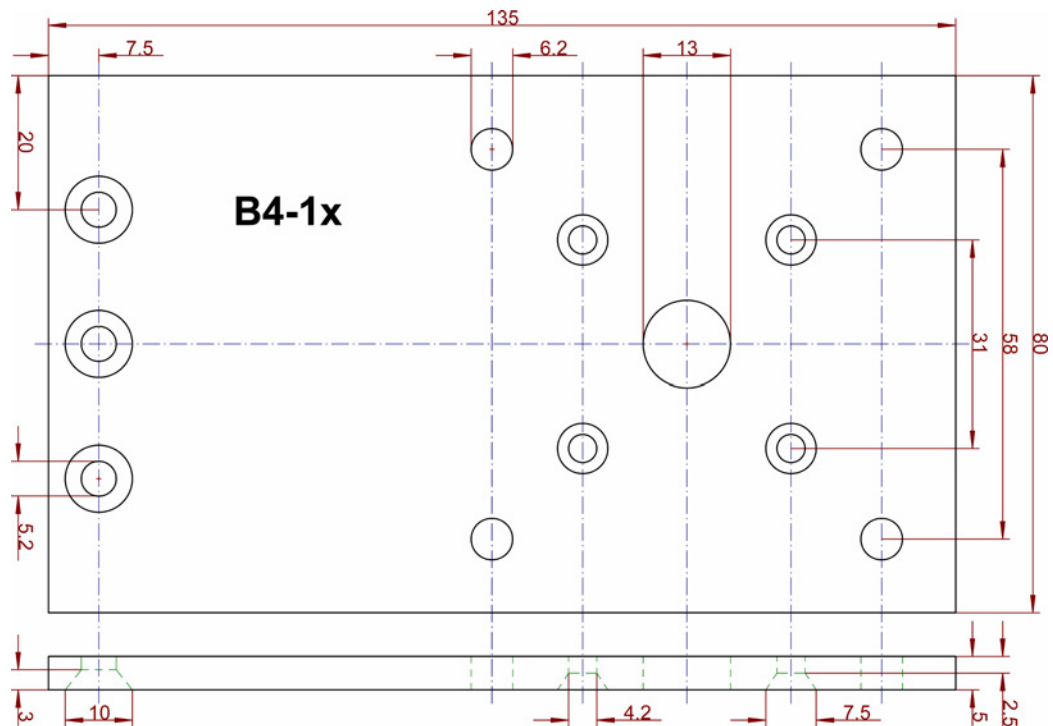
Vývody jednotlivých fází generátoru byly původně opatřeny modelářskými konektory typu banánek 4 x 14mm, které jsou ještě patrné na **Obr. 4.14**. Protože k tomuto konektoru bohužel neexistuje portikus vhodný k montáži přímo do plošného spoje, což bylo požadováno, proběhla jejich výměna za masivní zlacené modelářské konektory MG 5,5mm od firmy [49]. Podle výrobce jsou použitelné až do proudu 300A DC.

### 3.3.2 Upevnění generátoru

Generátor bylo potřeba jednak řádně upevnit k podložce a za druhé také přímo ke spalovacímu motoru. Úloha to nebyla snadná, protože hnací hřídelí motoru musí být přesně v ose s hřídelí generátoru. Proto musely být rozměry všech dílů a velikosti všech otvorů vrtány s velkou pečlivostí. K uchycení má generátor na své čelní straně připraveny 4 závitové díry pro šrouby M4. Z hliníkového plátu síly 5mm byla vyrobena bočnice (**B4**), do které byl vyvrtán otvor pro hřídel a čtyři otvory pro šrouby k uchycení generátoru. K tomu byly použity vysoce pevnostní nerezové šrouby se zápusnou hlavou, aby nepřekážely spojovacímu segmentu, jenž bude dále popsán. Tato bočnice je upevněna přímo k motoru pomocí čtyř distančních sloupků (**DS3**), které byly na zakázku vyrobeny soustružníkem. Ve spodní části je k bočnici přišroubován nosník (**N4**), za který je celý tento segment s generátorem dále přišroubován k podložce. Výkresy jednotlivých částí jsou ukázány na **Obr. 4.15** a **Obr. 4.16**. Jak vypadá toto řešení celkově si lze prohlédnout až na **Obr. 4.26**.



Obrázek 4.15 : Výkresy konstrukčních částí vyrobených k upevnění generátoru – část A



Obrázek 4.16 : Výkresy konstrukčních částí vyrobených k upevnění generátoru – část B

### 3.4 Napojení generátoru na hnací hřídel motoru

Doposud největší obtíže činilo spolehlivé napojení hřídele generátoru na výstup hnací síly motoru. K tomuto úkolu bylo potřeba se opakovaně vracet, protože prvotně navržené způsoby se neosvědčily. Problém spočíval v několika věcech. Za prvé výstup hnací síly motoru není veden přímo z klikové hřídele, ale z ventilátoru chlazení, v podobě dvou závitových pouzder symetricky umístěných v ose s hřídelí, jak je z blízka ukázáno na **Obr. 4.17**.



Obrázek 4.17 : Motor Honda GX25 – Výstup hnací síly

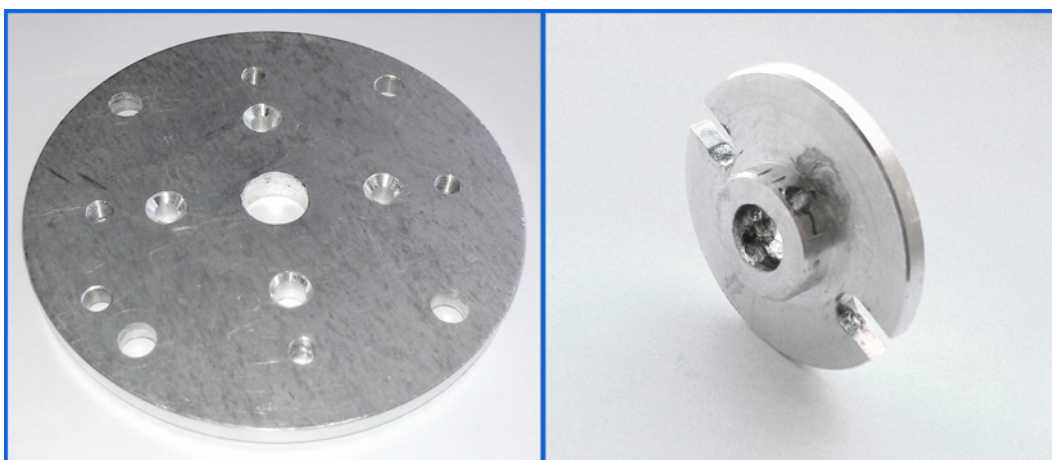
Čepy do těchto pouzder našroubované, jsou pozůstatkem z prvního pokusu o napojení a později byly opět odstraněny. V tomto kruhovém prostoru jinak bývá uložena odstředivá spojka, kterou lze spatřit na **Obr. 4.1** vpravo. Ta má běžně za úkol připojit hnané ústrojí až teprve po dosažení vyšších otáček motoru, což je sice pro použití v některých strojích užitečné, ale zde to žádoucí není a proto byla odebrána.



Místo ní zde byl později umístěn spojovací nástavec. Za druhé, v bližším pohledu není energie odevzdávaná klikovou hřídelí v čase rozložena spojitě, ale dochází k rázům točivého momentu, s tím jak se pohyb pístu při výbuchu ve válci periodicky prudce zrychluje. Tyto rázy způsobují postupné zničení jakéhokoliv nedokonalého mechanického spoje, navíc rozhodně neprospívají ložiskům v generátoru. Za třetí, při větším zatížení je zde přenášen značný výkon, takže spojení musí být velmi kvalitní, aby nedošlo únavou materiálu k poškození. Poslední aspekt je, že celé spojení musí být provedeno naprosto v ose a vyvážené, protože jinak by mohlo hlavně při vyšších otáčkách dojít k vylomení pouzder či jiné vážné mechanické závadě vlivem odstředivé síly a v důsledku toho vzniklých vibrací.

### 3.4.1 Možné způsoby řešení napojení

Bylo vyrobeno několik nástavců a spojovacích dílů, které využívali různé pojistné šrouby a závlačky. Jedno z těchto řešení je vidět na **Obr. 4.18**.



**Obrázek 4.18** : První pokus o mechanické napojení hřídele generátoru na hnací výstup motoru

Dílec na obrázku vlevo, byl přišroubován přímo k motoru a generátor byl na něj připevněn ze strany druhé. Středem procházela hřídel a na ni byl pomocí pojistného šroubu, později závlačky, upevněn nástavec, který je na obrázku vpravo. Do postranních vykrojených drážek zasahovaly čepy patrné na **Obr. 4.17**, které tímto způsobem otáčely hřídelí generátoru. Bohužel často docházelo k selhání z příčin výše vysvětlených. Začalo být jasné, že zde bude zapotřebí zcela odlišné, robustní a precizní řešení.

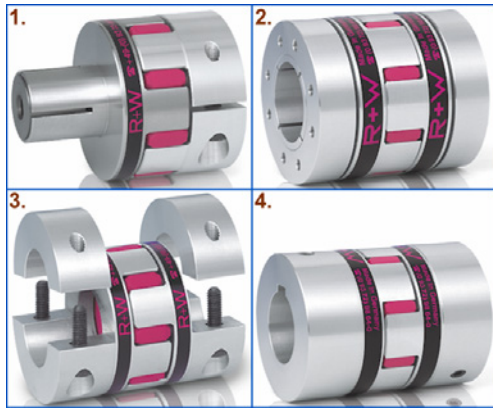
Nápad byl použit takzvanou pružnou spojku, která je určena jednak k přenosu krouticího momentu, utlumení rázů a také k vyrovnání menší úhlové odchylky mezi oběma osami. Jeví se tedy jako ideální řešení i když poněkud finančně nákladné. K tomu bylo ovšem také potřeba navrhnout a vyrobit další spojovací nástavec, pomocí kterého by se pružná spojka připevnila k ventilátoru chlazení.

### 3.4.2 Pružná spojka

Pružných spojek existuje mnoho různých druhů. Většinou jsou v provedení pro spojení hřídel – hřídel, což zde není použitelné. Po prostudování nabídky na trhu byla nalezena spojka, která má na jedné straně svěrné upínací pouzdro pro hřídel a na druhé straně kolík s rozpěrným kuželovým nábojem, který by se dal zapustit přímo do zamýšleného spojovacího nástavce.

Na **Obr. 4.19** si lze prohlédnout některé nejběžnější varianty dostupných pružných spojek. Zde použitý typ je označen číslem **1**, a konkrétně se jedná o model **EK7 série 10** [44], od německého výrobce R+W [43]. Po kontaktování několika prodejců byla spojka nakonec zakoupena u firmy [45].

Pružná spojka se skládá ze tří částí. Ocelového rozpěrného kuželového pouzdra, elastomerového kroužku a duralového svěrného prstence. Její celkové vlastnosti do značné míry závisí na použitém elastomerovém tlumícím kroužku, který je umístěn uprostřed obou kovových částí. Těch existuje vícero druhů (A až E [44]) a jsou odlišeny barevně, přičemž rozdíl je hlavně v jejich tuhosti a povolené pracovní teplotě. Kvůli



**Obrázek 4.19** : Pružné spojky firmy R+W (převzato a upraveno z [43])

- 1.: EK7 – s rozpěrným kuželem
- 2.: EK6 – s kuželovým upínacím kroužkem
- 3.: EKH – s děleným upínacím pouzdrém
- 4.: EK1 – s drážkou pro hřídel

možnosti experimentování byly nakoupeny 3 druhy. Nejprve byl osazen kroužek typu C (žlutý), protože poskytoval největší tlumící účinek. Později byl nahrazen kroužkem typu A (červený), kvůli vysoké teplotě vyskytující se v blízkosti bloku motoru.

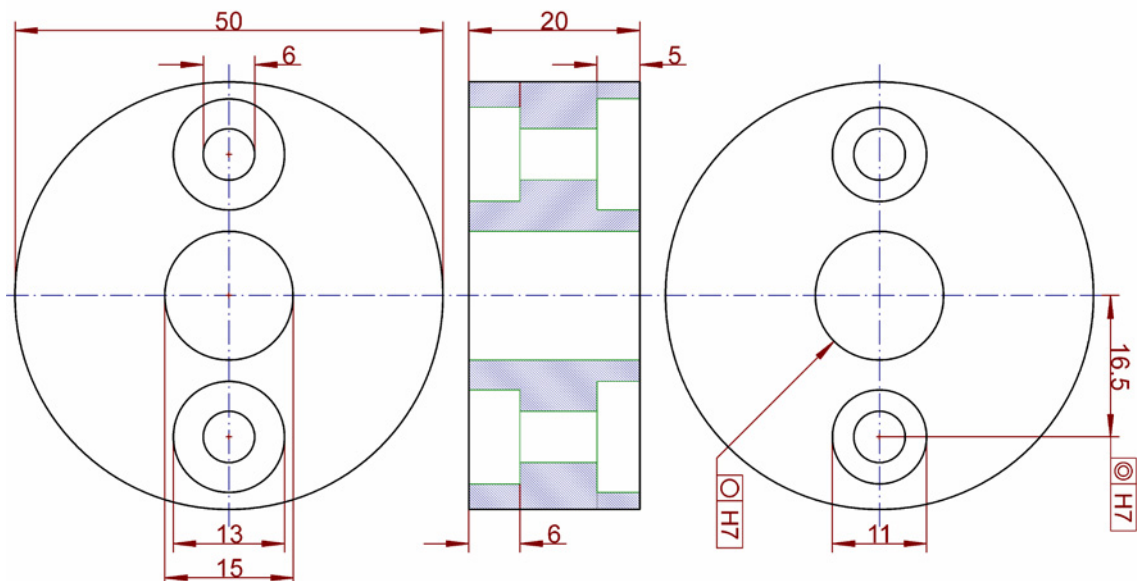
Při výběru pružné spojky byly zohledněny především dva parametry. Za prvé maximální povolený trvalý kroučící moment, který je podle [44] při použití kroužku A roven **12,5 Nm**. Podle [37] je spalovací motor schopen vyvinout maximální kroučící moment pouze **1 Nm**, takže zde je značná rezerva. Druhý důležitý parametr, je maximální povolená rychlost rotace, která je u této spojky **20 000 rpm**, přičemž otáčky motoru nikdy trvale nepřesáhnou **12 000 rpm**. V tomto případě je tedy mezní limit také

splněn. Spojka byla navíc dodavatelem, jako volitelný požadavek objednávky, vyvážena pro možnost použití při otáčkách vyšších než 4 000 rpm.

Výsledná schopnost spojky vyrovnat nesouososti je podle tabulek v katalogovém listu: 0,1mm laterální, 1mm úhlová, ±1mm axiální. Vzhledem k tomu, že všechny ostatní participující mechanické díly byly vyrobeny s velkou precizností, zdají se být tyto povolené tolerance dostačující.

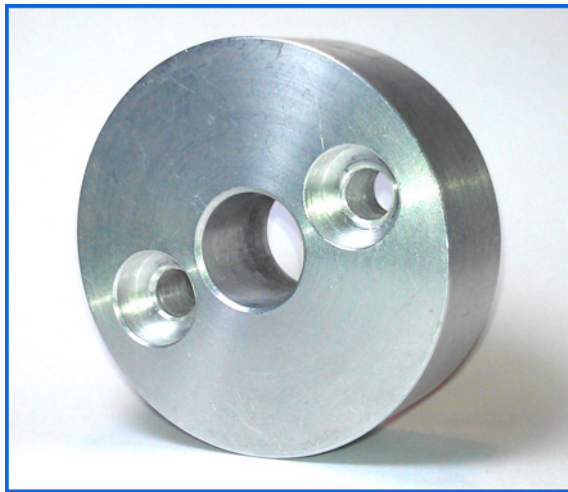
### 3.4.3 Návrh a výroba spojovacího nástavce

Spojovací nástavec řeší napojení pružné spojky na výstup hnací síly spalovacího motoru. Svou hmotností a rozměry má nahradit odstředivou spojku patrnou na obrázku **Obr. 4.1** vpravo. Výkres nástavce si lze prohlédnout na **Obr. 4.20**.



**Obrázek 4.20** : Spojovací nástavec – Výkres pro výrobu

Výrobek byl zhotoven zakázkově na soustruhu z masivní duralové kulatiny, která byla zakoupena samostatně ve firmě [40]. První obráběč bohužel nedokázal dodržet zadanou toleranci a zanesl chybu až 0,6 mm, v podobě nesouososti mezi dírou pro rozpěrný kužel pružné spojky a dírami na šrouby pro uchycení k ventilátoru chlazení.



**Obrázek 4.21** : Spojovací nástavec – ukázka provedení hotového výrobku

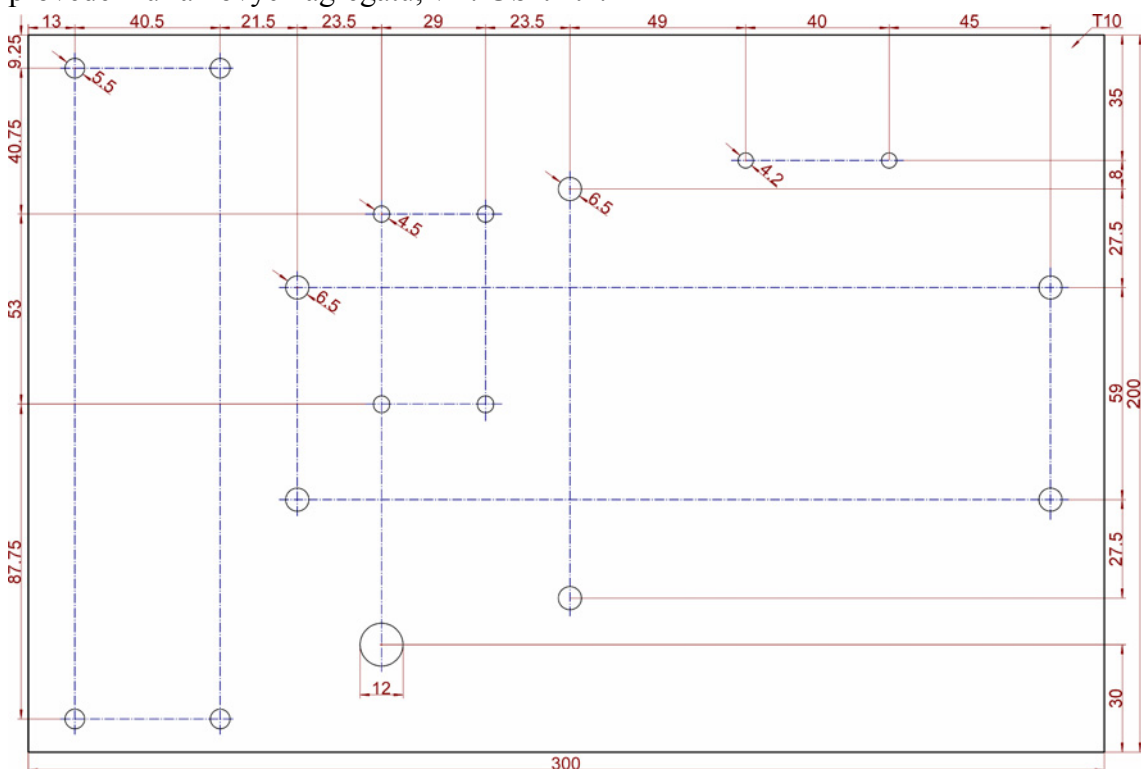
Díky tomu by bylo celé točivé ústrojí nevyváženo, což mohlo mít za následek výskyt nepřijatelných vibrací. Vznikla obava, aby nedošlo k vylomení závitových pouzder na ventilátoru. Proto musel být nástavec vyroben ještě jednou, tentokrát s mnohem větší přesností. Tolerance nejdůležitějších rozměrů byla tentokrát specifikována nikoliv ústně, ale přímo ve výkresu a to třídou přesnosti H7. Napodruhé bylo již vše v pořádku a výsledný výrobek si lze prohlédnout na **Obr. 4.21**.

Přípevnění nástavce k ventilátoru se provedlo dvěma vysokopevnostními kalenými šrouby M6. Jejich kulaté hlavy typu imbus jsou do nástavce zcela zapuštěny, aby nepřekážely v instalaci pružné spojky. Do volného prostoru kolem hlav byly poté ještě vsazeny měděné vymežovací futra. K zabránění povolání šroubů vlivem vibrací a uvolnění rozpěrného kuželu pružné spojky, byl použit přípravek Loctite 243, což je univerzálně použitelný zajišťovač závitů vhodný pro pracovní teploty až do 180°C.

Přípevnění nástavce k ventilátoru se provedlo dvěma vysokopevnostními kalenými šrouby M6. Jejich kulaté hlavy

### 3.5 Řešení celkového mechanického uspořádání stroje

Všechny části stroje bylo potřeba umístit na jednu platformu. První nápad byl svařit kovový rám, do kterého by se komponenty přišroubovaly na přivařené úchyty, po vzoru provedení u rámových agregátů, viz. **Obr. 2.2**.



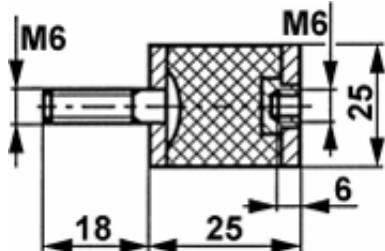
**Obrázek 4.22** : Výkres základnové desky agregátu



Ovšem reálná potřeba byla hlavně přišroubovat motor k pevné podložce, která by svou vahou zabráňovala jeho nadměrnému chvění při vysokých otáčkách. Proto bylo rozhodnuto všechny komponenty připevnit k ocelové desce síly 10mm, jenž byla zakoupena u firmy [40]. Nutno podotknout, že vrtání přesně umístěných děr do takto masivního ocelového plátu je poměrně zdlouhavý proces i s chlazením při použití nových kobaltových vrtáků. Vše se nakonec podařilo a výkres zhotovené základny s umístěním vytvořených otvorů ukazuje **Obr. 4.22**.

### 3.5.1 Odhlučnění

Aby bylo možné stroj testovat v obytných prostorech bytového domu, muselo být vymyšleno odsávání spalin a způsob odhlučnění. Odsávání bylo provedeno celkem bez problému s pomocí několika trubek a sacího ventilátoru. Odhlučnění pomocí šesti

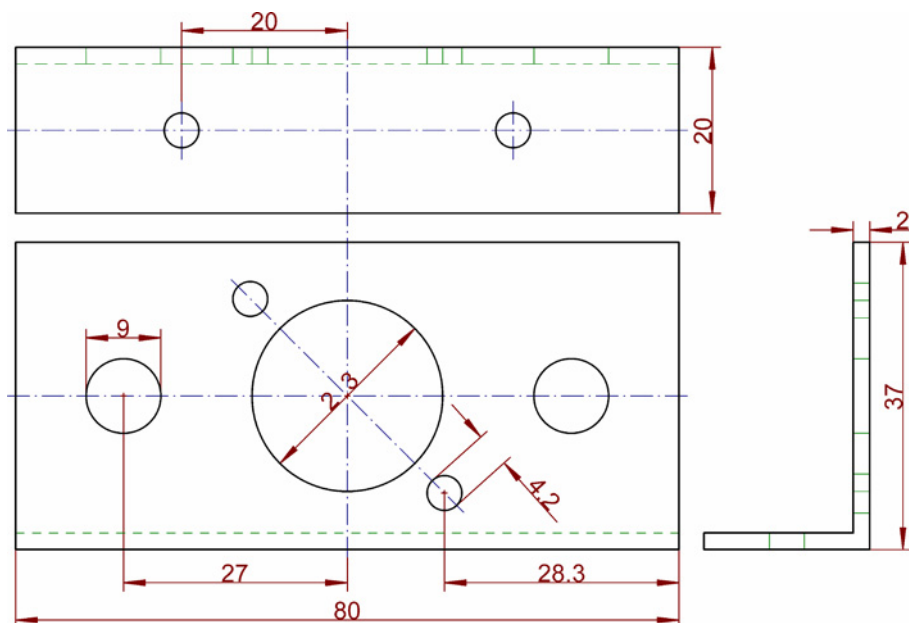


**Obrázek 4.23** : Výkres silenbloku (převzato a upraveno z [42])

silenbloků, jejichž výkres ukazuje **Obr. 4.23**. Ty jsou vždy po dvou našroubovány ke všem třem nosníkům motoru (N1, N2, N4). Teprve za silenbloky bylo soustrojí generátor-motor upevněno k základnové desce. Tím se výrazně omezily především nízkofrekvenční nežádoucí vibrace. Aby se tlumení ještě snížilo, byla zakoupena deska z pěnové gumy o rozměrech 230 x 330 mm, která se nalepila na spodní stranu základnové ocelové desky. Tím byly zcela eliminovány i zbývající vibrace přenášené do podkladu.

### 3.5.2 Svorky výstupního napětí

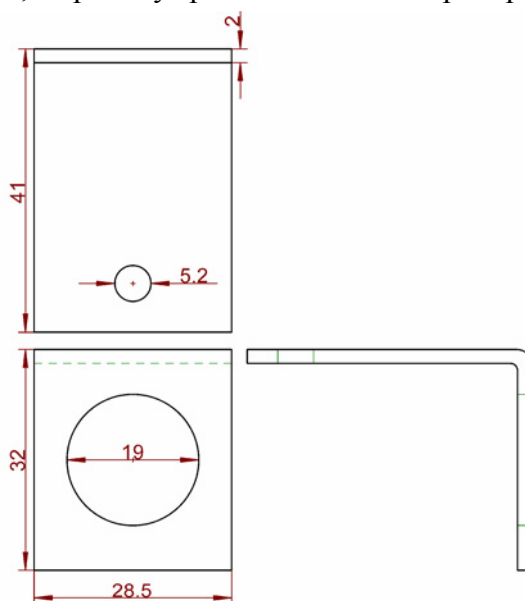
Výstupní svorky stejnosměrného napětí agregátu byly společně s objímkou pro tavnou pojistku umístěny na samostatném hliníkovém profilu tvaru L, jehož výkres je na **Obr. 4.24**. Ten je přišroubován na volném místě k základnové desce. Použity byly kvalitní zdířky od firmy Hirschmann, typ HIR-PKNI10B / R. Dimenzovány jsou na SS napětí 60V a proud 63A. Při uvažovaném maximálním výstupním výkonu 400W a nominálním napětí 13,8V je zde rezerva dostatečná a to i vzhledem k rovnosti (3.6). Tavná pojistka je do obvodu zařazena jen z opatrnosti, protože zařízení bude obsahovat především nastavitelnou elektronickou nadproudovou ochranu. Pojistka je dimenzována na proud 50A a uplatnila se hlavně v době před dokončením vývoje elektroniky.



**Obrázek 4.24** : Výkres profilu pro uchycení výstupních svorek a pojistkového pouzdra

### 3.5.3 Nouzový vypínač

Agregát musí také obsahovat nouzový vypínač, pomocí kterého bude možné spalovací motor v případě selhání elektroniky, nebo jakékoliv rizikové situace kdykoliv okamžitě vypnout. Pomocí samostatného hliníkového L profilu, jehož výkres se nachází na **Obr. 4.25**, je přišroubován na dobře přístupném místě u držadla ručního startéru. Použit je kolébkový přepínač s aretací s dimenzováním na střídavé napětí 250V, 10A. Měřením bylo totiž zjištěno, že napětí na sekundárním vinutí zapalovací cívky nikdy, ani při maximálních otáčkách motoru, nepřekročí napětí špička-špička 210V. Toto napětí má ovšem trvale poměrně malou energii, jeho střední hodnota se pohybuje nejvýše okolo 5V. Také bylo změřeno, že zkratový proud nikdy není větší než přibližně 0,7A. Lze tedy konstatovat, že použitý spínač tomuto účelu plně postačí.

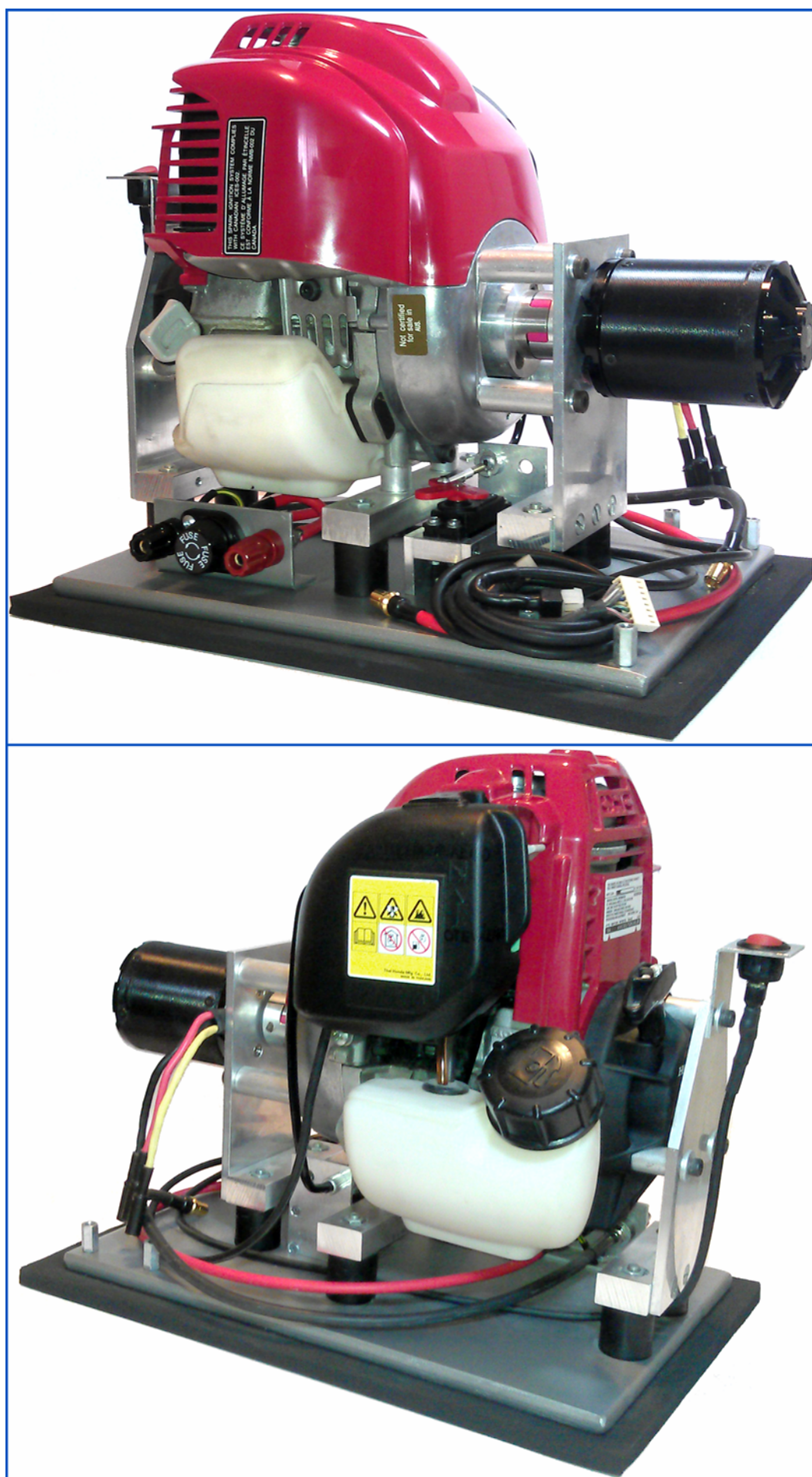


**Obrázek 4.25** : Výkres profilu pro uchycení nouzového vypínače motoru

### 3.5.4 Celkový pohled na výsledné mechanické uspořádání

Následující dvě fotografie na **Obr. 4.26**, ukazují celkový pohled na mechanickou část realizovaného prototypu agregátu. Lze zde zpozorovat všechny výše popsané mechanické komponenty. Čtyři distanční sloupky M5 x 15mm, viditelné na základnové desce pod generátorem, jsou připraveny pro připevnění DPS výkonové jednotky. Její propojení s výstupními svorkami je provedeno pomocí silových kabelů Helukabel Solarflex X PV1-F Ø6,9mm, které mají vzhledem k blízkosti bloku motoru, záměrně velký pracovní teplotní rozsah a také nadstandardní proudové dimenzování. Od nouzového vypínače vede stíněný kabel, protože se zde vyskytují vysokonapěťové špičky ze zapalovací cívky, které by mohly jinak způsobovat EM rušení do okolí.

Také bylo potřeba se zabírat otázkou celkového uzemnění. Všechny části stroje je potřeba přivést na společný potenciál základnové desky. Výkonová jednotka je uzemněna jednak přímo pomocí všech čtyř distančních sloupků na kterých je posazena a za druhé samostatným zemnicím vodičem, propojeným přímo se zápornou výstupní svorkou. Ta je navíc samostatným vodičem propojena se základnovou deskou. Protože silenbloky jsou z kaučuku, celé soustrojí motor-generátor je od základnové desky odizolováno. To není žádoucí a proto jsou obě části vodičově spojeny dalším samostatným zemnicím vodičem.



Obrázek 4.26 : Celkové mechanické uspořádání realizovaného prototypu agregátu

## 4. Elektronická část realizovaného agregátu

Teprve kompletní dokončení prototypu po stránce mechanické, umožnilo věnovat se plně návrhu části elektronické. V první fázi se testovali vlastnosti a prováděla měření jednotlivých funkčních bloků, které byly realizovány prozatím samostatně na nepájivých polích a univerzálních i leptaných DPS. Ve druhé fázi se všechny části sjednotily na tři DPS, kterých byly ještě postupem času vyrobeny dvě verze. První sloužila k obecnému ověření navržených zapojení, odladění možných problémů a k eliminaci chyb vzniklých při návrhu motivů plošných spojů. Druhé verze všech DPS byly již finální a jsou osazeny v konečném výrobku. Jednotlivé moduly budou dále popsány.

### 4.1 Zvolený koncept a rozdělení na moduly

Zařízení jako celek musí obsahovat za prvé řetězec obvodů pro zpracování a úpravu výstupního SS napětí, za druhé komplex řídicích a kontrolních obvodů, za třetí obvody zajišťující potřebná napájecí napětí pro elektroniku.

Bylo rozhodnuto, že zapojení je z praktických důvodů vhodné rozdělit na výkonovou jednotku a vzdálené ovládací zařízení. Kvůli možnému rušení, by totiž výkonové obvody, kde tečou značné proměnlivé proudy, měly být umístěny na jiném plošném spoji, než řídicí obvody s mikrokontrolérem. Díky této koncepci, bylo také možné přesunout ovládací zařízení do větší vzdálenosti od hlučného spalovacího motoru a jeho točivých částí, kde zůstalo trvale připojeno k počítači, během procesu odladění firmwaru. I z bezpečnostních důvodů se to jevílo jako adekvátní řešení.

Pro realizaci vzdáleného ovládacího zařízení bylo navrženo použití sendvičové struktury modulů. Je složeno z řídicí jednotky, do které se z horní strany připojuje modul LCD displeje s dotekovým panelem a ze spodní strany se instaluje modul napájecí.

Aby byl splněn požadavek možnosti obsluhy zařízení i bez spuštěného spalovacího motoru, bude napájecí modul obsahovat také několik sekundárních článků. To lze díky použití vhodných SMD držáků a běžně dostupných nabíjecích baterií velikosti AAA. Z toho ovšem také vyplývá potřeba na stejném modulu v těsné blízkosti umístit nějaký obvod nabíječky.

Napájecí zdroj byl nejprve koncipován jako společný pro veškerou elektroniku. Postupem času se dospělo k poznání, že lepší řešení bude navrhnout ho pro každou funkční část samostatně, protože v systému jsou zapotřebí různé hladiny napájecích napětí s různými požadavky na vyhlazení a proudový odběr. Navíc napájecí zdroj je vždy lepší lokalizovat přímo v místě spotřeby, což by jinak nebylo možné zajistit. Proto výkonová jednotka, řídicí jednotka i nabíječka baterií má vlastní malý spínaný zdroj k napájení.

V době kdy je spalovací motor v provozu a dochází k výrobě elektrické energie, baterie by se měly nabíjet a řídicí jednotka musí být napájena odjinud. Z baterií by měla být napájena pouze v případě, že agregát zrovna elektrickou energii nevyrábí. Tím se docílí, že baterie budou pokud možno vždy nabity a připraveny k použití. Takové chování napájecího modulu by měl zajišťovat samostatný obvod výběru napětí.

Výkonová jednotka by měla obsahovat především obvody ke zpracování napětí z generátoru na SS stabilizované napětí, obvody snímání elektrických veličin pro řídicí jednotku a svůj samostatný napaječ. Řídicí jednotka by měla mít možnost kdykoliv stroj v případě potřeby zastavit a také by se mělo zajistit, že stroj nepůjde nastartovat bez předchozí aktivace řídicí jednotky.

Tyto dvě funkce bude zabezpečovat obvod zkratování zapalování, který musí být kvůli možnému rušení také umístěn na výkonové jednotce.

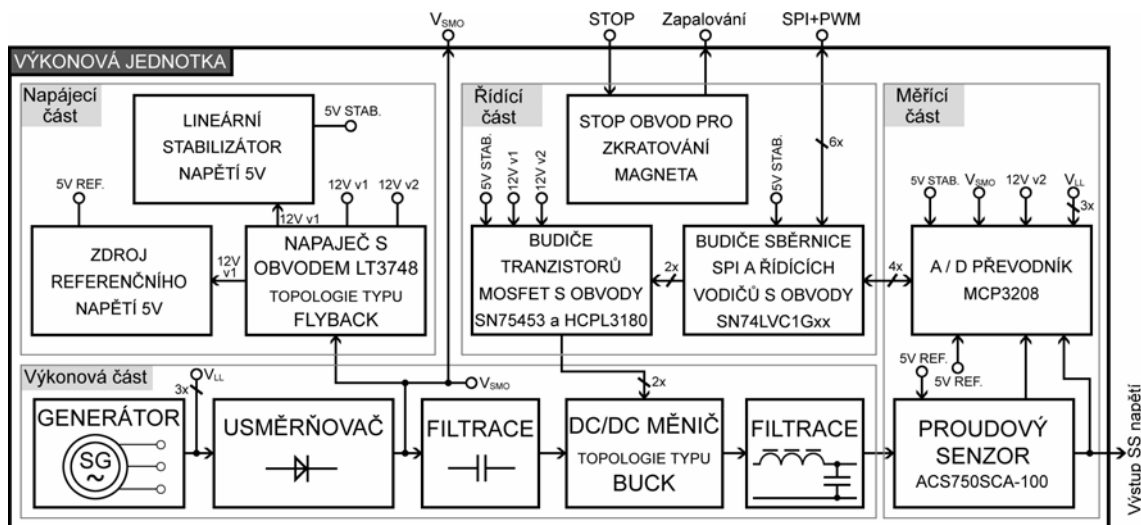
Řídící jednotka bude obsahovat všechny ostatní obvody potřebné k řádné funkci zařízení. Hlavní části zde budou mikropočítač firmy Parallax, EEPROM paměť, zapojení pro naprogramování pomocí PC přes USB port, obvody resetu, zapojení pro zvýšení počtu portů mikrokontroléru, ovládací obvod zkratování zapalování a obvody pro vytvoření potřebných napájecích napětí. Vedlejší, méně důležité části, budou obvod reálného času a obvod akustické indikace.

Na začátku kapitol věnovaných jednotlivým modulům, budou vždy uváděna jejich zjednodušená bloková schémata, kde přítomnost většiny funkčních bloků vyplývá ze snahy splnit cíle stanovené v kapitole **3**. Než bylo dosaženo současné podoby, prošla tato bloková schémata během experimentování řadou obměn. Bloky jsou seskupeny do funkčních částí usnadňujících popis. Dále je pro každý blok vždy zobrazeno použité napájecí napětí, směr toku informací a počet funkčních spojů jednotlivých vodivých propojení.

## 5. Výkonová jednotka

Blokové schéma výkonové jednotky se nachází na **Obr. 6.1**. Segment označený „**Výkonová část**“ obsahuje nejdůležitější elektroniku celého agregátu. Realizuje se zde úprava a stabilizace vyráběné energie. Popisu funkce zde přítomných bloků bude proto věnována značná pozornost a na jejich návrh kladen největší důraz.

Třífázové napětí z generátoru je nejprve usměrněno, čímž se získá zvlněné stejnosměrné napětí vyšší amplitudy. To je dále filtrováno, aby se zvlnění co nejvíce zmenšilo. V bloku DC/DC měniče je SS napětí modulováno, dochází zde ke zmenšení a stabilizaci střední hodnot. Za účelem opětovného získání SS napětí po tomto procesu, následuje blok výstupního LC filtru.



**Obrázek 6.1** : Zjednodušené blokové schéma výkonové jednotky

Dále je napětí vedeno do segmentu s označením „**Měřicí část**“. Zde jsou pomocí A/D převodníku jednak snímány informace o stavu systému, ale především hlavní sledované veličiny, kterými je velikost výstupního napětí a velikost proudu tekoucího do zátěže. Jejich přesná a spolehlivá znalost bez přidaného zpoždění je nezbytným předpokladem k zajištění správné funkce stabilizace výstupního napětí a korektní regulace výkonu spalovacího motoru. Z naměřených dat řídicí jednotka jednak stanovuje údaje, které v provozu zobrazuje na LCD displeji a dále s jejich pomocí provádí nepřetržitý monitoring stavu systému, pro případ potřeby odstavení stroje, kvůli možnosti vzniku poruchového stavu.

Segment s označením „**Řídicí část**“ zajišťuje spolehlivou komunikaci s řídicí jednotkou, která přes příslušné vodiče ovládá přítomné periferie. Tedy především řídí spínání tranzistorů v bloku DC/DC měniče a dále aktivuje obvod zkratování zapalovací cívky magneta.

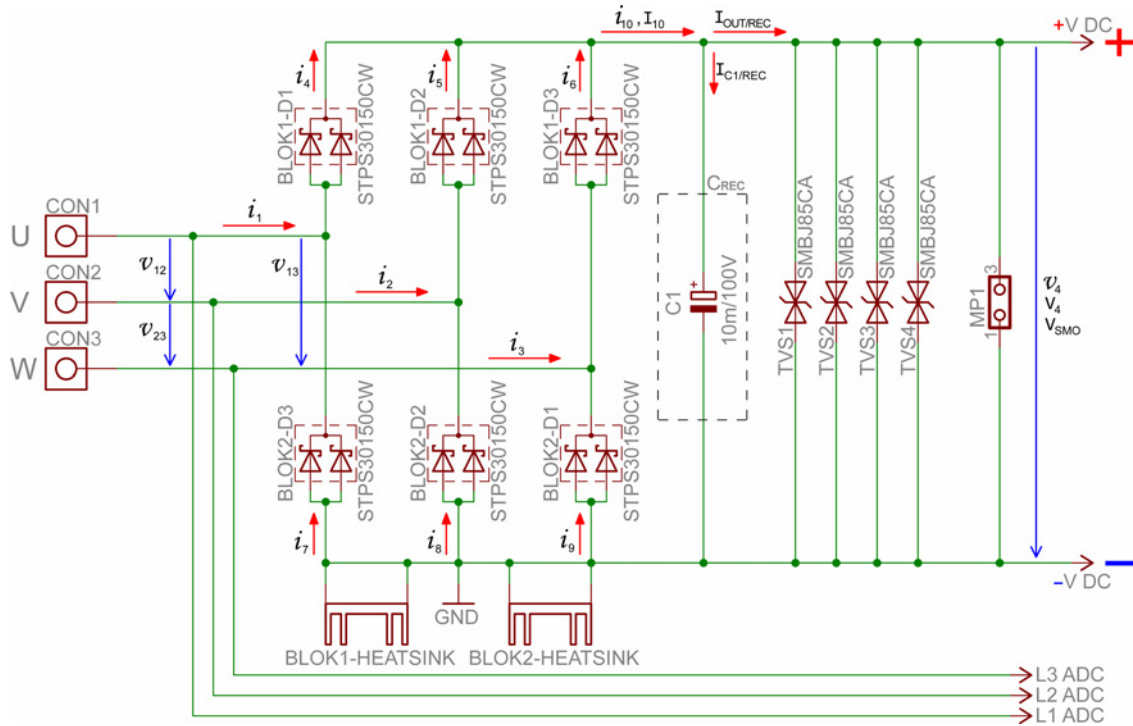
Poslední segment je označen „**Napájecí část**“. Jak bylo již zmíněno, výkonová jednotka obsahuje vlastní spínaný zdroj, který vyrábí všechna potřebná napětí. Je to především galvanicky oddělené napětí pro budiče tranzistorů MOSFET. Pro napájení ostatních přítomných obvodů je zde k dispozici napětí 5V. Kvůli bezchybnému a přesnému měření pomocí A/D převodníku a proudového senzoru se zde také nachází kvalitní napěťová reference.

Konkrétní schémata zapojení jednotlivých bloků jsou předmětem úvah dalších kapitol. Součástky v každém schématu budou pro lepší srozumitelnost a popis číslovány samostatně. Při návrhu výkonové jednotky posloužila jako zdroj informací také diplomová práce [163].



## 5.1 Trojfázový usměrňovač

Generátor na výstupních svorkách poskytuje tři harmonická sdužená napětí se vzájemným posuvem fází  $120^\circ$ . Statorová vinutí jsou symetrická, takže amplitudy mají stejnou velikost. Střídavé napětí je vedeno na třífázový neřízený usměrňovač, jehož schéma zapojení ukazuje **Obr. 6.2**.

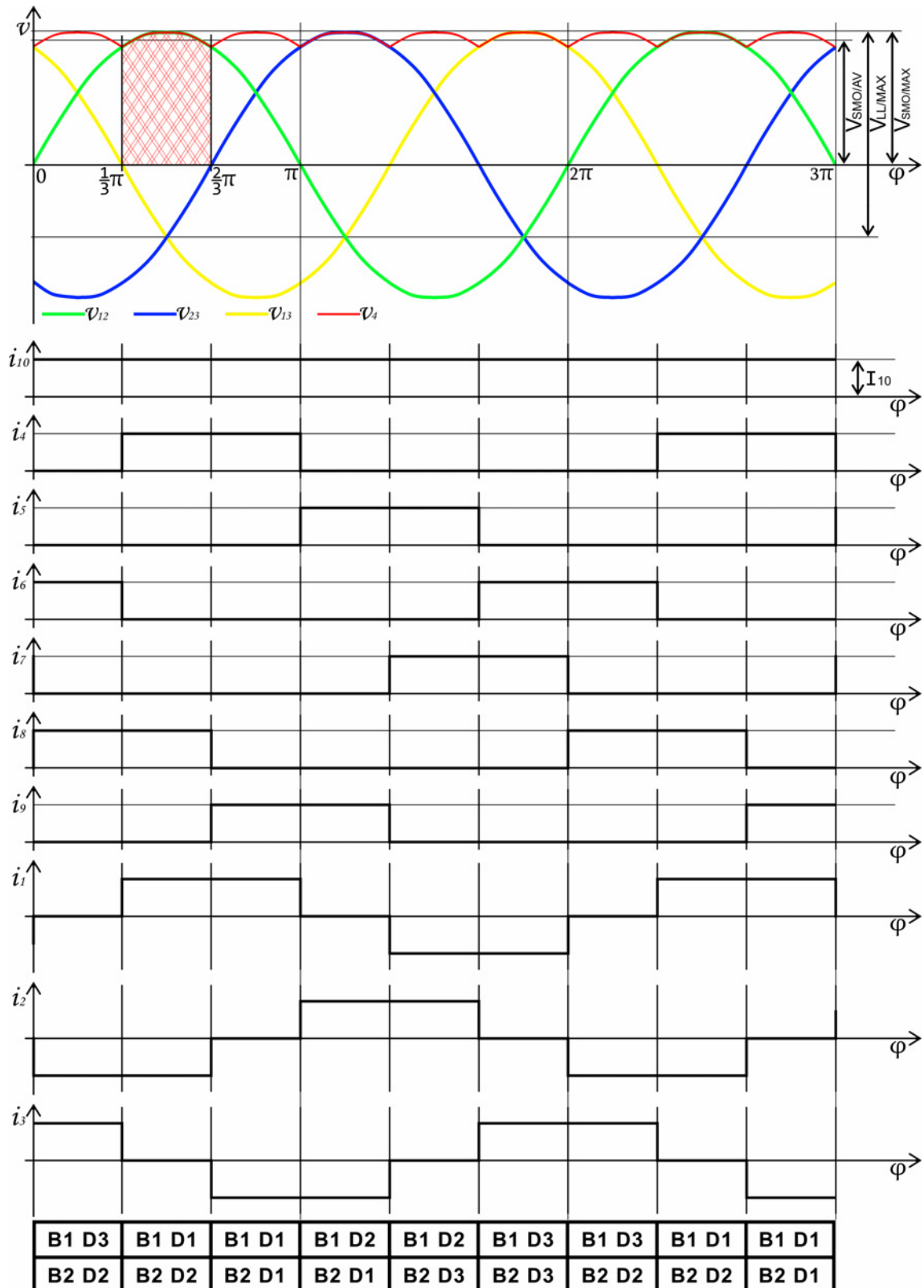


**Obrázek 6.2** : Schéma zapojení třífázového usměrňovače

Obvod je složen ze dvou trojpulzních uzlových usměrňovačů sériově propojených do můstku. Ty se většinou nazývají podle způsobu připojení ke zdroji. Diody bloku 1 anodová skupina a diody bloku 2 katodová skupina. Každý blok je tvořen třemi diodami, tudíž k realizaci zapojení jich je zapotřebí šest. Jak je ze schématu patrné, reálně bude použito diod celkem dvanáct, přičemž jedno pouzdro obsahuje vždy dvě paralelně spojené a proto lze o něm dále hovořit jako o diodě jedné. Odbočky z jednotlivých fází jsou vedeny do měřící části výkonové jednotky.

Zapojení pracuje takto. Aby se obvod uzavíral a do zátěže, která ve schématu znázorněna není, tekla nepřerušovaně proud, v každém okamžiku musí být aktivní minimálně jedna dioda z anodové i katodové skupiny. Je to vždy ta, na níž se v daném okamžiku nachází největší napětí s polarizací v propustném směru. Pokud je již dioda otevřena, vzhledem k aktuálnímu sledu fází tím současně polarizuje ostatní diody ze své skupiny závěrně, takže jimi proud neprotéká. Na základě měření a [157] byly vyhotoveny grafy na **Obr. 6.3**, kde lze za pomoci proudů které tečou jednotlivými diodami pozorovat v jakém sledu se otevírají. Značení veličin koresponduje se schématem, kde odlišně je značena okamžitá a střední hodnota. Tvar průběhů je pouze informativní, platný pro případ ideálních diod bez připojené zátěže. Jak je vidět, může během jedné periody nastat 6 kombinací orientace polarity vstupních napětí, mezi nimiž dochází ke komutaci diod. Dvojice současně otevřených diod jsou vypsány v tabulce, kde v každém poli je vždy vyznačeno číslo bloku B1, B2 a příslušná otevřená dioda D1 až D3. Protože jde o neřízený usměrňovač, lze také pozorovat, že komutace probíhá pouze při průchodu jedné z fází vstupních napětí nulou. Dále jsou pro ilustraci zobrazeny průběhy proudů odebíraných z jednotlivých fází díky čemuž je zřejmé, že zatěžovány jsou rovnoměrně. Červeně byl vyznačen průběh výsledného napětí.

Je na něm patrné, že jedna perioda vstupních napětí na výstupu vytvoří šest minim a maxim. Proto se tento usměrňovač jinak také nazývá šestipulsní. Výhodou oproti jednodušším zapojení, je malé zvlnění, malé úbytky na diodách a jejich menší napěťové namáhání v závěrném směru. Schéma dále ukazuje, že na výstup je připojena také filtrační kapacita, která má za úkol vzniklé zvlnění snížit. Také je zde přítomno několik transilů chránících všechny součástky v SMO proti náhodným napěťovým špičkám.



Obrázek 6.3 : Průběhy na třífázovém usměrňovači korespondující se schématem na Obr. 6.2



### 5.1.1 Výběr diod pro usměrňovač

Při výběru vhodných diod byl kladen důraz na několik základních parametrů. V první řadě to je minimální úbytek napětí v propustném směru  $V_F$ , aby bylo dosaženo rozumné účinnosti. Dále na krátkou dobu závěrného zotavení PN přechodu, protože sružené napětí generátoru může dosahovat i poměrně vysokých frekvencí (4.3.17). Tím se úkol zredukoval na výběr ze skupiny schottkyho diod, které mají díky přechodu kov-polovodič oba parametry ze všech druhů diod nejnižší. Dále musela být uvážena hodnota průměrného přípustného trvalého proudu v propustném směru  $I_{F/AV}$  a maximální povolené trvalé závěrné napětí  $V_{RRM}$ . Protože jde o výkonovou součástku, bylo také žádoucí vybrat pouzdro, které půjde umístit na plošný spoj za pomoci THT montáže a současně v případě potřeby snadno připevnit k chladiči. Zvažované diody, jež byly v danou chvíli v počtu šesti kusů k dispozici, jsou uvedeny i s typickými hodnotami základních parametrů v Tab. 6.1.

OZNAČENÍ DIODY	VÝROBCE	$I_{F/AV}$ (A)	$V_{RRM}$ (V)	$V_F$ (V)	TYP POUZDRA	POČET DIOD V POUZDRU
BYQ28E	Philips	10	200	0,895	TO220AB	2
SBL3060	DIODES	30	60	0,730	TO247	2
STPS30150	ST Microelectronics	30	150	0,750	TO247	2
MBR40250	ON Semiconductor	40	250	0,860	TO220AC	1

Tabulka 6.1 : Porovnání typických parametrů zvažovaných diod pro použití v třífázovém usměrňovači (zdroj informací [82], [162])

Střední hodnotu výsledného stejnosměrného napětí na výstupu třífázového usměrňovače lze spočítat integrací přes jednu šestinu periody přičemž daná plocha, v grafu vyznačena červeně šrafovaně, se dále vynásobí počtem pulsů v jedné periodě obsažených [157]:

$$\begin{aligned}
 V_{SMO/AV} &= \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) d(t) = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T (V_{LL/MAX} \cdot \sin(\omega_{LL} t)) d(\omega_{LL} t) = \\
 &= \frac{1}{\Phi} \cdot \int_0^{\Phi} (V_{LL/MAX} \cdot \sin(\varphi)) d(\varphi) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot V_{LL/MAX} \cdot \int_0^{2\pi} \sin(\varphi) d(\varphi) = \\
 &= \frac{V_{LL/MAX}}{2 \cdot \pi} \cdot p_{REC} \cdot \int_{\frac{1}{3}\pi}^{\frac{2}{3}\pi} \sin(\varphi) d(\varphi) = \frac{V_{LL/MAX} \cdot p_{REC}}{2 \cdot \pi} \cdot [-\cos(\varphi)]_{\frac{1}{3}\pi}^{\frac{2}{3}\pi} = \\
 &= \frac{p_{REC} \cdot V_{LL/MAX}}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ -\cos\left(\frac{2}{3} \cdot \pi\right) - \left(-\cos\left(\frac{1}{3} \cdot \pi\right)\right) \right] = \\
 &= \frac{p_{REC} \cdot V_{LL/MAX}}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ -\left(-\frac{1}{2}\right) - \left(-\frac{1}{2}\right) \right] = \frac{p_{REC} \cdot V_{LL/MAX}}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right] = \\
 &= \frac{6 \cdot V_{LL/MAX}}{2 \cdot \pi} = \frac{3}{\pi} \cdot V_{LL/MAX} = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot V_{LL/RMS} \cong 1,35 \cdot V_{LL/RMS}
 \end{aligned} \tag{6.1.1}$$

kde:  $p_{REC}$  ... je počet pulsů zvlnění SS napětí (odpovídá počtu diod) (-)  
 $V_{LL/MAX}$  ... je maximální hodnota sruženého napětí generátoru (V)  
 $V_{LL/RMS}$  ... je efektivní hodnota sruženého napětí generátoru (V)  
 $\omega_{LL} = 2 \cdot \pi \cdot f$  ... je úhlový kmitočet sruženého napětí generátoru ( $rad \cdot s^{-1}$ )

Jak je nyní patrné, tento zaokrouhlený výsledek byl v kapitole 4.3.1 použit při výběru vhodného generátoru. Z principu funkce zapojení vyplývá, že všech 6 diod je v závěrném směru namáháno maximální hodnotou sruženého napětí generátoru  $V_{LL/MAX}$  (Obr. 6.3).

Mělo by se tedy zajistit splnění podmínky:

$$V_{RRM/REC} > V_{LL/MAX} = \sqrt{2} \cdot \frac{V_{SMO/AV/max.}}{3 \cdot \sqrt{2}} = \frac{\pi}{3} \cdot 90 \cong 94,25V \quad (6.1.2)$$

Obecně platí, že závěrné napětí diod by se mělo volit alespoň o 50% vyšší než je očekávané mezní maximum, kvůli možným napěťovým překmitům vznikajícím při jejich závěrném zotavení.

Nejhorší situace z hlediska protékajícího proudu usměřovačem nastane za situace, kdy napětí vyráběné generátorem bude nejmenší, současně nastavené výstupní SS napětí agregátu bude minimální, při maximální připojené zátěži. Také musí být uvažován odběr veškerých dalších připojených obvodů na výkonové jednotce i ostatních modulech. Špičková hodnota tohoto přidaného odběru bude na základě pozdějších kalkulací a provedených měření i s rezervou nyní odhadnuta:

$$P_{ADD} \approx 50W \quad (6.1.3)$$

Výkonový měnič zde bude hlavním spotřebičem a proto je nutné také zohlednit energii v něm ztracenou přeměnou na teplo. Konzervativní odhad jeho účinnosti:

$$\eta_{DC/DC} \approx 80\% = 0,80 \quad (6.1.4)$$

Odhad celkového maximálního výkonu odebíraného z usměřovače pak bude:

$$P_{OUT/REC/max.} = \frac{P_{OUT/AGR/max.}}{\eta_{DC/DC}} + P_{ADD} = \frac{400}{0,80} + 50 \cong 550W \quad (6.1.5)$$

Protože během testování a odladění elektroniky by mohla teoreticky nastat i situace, kdy napětí v SMO poklesne pod hodnotu určenou měřením v rovnosti (4.3.22), bude lepší při stanovení maximálního proudu usměřovačem pro jistotu uvažovat napětí dané v deklaraci (3.3). Maximální velikost proudu odebíraného z usměřovače pak bude:

$$I_{OUT/REC/max.} = \frac{P_{OUT/REC/max.}}{V_{OUT/AGR/DC/min.}} = \frac{550}{10} = 55A \quad (6.1.6)$$

Vzhledem k tomu, že napětí generátoru roste během nastartování stroje v přiblížení v podstatě pozvolna a díky ovládání řídicí jednotkou, kde je možné zátěž připojit povelům až po ustálení otáček motoru, vypočtený maximální odběr se ihned po zapnutí vyskytnout nemůže a tudíž výstupní kapacita  $C_{REC}$  má vždy dostatek času se nabít. Proto zde s rázovým nabíjecím proudem není nutné počítat. Výkonové diody navíc snesou i poměrně výrazné krátkodobé proudové přetížení.

V jeden časový okamžik vždy vedou dvě diody zapojené se spotřebičem v sérii. Proudové namáhání jednotlivých součástek je dáno střední hodnotou proudu jimi protékajícího. Mělo by se tedy zajistit, aby jejich povolený trvalý proud byl větší než:

$$I_{F/AV/REC/Total} > \frac{1}{3} \cdot I_{OUT/REC/max.} = \frac{1}{3} \cdot 55 \cong 18,33A \quad (6.1.7)$$

Výpočet platí pro obě diody v jednom pouzdru, takže jednou poteče proud poloviční:

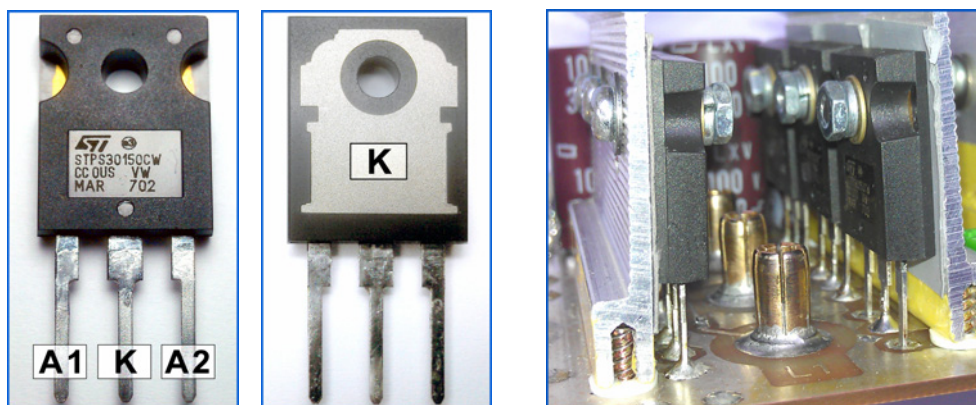
$$I_{F/AV/REC} = \frac{1}{2} \cdot I_{F/AV/REC/Total} = \frac{1}{2} \cdot 18,33 \cong 9,17A \quad (6.1.8)$$

Na základě uvedených kalkulací byly vybrány diody **STPS30150CW**, které všechny požadavky splňují s dostatečnou rezervou.

Výrobce uvádí že jsou primárně doporučeny k použití ve vysokofrekvenčních spínaných zdrojích, což by také mělo zajistit nízké parazitní komutační ztráty a díky paralelní kombinaci dvou diod v pouzdru, také snížení ztrát vodivostních. Jejich nejdůležitější parametry shrnuje **Tab. 6.2**. Pouzdro se zapojením vývodů a způsob montáže lze spatřit na **Obr. 6.4**.

Výrobce: ST Microelectronics		Označení diody: STPS30150CW	Montáž: THT	Počet diod v pouzdru: 2	Počet použitých součástek: 6
Veličina	Význam	Hodnota	Jednotka	Podmínky	
$V_{RRM}$	Maximální špičkové opakovatelné závěrné napětí	150	V		
$I_{F/RMS}$	Maximální povolená velikost efektivní hodnoty trvalého propustného proudu	30	A	platí pro jednu diodu	
$I_{F/AV}$	Maximální povolená velikost trvalého průměrného propustného proudu	15	A	$t = 155^{\circ}\text{C}$ ; $\delta = 0,5$ ; platí pro jednu diodu	
$V_F$	Propustný úbytek napětí na diodě	0,64	V	$t = 125^{\circ}\text{C}$ ; $I_F = I_{F/AV}$ ; pouze pro výpočet ztrát	
$r_d$	Diferenciální odpor diody	0,0073	$\Omega$	$t = 125^{\circ}\text{C}$ ; $I_F = I_{F/AV}$ ; pouze pro výpočet ztrát	
$I_R$	Maximální závěrný svodový proud	8	mA	$t = 125^{\circ}\text{C}$ ; $V_R = V_{RRM}$ ; platí pro jednu diodu	
$R_{\theta(j \rightarrow c)}$	Tepelný odpor vazby čipu s pouzdrém	0,8	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$	platí pro obě diody	
$R_{\theta(c \rightarrow a)}$	Tepelný odpor vazby pouzdra s okolím	0,1	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$		
$T_{j(max)}$	Maximální pracovní teplota čipu	175	$^{\circ}\text{C}$		

**Tabulka 6.2** : Základní parametry použitých diody STPS30150CW (převzato z [82])



**Obrázek 6.4** : Ukázka pouzdra TO247 diod STPS30150CW, zapojení vývodů a provedení montáže

Diody ve schématu označené TVS1 až TVS4 (Transient Voltage Suppressor) jsou obousměrné transily, které chrání všechny elektrické obvody napájené ze SMO před náhodným napětovým impulsním přepětím, které by se zde mohlo vyskytnout například při odpojení velké zátěže z výstupu měniče. Za normálních okolností se tedy vůbec neuplatňují, kromě zanedbatelného svodového proudu. Více paralelně spojených diod je použito z důvodu lepší tepelné distribuce pohlcené energie po DPS. Průrazné napětí je voleno v souladu s (4.3.21) a dimenzováním ostatních součástek v SMO. Konektor MP1 je přítomen pouze z důvodu snadnějšího měření.

## 5.1.2 Filtrace výstupního napětí usměrňovače

Filtrační člen ve schématu na **Obr. 6.2** reprezentován kapacitou  $C_{REC}$ , se bude jednak z části podílet na eliminaci pozůstatků rušení od lokálního napájecího spínaného zdroj, které by jinak mohly mít negativní vliv na proces stabilizace napětí v měniči, ale především zmenší činitel zvlnění, který je sice pro šestipulsní usměrňovač vcelku malý, přesto bude mít jeho pokles pozitivní vliv na kvalitu výsledného stabilizovaného SS napětí agregátu.

K přibližnému určení potřebné velikosti kapacity může být použit postup uvedený v literatuře [159]. Uvažuje se zde, že celý okamžitý výkon odebíraný zátěží navýšený o ztráty musí pokrýt tento kondenzátor. Kapacita by měla být určena pro nejhůrší možný případ, což je při volnoběžných otáčkách, kdy je velikost a frekvence zvlnění usměrňovaného napětí nejmenší. To sice povede na větší hodnotu, ale je to nutné pokud má být zaručeno požadované zvlnění v celém stanoveném napěťovém rozsahu. Nejprve bude potřeba zjistit minimální frekvenci zvlnění usměrňovaného napětí. Ta závisí na otáčkách generátoru, takže je nejlepší odvodit ji přímo z reálného měření. Lze k tomu využít již provedené měření sdruženého napětí (4.3.10). Za dobu jedné periody se sice kondenzátor nabije šestkrát, ale oproti frekvenci sdruženého napětí bude frekvence zvlnění usměrňovaného napětí trojnásobná, což lze demonstrovat na **Obr. 6.3**:

$$f_{\Delta V_{OUT/REC/min.}} = 3 \cdot f_{GEN/LL/meas./AV/nom.} = 3 \cdot 358 = 1,074 kHz \quad (6.1.9)$$

Účinnost měniče byla již dříve odhadnuta. Volba menší účinnosti než bude reálná povede k výpočtu větší kapacity, protože kondenzátor musí uchovávat energii i pro ztrátový výkon. To ovšem není problém, protože vypočtenou hodnotu kapacity hliníkových filtračních kondenzátorů bývá zvykem stejně o něco zvětšit, kvůli jejich značné toleranci v řádu desítek procent. Energie dodávaná z kondenzátoru se nyní spočte:

$$W_{C_{REC}} = \frac{P_{OUT/REC/max.}}{f_{\Delta V_{OUT/REC/min.}}} = \frac{550}{1074} \cong 0,512 \text{ W} \cdot s \quad (6.1.10)$$

Jedná se v podstatě o energii, dodanou během trvání jednoho obloučku zvlnění výstupního napětí usměrňovače. Maximální zvlnění napětí na kondenzátoru  $C_{REC}$  bude nyní odhadem povoleno:

$$\delta V_{C_{REC}/max.} = 10\% = 0,1 \quad (6.1.11)$$

Při nejmenším napětí v SMO určeném rovností (4.3.22) by pak zvlnění mělo dosahovat:

$$\Delta V_{C_{REC}/max.} = \delta V_{C_{REC}/max.} \cdot V_{SMO/AV/min.} = 0,1 \cdot 17 = 1,7V \quad (6.1.12)$$

Díky rychlé regulační smyčce, která je zajištěna rychlým A/D převodníkem a MCU, by takové napěťové zvlnění na svém vstupu měl být dále navrhovaný měnič schopen bez potíží zpracovat.

Minimální potřebná kapacita se nyní vypočte:

$$C_{REC} = \frac{W_{C_{REC}}}{V_{SMO/AV/min.}^2 - \left( (1 - \delta V_{C_{REC}/max.}) \cdot V_{SMO/AV/min.} \right)^2} = \frac{0,512}{17^2 - ((1 - 0,1) \cdot 17)^2} \cong 9326 \mu F \cong 10000 \mu F \quad (6.1.13)$$

Kde výraz ve jmenovateli je rozdíl napěťových ploch. Výsledek byl zaokrouhlen na nejbližší normalizovanou dostupnou hodnotu.

S rostoucím napětím při konstantní zátěži i kapacitě bude zvlnění klesat. Při maximálním napětí v SMO bude při použití vypočtené kapacity zvlnění napětí na  $C_{REC}$  teoreticky pouze:

$$\Delta V_{C_{REC}/min.} = \delta V_{C_{REC}/min.} \cdot V_{SMO/AV/max.} = \left( 1 - \frac{\sqrt{V_{SMO/AV/max.}^2 - \frac{W_{C_{REC}}}{C_{REC}}}}{V_{SMO/AV/max.}} \right) \cdot V_{SMO/AV/max.} = \left( 1 - \frac{\sqrt{90^2 - \frac{0,512}{0,01}}}{90} \right) \cdot 90 \cong 285mV \quad (6.1.14)$$

Pro výběr konkrétního kondenzátoru se musí dále zjistit jaké bude jeho proudové namáhání. Efektivní hodnota celkového proudu skrz tuto filtrační kapacitu je dána:

$$I_{C_{REC}/RMS} = \sqrt{I_{C_{REC}+}^2 + I_{C_{REC}-}^2} \quad (6.1.15)$$

kde:  $I_{C_{REC}+}$  ... je efektivní hodnota nabíjecího proudu kondenzátoru  $C_{REC}$  (A)

$I_{C_{REC}-}$  ... je efektivní hodnota vybíjecího proudu kondenzátoru  $C_{REC}$  (A)

První z proudů se spočte:

$$I_{C_{REC}+} = I_{C_{REC}+/MAX} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\delta_{C_{REC}+}} \quad (6.1.16)$$

kde:  $I_{C_{REC}+/MAX}$  ... je špičková hodnota nabíjecího proudu kondenzátoru  $C_{REC}$  (A)

$\delta_{C_{REC}+}$  ... je poměr mezi celkovou dobou trvání jednoho obloučku zvlnění a dobou trvání nabíjení kondenzátoru  $C_{REC}$  (s)

Jedná se vlastně o výpočet efektivní hodnoty proudu s pilovým průběhem.

Druhý proud se vypočte ze vztahu:

$$I_{C_{REC}-} = I_{C_{REC}-/MAX} \cdot \sqrt{\delta_{C_{REC}-}} \quad (6.1.17)$$

kde:  $I_{C_{REC}-/MAX}$  ... je maximální hodnota vybíjecího proudu kondenzátoru  $C_{REC}$  (A)

$\delta_{C_{REC}-}$  ... je poměr mezi celkovou dobou trvání jednoho obloučku zvlnění a dobou trvání vybíjení kondenzátoru  $C_{REC}$  (s)

Zde se jedná o výpočet efektivní hodnoty proudu s obdélníkovým průběhem.

Amplitudy obou proudů budou:

$$I_{C_{REC}+/MAX} = C_{REC} \cdot V_{SMO/AV/min.} \cdot \omega_{LL} \cdot \cos(\omega_{LL} \cdot t_{C_{REC} \rightarrow +}) \quad (6.1.18)$$

$$I_{C_{REC}-/MAX} = \frac{I_{C_{REC}+/MAX} \cdot \delta_{C_{REC}+}}{2 \cdot \delta_{C_{REC}-}} \quad (6.1.19)$$

kde:  $t_{C_{REC} \rightarrow +}$  ... je časový okamžik, kdy se kondenzátor přestal vybíjet a začal se opět nabíjet (s)

Úhlový kmitočet a ostatní potřebné neznámé hodnoty se vypočtou:

$$\omega_{LL} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_{\Delta V_{OUT}/REC/min.}}{2} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1074}{2} \cong 3374 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.1.20)$$

$$t_{C_{REC} \rightarrow +} = \frac{\arcsin(1 - \delta V_{C_{REC}/max.})}{\omega_{LL}} = \frac{\arcsin(1 - 0,1)}{3374} \cong 332 \mu\text{s} \quad (6.1.21)$$

$$\delta_{C_{REC}+} = \frac{1}{2 \cdot f_{REC/\Delta V/min.}} - t_{C_{REC} \rightarrow +} = \frac{1}{2 \cdot 1074} - 332 \cdot 10^{-6} \cong 134 \mu\text{s} \quad (6.1.22)$$

$$\delta_{C_{REC}-} = \frac{1}{2 \cdot f_{REC/\Delta V/min.}} + t_{C_{REC} \rightarrow +} = \frac{1}{2 \cdot 1074} + 332 \cdot 10^{-6} \cong 798 \mu\text{s} \quad (6.1.23)$$

Po dosazení do vztahů (6.1.15–6.1.19):

$$I_{C_{REC+}/MAX} = 0,01 \cdot 17 \cdot 3374 \cdot \cos(3374 \cdot 332 \cdot 10^{-6}) \cong 574 A \quad (6.1.24)$$

$$I_{C_{REC-}/MAX} = \frac{574 \cdot 134 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 798 \cdot 10^{-6}} \cong 48,19 A \quad (6.1.25)$$

$$I_{C_{REC+}} = 574 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{134 \cdot 10^{-6}} \cong 3,84 A \quad (6.1.26)$$

$$I_{C_{REC-}} = 48,19 \cdot \sqrt{798 \cdot 10^{-6}} \cong 1,36 A \quad (6.1.27)$$

$$I_{C_{REC}/RMS} = \sqrt{3,84^2 + 1,36^2} \cong 4,07 A \quad (6.1.28)$$

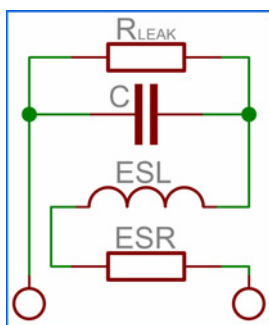
Použitý kondenzátor tedy bude muset snést trvalý střídavý proud přibližně **4,1A**.

Napěťové dimenzování je zde odvozeno z rovnosti (4.3.21). Proto se musí vybrat kondenzátor s povolenou hodnotou trvalého SS napětí splňující podmínku:

$$V_{C_{REC}/DC} > V_{SMO/AV/\max.} \Rightarrow V_{C_{REC}/DC} = 100V \quad (6.1.29)$$

Bývá zvykem volit alespoň o 50% větší napětí než je očekávané provozní maximum, ovšem další vyšší normalizovaná hodnota je až 150V. Vzhledem k tomu, že rovnost (4.3.21) byla položena již se značnou rezervou dimenzování na 100V bude vyhovující. Případné napěťové špičky eliminují přítomné transily.

Na velikost výsledného zvlnění napětí má významný vliv především ekvivalentní



**Obrázek 6.5** : Náhradní schéma kondenzátoru

sériový odpor **ESR** a kapacita kondenzátoru. Další dva parametry vyplývající ze zjednodušeného náhradního modelu na **Obr. 6.5**, jsou ekvivalentní sériová indukčnost **ESL** a svodový odpor **R<sub>LEAK</sub>**. Protože hliníkové elektrolytické kondenzátory mají ESL při nízkých kmitočtech velmi malou, v řádu nH, výrobci jí často ani neuvádějí a její vliv na výsledné zvlnění bude zanedbatelný, nemusí být při výpočtech zohledněna. Svodový proud způsobený rezistorem **R<sub>LEAK</sub>** je obvykle také velmi malý a vliv má spíše na dlouhodobé klidové ztráty kondenzátoru. Co se týká ekvivalentního sériového odporu, nejsou zde kladeny zdaleka takové nároky jako budou na výstupu měniče. Maximální

přijatelnou velikost ESR lze spočítat:

$$ESR_{C_{REC}} < \frac{\Delta V_{C_{REC}/\max.}}{I_{C_{REC}/RMS}} = \frac{1,7}{4,07} \cong 0,42 \Omega \quad (6.1.30)$$

Splnit takový požadavek nebude obtížné, protože i standardní aluminiové kondenzátory s takto velkou kapacitou mají obvykle hodnotu ESR mnohem nižší. Aby se ušetřilo místo na plošném spoji, použije se kondenzátor opatřený šroubovým úchytem, který bude umístěn samostatně vedle DPS výkonové jednotky a motoru.

Proto bude lepší vybrat typ pro vyšší pracovní teplotu. Použit může být například kondenzátor, jehož parametry jsou uvedeny v **Tab. 6.3** a ukázka pouzdra s úchytem je na **Obr. 6.6**. Pokud jde o proudové dimenzování, je plně dostatečné, naopak zde bude značná rezerva.

Při střídavé polarizaci je ztrátový výkon na kondenzátoru dán především velikostí ESR. Nějakou roli zde hraje i svodový proud, který je nepatrný, pokud přiložené napětí je mnohem nižší než maximální povolené pracovní. Ztrátový výkon na **C<sub>REC</sub>** se tedy přibližně spočte:

$$P_{C_{REC}/\max.} = ESR_{C_{REC}} \cdot I_{C_{REC}/RMS}^2 = 14 \cdot 10^{-3} \cdot 4,07^2 \cong 0,232 W \quad (6.1.31)$$

Díky nízkému ESR bude v porovnání s diodami výkonová ztráta zde nepodstatná.

Výrobce: Epcos		Série: B41580	Typ: A9109M	Montáž: Šroubové vývody	Počet kusů: 1
Veličina	Význam	Hodnota	Jednotka	Podmínky	
C	Kapacita	10 000	μF	± 20%	
V <sub>R</sub>	Maximální trvalé pracovní napětí	100	V	DC	
t	Maximální povolená pracovní teplota	105	°C		
I <sub>AC/R</sub>	Jmenovitá hodnota povoleného trvalého zvlnění protékajícího proudu	11	A	AC ; f = 100Hz ; t = 105°C	
ESL	Maximální parazitní indukčnost	13	nH		
ESR	Maximální ekvivalentní sériový odpor	14	mΩ	f = 100Hz ; t = 20°C	
L x d	Rozměry: výška x průměr	105,7 x 51,6	mm		

Tabulka 6.3 : Parametry kondenzátoru použitého k filtraci napětí za usměrňovačem (převzato z [77])



Obrázek 6.6 : Ukázka pouzdra a úchytu použitého kondenzátoru Epcos B41580-A9109M (převzato a upraveno z [57])

Porovnat zvlnění usměrňovače před a po připojení této filtrační kapacity lze na oscilogramech **Obr. 6.7**. Průběhy jsou změřeny při vyšších otáčkách motoru, když jsou rozdíly patrnější. Činitel zvlnění se podle [155] obecně vypočte:

$$p_{ZV} = \frac{\Delta V_{OUT}}{V_{OUT}} \cdot 100\% \quad (6.1.32)$$

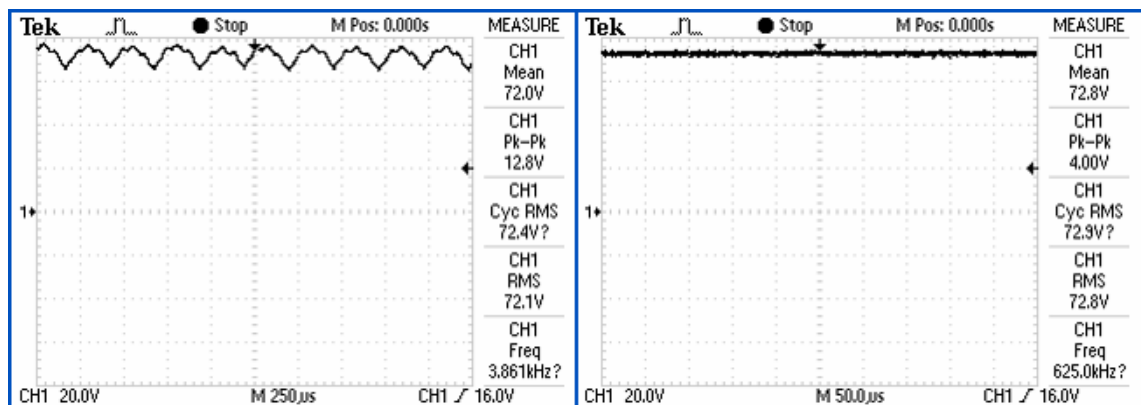
kde:  $\Delta V_{OUT}$  ... je zvlnění napětí na výstupu zdroje špička-špička ( $V$ )  
 $V_{OUT}$  ... je střední hodnota napětí na výstupu zdroje ( $V$ )

Činitel zvlnění před připojením  $C_{REC}$  podle **Obr. 6.7** byl naměřen:

$$p_{REC/SMO} = \frac{\Delta V_{SMO}}{V_{SMO/AV}} \cdot 100\% = \frac{12,8}{72,0} \cdot 100\% = 17\% \quad (6.1.33)$$

Činitel zvlnění po připojení filtračního kondenzátoru poklesl až na:

$$p_{REC/SMO@C_{REC}} = \frac{\Delta V_{SMO@C_{REC}}}{V_{SMO/AV@C_{REC}}} \cdot 100\% = \frac{4}{72,8} \cdot 100\% = 5,5\% \quad (6.1.34)$$



a) Bez použití výstupní filtrační kapacity

b) S připojenou výstupní filtrační kapacitou

Obrázek 6.7 : Porovnání zvlnění výstupního napětí šestipulsního usměrňovače při vysokých otáčkách generátoru

### 5.1.3 Výkonová ztráta usměrňovače a chlazení diod

Třífázový šestipulsní usměrňovač má oproti jiným druhům používaných zapojení účinnost obecně nejvyšší. Literatura uvádí, že může dosahovat až 98%. Je to dáno hlavně tím, že s rostoucím počtem fází se účinnost zvyšuje. S využitím katalogového listu použitých diod [82] a [153] může být nyní ověřeno, zdali je potřeba použít chladič, případně jak objemný. Celkové ztráty na jakékoli diodě jsou dány [133]:

$$P_D = P_{D/CON} + P_{D/REV} + P_{D/SW/ON} + P_{D/SW/OFF} \quad (6.1.35)$$

- kde:  $P_{D/CON}$  ... je výkon ztracený při vedení proudu otevřenou diodou v důsledku nenulového úbytku napětí, neboli ztráty vodivostní ( $W$ )  
 $P_{D/REV}$  ... je výkon ztracený na závěrně polarizované diodě v důsledku nenulových svodových proudů, neboli ztráty závěrné ( $W$ )  
 $P_{D/SW/ON}$  ... je výkon ztracený při komutaci diody ze stavu kdy je uzavřena, do stavu kdy je otevřena, neboli ztráty zapínací ( $W$ )  
 $P_{D/SW/OFF}$  ... je výkon ztracený při komutaci diody ze stavu kdy je otevřena, do stavu kdy je uzavřena, neboli ztráty vypínací ( $W$ )

Vodivostní ztráty se uplatňují vždy a lze je vypočítat:

$$P_{D/CON} = V_{T0} \cdot I_{F/AV} + r_d \cdot I_{F/RMS}^2 \quad (6.1.36)$$

- kde:  $V_{T0}$  ... je prahové napětí diody z datového listu ( $V$ )  
 $I_{F/AV}$  ... je střední hodnota proudu diodou ( $A$ )  
 $r_d$  ... je diferenciální odpor diody z datového listu ( $\Omega$ )  
 $I_{F/RMS}$  ... je efektivní hodnota proudu diodou ( $A$ )

Střední hodnota proudu tekoucího jednou diodou je již známa, ale pro výpočet vodivostních ztrát bude potřeba znát také efektivní hodnotu. Na grafech **Obř. 6.3** je možné spatřit, že průběh proudu diodami je obdélníkový s dobou trvání po jednu třetinu periody. Z definice efektivní hodnoty se tedy proud integrací spočte:

$$\begin{aligned} I_{F/RMS/Total} &= \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^{\frac{1}{3}T} I_{F/MAX}^2 t dt} = \sqrt{\frac{I_{F/MAX}^2}{T} \cdot \int_0^{\frac{1}{3}T} t dt} = \\ &= \sqrt{\frac{I_{F/MAX}^2}{T} \cdot [t]_0^{\frac{1}{3}T}} = \sqrt{\frac{I_{F/MAX}^2}{T} \cdot \left[ \frac{1}{3} \cdot T - 0 \right]} = \sqrt{\frac{I_{F/MAX}^2 \cdot T}{T \cdot 3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I_{F/MAX} = \\ &= I_{F/MAX} \cdot \sqrt{\delta_{REC}} = I_{F/MAX} \cdot \sqrt{\frac{1}{3}} \end{aligned} \quad (6.1.37)$$

kde:  $\delta_{REC} = 1/3$  ... je část periody po kterou je dioda otevřena (-)

Nyní je uvažováno, že proud se dělí mezi obě diody v jednom pouzdru přibližně rovnoměrně:

$$I_{F/RMS/REC/Total} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{2} \cdot I_{REC/OUT/max.} = \frac{55}{2 \cdot \sqrt{3}} \cong 15,88 A \quad (6.1.38)$$

Po dosazení do rovnice (6.1.36), vodivostní ztráty jedné diody v pouzdru budou:

$$P_{D/REC/CON} = 0,64 \cdot 9,17 + 0,0073 \cdot 15,88^2 \cong 7,71 W \quad (6.1.39)$$

Závěrné ztráty na jedné diodě se spočtou:

$$P_{D/REC/REV} = V_{LL/MAX} \cdot I_R \cdot (1 - \delta_{REC}) = 94,25 \cdot 0,008 \cdot \left(1 - \frac{1}{3}\right) \cong 0,5 W \quad (6.1.40)$$



Zapínací ztráty jsou u schottkyho diod tak malé, že nemá smysl se s nimi zaobírat. Ztráty vypínací se výrazněji uplatňují až při frekvencích nad 100 kHz a při frekvencích několika stovek kHz se mohou dokonce stát dominantními. Vzhledem k tomu, že usměrňovač bude zpracovávat napětí o frekvencích dosahujících maximálně jednotek kHz (4.3.17), mohou být tyto ztráty zanedbány také.

Přibližné maximální celkové ztráty na jedné diodě v pouzdru součástky tedy budou:

$$P_{D/REC/max.} = P_{D/REC/CON} + P_{D/REC/REV} = 7,71 + 0,5 = 8,21W \quad (6.1.41)$$

Celkové ztráty na usměrňovači jsou dány součtem ztrát na všech diodách, které vedou současně proud a ztrát na výstupním kondenzátoru:

$$P_{REC/max.} = 4 \cdot P_{D/REC/max.} + P_{C1/REC/max.} = 4 \cdot 8,21 + 0,232 \cong 33,07W \quad (6.1.42)$$

Protože během výpočtů byly použity pouze mezní hodnoty, výsledek je platný pro případ nejhorších podmínek.

Teplotný odpor je obecně dán vztahem:

$$R_g = \frac{\Delta \vartheta}{P_g} = \frac{\vartheta_a - \vartheta_m}{P_g} \quad (6.1.43)$$

- kde:  $R_g$  ... je tepelný odpor ( $^{\circ}C/W$ )  
 $\Delta \vartheta$  ... je tepelný spád mezi dvěma prostředími ( $^{\circ}C$ )  
 $P_g$  ... je tepelný výkon, neboli tepelný tok ( $W$ )  
 $\vartheta_a$  ... je teplota okolního prostředí (**a**mbient) ( $^{\circ}C$ )  
 $\vartheta_m$  ... je teplota sledovaného materiálu (**m**aterial) ( $^{\circ}C$ )

Jedná se o ekvivalentní vyjádření k ohmovu zákonu.

Protože výkonová jednotka se bude nacházet v blízkosti bloku motoru, kde může docházet ke značnému tepelnému vyzařování, maximální teplota okolního prostředí bude uvažována:

$$\vartheta_{a/max.} = 50^{\circ}C \quad (6.1.44)$$

Celkový tepelný odpor chladicí soustavy jakékoliv polovodičové součástky je obecně dán:

$$R_g = R_{g(j \rightarrow c)} + R_{g(c \rightarrow s)} + R_{g(s \rightarrow a)} \quad (6.1.45)$$

- kde:  $R_{g(j \rightarrow c)}$  ... je tepelný odpor styku PN přechodu s pouzdrém  
 (**j**unction  $\rightarrow$  **c**ase) ( $^{\circ}C/W$ )  
 $R_{g(c \rightarrow h)}$  ... je tepelný odpor styku pouzdra s chladičem,  
 (**c**ase  $\rightarrow$  **h**eatsink) ( $^{\circ}C/W$ )  
 $R_{g(h \rightarrow a)}$  ... je tepelný odpor styku chladiče s okolním prostředím  
 (**h**eatsink  $\rightarrow$  **a**mbient) ( $^{\circ}C/W$ )

S využitím předchozích vztahů a údajů z **Tab. 6.2**, lze spočítat jaká bude teplota čipu diody bez použití chladiče:

$$\begin{aligned} \vartheta_j &= \vartheta_a + P \cdot R_g = \\ &= \vartheta_{a/max.} + 2 \cdot P_{D/REC/max.} \cdot R_{g(j \rightarrow c)/D/REC} + 2 \cdot P_{D/REC/max.} \cdot R_{g(c \rightarrow a)/D/REC} = \\ &= 50 + 2 \cdot 8,21 \cdot 0,8 + 2 \cdot 8,21 \cdot 0,1 \cong 64,8^{\circ}C \end{aligned} \quad (6.1.46)$$

Maximální přípustná pracovní teplota čipu diody STPS30150CW je  $175^{\circ}C$ . Diody tedy nemusí být nutně doplňovány chladičem, protože oteplení není tak významné.

I přesto byly dva malé chladiče použity a to hlavně kvůli případnému zkratu na výstupu usměrňovače během testování, který by mohl díky malé tepelné kapacitě samotných součástek způsobit jejich rychlé tepelné přetížení. Na každém chladiči jsou osazeny tři diody.

Účinnost celého usměrňovače lze přibližně určit :

$$\begin{aligned}\eta_{REC} &= \frac{P_{REC/OUT/max.}}{P_{REC/IN}} \cdot 100\% = \frac{P_{REC/OUT/max.}}{P_{REC/OUT/max.} + P_{REC/max.}} \cdot 100\% = \\ &= \frac{550}{550 + 33,07} \cdot 100\% \cong 94,33\%\end{aligned}\tag{6.1.47}$$

kde:  $P_{REC/IN}$  ... je celkový výkon dodaný z generátoru do usměrňovače ( $W$ )

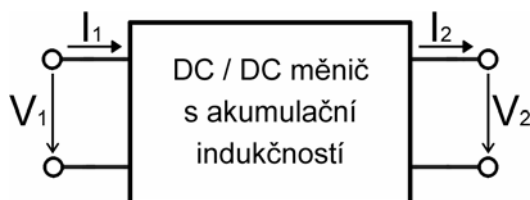
Po nějakou dobu byla zvažována také možnost použití řízených polovodičových prvků na místo diod, jako tyristorů či tranzistorů MOSFET, s úmyslem účinnost ještě zvýšit. Při dlouhodobějším provozu stroje na vyšší výkon by se díky tomu mohla ušetřit část paliva. Znamenalo by to ovšem výrazně složitější návrh tohoto bloku, který by navíc musel být řízen buď mikrokontrolérem z řídicí jednotky, nebo pomocí specializovaného integrovaného obvodu osazeného přímo na výkonové jednotce. Po zvážení přínosu bylo od tohoto nápadu ustoupeno s tím, že zde zůstane prostor pro případné budoucí vylepšení.

## 5.2 Výkonový DC/DC měnič

Hodnota stejnosměrného napětí dodávaného z bloku usměrňovače, se může pohybovat v širokém rozmezí a podléhat zbytkovému zvlnění. Výkonový DC/DC měnič je spínaný zdroj, který má za úkol toto napětí upravit na konstantní velikost a provést jeho stabilizaci s omezením zvlnění na nejvyšší povolenou hodnotu.

Různých druhů měničů existuje velký počet. Podrobně se tomuto tématu věnuje mnoho literatury [154, 155, 158, 159]. Vzhledem k požadovanému výstupnímu výkonu agregátu lze uvažovat jen o zapojeních s akumulací indukčností. Různá zapojení se spínanými kapacitami lze ignorovat, používají se výhradně u měničů malých výkonů, často s bateriovým napájením, kde je kladen důraz spíše na velmi vysokou účinnost.

Otázkou je, zdali bude potřeba volit měnič s galvanickým oddělením vstupu od výstupu. Vzhledem k tomu, že vstupem je napětí z generátoru, jehož vinutí je od okolí izolováno, celé zařízení je přenosné a všechny části stroje jsou vodivě pospojovány, z hlediska připojeného spotřebiče se dá stroj uzemnit v místě, kde je zrovna používán. Proto lze při výběru vhodného měniče vynechat také všechna zapojení využívající oddělovacích transformátorů.



Obrázek 6.8 : DC/DC měnič jako dvojbran

Pokud se uvažuje akumulací měnič s indukčností jako dvojbran na **Obr. 6.8**, z hlediska vstupně výstupních poměrů velikosti napětí existuje pět základních variant zapojení:

$$\text{Invertující (FLYBACK, BUCK-BOOST), kde: } V_2 \leq -V_1 \quad (6.2.1)$$

$$\text{Zvyšující (STEP-UP, BOOST), kde: } V_2 > V_1 \quad (6.2.2)$$

$$\text{Snižující (STEP-DOWN, BUCK), kde: } V_2 \leq V_1 \quad (6.2.3)$$

$$\text{Zvyšující i snižující invertující (ČUK), kde: } V_2 \leq -V_1 \vee V_2 > -V_1 \quad (6.2.4)$$

$$\text{Zvyšující i snižující (SEPIC), kde: } V_2 \leq V_1 \vee V_2 > V_1 \quad (6.2.5)$$

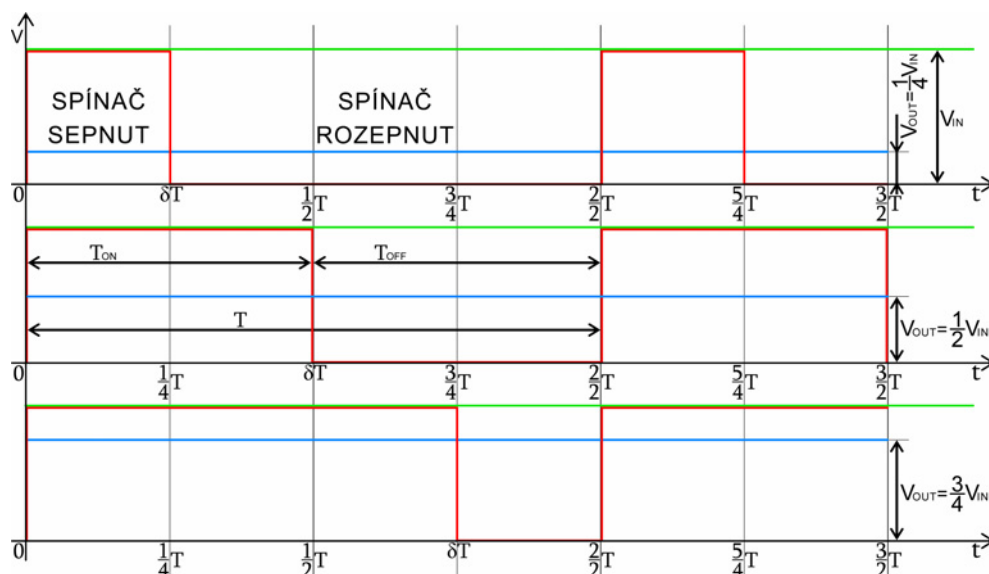
Nejjednodušší varianta zvyšujícího měniče byla stručně popsána ve stati o inverteru v kapitole 2.4. Protože generátor je vybrán tak, aby poskytoval dostatečné napětí za všech běžných provozních podmínek, bude vyhovovat měnič ze skupiny napětí snižujících.

### 5.2.1 Pracovní cyklus měniče a pulzně šířková modulace

Každý měnič musí obsahovat minimálně jeden spínač, například tranzistor. Regulace výstupního napětí probíhá prostřednictvím jeho řízení. Tranzistor je buď zcela uzavřen nebo zcela otevřen, takže vstupní napětí s amplitudou  $V_{IN}$  je dvoustavově modulováno. Je potřeba zajistit, aby se změny stavů odehrávaly v co nejkratším čase, protože jinak vzrůstají spínací ztráty a účinnost celého zařízení se výrazně zhoršuje, zvláště pokud pracuje na vysokých frekvencích.

Realizovaný měnič bude ke stabilizaci napětí využívat pulzně šířkovou modulaci – PWM. Situaci pro její tři různé případy vykresluje **Obr. 6.9**.

Je zřejmé, že tímto způsobem lze přesně dávkovat potřebné množství energie, za účelem dosažení konstantní střední hodnoty napětí na výstupu měniče.



Obrázek 6.9 : PWM modulace a pracovní cyklus DC/DC měniče

Jedná se o periodický děj pro který platí:

$$T = konst. \Rightarrow \frac{1}{T} = f = konst. , \frac{T_{ON}}{T_{OFF}} \neq konst. \quad (6.2.6)$$

- kde:  $T$  ... je perioda pracovního cyklu (s)  
 $f$  ... je frekvence (Hz)  
 $T_{ON}$  ... je doba po kterou je spínač v jedné periodě sepnut (s)  
 $T_{OFF}$  ... je doba po kterou je spínač v jedné periodě rozepnut (s)

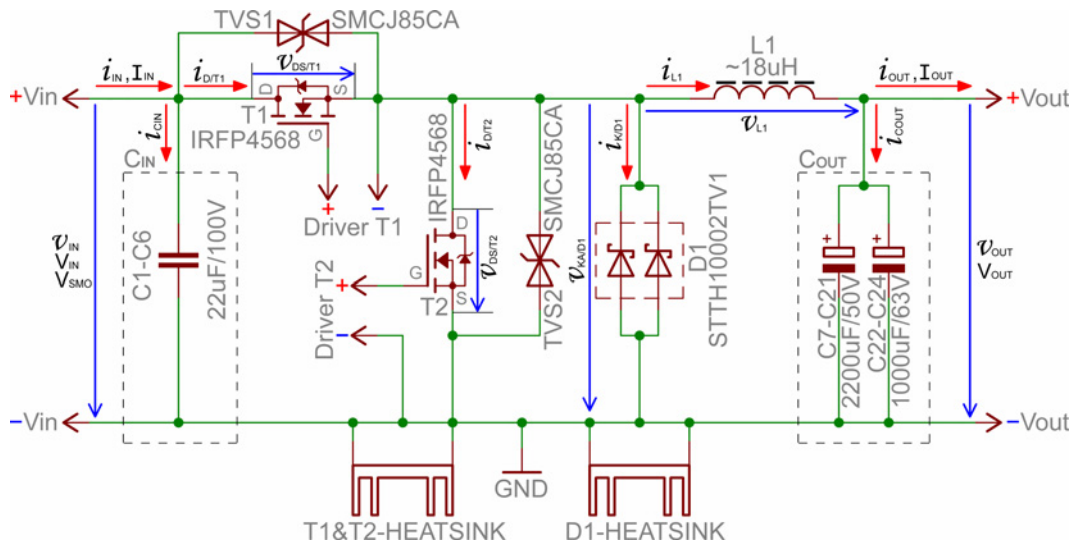
Dále se zavádí činitel plnění napětěových pravoúhlých impulsů:

$$\delta = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad (6.2.7)$$

## 5.2.2 Topologie a princip funkce měniče

Ze skupiny snižujících DC/DC měničů připadá v úvahu zapojení v literatuře označované „BUCK“, jehož schéma se nachází na **Obr. 6.10**. Průběhy všech podstatných napětí a proudů v obvodu jsou znázorněny na grafech **Obr. 6.11** a **6.12**, přičemž se předpokládá, že všechny obvodové prvky mají ideální vlastnosti a na výstup je připojena pouze odporová zátěž, která ve schématu zakreslena není. Budící obvody tranzistorů MOSFET budou řešeny samostatně.

Měnič obsahuje tři základní součástky, kterými jsou spínač, rekuperační dioda a akumulační indukčnost. Hlavní spínač je zde tranzistor T1, zapojený sériově se zdrojem. Vedlejším spínačem je tranzistor T2, který je zapojen paralelně s rekuperační, neboli nulovou diodou D1. Tyto dvě součástky pracují v tandemu, tj. T2 je spínán souhlasně s otevřením D1. Proud se tedy dělí mezi oba prvky, čímž je docíleno lepší účinnosti měniče, protože tranzistor MOSFET má mnohem menší odpor kanálu v sepnutém stavu, než dioda v propustném směru. Takto koncipovaný sestupný měnič bývá v literatuře označován jako synchronní, protože řízení obou spínačů musí být přesně koordinováno.



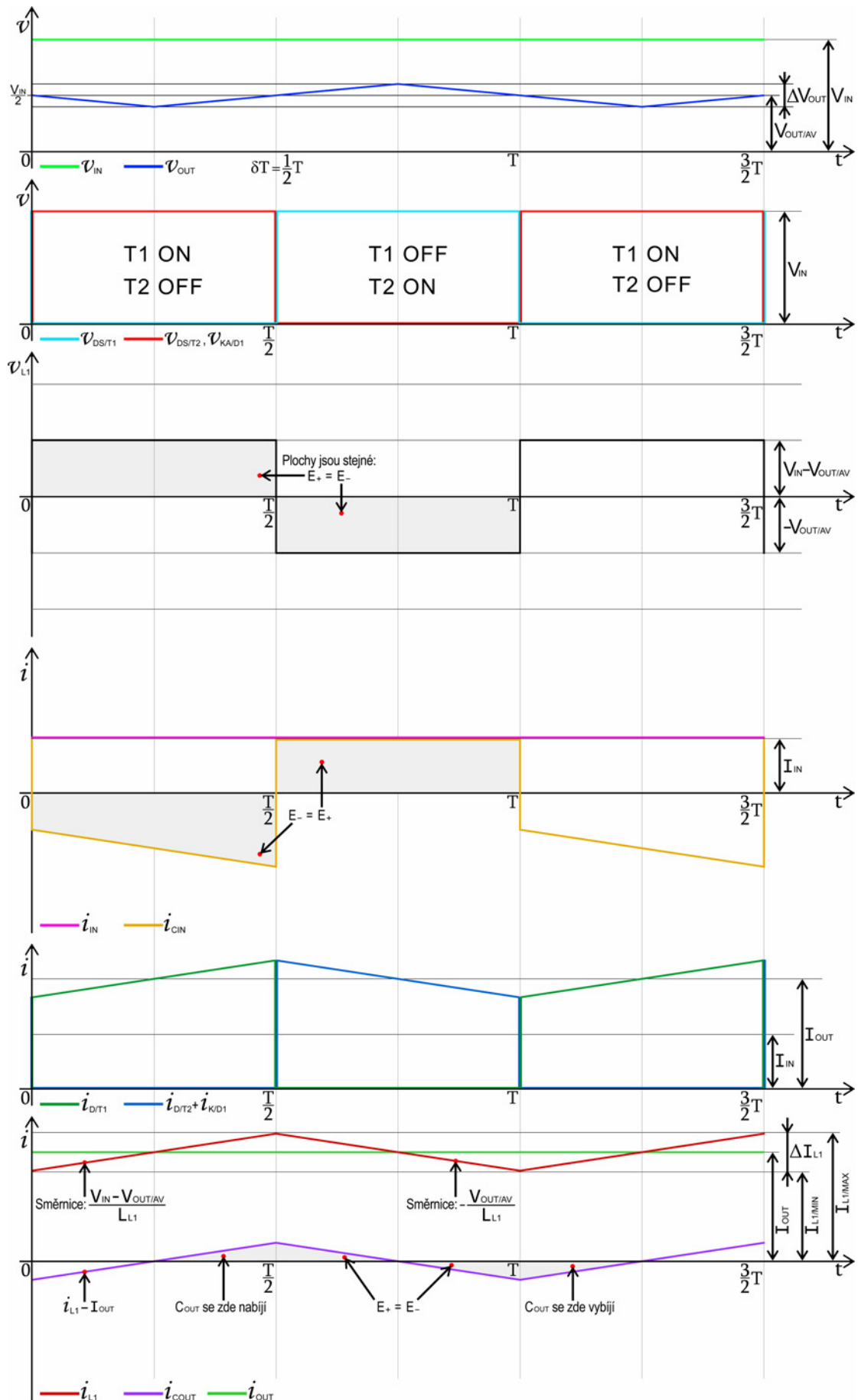
**Obrázek 6.10** : Schéma zapojení snižujícího akumulárního měniče s topologií „BUCK“

Zapojení lze pro účely popisu rozdělit na několik částí a to modulační, filtrační, rekuperační a ochrannou. Tranzistor T1 provádí pulzně šířkovou modulaci vstupního stejnosměrného napětí s amplitudou  $V_{IN}$ , které dále upravuje výstupní LC filtr, tvořený akumulární indukčností L1 a baterií kondenzátorů C7 až C24. Tento filtr má výrazný akumulární charakter, aby uchoval energii pro zásobování spotřebiče v době, kdy je T1 rozepnut. Proto musí být jádro L1 z feromagnetického materiálu a kapacita  $C_{OUT}$  poměrně vysoká. Z frekvenčního hlediska se jedná o dolní propust. Kapacita vstupního filtračního kondenzátoru složeného z C1 až C6 se v podstatě sčítá s výstupní filtrační kapacitou usměrňovače  $C_{REC}$ , rozdíl je hlavně v umístění na DPS.

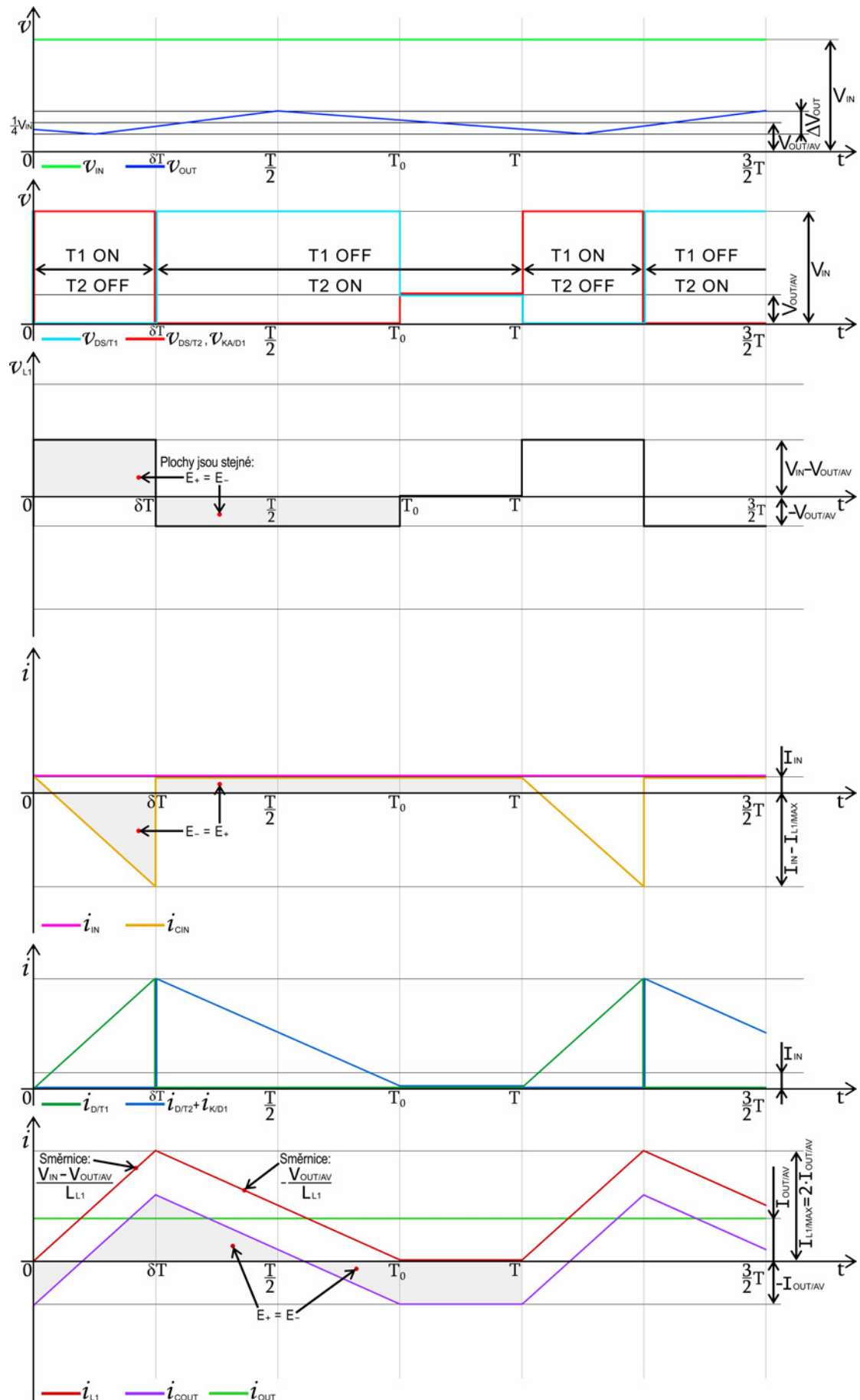
Vzhledem k fyzikálním vlastnostem induktoru, se v jeho elektromagnetickém poli během intervalu  $T_{ON}$  (**Obr. 6.11**) pracovního cyklu obvodu ukládá značná energie, která musí být během intervalu  $T_{OFF}$  nějak spotřebována. Její rekuperace se provádí v podstatě z několika důvodů. Jednak kvůli zajištění nízkého zvlnění výstupního napětí, protože proud do zátěže může díky tomu protékat nepřerušovaně. Dále kvůli zachování rozumné účinnosti měniče, protože jinak by vznikaly na tlumivce vysokonapěťové překmity, které by bylo nutné eliminovat tlumícím obvodem, kde by se energie přeměnila neúčinně na teplo. S překmity by se také muselo počítat při dimenzování všech ostatních součástí, aby nedošlo k jejich poškození. Přítomnost induktoru L1 je zde nezbytná také z důvodu, že jinak by vlivem vysokého impulsního nabíjecího proudu do  $C_{OUT}$  docházelo při sepnutí T1 k jeho velkému namáhání.

Poslední část obvodu se skládá z obousměrných ochranných diod transil D2 a D3 určených k eliminaci náhodných impulsních přepětí na přechodech drain-source u obou tranzistorů.

Při popisu činnosti obvodu lze vycházet z **Obr. 6.11**. V časovém intervalu  $\{0; 0,5T\}$  je sepnut pouze T1, kondenzátor  $C_{IN}$  se vybíjí a dioda D1 je uzavřena, protože napětí na  $C_{IN}$  ji polarizuje závěrně. Akumulární indukčnost L1 v tomto intervalu shromažďuje energii do svého magnetického pole a zároveň skrz ni protéká proud do zátěže, který také v části periody nabíjí výstupní kondenzátor  $C_{OUT}$ . V časovém intervalu navazujícím, to jest  $\{0,5T; T\}$  je tranzistor T1 uzavřen a vstupní kondenzátor  $C_{IN}$  se nabíjí. Cívka se snaží energii nahromaděnou v předchozí periodě odevzdat zpět do obvodu, proto se stane zdrojem a na jejích svorkách dojde ke komutaci napětí. Tento jev je důsledkem Lenzova zákon. Obvod se nyní uzavírá přes rekuperační diodu D1 a tranzistor T2, který je v této periodě otevřen. Výstupní kondenzátor  $C_{OUT}$  nyní částečně pomáhá dodávat energii do zátěže.



**Obrázek 6.11** : Průběhy napětí a proudů akumulárního měniče s topologií typu „BUCK“, pro případ kontinuálního režimu a činitele plnění řídicího impulsu  $\delta = 0,5$



**Obrázek 6.12** : Průběhy napětí a proudů akumulčního měniče s topologií typu „BUCK“, pro případ diskontinuálního režimu a činitele plnění řídicího impulsu  $\delta = 0,25$

Z hlediska proudu  $i_{L1}$ , může obvod pracovat ve třech režimech. Spojitým (continual), hraničním (boundary) a nespojitým (discontinual). Závísí to na způsobu řízení a parametrech použitých součástek, především indukčnosti akumulární tlumivky. V kontinuálním režimu proud tlumivkou nepoklesne na nulu v rozsahu celé periody pracovního cyklu. Pro tento případ platí grafy na **Obr. 6.11**. Při určení velikosti výstupního napětí v tomto režimu se vychází z toho, že napěťové plochy induktoru (v grafu vyznačeny) si musí být v důsledku Zákona zachování energie rovny. Dodaná energie musí být opět odevzdána, proto platí:

$$(V_{IN} \cdot \delta \cdot T) - (V_{OUT} \cdot \delta \cdot T) = (V_{OUT} \cdot T) - (V_{OUT} \cdot \delta \cdot T) \quad (6.2.8)$$

Po úpravě lze získat vztah pro teoretickou hodnotu výstupního napětí sestupného měniče v kontinuálním režimu:

$$V_{OUT/con.} = \delta \cdot V_{IN} \quad (6.2.9)$$

Výstupní proud v kontinuálním režimu se spočte:

$$I_{OUT/con.} = \frac{1}{2} \cdot (I_{L1/MAX} + I_{L1/MIN}) \cdot (1 - \delta) \quad (6.2.10)$$

V režimu diskontinuálním naopak proud tekoucí tlumivkou vždy před skončením periody pracovního cyklu na nulu poklesne, což lze pozorovat na grafech **Obr. 6.12**. Zde je situace o něco složitější a velikost výstupního napětí závisí nejen na činiteli plnění, ale i na hodnotě indukčnosti tlumivky a velikosti výstupního proudu:

$$V_{OUT/dis.} = \frac{V_{IN}^2}{\frac{2 \cdot I_{OUT} \cdot L_{L1}}{T \cdot \delta^2} + V_{IN}} \quad (6.2.11)$$

Výstupní proud měniče v diskontinuálním režimu se spočte:

$$I_{OUT/dis.} = \frac{(V_{IN} - V_{OUT}) \cdot \delta \cdot T \cdot \left( \delta + \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{V_{OUT}} \cdot \delta \right)}{2 \cdot L_{L1}} \quad (6.2.12)$$

Z hlediska zvlnění výstupního napětí je žádoucí, aby měnič pracoval pokud možno stále v režimu kontinuálním. Nicméně to lze samozřejmě zajistit pouze v určitém rozsahu proudu tekoucího do zátěže. S malou připojenou zátěží, bude měnič vždy pracovat v režimu nespojitým a to v každém případě během zapnutí zařízení, až do okamžiku překročení hodnoty minimální zátěže pro režim spojitý.

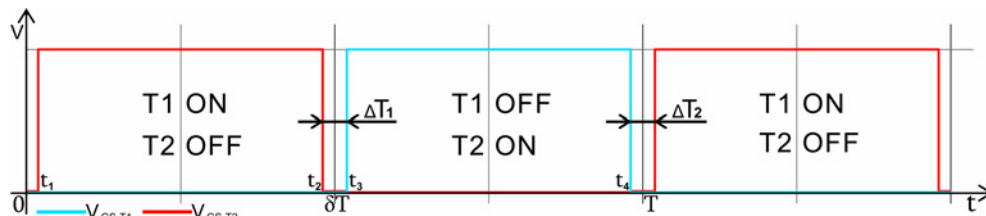
V hraničním režimu proud induktorem poklesne v každé periodě pracovního cyklu vždy přibližně na nulu. Tento režim se využívá především při řízení s proměnnou frekvencí, kdy lze dosáhnout zmenšení objemu některých součástek, přesnější regulace při zatížení a menšího EM rušení. Často s ním pracují IO spínaných zdrojů menších výkonů.

### 5.2.3 Řízení měniče a volba pracovního kmitočtu

Tranzistory T1 a T2 jsou ovládány externě z řídicí jednotky. Musí se striktně dodržet, aby byl v jeden časový okamžik sepnut vždy pouze jeden z nich. Nastane-li situace kdy dojde k sepnutí současně obou, způsobí to zkrat a jejich téměř jisté zničení proudovým přetížením. Řízení tranzistorů při odladění firmwaru bylo tedy potřeba provádět s velkou opatrností. Méně kritický je případ, když jsou oba tranzistory v jeden časový okamžik rozepnuty.



Tedy zastane úlohu tranzistoru T2 rekuperační dioda D1, ale klesá tím účinnost měniče a po odčerpání energie z kondenzátoru  $C_{OUT}$  dochází v krátkém čase k poklesu velikosti výstupního SS napětí. Proto je třeba se této situaci pokud možno vyhnout rovněž. Reálně je vyhovující mezi jednotlivé operace změny stavů tranzistorů zařadit pouze drobné zpoždění v podobě intervalů  $\Delta T_1$  a  $\Delta T_2$ , také známých jako „Dead Time“, jak je ukázáno na **Obr. 6.13**. Takové ošetření eventuelní problémy spolehlivě eliminuje.



**Obrázek 6.13** : Ukázka časování při řízení tranzistorů synchronního měniče typu „BUCK“

Před výběrem konkrétních součástek a výpočtem hodnot, musí být nejprve stanovena frekvence PWM signálu k řízení tranzistorů. Po provedení série experimentů bylo nakonec stanoveno:

$$f_{PWM} = 100kHz \Rightarrow T_{PWM} = \frac{1}{f_{PWM}} = \frac{1}{10^5} = 10\mu s \quad (6.2.13)$$

Vzhledem k tomu, že pracovní kmitočty měničů se v dnešní době pohybují dokonce v řádu jednotek až desítek MHz, teoreticky by se dal použít kmitočet i mnohem vyšší. Při správném návrhu tím lze dosáhnout lepší účinnosti a menších rozměrů zařízení. Ovšem bylo by to za cenu daleko vyšších nároků v podstatě na veškeré součástky, především spínače, jejich budiče včetně napaječe, ale i jádro akumulární tlumivky.

Aby byla regulace napětí dostatečně plynulá, musela se také zajistit odpovídající jemnost kroku šířky pulsu PWM signálu. To se z počátku jevilo jako omezující faktor, protože bez použití přídavných externích obvodů je minimální šířka pulsu dána pouze možnostmi mikropočítače na řídicí jednotce, konkrétně rychlostí jakou je schopen vykonávat instrukce. Běžně rozšířené PWM rutiny v tomto ohledu bohužel nepodávaly uspokojivé výsledky, navíc dosahovaly jen jednotek, maximálně desítek kHz. Teprve poté co byl kód napsán kompletně v assembleru, se podařilo při zvolené frekvenci 100kHz, mezi 0% a 100% šířky pulsu PWM signálu dosáhnout počtu kroků:

$$n_{PWM/Step/100\%} = 960 \quad (6.2.14)$$

Bylo ověřeno, že takový rozsah pro zajištění plynulé regulace výstupního napětí více než postačuje. Naopak kvůli zvýšení rychlosti odezvy regulační smyčky musel být nakonec jeden krok úmyslně redukován na jedno procento:

$$n_{PWM/Step/1\%} = \frac{n_{PWM/Step/100\%}}{100} = \frac{960}{100} = 9,6 \quad (6.2.15)$$

Délka jednoho kroku šířky pulsu řídicího PWM signálu tedy bude:

$$t_{PWM/Step/1\%} = \frac{T_{PWM}}{n_{PWM/Step/100\%}} \cdot n_{PWM/Step/1\%} = \frac{10^{-5}}{960} \cdot 9,6 = 100ns \quad (6.2.16)$$

## 5.2.4 Výběr tranzistorů a diod

Pokud jde o spínače, lze v zásadě uvažovat pouze o tranzistorech MOSFET, případně IGBT. Vzhledem k tomu, že moduly IGBT se nasazují při nutnosti řízení výkonů mnohem vyšších než jsou zde, budou použity tranzistory MOSFET. Rekuperační dioda D1 bude typu schottky, kvůli zajištění malých ztrát. Volba konkrétních součástí je podmíněna maximálními hodnotami obvodových veličin.

Při zanedbání parazitních jevů, pro špičkovou hodnotu proudu tekoucího skrz tranzistor T1 platí:

$$I_{D/T1/MAX} = I_{OUT/AGR/DC/max.} + \frac{\Delta I_{L1}}{2} \quad (6.2.17)$$

kde:  $I_{D/T1/MAX}$  ... je špičkový proud tekoucí do drainu tranzistoru T1 (A)  
 $\Delta I_{L1}$  ... je zdvih magnetizačního proudu tlumivky L1 (A)

Zdvih proudu tlumivkou měniče se obecně spočte:

$$\Delta I_L = k \cdot I_{OUT/AV} \quad (6.2.18)$$

kde:  $k$  ... je koeficient zvlnění proudu tekoucího tlumivkou (-)  
 $I_{OUT/AV}$  ... je střední hodnota proudu tekoucího do zátěže, která zde odpovídá proudu  $I_{OUT/AGR/DC/max.}$  (A)

Podle [158] se obvykle volí  $k < 0,2$  aby napětí na baterii výstupních kondenzátorů  $C_{OUT}$  nebylo příliš zvlněno. Jiná literatura [121-124] uvádí, že běžnější je volit tento koeficient spíše v rozsahu 0,2 až 0,5. Každopádně menší hodnota vede na větší indukčnosti tlumivky a menší kapacity výstupních kondenzátorů. Zde bude koeficient stanoven na základě dříve určeného minimálního proudu, při kterém by  $k$  dosažení malého zvlnění výstupního napětí měl měnič ještě pracovat v kontinuálním režimu:

$$k = \frac{2 \cdot I_{OUT/AGR/DC/min.}}{I_{OUT/AGR/DC/max.}} = \frac{2 \cdot 3,5}{40} = 0,175 \quad (6.2.19)$$

Zvlnění proudu tekoucího tlumivkou potom bude:

$$\Delta I_{L1} = k \cdot I_{OUT/AGR/DC/max.} = 0,175 \cdot 40 = 7 A \quad (6.2.20)$$

Minimální hodnota proudu tekoucího tlumivkou se spočte:

$$I_{L1/MIN} = I_{OUT/AGR/DC/max.} - \frac{\Delta I_{L1}}{2} = 40 - \frac{7}{2} = 36,5 A \quad (6.2.21)$$

Po dosažení do (6.2.17), bude špičkový proud tranzistorů T1 i T2:

$$I_{L1/MAX} = I_{D/T1/MAX} = I_{D/T2/MAX} = 40 + \frac{7}{2} = 43,5 A \quad (6.2.22)$$

Což je zároveň špičková hodnota proudu tekoucího tlumivkou L1, neboli maximální magnetizační proudu.

Napětí stanovené v (4.3.21) lze považovat za největší jaké se na přechodu drain-source tranzistoru T1 může teoreticky vyskytnout. Mělo by se tedy zajistit, aby maximální povolené trvalé závěrné napětí vybraného tranzistoru splnilo podmínku:

$$V_{DSS/T1} > V_{SMO/AV/max.} \quad (6.2.23)$$

Dále je nutné zaobírat se tranzistorem T2 a diodou D1. Bude-li uvažováno zjednodušení, že proud je dělen rovnoměrně mezi obě součástky, může se psát:

$$I_{D/T2/MAX/teor.} = I_{K/D1/MAX/teor.} = \frac{1}{2} \cdot I_{L1/MAX} = \frac{1}{2} \cdot 43,5 = 21,75A \quad (6.2.24)$$

kde:  $I_{D/T2/MAX/teor.}$  ... je pomyslný špičkový proud tekoucí do drainu T2 (A)  
 $I_{K/D1/MAX/teor.}$  ... je pomyslný špičkový proud tekoucí diodou D1 (A)

Ovšem taková situace reálně nenastane, protože tranzistor má odpor kanálu v sepnutém stavu výrazně menší než je dynamický odpor diody. Poteče jím tedy proud mnohem větší. Pokud ale k jeho sepnutí v dané periodě například chybou řízení nedojde ve stanovený čas, nebo dokonce vůbec, veškerý proud poteče diodou D1. Bude ji tedy pro jistotu lepší dimenzovat na proud oproti této úvaze dvojnásobný, takže zůstává v platnosti ustanovení (6.2.22) a za špičkový proud diodou lze považovat:

$$I_{K/D1/MAX} = I_{L1/MAX} \quad (6.2.25)$$

Pro bezpečné napěťové dimenzování by se mělo zajistit, aby hodnota závěrného napětí diody D1 a povolené napětí přechodu drain-source tranzistoru T2, splňovalo nerovnost:

$$V_{DSS/T2} \geq V_{RRM/D1} > V_{IN/DC/max.} + V_{OUT/AGR/DC/max.} = 90 + 15 = 105V \quad (6.2.26)$$

Je to z toho důvodu, že když T1 vypne, může se zde na okamžik objevit napětí z L1 a C<sub>OUT</sub> v sérii. Opět platí, že povolené trvalé závěrné napětí obou součástek by se mělo volit ještě o něco větší.

Z dostupných součástek byly na základě provedených úvah a kalkulací vybrány tranzistory a dioda, jejichž parametry jsou uvedeny v **Tab. 6.4** a **6.5**. Pouzdra a zapojení vývodů se nachází na **Obr. 6.14** a **6.15**.

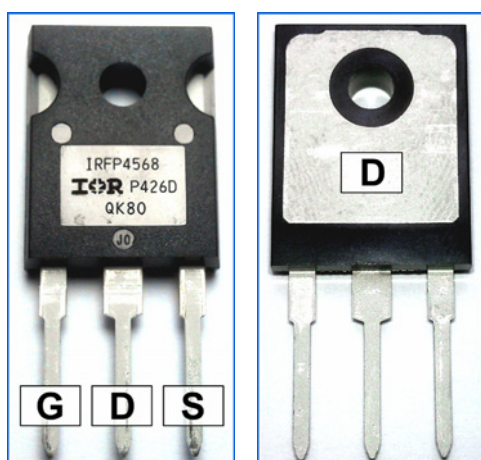
Průrazné napětí transilů TVS1 a TVS2 bude vzhledem k povolenému napětí V<sub>DSS</sub> a maximálnímu napětí v obvodu dle (6.2.23) a (6.2.26) zvoleno 85V. Veškeré obvody na všech modulech napájených ze SMO, jsou jinak chráněny proti přepětí transily přímo v bloku usměrňovače. Při výběru ochranných diod posloužil katalog [84].

Typové označení tranzistoru: RFP4568PbF		Počet použitých kusů: 2		
Výrobce: International rectifier		Pouzdro: TO-247AC		
Veličina	Význam	Hodnota	Jednotka	Podmínky
V <sub>BR/DSS/MIN</sub>	Minimální průrazné napětí přechodu Drain-Source	150	V	V <sub>GS</sub> = 0V ; I <sub>D</sub> = 250μA
I <sub>D/MAX</sub>	Maximální přípustný kontinuální proud do drainu	121	A	T <sub>C</sub> = 100°C ; V <sub>GS</sub> = 10V
R <sub>DS/ON/MAX</sub>	Maximální odpor vodivého kanálu Drain-Source	5,9	mΩ	V <sub>GS</sub> = 10V ; I <sub>D</sub> = 103A
V <sub>GS/MAX</sub>	Maximální přípustné napětí přechodu Gate-Source	± 30	V	
V <sub>GS/Threshold/MAX</sub>	Maximální prahové napětí	5	V	V <sub>DS</sub> = V <sub>GS</sub> ; I <sub>D</sub> = 250μA
I <sub>GSS/MAX</sub>	Maximální svodový proud z elektrody Gate do elektrody Source	± 100	nA	V <sub>GS</sub> = ± 20V
I <sub>DSS/MAX</sub>	Maximální svodový proud z elektrody Drain do elektrody Source	250	μA	V <sub>DS</sub> = 150V ; V <sub>GS</sub> = 0V ; T <sub>J</sub> = 125°C
Q <sub>G/MAX</sub>	Maximální celkový náboj hradla	227	nC	I <sub>D</sub> = 103A ; V <sub>DS</sub> = 75V ; V <sub>GS</sub> = 10V
R <sub>G/Int./TYP</sub>	Typická hodnota vnitřního odporu řídicí elektrody	1	Ω	
t <sub>Delay/ON</sub> + t <sub>Rise</sub>	Typická doba úplného sepnutí	146	ns	V <sub>DD</sub> = 98V ; I <sub>D</sub> = 103A ; R <sub>Gate</sub> = 1,0Ω ; V <sub>GS</sub> = 10V
t <sub>Delay/OFF</sub> + t <sub>Fall</sub>	Typická doba úplného rozepnutí	131	ns	
R <sub>θ(j-c)</sub>	Tepelný odpor vazby čip-pouzdro	0,29	°C/W	
T <sub>J(max.)</sub>	Maximální pracovní teplota čipu	175	°C	

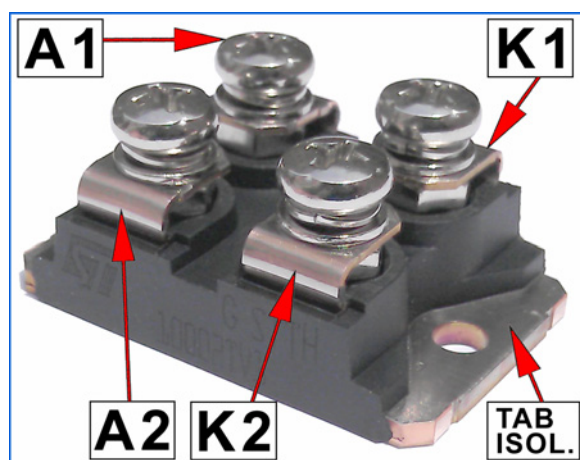
Tabulka 6.4 : Nejdůležitější parametry použitých tranzistorů IRFP4568PbF (převzato z [85])

Typové označení diody: STTH10002TV1		Počet použitých kusů: 1		
Výrobce: ST Microelectronics		Pouzdro: ISOTOP		Počet diod v pouzdru: 2
Veličina	Význam	Hodnota	Jednotka	Podmínky
$V_{RRM}$	Maximální opakovatelné špičkové závěrné napětí	200	V	$T_J = 25^\circ\text{C}$
$I_{F(AV)}$	Maximální přípustný trvalý průměrný proud v propustném směru	50	A	$T_C = 100^\circ\text{C}$ ; $\delta = 0,5$
$V_F$	Maximální úbytek napětí na diodě v propustném směru	1,00	V	$T_J = 125^\circ\text{C}$ ; $I_F = 100\text{A}$
$V_{F0}$	Úbytek napětí na diodě v propustném směru pro výpočet ztrát	0,63	V	$T_J = 150^\circ\text{C}$ ; pouze pro výpočet ztrát
$r_d$	Diferenciální odpor diody pro výpočet ztrát	0,0034	$\Omega$	$T_J = 150^\circ\text{C}$ ; pouze pro výpočet ztrát
$I_R$	Maximální závěrný svodový proud	500	$\mu\text{A}$	$V_R = 200\text{V}$ ; $T_J = 125^\circ\text{C}$
$R_{\theta(j-c)}$	Tepelný odpor vazby čip-pouzdro	0,55	$^\circ\text{C}/\text{W}$	
$T_{j(max.)}$	Maximální pracovní teplota čipu	150	$^\circ\text{C}$	

Tabulka 6.5 : Nejdůležitější parametry použité diody STTH10002TV1 (převzato z [83])



Obrázek 6.14 : Ukázka pouzdra TO-247AC a zapojení vývodů tranzistoru IRFP4568PbF



Obrázek 6.15 : Ukázka pouzdra ISOTOP a zapojení vývodů diody STTH10002TV1

### 5.2.5 Návrh a výroba tlumivky

Při návrhu sestupného měniče je obvykle zvykem začínat výstupní tlumivkou. Ta musí být navržena s použitím hodnot obvodových veličin pro nejhorší situaci jakou lze za bezporuchového stavu očekávat, což je maximální výstupní proud, při nejvyšším vstupním napětí. Dále protože výstupní napětí bude v omezeném rozsahu regulovatelné, je potřeba uvažovat jeho maximální nastavitelnou velikost. Také budou zohledněny úbytky na součástkách, což vyústí ve výpočet mírně vyšší indukčnosti. Postupy a podrobné odvození vztahů lze nalézt například v literatuře [158, 159, 121-127]. Při požadavku chodu měniče v kontinuálním režimu se minimální potřebná indukčnost tlumivky  $L_1$  vypočítá pomocí vztahu:

$$L_{L1/min.} = \frac{(V_{IN/AV/max.} - V_{T1/ON/Drop} - V_{OUT/AV/max.})}{k \cdot I_{OUT/AV} \cdot f_{PWM}} \cdot \delta = \frac{(V_{SMO/AV/max.} - V_{T1/ON/Drop} - V_{OUT/AGR/DC/max.}) \cdot (V_{OUT/AGR/DC/max.} + V_{T2||D5/ON/Drop})}{(V_{SMO/AV/max.} - V_{T1/ON/Drop} + V_{T2||D1/ON/Drop}) \cdot \Delta I_{L1} \cdot f_{PWM}} \quad (6.2.27)$$

kde:  $V_{IN/AV/max.}$  ... je střední hodnota nejvyššího vstupního napětí měniče ( $V$ )  
 $V_{OUT/AV/max.}$  ... je střední hodnota nejvyššího výstupního napětí měniče ( $V$ )  
 $V_{T1/ON/Drop}$  ... je úbytek napětí na tranzistoru T1 v sepnutém stavu ( $V$ )  
 $V_{T2||D1/ON/Drop}$  ... je úbytek napětí na tranzistoru T2 v sepnutém stavu, paralelně s úbytkem na otevřené diodě D1 ( $V$ )

Největší úbytek napětí na tranzistorech T1 a T2 je dán:

$$\begin{aligned} V_{T1/ON/ Drop} &= V_{T2/ON/ Drop} = R_{DS/ON/T1/max.} \cdot I_{OUT/AGR/DC/max.} = \\ &= R_{DS/ON/T2/max.} \cdot I_{OUT/AGR/DC/max.} = 5,9 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cong 0,236V \end{aligned} \quad (6.2.28)$$

kde:  $R_{DS/ON/Tx/max.}$  ... je maximální odpor kanálu tranzistorů z datového listu ( $\Omega$ )

Přibližný úbytek napětí na tranzistoru T2, zapojeného paralelně s diodou D1 bude:

$$V_{T2||D1/ON/ Drop} = \frac{V_{T2/ON/ Drop} \cdot \frac{V_{F/D1/max.}}{2}}{V_{T2/ON/ Drop} + \frac{V_{F/D1/max.}}{2}} = \frac{0,236 \cdot \frac{0,77}{2}}{0,236 + \frac{0,77}{2}} \cong 0,146V \quad (6.2.29)$$

kde:  $V_{F/D1/max.}$  ... je maximální úbytek napětí na diodě D1 z datového listu, přičemž v jejím pouzdru jsou dvě paralelně spojené ( $V$ )

Po dosazení do původní rovnice se spočte:

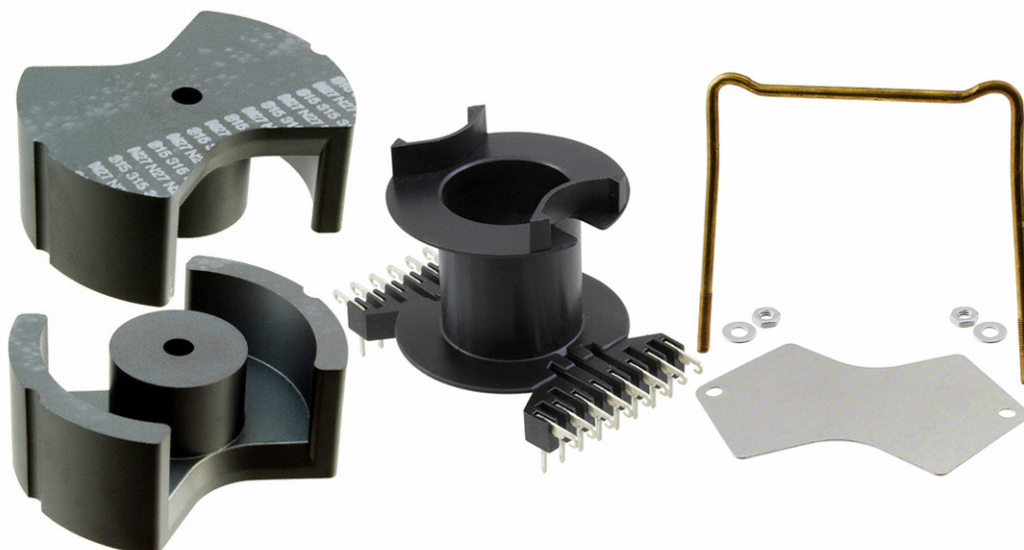
$$L_{L1/min.} = \frac{(90 - 0,236 - 15) \cdot (15 + 0,146)}{(90 - 0,236 + 0,146) \cdot 7 \cdot 10^5} \cong 17,99 \mu H \quad (6.2.30)$$

Akumulační tlumivku s odpovídající indukčností by sice bylo možné zakoupit už hotovou, ale především z důvodu eventuelní nutnosti dalších úprav bylo rozhodnuto ji vyrobit. S využitím literatury [110, 158, 159] a katalogů firmy [55] se nejprve vybíralo vhodné jádro. Těch existuje značné množství, namátkou E, EF, EI, EC, PM, RM, EP, ETD, EFD, toroidní a další. Každý druh je navržen pro odlišný aplikační segment a má různé přednosti i negativa. Nakonec bylo zvoleno jádro typu PM (Pot core Module), dle výrobce přímo předurčené k výrobě transformátorů a akumulací indukčností impulsních spínaných měničů výkonů přibližně od 250W do 3kW s pracovními kmitočty až do 300kHz. Tyto jádra mají sice mírně větší objem a hmotnost, ale jinak se vyznačují řadou pozitivních vlastností, jako vysokým indukčním tokem uvnitř svého průřezu, díky čemuž stačí malý počet závitů a naopak mimo svůj průřez malým rozptylovým polem. Jako výhoda se také uvádí snížená rozptylová indukčnost i kapacita vinutí. Výběr konkrétního typu ze skupiny PM jader byl proveden především na základě hodnoty maximálního možného přenášeného výkonu. Zdali se cívka vejde na danou kostru se ověřovalo výpočetní iterační metodou s pomocí nomogramů výrobce [110], které pro jednotlivá jádra udávají maximální počet závitů při daném průměru vodiče.

Nakonec se zvolilo jádro Epcos **PM62/49 – B65684A0315A027**, které bylo zakoupeno u firmy [57], spolu s kostrou B65685B1016T001 a montážní sadou B65685A2000. Tyto komponenty lze pohromadě spatřit na **Obr. 6.16**. Parametry jádra jsou uvedeny v **Tab. 6.6**.

Typové označení jádra: <b>PM62/49 – B65684A0315A027</b>		Výrobce: <b>Epcos</b>		Materiál: <b>N27</b>
Veličina	Význam	Hodnota	Jednotka	Podmínky
$\Sigma I/A$	Magnetický tvarový činitel jádra	0,191	mm <sup>-1</sup>	
$l_e$	Střední délka magnetické siločáry	109	mm	
$A_e$	Efektivní průřez jádra (zavádí se u jader s nehomogenním magnetickým obvodem)	570	mm <sup>2</sup>	
$A_{min}$	Minimální příčný průřez jádra	470	mm <sup>2</sup>	
$V_e$	Efektivní objem jádra	62000	mm <sup>3</sup>	
$s$	Mezera ve středním sloupku jádra	2,6	mm	
$A_L$	Činitel indukčnosti	315 ± 3%	nH	
$\mu_e$	Efektivní permeabilita jádra	48	-	
$m$	Hmotnost jádra	280	g (pár)	
$P_{Trans}$	Maximální přenášený výkon jádra	673	W	f = 25kHz
$R_{th}$	Tepelný odpor jádra	12	K/W	N27@ΔT=30°K

Tabulka 6.6 : Parametry použitého feritového jádra (převzato z [110])



**Obrázek 6.16** : Ukázka použitého feritového jádra PM62/49, kostry pro vinutí a montážní sady (převzato a upraveno z [59])

Ze známého vzorce pro výpočet indukčnosti cívky se získá vztah pro potřebný počet závitů k dosažení žádané hodnoty:

$$L = \mu_0 \cdot \mu_e \cdot N^2 \cdot \frac{A_e}{l_e} \Rightarrow N = \sqrt{\frac{L_{L1} \cdot l_e}{\mu_0 \cdot \mu_e \cdot A_e}} \quad (6.2.31)$$

kde:  $\mu_0$  ... je permeabilita vakua ( $H/m$ )  
 $\mu_e$  ... je efektivní permeabilita jádra (-)  
 $N$  ... je počet závitů cívky (-)

Díky součiniteli indukčnosti z datového listu jádra, který má v sobě zahrnutý všechny potřebné konstanty, se výpočet zjednoduší do tvaru:

$$N_{L1} = \sqrt{\frac{L_{L1/min.}}{A_{L1}}} = \sqrt{\frac{17,99 \cdot 10^{-6}}{3,15 \cdot 10^{-7}}} \cong 7,557 \approx 7,5 \text{ závitů} \quad (6.2.32)$$

Vzhledem k orientaci vývodů na kostře cívky bude možné bez problému navinout i půl závit. Proudová hustota ve vodiči se obecně spočte:

$$J = \frac{I}{S} \quad (6.2.33)$$

kde:  $J$  ... je proudová hustota ve vodiči ( $A/m^2$ )  
 $I$  ... je proud protékající vodičem ( $A$ )  
 $S$  ... je plocha průřezu vodiče ( $m^2$ )

Podle [159] je v závislosti na účinnosti chlazení vinutí přípustná proudová hustota ve vodiči cívky 1 až 6  $A/mm^2$ . Protože zde bude relativně malý počet závitů a vinutí je zcela otevřené, lze zvolit:

$$J_{Wire/L1} = 5 \frac{A}{mm^2} \quad (6.2.34)$$

Při použití vodičů s kruhovým průřezem se celkový potřebný průměr vyjádří:

$$J_{Wire/L1} = \frac{I_{L1/RMS/max.}}{S_{Wire/L1}} = \frac{I_{L1/RMS/max.}}{\pi \cdot \left(\frac{d_{Wire/L1/min.}}{2}\right)^2} \Rightarrow d_{Wire/L1/min.} = \sqrt{\frac{4 \cdot I_{L1/RMS/max.}}{\pi \cdot J_{Wire/L1}}} \quad (6.2.35)$$

Protože zde hrají roli tepelné účinky elektrického proudu, musí být kalkulováno s efektivní hodnotou, která se vypočte jako součet čtverců stejnosměrné složky a efektivní hodnoty superponovaného trojúhelníkového průběhu:

$$I_{L1/RMS/\max.} = \sqrt{\left(\frac{I_{L1/MIN} + I_{L1/MAX}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \Delta I_{L1}}{2}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{36,5 + 43,5}{2}\right)^2 + \left(\frac{\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 7}{2}\right)^2} \cong 40,05 A \quad (6.2.36)$$

U tohoto průběhu proudu je typicky výsledek skoro stejný jako střední hodnota. Minimální potřebný celkový průměr vodiče po dosazení bude:

$$d_{Wire/L1/\min.} = \sqrt{\frac{4 \cdot 40,05}{\pi \cdot 5}} \cong 3,194 mm \quad (6.2.37)$$

Dále je třeba zhodnotit vliv elektrického povrchového jevu ve vodiči, také známý jako „Skin Efekt“, který by mohl negativně ovlivnit celkové ztráty na tlumivce. Posuzuje se pomocí hloubky vniku  $\sigma$ , což je vzdálenost od povrchu vodiče směrem k jeho středu, ve které proudová hustota oproti povrchu poklesne na hodnotu  $e^{-1}$ . Je známo, že tento jev se znatelně uplatňuje pouze v dobrých vodičích při vysokých frekvencích a proto má smysl jeho účinky prověřit. Literatura [159] doporučuje, aby se při neharmonickém průběhu proudu tlumivkou, jenž obsahuje mnoho vyšších harmonických složek, výpočet hloubky vniku prováděl pro základní harmonickou, zvětšenou alespoň o 50%. Pulzně šířková modulace je právě takový případ. Hloubka vniku se tedy spočte:

$$\sigma_{Wire/L1} = \sqrt{\frac{\rho_{Cu}}{\pi \cdot \mu_0 \cdot 1,5 \cdot f_{PWM}}} = \sqrt{\frac{1,75 \cdot 10^{-8}}{\pi \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,5 \cdot 10^5}} \cong 0,172 mm \quad (6.2.38)$$

kde:  $\rho_{Cu}$  ... je měrný odpor mědi ( $\Omega \cdot m$ )

Podle [159] je neúčelné používat kruhové vodiče o průměru větším než je trojnásobek hloubky vniku:

$$d_{Wire/L1} < 3 \cdot \sigma_{Wire/L1} = 3 \cdot 0,172 = 0,516 mm \quad (6.2.39)$$

K dispozici byl měděný izolovaný vodič **Conrad SU607622** s vnějším průměrem:

$$d_{Wire/L1} = 0,5 mm \quad (6.2.40)$$

Protože  $d_{Wire/L1} < d_{Wire/L1/\min.}$  musí být vinutí složeno ze svazku více vodičů, což je vhodné i z důvodu minimalizace stejnosměrného odporu, který způsobuje jednu z hlavních složek ztrát na tlumivce.

Plocha průřezu použitého vodiče se spočte:

$$S_{Wire/L1} = \pi \cdot \frac{d_{Wire/L1}^2}{4} = \pi \cdot \frac{0,5^2}{4} \cong 0,196 mm^2 \quad (6.2.41)$$

Minimální potřebná celková plocha průřezu vodiče:

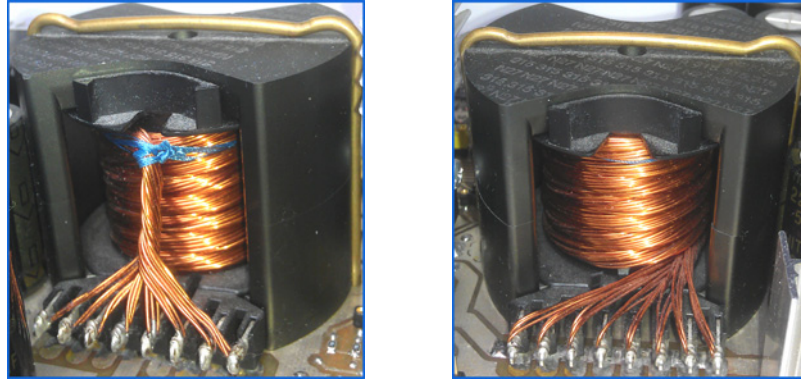
$$S_{Wire/L1/\min.} = \frac{I_{L1/RMS/\max.}}{J_{Wire/L1}} = \frac{40,05}{5} = 8,01 mm^2 \quad (6.2.42)$$



Potřebný počet vodičů pak bude:

$$M_{Wire/L1} = \frac{S_{Wire/L1/min.}}{S_{Wire/L1}} = \frac{8,01}{0,196} \cong 40,867 \approx 40 \quad (6.2.43)$$

Použito bylo dohromady 40 vodičů smotaných do osmi svazků tvořících celkový klastr, který se poté navinul na kostru. Na jedno pájecí očko je vždy uchycen jeden svazek s pěti vodiči. Výsledné provedení, kde hotová cívka je již osazena na DPS ukazuje **Obr. 6.17**.



**Obrázek 6.17** : Ukázka vyrobené akumulční indukčnosti pro měnič

Hodnota indukčnosti vyrobené cívky byla informativně ověřena k tomuto účelu postaveným rezonančním měřičem, podle [164] a odchylka od předpokládané hodnoty činila přibližně +5%.

Díky paralelnímu spojení mnoha vodičů bude činný odpor vinutí velmi nízký:

$$R_{L1/DC} = \frac{R_{Wire/L1}}{M_{Wire/L1}} = \frac{N_{L1} \cdot \rho_{Cu@20^{\circ}C} \cdot \frac{l_{Wire/L1} \cdot 1,3}{S_{Wire/L1}}}{M_{Wire/L1}} = \frac{N_{L1} \cdot \rho_{Cu@20^{\circ}C} \cdot \frac{\pi \cdot d_{Coil/L1} \cdot 1,3}{S_{Wire/L1}}}{M_{Wire/L1}} = \quad (6.2.44)$$

$$= \frac{7,5 \cdot 1,72 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\pi \cdot 0,029 \cdot 1,3}{1,96 \cdot 10^{-7}}}{40} \cong 1,949 m\Omega$$

kde:  $R_{Wire/L1}$  ... je odpor jednoho vodiče z celkového klastru vinutí ( $\Omega$ )  
 $\rho_{Cu@20^{\circ}C}$  ... je tabulková hodnota rezistivity mědi při teplotě 20°C ( $\Omega \cdot m$ )  
 $l_{Wire/L1}$  ... je délka jedné otočky vodiče na sloupku kostry cívky ( $m$ )  
 $d_{Coil/L1}$  ... je průměr sloupku kostry cívky ( $m$ )

Délka každého vodiče cívky je ve výpočtu zvětšena o 30%, jako kompenzace nedokonalostí vzniklých při jejím vinutí a přidané vzdálenosti uchycení k pájecím okům.

Nakonec je potřeba ověřit jestli maximální magnetizační proud tlumivkou nepřekročí saturační proud jádra, protože když je jádro v saturaci začíná se výrazně uplatňovat reluktance, tj. odpor magnetického obvodu způsobený jednak samotným materiálem jádra, ale především mezerou v magnetickém obvodu. To ohřívá jádro a při vyšších výkonech by razantně klesala účinnost celého měniče. Z datového listu [110] materiálu jádra TDK – SIFERRIT N27 bylo zjištěno, že magnetická indukce v nasycení při vyšší pracovní teplotě je:

$$B_{S/N27@100^{\circ}C} = 410 mT \quad (6.2.45)$$

Aby bylo jádro bezpečně mimo oblast saturace, musí platit nerovnost [159]:

$$\frac{B_{S/N27@100^{\circ}C}}{2} > \frac{L_{L1} \cdot I_{L1/MAX}}{N_{L1} \cdot A_{e/L1}} = \frac{N_{L1}^2 \cdot A_{L1} \cdot I_{L1/MAX}}{N_{L1} \cdot A_{e/L1}} \quad (6.2.46)$$

Po dosažení:

$$\frac{0,41}{2} = 0,205T > \frac{7,5^2 \cdot 3,15 \cdot 10^{-7} \cdot 43,5}{7,5 \cdot 5,7 \cdot 10^{-4}} = 0,18T \quad (6.2.47)$$

Podmínka je tedy splněna a jádro ani při maximálním výkonu měniče za vysoké pracovní teploty nebude saturováno. Obecně platí, že magnetizační proud by měl být alespoň o 10% menší než saturační proud, což pokryje tolerance parametrů jádra.

Na závěr lze podotknout, že pokud by byl minimální výstupní proud volen nižší, konstanta  $k$  by poté byla vyšší, to by vyústilo ve výpočet větší indukčnosti a tím pádem i většího počtu závitů, následkem čehož by tato nerovnost již splněna být nemusela.

## 5.2.6 Určení vstupní filtrační kapacity měniče

Díky pulsnímu charakteru odběru energie má měnič tendenci na vstupu působit značné zvlnění napětí, odrážející vysokou frekvenci řídicího PWM signálu. K eliminaci takového rušení se zde umisťují kondenzátory, ve schématu označené souhrnně  $C_{IN}$ . Teoreticky je možné tuto kapacitu sloučit s výstupním filtračním kondenzátorem usměrňovače  $C_{REC}$ , který je v SMO zapojen k  $C_{IN}$  paralelně, ale vzhledem k nutné délce spojů na DPS a délce připojovacího vodiče  $C_{REC}$ , bude lepší pokrýt přechodné energetické nároky měniče separátně. Spíše než kapacita je zde důležité adekvátní proudové dimenzování a lokalizace v těsné blízkosti výkonových tranzistorů. U měničů nižších výkonů se zde často používají keramické kondenzátory. Na základě [121-127], lze minimální potřebnou hodnotu  $C_{IN}$  vyjádřit ze vztahu pro výpočet velikosti zvlnění napětí na vstupu měniče, které je již známo (6.1.12). Výpočet minimální potřebné kapacity kondenzátoru  $C_{IN}$ , při zohlednění dříve odhadované účinnosti měniče se provede:

$$C_{IN/min.} = \frac{I_{OUT/AGR/DC/max.} \cdot V_{OUT/AGR/DC/min.} \cdot (2 - \eta_{DC/DC})}{\Delta V_{C_{REC}/max.} \cdot V_{SMO/AV/min.} \cdot f_{PWM}} = \frac{40 \cdot 10 \cdot (2 - 0,8)}{1,7 \cdot 17 \cdot 10^5} \cong \quad (6.2.48)$$

$$\cong 166 \mu F$$

Efektivní hodnota proudu tekoucího kondenzátorem  $C_{IN}$  je největší, bude-li činitel plnění roven jedné polovině:

$$I_{C_{IN}/RMS} = \sqrt{\delta \cdot \left( I_{OUT/DC/max.}^2 \cdot (1 - \delta) + \frac{1}{12} \cdot \Delta I_{L1}^2 \right)} = \quad (6.2.49)$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left( 40^2 \cdot \left( 1 - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{12} \cdot 7^2 \right)} \cong 20,05 A$$

Maximální přípustná hodnota ESR se určí:

$$ESR_{C_{IN}/max.} = \frac{\Delta V_{C_{IN}/max.}}{I_{C_{IN}/RMS}} = \frac{1}{20,05} = 49,88 m\Omega \quad (6.2.50)$$

Napěťové namáhání kondenzátorů  $C_{IN}$  bude opět odvozeno z ustanovení (4.3.21), přičemž zde platí stejné úvahy jako v případě (6.1.29):

$$V_{C_{IN}/DC/min.} > V_{SMO/AV/max.} \quad (6.2.51)$$

Kapacita  $C_{IN}$  bude složena z keramických kondenzátorů, které jsou sice finančně nákladnější, ale svými vlastnostmi zde nejvíce vyhovují. Díky tomu dojde ke značné úspoře místa na DPS. Parametry a počty použitých kusů jsou uvedeny v Tab. 6.7. Ukázkou pouzdra keramik a jejich povrchové montáže si lze prohlédnout na Obr. 6.18.

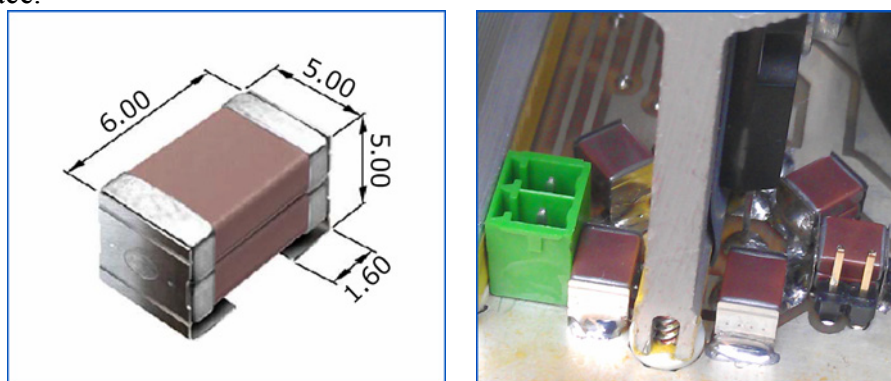
Výrobce		Typ	Série	Montáž	Počet kusů
TDK		Keramický	CKG57N-Hmota X7S	SMT	n = 6
Veličina	Význam	Hodnota	Jednotka	Podmínky	
C	Kapacita	22	μF		
V	Maximální pracovní napětí	100	V DC		
I <sub>RMS</sub>	Maximální povolené trvalé zvlnění proudu kondenzátorem	4,00	A	Δt = 20°C ; f = 100kHz	
ESR	Ekvivalentní sériový odpor	4	mΩ	t = 20°C ; f = 100kHz	
t	Maximální pracovní teplota	125	°C		
PKG	Rozměry: velikost SMD pouzdra	5750	-		

Tabulka 6.7 : Parametry kondenzátorů použitých pro vstupní filtraci měniče (převzato z [79])

Celková kapacita kondenzátorů souhrnně označených jako C<sub>IN</sub> bude:

$$C_{IN} = n \cdot C = 6 \cdot 22 \cdot 10^{-6} = 132 \mu F \quad (6.2.52)$$

Zbývající kapacitu s přehledem pokryje předdimenzovaný kondenzátor C<sub>REC</sub> z bloku usměrňovače.



Obrázek 6.18 : Ukázka SMD pouzdra 5750 (převzato a upraveno ze [79]) a jeho povrchové montáže

Keramické kondenzátory mají za běžných podmínek ekvivalentní sériový odpor velmi nízký:

$$ESR_{C_{IN}} = \frac{ESR}{n} = \frac{0,004}{6} \approx 0,7 m\Omega < ESR_{C_{IN}/max.} \quad (6.2.53)$$

Pozitivní vlastností keramik také je, že velikost přípustného zvlnění proudu u nich závisí výhradně na momentální teplotě hmoty ze které jsou vyrobeny. Protože spojen jich zde bude paralelně větší počet, oba požadavky (6.2.49) a (6.2.50) se splní s velkou rezervou. Díky velmi nízkému ESR nebudou ztráty na vstupním kondenzátoru měniče C<sub>IN</sub> příliš významné:

$$P_{C_{IN}/max.} = ESR_{C_{IN}} \cdot I_{C_{IN}/RMS}^2 = 4 \cdot 10^{-4} \cdot 20,05^2 \approx 0,161 W \quad (6.2.54)$$

### 5.2.7 Určení výstupní filtrační kapacity měniče

Baterie výstupních kondenzátorů měniče ve schématu označená C<sub>OUT</sub> je velmi důležitá, poněvadž provádí soustavnou filtraci výstupního napětí, uchovává energii k pokrytí krátkodobých proudových špiček zátěže a eliminuje napěťové překmitky regulátoru, také známé jako „overshoot“. Navíc pokud měnič díky poklesu výstupního proudu pod hodnotu I<sub>OUT/AGR/DC/min.</sub>, byť i dočasně přejde do nespojitého režimu, zvlnění je poté závislé pouze na velikosti této kapacity.

Minimální potřebnou hodnotu lze vyjádřit z často užívaného vztahu pro zvlnění výstupního napětí měniče v kontinuálním režimu, kde jsou zohledněny i parazitní parametry součástky [121, 123, 125, 127]:

$$\Delta V_{OUT/DC/max.} = \frac{\Delta I_{L1}}{8 \cdot C_{OUT/con./min.} \cdot f_{PWM}} + ESR_{C_{OUT}} \cdot \Delta I_{L1} + ESL_{C_{OUT}} \cdot \frac{V_{IN/DC/max.}}{L_{L1}} \quad (6.2.55)$$

Tento výpočet bere v úvahu pouze zvlnění způsobené kolísáním proudu na induktoru. Výsledná kapacita by nebyla dostačující, pokud má kondenzátor pokrývat také přechodové jevy. Například jeli na výstup měniče připojena maximální zátěž, jádro tlumivky akumuluje značnou energii a dojde-li poté náhle k výraznému odlehčení zátěže, energie dodaná skrz rekuperační obvod může způsobit výrazné napěťové překmity nad nastavenou hodnotu výstupního napětí, čemuž nemá šanci regulační smyčka nijak zabránit. Je tedy potřeba použít spíše postup dle [123-125], obdobný jako v případě (6.1.13):

$$C_{OUT/con./min.} = \frac{L_{L1} \cdot I_{L1/MAX}^2}{(V_{OUT/DC/max.} + 0,5 \cdot \Delta V_{OUT/AGR/DC/max.})^2 - V_{OUT/DC/max.}^2} = \frac{17,99 \cdot 10^{-6} \cdot 43,5^2}{(15 + 0,5 \cdot 0,1)^2 - 15^2} \cong 22657 \mu F \quad (6.2.56)$$

Pro zajištění definovaného zvlnění i v režimu diskontinuálním, by kapacita filtračního kondenzátoru musela být několikanásobně větší. Lze ji určit ze vztahu [121]:

$$C_{OUT/dis./min.} \geq \frac{I_{OUT/DC/max.} \cdot \left(1 - \frac{I_{OUT/DC/max.}}{\Delta I_{L1}}\right)^2}{f_{PWM} \cdot \Delta V_{OUT/DC/max.}} = \frac{40 \cdot \left(1 - \frac{40}{7}\right)^2}{10^5 \cdot 0,1} \cong 0,089 F \quad (6.2.57)$$

Proto je také žádoucí, aby měnič pracoval pokud možno v režimu kontinuálním.

Střední hodnota střídavého proudu trvale protékajícího skrz  $C_{OUT}$  je sice nulová, ale efektivní hodnota nikoliv a kvůli adekvátnímu dimenzování musí být určena:

$$I_{C_{OUT}/RMS} = \frac{(V_{IN/DC/max.} - V_{OUT/DC/max.}) \cdot \frac{V_{OUT/DC/max.}}{V_{IN/DC/max.}}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot f_{PWM} \cdot L_{L1}} = \frac{(90 - 15) \cdot \frac{15}{90}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10^5 \cdot 17,99 \cdot 10^{-6}} \cong 2,01 A \quad (6.2.58)$$

Na výstupu měniče se kvůli vysoké kapacitě většinou používají hliníkové elektrolytické kondenzátory. Ty mají ESL při nízkých kmitočtech velmi malou, takže úbytky napětí způsobené parazitními indukčnostmi mohou být zanedbány. Vliv ESR je ovšem mnohonásobně větší. Bude nutné zde použít nízkoimpedanční typy s označením „Low ESR“. Je potřeba ověřit že platí:

$$ESR_{C_{OUT}/max.} \leq \frac{\Delta V_{OUT/DC/max.}}{I_{L1/MAX}} = \frac{0,1}{43,5} \cong 2,30 m\Omega \quad (6.2.59)$$

Napěťové namáhání  $C_{OUT}$  je odvozeno od hodnoty stanovené v rovnosti (3.4), přičemž povolené SS napětí je potřeba vybírat odhadem alespoň trojnásobné, kvůli možným regulačním překmitům:

$$V_{C_{OUT}/DC} > 3 \cdot V_{OUT/AGR/DC/max.} = 3 \cdot 15 = 45 V \cong 50 V \quad (6.2.60)$$

Výsledek je zaokrouhlen na nejbližší normalizovanou hodnotu.

Filtrační kapacita  $C_{OUT}$  bude z důvodu optimálního využití plochy DPS složena z různých kondenzátorů, které byly v celkovém počtu 18-ti kusů zakoupeny u firem [53, 52] a jejich parametry jsou uvedeny v Tab. 6.8.

Označení $C_{OUT}$	Výrobce	Typ	Série	Montáž	Počet kusů
A	HITANO	Elektrolytický	EXR – Low ESR	THT	$n_A = 15$
B	SAMXON	Elektrolytický	GF – Low ESR	THT	$n_B = 3$
Veličina	Význam	Hodnota	Jednotka	Podmínky	
$C_{A/B}$	Kapacita	2200 / 1000	$\mu F$	$\pm 20 \%$	
$V_{A/B}$	Maximální pracovní napětí	50 / 63	V DC		
$I_{RMS-A/B}$	Maximální povolené trvalé zvlnění proudu kondenzátorem	3,07 / 1,79	A	$f = 100 \text{ kHz} ; t = 105 \text{ }^\circ\text{C}$	
$ESR_{A/B}$	Ekvivalentní sériový odpor	32 / 36	$m\Omega$	$f = 100 \text{ kHz} ; t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	
$t_{A/B}$	Maximální pracovní teplota	105	$^\circ\text{C}$		
$(d \times L)_{A/B}$	Rozměry: průměr x výška	18 x 36 / 12,5 x 35	mm		
$RM_{A/B}$	Rozteč vývodů	7,5 / 5,0	mm		

Tabulka 6.8 : Parametry kondenzátorů použitých ve výstupním filtru výkonového DC/DC měniče (převzato z [80, 81])

V obou případech se jedná o nízkoimpedanční typy se zvýšenou životností, dle výrobců přímo doporučené pro použití ve spínaných zdrojích. Díky jejich velkému počtu bude proudové dimenzování zcela vyhovující.

Celková kapacita ve schématu souhrnně označena jako  $C_{OUT}$  bude:

$$C_{OUT} = n_A \cdot C_A + n_B \cdot C_B = 15 \cdot 2,2 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 36000 \mu F > C_{OUT/con./min.} \quad (6.2.61)$$

Kvůli značné toleranci kapacity byla hodnota přibližně o 60% navýšena. Baterii kondenzátorů po osazení na DPS je možné spatřit na **Obr. 6.19**.



Obrázek 6.19 : Ukázka baterie výstupních filtračních kondenzátorů měniče po osazení

Při paralelním spojení více kondenzátorů se výsledný ESR spočte:

$$ESR_{C_{OUT}} = \left( \left( \frac{ESR_A}{n_A} \right)^{-1} + \left( \frac{ESR_B}{n_B} \right)^{-1} \right)^{-1} = \left( \left( \frac{0,032}{15} \right)^{-1} + \left( \frac{0,036}{3} \right)^{-1} \right)^{-1} \cong 1,81 m\Omega < ESR_{C_{OUT}/max.} \quad (6.2.62)$$

Všechny nutné podmínky jsou splněny.

Celkové ztráty na výstupní filtrační kapacitě  $C_{OUT}$  budou teoreticky zanedbatelné:

$$P_{C_{OUT}/max.} = ESR_{C_{OUT}} \cdot I_{C_{OUT}/RMS}^2 = 1,81 \cdot 10^{-3} \cdot 2,01^2 \cong 7,313 mW \quad (6.2.63)$$





Kondenzátory C3, C6 a C8 poskytují lokální náboj pro pokrytí impulsních energetických nároků, které jsou nezanedbatelné především v případě IC4 a IC5.

Napájecí napětí je sice po DPS distribuováno co nejlépe, přesto mají spoje několik centimetrů a proto jsou tyto kapacity velmi důležité. Zbývající kondenzátory jsou standardní blokovací a jejich hodnoty vychází přímo z doporučení výrobců v datových listech. Součástky s označením MP1 a MP2 jsou precizní dutinkové lišty, osazené kvůli snadnému měření hrotem osciloskopu a JP1 až JP3 jsou dvoupinové lišty pro zkratovací spojky Jumper, umožňující postupné oživování a měření zapojení.

Pokud jde o IC4 a IC5, je vhodné věc poněkud rozvést v souvislosti s volbou výkonových tranzistorů. U synchronního sestupného měniče s topologií typu BUCK (**Obr. 6.10**), se teoreticky na pozici tranzistoru T1 může použít jak MOSFET s kanálem typu P tak N. Volba má ovšem dopad na způsob konstrukce budiče. V případě použití MOSFETu s kanálem typu P, musí být řídicí napětí  $V_{GS}$  nižší, než je řízené napětí  $V_S$ . Budič může být sice napájen přímo napětím z elektrody source, ovšem pouze do jeho velikosti přibližně 20 až 30V, v závislosti na povoleném napětí  $V_{GS}$ . Pokud je pracovní napětí  $V_S$  vyšší (což v této aplikaci bude), musí se pro napájení budiče zajistit jeho adekvátní zmenšení. Při použití MOSFETu s kanálem typu N je potřeba, aby řídicí napětí  $V_{GS}$  bylo naopak vyšší, než řízené napětí  $V_D$ . V tomto případě lze situaci řešit vícero způsoby. K získání vyššího napětí lze použít nábojovou pumpu, nebo zvyšující měnič s indukčnostmi či transformátorem. Další možnost je použití snižujícího spínaného zdroje, ovšem s galvanicky odděleným výstupem. Ten je pak možné připojit přímo na potenciál drainu, ať už je zde pracovní napětí jakékoliv. Taková varianta se jeví jako nejlepší a proto zde také bude použita. Díky tomu může jeden spínaný zdroj topologie FLYBACK s vícero výstupy, poskytnout potřebná napájecí napětí všem obvodům na výkonové jednotce.

Na pozici tranzistoru T2 se používají výhradně MOSFETy s kanálem typu N, protože elektroda source je zde spojena přímo se zemí. Při použití MOSFETu s kanálem typu P, by totiž k jeho řízení bylo nutné vytvořit napětí s nižším potenciálem než je hlavní zem celého obvodu, což je nevhodné.

Galvanickým oddělením napájecího napětí pro budič tranzistoru T1, vzniká potřeba zajistit také izolaci řídicího signálu. To lze v zásadě realizovat buď malým impulsovým transformátorem, nebo pomocí optoelektrického, či dielektrického vazebního prvku. Kvůli zjednodušení celého návrhu, zde bude použit integrovaný výkonový optobudič, který je schopen plnit oba úkoly současně. Tranzistor T2 lze teoreticky kontrolovat pomocí standardního neizolovaného budiče. Ovšem při řízení vyšších výkonů, kdy impulsní proudy gatů jsou vysoké, je kompletní galvanické oddělení ovládacích signálů od výkonové části obvykle doporučováno, kvůli možnému přenosu rušení na nízkonapěťové řídicí obvody. Oba tranzistory jsou tedy řízeny pomocí identických optobudičů, což současně usnadnilo návrh DPS, využitím symetrie motivu.

Obecně lze konstatovat, že rychlost otevření a uzavření tranzistoru MOSFET závisí výhradně na tom, jak rychle je budič schopen nabíjet a vybíjet kapacitu řídicí elektrody:

$$t_{ON/FET} = \frac{Q_{G/Total/FET}}{I_{Driver/HIGH/AV}}, \quad t_{OFF/FET} = \frac{Q_{G/Total/FET}}{I_{Driver/LOW/AV}} \quad (6.2.64)$$

- kde:  $t_{ON/FET}$  ... je doba trvání úplného sepnutí tranzistoru MOSFET (s)  
 $t_{OFF/FET}$  ... je doba trvání úplného rozepnutí tranzistoru MOSFET (s)  
 $Q_{G/Total/FET}$  ... je celkový náboj řídicí elektrody gate tranzistoru MOSFET, odečtený z datového listu (C)  
 $I_{Driver/HIGH/AV}$  ... je průměrný proud dodaný z budiče během času  $t_{ON/FET}$ , je-li výstup ve stavu s vysokou napěťovou úrovní (A)  
 $I_{Driver/LOW/AV}$  ... je průměrný proud dodaný z budiče během času  $t_{OFF/FET}$ , je-li výstup ve stavu s nízkou napěťovou úrovní (A)



Z toho plyne, že výběr dostatečně proudově dimenzovaných budičů bude úkol stěžejní. Teoretické omezení je zde dáno v podstatě pouze vnitřním odporem řídicí elektrody tranzistoru  $R_{G/Int./TYP}$  (Tab. 6.4). Ovšem pokud je proud volen příliš vysoký, začínají hrát velmi významnou roli jakékoliv parazitní indukčnosti spojů i vývodů pouzder samotných součástek. Další omezení je způsobené tepelnými ztrátami na budiči, tlumícím rezistoru (R7, R8),  $R_{G/Int./TYP}$  a ztrátami na parazitách cest DPS.

Prakticky se musí především zajistit, aby čas potřebný k otevření a následnému uzavření tranzistoru byl mnohem kratší, než bude v první řadě perioda řídicího PWM signálu, ale hlavně kratší než nejmenší předpokládaná šířka pulsu PWM signálu. Délka nejmenšího časového intervalu otevření T1 a T2, je dána mezními hodnotami činitelů plnění potřebných k dosažení stanovených výstupních napětí:

$$\delta_{min.} = \frac{V_{OUT/AGR/DC/min.}}{V_{SMO/AV/max.}} = \frac{10}{90} \cong 0,11 \quad (6.2.65)$$

$$t_{ON/T1/min.} = T_{PWM} \cdot \delta_{min.} = 10^{-5} \cdot 0,11 = 1,1 \mu s \quad (6.2.66)$$

$$\delta_{max.} = \frac{V_{OUT/AGR/DC/max.}}{V_{SMO/AV/min.}} = \frac{15}{17} \cong 0,88 \quad (6.2.67)$$

$$t_{ON/T2/min.} = T_{PWM} \cdot (1 - \delta_{max.}) = 10^{-5} \cdot (1 - 0,88) = 1,2 \mu s \quad (6.2.68)$$

Protože  $t_{ON/T1/min.} < t_{ON/T2/min.}$  je zřejmé, že bude nutné zajistit:

$$t_{ON\&OFF/FET/max.} = t_{ON/FET} + t_{OFF/FET} \ll 1,1 \mu s \quad (6.2.69)$$

Regulační smyčka může při náhodném podregulování či přeregulování výstupu krátkodobě operovat i s činitelem plnění mimo vypočtený rozsah. Je tedy vhodné zařídit, aby doba sepnutí/rozeptnutí tranzistorů byla srovnatelná spíše s velikostí jednoho kroku šířky PWM pulsu. Rychlejší nabíjení a vybíjení kapacity hradla bude mít jediné pozitivní dopad na spínací ztráty. Bude-li uvažován jeden cyklus úplného otevření a uzavření tranzistoru, dle referenčních údajů z datového listu (Tab. 6.4) lze ověřit realnost takového požadavku:

$$t_{Delay/ON} + t_{Rise} + t_{Delay/OFF} + t_{Fall} = 227 ns < t_{ON\&OFF/FET/max.} \quad (6.2.70)$$

Pro zaručení spolehlivého spínání MOSFETů by se napájecí napětí budičů mělo volit alespoň dvojnásobné oproti prahovému. Bude zde proto použito:

$$V_{CC/Driver} = 2 \cdot V_{GS/Threshold/MAX} = 2 \cdot 5 = 10V \approx 12V \quad (6.2.71)$$

Celkový průměrný proud z budiče do řídicí elektrody pak může být spočten:

$$I_{Driver/AV/min.} = \frac{V_{G/Total}@ (V_{GS}=12V/V_{DS}\approx 100V/I_D=103A)}{t_{ON\&OFF/FET/max.}} = \frac{1,85 \cdot 10^{-7}}{1,1 \cdot 10^{-6}} = 0,168 A \quad (6.2.72)$$

Náboj gate je značně závislý na velikosti přiloženého napětí  $V_{GS}$  a proto byl odečten z grafu v datovém listu. Proud do hradla ale v žádném případě není konstantní a rozhodující pro výběr budiče je jeho špičková hodnota. Literatura obvykle uvádí, že její přijatelný odhad lze provést prostřednictvím volby vhodné časové konstanty se kterou bude zaručeno, že nabíjecí proces je již téměř dokončen, respektive že napětí gate s jistotou překročilo Millerovo napětí. Zvolí-li se konstanta  $\alpha = 3$  znamená to, že napětí na gate dosáhlo již 95% maximální hodnoty. Úvahu lze tedy zapsat:

$$t_{ON\&OFF/FET/max.} = \alpha \cdot \tau = \alpha \cdot R_{OUT/Driver} \cdot C_{G/EFF} = \alpha \cdot R_{OUT/Driver} \cdot \frac{Q_{G/Total}@V_{CC/Driver}}{V_{CC/Driver}} \quad (6.2.73)$$

kde:  $\tau$  ... je časová RC konstanta (s)

$C_{G/EFF}$  ... je tzv. efektivní vstupní kapacita tranzistoru MOSFET (F)

$R_{OUT/Driver}$  ... je vnitřní odpor výstupu budiče ( $\Omega$ )

$$R_{OUT/Driver} = \frac{V_{CC/Driver} \cdot t_{ON\&OFF/FET/max.}}{\alpha \cdot Q_{G/Total}@ (V_{GS}=12V / V_{DS} \approx 100V / I_D=103A)} = \frac{12 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 1,85 \cdot 10^{-7}} \cong 23,78\Omega \quad (6.2.74)$$

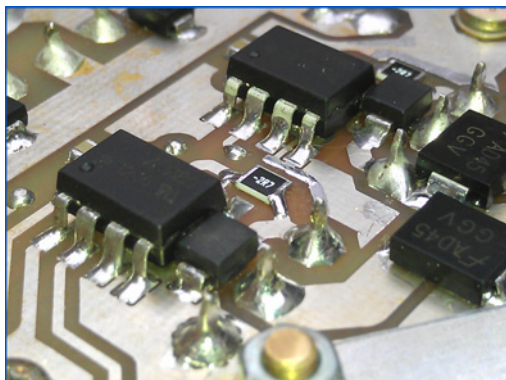
$$I_{Driver/PK/min.} = \frac{V_{CC/Driver}}{R_{OUT/Driver} - R_{G/Int./TYP/FET}} = \frac{12}{23,78 - 1} \cong 0,53A \quad (6.2.75)$$

kde:  $I_{Driver/PK/min.}$  ... je minimální potřebný špičkový proud dodaný z budiče (A)

Poměrně běžné **2,5A** optobudiče **HCPL3180** od firmy Avago Technologies, poskytnou dostatečnou proudovou rezervu. Jsou navrženy přímo ke spínání výkonových tranzistorů MOSFET v DC/DC měničích s pracovním kmitočtem až do 250kHz. Přibližné vnitřní uspořádání obvodu lze pozorovat přímo ve schématu na **Obr. 6.20**. Na vstupu se nachází LED dioda, která skrz transparentní Faradayův štít zlepšující CMR, emituje záření na integrovanou fotodiodu a takto je realizováno galvanické oddělení od výkonové části. Na výstupu se nalézá klasický tranzistorový půlmost, neboli „Totem-Pole“, kde vrchní část je tvořena trojitým Darlingtonovým zapojením z bipolárních tranzistorů. Spodní část se skládá z kombinované struktury bipolárních a unipolárních tranzistorů k dosažení menšího vnitřního odporu, při výstupu ve stavu s nízkou napětíovou úrovní. To je potřebné kvůli zaručení vybití náboje gatu za přibližně stejnou dobu jako nabití. Obvod také obsahuje 7,5V podpěťový zámeček s hysterezí, což vylučuje řízení gatu nedostatečným napětím. Nejdůležitější parametry budiče jsou uvedeny v **Tab. 6.9** a ukázkou pouzdra i s montáží lze spatřit na **Obr. 6.21**.

Typové označení obvodu: HCPL-3180-300E		Počet použitých kusů: 2		
Výrobce: Avago Technologies		Pouzdro: DIP8 - SMD (Gull Wing)		
Veličina	Význam	Hodnota	Jednotka	Podmínky
$V_{CC/MIN} / V_{CC/MAX}$	Doporučený rozsah napájecího napětí	10 - 20	V	
$I_{OL/PK/MAX} / I_{OH/PK/MAX}$	Maximální povolený špičkový proud při výstupu ve stavu nízké/vysoké úrovně	2,5 / 2,5	A	
$I_{OL/PK/MIN} / I_{OH/PK/MIN}$	Minimální garantovaný špičkový proud při výstupu ve stavu nízké/vysoké úrovně	2,0 / 2,0	A	$V_O=10V / V_O=V_{CC}-10V$
$I_F/MIN / I_F/MAX$	Doporučený rozsah proudu LED	10 - 16	mA	
$V_F/TYP$	Typické propustné napětí LED	1,5	V	$I_F = 10 \text{ mA} ; -1,6 \text{ mV}/^\circ\text{C}$
$I_{CCL/MAX} / I_{CCH/MAX}$	Maximální vlastní spotřeba obvodu při výstupu ve stavu nízké/vysoké úrovně	6 / 6	mA	Výstup nezatížen ; $I_F=3-0,8\text{mA} / I_F=10-16\text{mA}$
$P_T/MAX$	Maximální povolený ztrátový výkon	295	mW	
$T_{MAX}$	Maximální doporučená pracovní teplota	100	°C	

**Tabulka 6.9** : Nejdůležitější parametry použitých budičů MOSFETů (převzato z [89])



**Obrázek 6.21** : Ukázkou pouzdra a montáže výkonových budičů tranzistorů MOSFET

Hodnota tlumících rezistorů R7 a R8 musí být stanovena tak, aby nedocházelo k přetěžování výstupu budiče překračováním  $I_{OL/PK/MAX}$  a  $I_{OH/PK/MAX}$ . Výpočet se provede doporučeným způsobem dle datového listu [89], přičemž bude také zohledněn vnitřní odpor řídicí elektrody tranzistoru. Aby obvody nepracovaly na hranici mezních parametrů, uvažuje se střed mezi minimálním a maximálním špičkovým proudem.

Minimální potřebný odpor obou rezistorů se pak spočte:

$$R_{Damping} = R_7 = R_8 = \frac{V_{CC/Driver} - V_{OL/Driver@100^\circ C/2,25A}}{0,5 \cdot (I_{OL/PK/MIN/Driver} + I_{OL/PK/MAX/Driver})} - R_{G/Int./FET} =$$

$$= \frac{12 - 3,3}{0,5 \cdot (2,0 + 2,5)} - 1 \cong 2,87\Omega \approx 2,7\Omega \quad (6.2.76)$$

kde:  $V_{OL/Driver@100^\circ C/2,25A}$  ... je napětí nízké úrovně na výstupu budiče při zvoleném proudu a vysoké pracovní teplotě, odečtené z grafu v datovém listu budiče [89] ( $V$ )

Výsledek byl upraven na nejbližší dostupnou hodnotu odporu.

Při použití zvolených budičů by tranzistory měly být teoreticky otevírány/uzavírány nejvýše během času:

$$t_{ON\&OFF/FET/teor.} = \frac{2 \cdot Q_{G/Total@V_{GS}=12V/V_{DS}\approx 100V/I_D=103A}}{0,5 \cdot (I_{OL/PK/MIN/Driver} + I_{OL/PK/MAX/Driver})} = \frac{2 \cdot 1,85 \cdot 10^{-7}}{0,5 \cdot (2 + 2,5)} \cong 164ns \quad (6.2.77)$$

Což je téměř 7x rychleji než je dle (6.2.69) nutné.

Provede-li se dále aproximace proudových pulsů pravoúhlým trojúhelníkovým průběhem, může být výkonová ztráta na tlumících rezistorech určena:

$$P_{R_{Damping}} = R_{Damping} \cdot I_{Driver/RMS}^2 \approx R_{Damping} \cdot \left( \frac{I_{OL/PK/MIN/Driver} + I_{OL/PK/MAX/Driver}}{2} \cdot \sqrt{\frac{t_{ON\&OFF/FET/teor.} \cdot f_{PWM}}{3}} \right)^2 =$$

$$= 2,9 \cdot \left( \frac{2 + 2,5}{2} \cdot \sqrt{\frac{1,64 \cdot 10^{-7} \cdot 10^5}{3}} \right)^2 \cong 80mW \quad (6.2.78)$$

Podle toho byly vybrány SMD rezistory s adekvátní watáží.

Předřadné rezistory k integrované LED diodě se spočtou způsobem obvyklým:

$$R_5 = R_6 = \frac{V_{LED/Driver} - V_{F/TYP/Driver}}{0,5 \cdot (I_{F/MIN/Driver} + I_{F/MAX/Driver})} = \frac{5 - 1,5}{0,5 \cdot (0,01 + 0,016)} \cong 270\Omega \quad (6.2.79)$$

kde:  $V_{LED/Driver}$  ... je napětí použité k napájení LED diody optobudiče ( $V$ )

Obousměrné ochranné diody transil proti impulsnímu přepětí TVS1 a TVS2, jsou v SMD pouzdru umístěny přímo mezi vývody gate a source tranzistorů, kde mají za úkol eliminovat především případné induktivní napěťové špičky. Jejich průrazné napětí musí být voleno o něco vyšší než napájecí budičů a nižší než je povolené napětí  $V_{GS}$ :

$$V_{GS/MAX/FET} > V_{BR/D1} = V_{BR/D2} = 15V > V_{CC/Driver} \quad (6.2.80)$$

Na závěr se provede ověření, zdali nebude překročena maximální povolená výkonová ztráta samotných optobudičů:

$$P_{Driver/Total} = P_{LED} + P_{BIAS} + P_{OUT/L \rightarrow H} + P_{OUT/H \rightarrow L} \quad (6.2.81)$$

kde:  $P_{Driver/Total}$  ... je celkový ztrátový výkon na jednom optobudiči ( $W$ )

$P_{LED}$  ... je ztrátový výkon na vstupní integrované LED diodě ( $W$ )

$P_{BIAS}$  ... je ztrátový výkon způsobený vlastní spotřebou obvodu ( $W$ )

$P_{OUT/L \rightarrow H}$  ... je výkon ztracený díky nabíjení kapacity gate tranzistoru ( $W$ )

$P_{OUT/H \rightarrow L}$  ... je výkon ztracený díky vybíjení kapacity gate tranzistoru ( $W$ )

$$P_{LED} = I_{F/LED/Driver} \cdot V_{F/LED/Driver@I_F=13mA} \cdot \delta_{max.} = 1,3 \cdot 10^{-2} \cdot 1,57 \cdot 0,88 \cong 18mW \quad (6.2.82)$$

$$P_{BIAS} = I_{CC/MAX/Driver} \cdot V_{CC/Driver} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cong 72mW \quad (6.2.83)$$

Celkové ztráty spojené s nabíjením a vybíjením kapacity gatu MOSFETu jsou:

$$P_{GATE/FET} = V_{CC/Driver} \cdot Q_{G/Total/FET} \cdot f_{PWM} = 12 \cdot 1,85 \cdot 10^{-7} \cdot 10^5 = 222mW \quad (6.2.84)$$

Tento ztrátový výkon se dělí mezi výstupní odpor budiče, externí tlumící rezistor a interní odpor řídicí elektrody tranzistoru. Část která připadá na budič se spočte:

$$P_{OUT/L \rightarrow H} = P_{GATE/FET} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{OH/Driver}}{R_{OH/Total}} ; P_{OUT/H \rightarrow L} = P_{GATE/FET} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{OL/Driver}}{R_{OL/Total}} \quad (6.2.85)$$

kde:  $R_{OH/Driver}$  ... je vnitřní odpor budiče při výstupu ve stavu vysoké úrovně ( $\Omega$ )  
 $R_{OH/Total}$  ... je celkový odpor při výstupu ve stavu vysoké úrovně ( $\Omega$ )  
 $R_{OL/Driver}$  ... je vnitřní odpor budiče při výstupu ve stavu nízké úrovně ( $\Omega$ )  
 $R_{OL/Total}$  ... je celkový odpor při výstupu ve stavu nízké úrovně ( $\Omega$ )

Vnitřní odpory budiče se spočtou:

$$R_{OH/Driver} = \frac{V_{CC/Driver} - V_{OH/Drop/Driver@(100^\circ C/2,25A)}}{0,5 \cdot (I_{OL/PK/MIN/Driver} + I_{OL/PK/MAX/Driver})} = \frac{12 - 4,5}{0,5 \cdot (2,5 + 2,5)} \cong 3,33\Omega \quad (6.2.86)$$

kde:  $V_{OH/Drop/Driver@(100^\circ C/2,25A)}$  ... je úbytek napětí na výstupu při zvoleném proudu a vysoké pracovní teplotě, odečten z grafu v datovém listu budiče [89] ( $V$ )

$$R_{OL/Driver} = \frac{V_{OL/Driver@(100^\circ C/2,25A)}}{0,5 \cdot (I_{OL/PK/MIN/Driver} + I_{OL/PK/MAX/Driver})} = \frac{3,3}{0,5 \cdot (2,5 + 2,5)} = 1,47\Omega \quad (6.2.87)$$

Celkové odpory pak budou:

$$R_{OH/Total} = R_{OH/Driver} + R_{Damping} + R_{G/Int./FET} = 3,33 + 2,9 + 1 = 7,23\Omega \quad (6.2.88)$$

$$R_{OL/Total} = R_{OL/Driver} + R_{Damping} + R_{G/Int./FET} = 1,47 + 2,9 + 1 = 5,37\Omega \quad (6.2.89)$$

Po dosazení do předchozích vztahů:

$$P_{OUT/L \rightarrow H} = 0,222 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{3,33}{7,23} \cong 51mW ; P_{OUT/H \rightarrow L} = 0,222 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1,47}{5,37} \cong 30mW \quad (6.2.90)$$

$$P_{Driver/Total} = 0,018 + 0,072 + 0,051 + 0,030 = 171mW < P_{T/MAX/Driver} = 295mW \quad (6.2.91)$$

Nutná podmínka je splněna s dostatečnou rezervou, proto není potřeba zabývat se dále oteplením budičů.

### 5.2.9 Výkonová ztráta měniče a chlazení součástek

Celkový výkon ztracený na tlumivce je obecně dán příspěvkem od ztrát v jádru a od ztrát vznikajících na vinutí:

$$P_L = P_{Core} + P_{Coil} \quad (6.2.92)$$

kde:  $P_L$  ... je celkový ztrátový výkon na tlumivce ( $W$ )  
 $P_{Core}$  ... je celkový ztrátový výkon v jádru tlumivky ( $W$ )  
 $P_{Coil}$  ... je celkový ztrátový výkon na vinutí tlumivky ( $W$ )

Je známo, že celkový ztrátový výkon v materiálu magnetického obvodu  $P_{Core}$  je dán součtem ztrát způsobených vířivými proudy, ztrát magnetickým zpožděním (někdy označovaných jako zbytkových) a ztrát hysterezních. Ovšem pro zjednodušení výpočtu byl zaveden a obvykle se používá měrný ztrátový výkon, který odpovídá celkovým ztrátám vztaženým k jednotce objemu či hmotnosti materiálu jádra. Celkový ztrátový výkon jádra se tedy spočte:

$$P_{Core} = p_{Core/m} \cdot m_{Core} = p_{Core/V} \cdot V_{Core} \quad (6.2.93)$$

kde:  $p_{Core/m}$  ... je měrný ztrátový výkon v materiálu magnetického obvodu, vztažený k jednotce jeho hmotnosti ( $W/kg$ )  
 $m_{Core}$  ... je celková hmotnost jádra (obou polovin) z datového listu ( $kg$ )  
 $p_{Core/V}$  ... je měrný ztrátový výkon v materiálu magnetického obvodu, vztažený k jednotce jeho objemu ( $W/m^3$ )  
 $V_{Core}$  ... je efektivní objem jádra udaný v datovém listu ( $m^3$ )

Ztráty v jádru jsou obecně způsobeny jeho magnetováním střídavým proudem, proto k určení hodnoty měrného ztrátového výkonu, je potřeba znát proměnnou složku magnetické indukce, neboli magnetický indukční zdvih:

$$\Delta B_{L1} = \frac{L_{L1} \cdot \Delta I_{L1}}{N_{L1} \cdot A_{e/L1}} = \frac{17,99 \cdot 10^{-6} \cdot 7}{7,5 \cdot 5,7 \cdot 10^{-4}} \cong 29,46 mT \quad (6.2.94)$$

kde:  $A_{e/L1}$  ... je efektivní (náhradní, ekvivalentní) průřez jádra z datového listu, nebo dle **Tab. 6.6** ( $m^2$ )

Pro vypočtenou hodnotu indukčního zdvihu, se měrný ztrátový výkon odečte z grafu v datovém listu výrobce materiálu jádra [110]. Pro feritový materiál Epcos – TDK N27, při frekvenci dle (6.2.13) je odečtená hodnota přibližně:

$$P_{N27@(\Delta B_{L1}/100kHz/100^\circ C)} \approx 20 \frac{kW}{m^3} \quad (6.2.95)$$

Ztrátový výkon jádra se nyní vypočte:

$$P_{L1/Core} = P_{N27@(\Delta B_{L1}/100kHz/100^\circ C)} \cdot V_{e/L1} = 20 \cdot 6,2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^3 = 1,24W \quad (6.2.96)$$

Na vinutí vznikají jednak ztráty stejnosměrné, způsobené jeho činným odporem, ale také ztráty střídavé, jakožto účinek skin efektu:

$$P_{Coil} = P_{Coil/DC} + P_{Coil/AC} \quad (6.2.97)$$

Příspěvky od ostatních parazitních jevů, jako blízkostní (proximitní) ztráty jsou malé a mohou být zanedbány. Stejnosměrné ztráty se s použitím ohmova zákona obecně spočtou:

$$P_{Coil/DC} = R_{Coil/DC} \cdot I_{Coil/RMS}^2 \quad (6.2.98)$$

Po dosažení stejnosměrné ztráty na vinutí budou:

$$P_{L1/Coil/DC} = R_{L1/DC} \cdot I_{L1/RMS}^2 = 1,949 \cdot 10^{-3} \cdot 40,017^2 \cong 3,121W \quad (6.2.99)$$

Vinutí s menším průřezem by mělo za následek ztráty mnohem výraznější.

Střídavé ztráty se spočtou obdobně, s tím rozdílem, že zde účinkuje pouze proměnná složka proudu tlumivkou:

$$P_{Coil/AC} = R_{Coil/AC} \cdot I_{Coil/AC/RMS}^2 \quad (6.2.100)$$

Protože měrný odpor zůstává stále stejný, střídavý odpor způsobený povrchovým jevem lze jednoduše vyjádřit z poměru dvou ploch:

$$\frac{R_{Coil/AC}}{R_{Coil/DC}} = \frac{\pi \cdot r^2}{\pi \cdot r^2 - \pi \cdot (r - \sigma)^2} \quad (6.2.101)$$

$$R_{L1/AC} = \frac{R_{L1/DC} \cdot r^2}{r^2 - (r - \sigma)^2} = \frac{1,949 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{0,5}{2} \cdot 10^{-3}\right)^2}{\left(\frac{0,5}{2} \cdot 10^{-3}\right)^2 - \left(\frac{0,5}{2} \cdot 10^{-3} - 0,172 \cdot 10^{-3}\right)^2} \cong 2,159 m\Omega \quad (6.2.102)$$

Zde je možné posoudit, že pro střídavý proud má skin efekt opravdu za následek o něco vyšší odpor vinutí.

Efektivní hodnota zvlnění proudu tekoucího induktorem se spočte:

$$I_{L1/AC/RMS} = \Delta I_{L1} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3}} = 7 \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3}} \cong 2,021 A \quad (6.2.103)$$

Po dosazení do vzorce (6.2.100):

$$P_{L1/Coil/AC} = R_{L1/AC} \cdot I_{L1/AC/RMS}^2 = 2,159 \cdot 10^{-3} \cdot 2,021^2 \cong 8,818 mW \quad (6.2.104)$$

Předpoklad, že při splnění podmínky (6.2.39) je možné ztrátový výkon způsobený povrchovým jevem zanedbat se tedy potvrdil.

Celkové ztráty ve vinutí po dosazení do (6.2.98) budou:

$$P_{L1/Coil} = P_{L1/Coil/DC} + P_{L1/Coil/AC} = 3,121 + 0,008818 \cong 3,130 W \quad (6.2.105)$$

Celkový ztrátový výkon na tlumivce po dosazení do (6.2.92) je:

$$P_{L1/max.} = P_{L1/Core} + P_{L1/Coil} = 1,24 + 3,13 = 4,37 W \quad (6.2.106)$$

Dále bude ověřeno, jak moc se za provozu zvýší teplota tlumivky. Celkové oteplení je dáno příspěvkem od jádra a od vinutí:

$$\Delta \mathcal{G}_L = P_{Core} \cdot R_{g/Core} + P_{Coil} \cdot R_{g/Coil} \quad (6.2.107)$$

kde:  $\Delta \mathcal{G}_L$  ... je celkové oteplení tlumivky ( $^{\circ}K \vee ^{\circ}C$ )

$R_{g/Core}$  ... je tepelný odpor jádra ( $^{\circ}K/W \vee ^{\circ}C/W$ )

$R_{g/Coil}$  ... je tepelný odpor vinutí ( $^{\circ}K/W \vee ^{\circ}C/W$ )

Typická hodnota tepelného odporu platná pro jádro PM 62/49 byla zjištěn z datového listu výrobce:

$$R_{g/L1/Core} \approx 12 \frac{K}{W} \quad (6.2.108)$$

Tepelný odpor vinutí může být obtížné přesněji stanovit, protože závisí na mnoha faktorech, jako vlastnostech kostry cívky, geometrii vinutí i jádra, rozložení teplot na DPS, a dalších. Na základě informací z [158], je zvolena odhadem hodnota:

$$R_{g/L1/Coil} \approx 3 \frac{K}{W} \quad (6.2.109)$$

Po dosazení bude nejvyšší teplota tlumivky:

$$\mathcal{G}_{L1} = \mathcal{G}_{a/max.} + \Delta \mathcal{G}_{L1} = \mathcal{G}_{a/max.} + P_{L1/Core} \cdot R_{g/L1/Core} + P_{L1/Coil} \cdot R_{g/L1/Coil} = 50 + 1,24 \cdot 12 + 3,13 \cdot 3 \cong 74,27^{\circ}C \quad (6.2.110)$$

Oteplení celé tlumivky bude způsobeno především stejnosměrnými ztrátami ve vinutí, hlavně při vyšším zatížení agregátu. Maximální povolená pracovní teplota polyuretanového pájitelného izolačního laku vodičů i kostry cívky je shodně 155°C. Mezní pracovní teplota pro hmotu jádra Epcos-TDK N27 je 220°C. Vzhledem k tomu, že vinutí je zcela otevřené a vzduchu ze všech stran dobře přístupno s chlazením by neměly nastat potíže.

Další součástky jenž mohou působit znatelné ztráty jsou tranzistory T1, T2 a dioda D1. Celkový výkon ztracený na tranzistoru MOSFET s kanálem typu N ve spínacím režimu je obecně dán součtem dvou hlavních složek:

$$P_{FET} = P_{CL/FET} + P_{SW/FET} \quad (6.2.111)$$

- kde:  $P_{FET}$  ... je celkový výkon ztracený na tranzistoru MOSFET ( $W$ )  
 $P_{CL/FET}$  ... je výkon ztracený v důsledku vodivostních ztrát (Conduction Losses) ( $W$ )  
 $P_{SW/FET}$  ... je výkon ztracený v důsledku spínacích ztrát (Switching Losses) ( $W$ )

Vodivostní ztráty MOSFETu mohou být rozepsány:

$$P_{CL/FET} = P_{CL/ON/FET} + P_{CL/OFF/FET} + P_{CL/BD/FET} \quad (6.2.112)$$

- kde:  $P_{CL/ON/FET}$  ... je ztrátový výkon způsobený nenulovým odporem vodivého kanálu přechodu DS, jeli tranzistor plně saturován ( $W$ )  
 $P_{CL/OFF/FET}$  ... je ztrátový výkon způsobený svodovými proudy mezi přechody DS a GS, jeli tranzistor zcela uzavřen ( $W$ )  
 $P_{CL/BD/FET}$  ... je ztrátový výkon vznikající na body diodě, při její polarizaci v propustném směru (Body Diode Conduction Losses) ( $W$ )

Spínací ztráty MOSFETu se skládají z řady složek:

$$P_{SW/FET} = P_{SW/ON/FET} + P_{SW/OFF/FET} + P_{SW/GL/FET} + P_{SW/BDRL/FET} + P_{SW/OCL/FET} \quad (6.2.113)$$

- kde:  $P_{SW/ON/FET}$  ... je výkon ztracený během času potřebného k plnému vytvoření vodivého kanálu tranzistoru ( $W$ )  
 $P_{SW/OFF/FET}$  ... je výkon ztracený během času potřebného k úplnému zániku vodivého kanálu tranzistoru ( $W$ )  
 $P_{SW/GL/FET}$  ... je výkon ztracený při nabíjení kapacity řídicí elektrody tranzistoru (Gate Losses) ( $W$ )  
 $P_{SW/BDRL/FET}$  ... je výkon ztracený při zotavování substrátové diody tranzistoru (Body Diode Recovery Losses) ( $W$ )  
 $P_{SW/OCL/FET}$  ... je výkonová ztráta způsobená nabíjením a vybíjením výstupní kapacity tranzistoru (Output Capacitance Losses) ( $W$ )

Obecný výpočet ztrátového výkonu použitelný pro rekuperační diodu D1, byl již dříve uveden (6.1.35).

Tranzistory MOSFET obsahují z technologických důvodů substrátovou diodu chránící přechod DS proti přepólování. Bude-li se vycházet opět ze schématu na **Obr. 6.10** a grafu časování na **Obr. 6.13**, je potřeba rozlišit tři případy. V intervalech  $\Delta T_1$  a  $\Delta T_2$ , když jsou oba tranzistory uzavřeny vede proud pouze substrátová dioda tranzistoru T2 a současně rekuperační dioda D1. Poté co je následně T2 v intervalu  $\{t_3; t_4\}$  otevřen, odpor mezi jeho elektrodami drain-source se zmenší na minimum, takže substrátová dioda se v podstatě neuplatní, ale s vedením proudu stále pomáhá externí schottkyho dioda D1. Proto je v těchto případech potřeba výpočet vodivostních ztrát rozdělit na dvě části.

U tranzistoru T1 je situace jednodušší, protože v intervalu  $\{t_1; t_2\}$  kdy je otevřen vede proud pouze sám. V ostatním čase je uzavřen a jeho substrátová dioda se neuplatňuje vůbec, protože je trvale polarizována závěrně.



Veškeré vodivostní ztráty se nyní postupně spočtou:

$$\delta_{DEAD} = (\Delta T_1 + \Delta T_2) \cdot f_{PWM} = (2 \cdot 10^{-7} + 2 \cdot 10^{-7}) \cdot 10^5 = 0,04 \quad (6.2.114)$$

kde:  $\delta_{DEAD}$  ... je činitel plnění platný pro intervaly  $\Delta T_1$  a  $\Delta T_2$ ,  
dle průběhu na **Obr. 6.13** (–)

$\Delta T_1, \Delta T_2$  ... jsou časové prodlevy použité v PWM signálu při řízení měniče,  
dle průběhu na **Obr. 6.13** (s)

$$\delta_{ON/MAX/T1} = \delta_{max.} - \delta_{DEAD} = 0,88 - 0,04 = 0,84 \quad (6.2.115)$$

kde:  $\delta_{ON/MAX/T1}$  ... je maximální činitel plnění platný pro dobu kdy je tranzistor T1  
otevřen, dle průběhu na **Obr. 6.13** (–)

$$\delta_{ON/MAX/T2} = 1 - \delta_{min.} - \delta_{DEAD} = 1 - 0,1 - 0,04 = 0,86 \quad (6.2.116)$$

kde:  $\delta_{ON/MAX/T2}$  ... je maximální činitel plnění platný pro dobu kdy je tranzistor T2  
otevřen, dle průběhu na **Obr. 6.13** (–)

$$P_{CL/ON/T1} = R_{DS/ON/MAX/T1} \cdot I_{D/RMS/T1}^2 = R_{DS/ON/MAX/T1} \cdot (I_{L1/RMS} \cdot \sqrt{\delta_{ON/MAX/T1}})^2 = 5,9 \cdot 10^{-3} \cdot (40,017 \cdot \sqrt{0,84})^2 = 7,936W \quad (6.2.117)$$

kde:  $R_{DS/ON/MAX/T1}$  ... je maximální odpor vodivého kanálu tranzistoru T1 ( $\Omega$ )  
 $I_{D/RMS/T1}$  ... je efektivní hodnota proudu tekoucího drainem T1 (A)

$$P_{CL/ON/T2} = R_{DS/ON/MAX/T2} \cdot I_{D/RMS/T2}^2 = R_{DS/ON/MAX/T2} \cdot (I_{L1/RMS} \cdot \sqrt{\delta_{ON/MAX/T2}})^2 = 5,9 \cdot 10^{-3} \cdot (40,017 \cdot \sqrt{0,86})^2 \cong 8,125W \quad (6.2.118)$$

kde:  $R_{DS/ON/MAX/T2}$  ... je maximální odpor vodivého kanálu tranzistoru T2 ( $\Omega$ )  
 $I_{D/RMS/T2}$  ... je efektivní hodnota proudu tekoucího drainem T2 (A)

$$P_{CL/ON/D1} = V_{T0/D1} \cdot I_{F/AV/D1} + r_{d/D1} \cdot I_{F/RMS/D1}^2 = V_{F0/D1} \cdot \frac{I_{L1/MIN} + I_{L1/MAX}}{2} \cdot \delta_{ON/MAX/T2} + r_{d/D1} \cdot (I_{L1/RMS} \cdot \sqrt{\delta_{ON/MAX/T2}})^2 = 0,63 \cdot \frac{1}{2} \cdot (36,5 + 43,5) \cdot 0,86 + 3,4 \cdot 10^{-3} \cdot (40,017 \cdot \sqrt{0,86})^2 = 26,354W \quad (6.2.119)$$

$$P_{CL/ON@(T2||D1)} = \frac{P_{CL/ON/T2} \cdot P_{CL/ON/D1}}{P_{CL/ON/T2} + P_{CL/ON/D1}} = \frac{8,125 \cdot 26,354}{8,125 + 26,354} = 6,210W \quad (6.2.120)$$

kde:  $P_{CL/ON@(T2||D1)}$  ... je maximální celkový vodivostní ztrátový výkon,  
s uplatněním v době kdy je tranzistor T2 otevřen (W)

$$P_{CL/DEAD/D1} = V_{F0/D1} \cdot \frac{I_{L1/MIN} + I_{L1/MAX}}{2} \cdot \delta_{DEAD} + r_{d/D1} \cdot (I_{L1/RMS} \cdot \sqrt{\delta_{DEAD}})^2 = 0,63 \cdot \frac{1}{2} \cdot (36,5 + 43,5) \cdot 0,04 + 3,4 \cdot 10^{-3} \cdot (40,017 \cdot \sqrt{0,04})^2 = 1,242W \quad (6.2.121)$$

$$P_{CL/BD/DEAD/T2} = V_{SD/T2} \cdot \frac{I_{L1/MIN} + I_{L1/MAX}}{2} \cdot \delta_{DEAD} = 1,3 \cdot \frac{1}{2} \cdot (36,5 + 43,5) \cdot 0,04 = 2,08W \quad (6.2.122)$$

kde:  $V_{SD/T2}$  ... je maximální úbytek napětí na substrátové diodě tranzistoru T2  
z datového listu (V)

$$P_{CL@(BD/T2&DEAD/D1)} = \frac{P_{CL/BD/DEAD/T2} \cdot P_{CL/DEAD/D1}}{P_{CL/BD/DEAD/T2} + P_{CL/DEAD/D1}} = \frac{2,08 \cdot 1,242}{2,08 + 1,242} = 0,778W \quad (6.2.123)$$

kde:  $P_{CL@(BD/T2&DEAD/D1)}$  ... je maximální celkový vodivostní ztrátový výkon  
působící v intervalech  $\Delta T_1$  a  $\Delta T_2$ , dle **Obr. 6.13** (W)

Ztráty způsobené svodovými proudy jsou u tranzistoru MOSFET velmi malé a většinou je lze zanedbat. Pro úplnost mohou být přibližně stanoveny:

$$\delta_{OFF/MAX/T1} = \delta_{ON/MAX/T2} \quad , \quad \delta_{OFF/MAX/T2} = \delta_{ON/MAX/T1} \quad (6.2.124)$$

kde:  $\delta_{OFF/MAX/T1} \dots$  je maximální činitel plnění platný pro dobu kdy je tranzistor T1 uzavřen, dle grafu na **Obr. 6.13** (–)

$\delta_{OFF/MAX/T2} \dots$  je maximální činitel plnění platný pro dobu kdy je tranzistor T2 uzavřen, dle grafu na **Obr. 6.13** (–)

$$P_{CL/OFF/T1} = V_{SMO/AV/\max.} \cdot I_{DSS/T1} \cdot \delta_{OFF/MAX/T1} = 90 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,86 = 19,35 mW \quad (6.2.125)$$

$$P_{CL/OFF/T2} = V_{SMO/AV/\max.} \cdot I_{DSS/T2} \cdot \delta_{OFF/MAX/T2} = 90 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,84 = 18,90 mW \quad (6.2.126)$$

kde:  $I_{DSS/T1}$  ,  $I_{DSS/T2} \dots$  je maximální svodový proud mezi elektrodami drain a source z datového listu tranzistoru (A)

$$P_{CL/OFF/D1} = V_{SMO/AV/\max.} \cdot I_{R/D1} \cdot \delta_{OFF/MAX/T2} = 90 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,84 = 37,8 mW \quad (6.2.127)$$

kde:  $I_{R/D1} \dots$  je maximální závěrný svodový proud diody dle datového listu (A)

Spínací ztráty tranzistoru MOSFET lze rozepsat:

$$P_{SW/ON/FET} = E_{ON/FET} \cdot f_{PWM} \quad , \quad P_{SW/OFF/FET} = E_{OFF/FET} \cdot f_{PWM} \quad (6.2.128)$$

kde:  $E_{ON/FET} \dots$  je energie potřebná k otevření tranzistoru (J)

$E_{OFF/FET} \dots$  je energie potřebná k uzavření tranzistoru (J)

$$E_{ON/FET} = P_{FET} \cdot t_{ON/FET} \quad , \quad E_{OFF/FET} = P_{FET} \cdot t_{OFF/FET} \quad (6.2.129)$$

kde:  $P_{FET} \dots$  je výkon přenášený přes tranzistor během relevantních časových intervalů (W)

$t_{ON/FET} \dots$  je doba náběhu proudu drainem, během procesu sepnutí tranzistoru (s)

$t_{OFF/FET} \dots$  je doba poklesu napětí na přechodu drain-source, během procesu uzavření tranzistoru (s)

$$P_{FET} = \frac{1}{2} \cdot V_{D/FET@P_{OUT/AGR/\max.}} \cdot I_{D/FET@P_{OUT/AGR/\max.}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{OUT/AGR/\max.}}{\eta_{DC/DC}} \quad (6.2.130)$$

kde:  $V_{D/FET} \dots$  je napětí na elektrodě drain tranzistoru (V)

$I_{D/FET} \dots$  je proud tekoucí drainem tranzistoru (A)

$$t_{FET/ON} = \frac{Q_{G/SW}}{I_{Driver/L \rightarrow H/FET}} \quad , \quad t_{FET/OFF} = \frac{Q_{G/SW}}{I_{Driver/H \rightarrow L/FET}} \quad (6.2.131)$$

kde:  $Q_{G/SW} \dots$  je spínací náboj (Switching Charge) hradla T1, T2 (C)

$I_{Driver/L \rightarrow H/FET} \dots$  je průměrný proud dodávaný z budiče během  $t_{FET/ON}$  (A)

$I_{Driver/H \rightarrow L/FET} \dots$  je průměrný proud dodávaný z budiče během  $t_{FET/OFF}$  (A)

$$Q_{G/SW} \approx Q_{GD} + \frac{Q_{GS}}{2} = 55 \cdot 10^{-9} + \frac{52 \cdot 10^{-9}}{2} = 81 \cdot 10^{-9} C \quad (6.2.132)$$

kde:  $Q_{GD} \dots$  je náboj mezi elektrodami gate a drain tranzistoru T1, T2 (C)

$Q_{GS} \dots$  je náboj mezi elektrodami gate a source tranzistoru T1, T2 (C)

$$I_{Driver/L \rightarrow H/FET} = \frac{V_{CC/Driver} - V_{PL}}{R_{OH/Total}} \quad , \quad I_{Driver/H \rightarrow L/FET} = \frac{V_{PL}}{R_{OL/Total}} \quad (6.2.133)$$

kde:  $V_{PL} \dots$  je tzv. Millerovo napětí (Miller Plateau Voltage) pro T1 i T2 (V)

$$V_{PL} = V_{GS/TH/MAX} + \frac{I_{D/FET}}{G_{fs}} = 5 + \frac{40}{162} \cong 5,25V \quad (6.2.134)$$

kde:  $V_{GS/TH/MAX}$  ... je nejvyšší prahové napětí tranzistorů T1 a T2, odečtené z datového listu ( $V$ )

$G_{fs}$  ... je transkonduktance tranzistorů T1 a T2 z datového listu ( $S$ )

Po dosazení do výše uvedených rovnic:

$$I_{Driver/L \rightarrow H/T1} = \frac{12 - 5,25}{7,23} \cong 0,934A \quad , \quad I_{Driver/H \rightarrow L/T1} = \frac{5,25}{5,37} \cong 0,978A \quad (6.2.135)$$

$$t_{ON/T1} = \frac{81 \cdot 10^{-9}}{0,934} \cong 86,724ns \quad , \quad t_{OFF/T1} = \frac{81 \cdot 10^{-9}}{0,978} \cong 82,822ns \quad (6.2.136)$$

$$P_{T1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{400}{0,8} = 250W \quad (6.2.137)$$

$$E_{ON/T1} = 250 \cdot 86,724 \cdot 10^{-9} \cong 2,168 \cdot 10^{-5} J \quad (6.2.138)$$

$$E_{OFF/T1} = 250 \cdot 82,822 \cdot 10^{-9} \cong 2,071 \cdot 10^{-5} J \quad (6.2.139)$$

$$P_{SW/ON/T1} = 2,168 \cdot 10^{-5} \cdot 10^5 = 2,168W \quad (6.2.140)$$

$$P_{SW/OFF/T1} = 2,071 \cdot 10^{-5} \cdot 10^5 = 2,071W \quad (6.2.141)$$

$$P_{SW/T1} = P_{SW/ON/T1} + P_{SW/OFF/T1} = 2,168 + 2,071 = 4,239W \quad (6.2.142)$$

Spínací ztráty tranzistoru T2 jsou velmi malé a většinou je lze zanedbat. Důvod je ten, že v okamžiku kdy tranzistor T1 vypne, téměř ihned začne vést substrátová dioda tranzistoru T2, v tomto případě i společně s externí schottkyho diodou D1. Jakmile poté sepne tranzistor T2, napětí na něm je již rovno propustnému úbytku obou paralelně spojených diod. Přibližně je možné tyto ztráty spočítat například pomocí postupu popsaného v aplikační poznámce [117]:

$$P_{SW/T2} \approx \left( t_{A/T2} \cdot V_{BD/T2\&D1} + t_{B/T2} \cdot 0,5 \cdot \left( \frac{V_{BD/T2\&D1} + I_{D/MAX/T2}}{1,1 \cdot R_{DS/ON/MAX/T2}} \right) \right) \cdot I_{D/MAX/T2} \cdot f_{PWM} \quad (6.2.143)$$

kde:  $t_{A/T2}$  ... je první část časového intervalu trvání sepnutí, nebo vypnutí T2 ( $s$ )

$t_{B/T2}$  ... je druhá část časového intervalu trvání sepnutí, nebo vypnutí T2 ( $s$ )

$V_{BD/T2\&D1}$  ... je výsledný úbytek napětí na substrátové diodě tranzistoru T2 paralelně zapojené s externí schottkyho diodou D1 ( $V$ )

$$V_{BD/T2\&D1} = \frac{V_{SD/T2@(103A/25^\circ C)} \cdot V_{F/D1@(100A/25^\circ C)}}{V_{SD/T2@(103A/25^\circ C)} + V_{F/D1@(100A/25^\circ C)}} = \frac{1,3 \cdot 1,15}{1,3 + 1,15} = 0,610V \quad (6.2.144)$$

kde:  $V_{SD/T2@(103A/25^\circ C)}$  ... je nejvyšší propustný úbytek napětí na substrátové diodě tranzistoru T2 ( $V$ )

$V_{F/D1@(100A/25^\circ C)}$  ... je nejvyšší propustný úbytek napětí na externí schottkyho diodě D1 ( $V$ )

$$t_{ON/A/T2} = K_{t_{ON/A/T2}} \cdot R_{TOTAL/ON} \cdot C_{ISS/T2} \quad (6.2.145)$$

$$t_{ON/B/T2} = K_{t_{ON/B/T2}} \cdot R_{TOTAL/OFF} \cdot C_{ISS/T2} \quad (6.2.146)$$

kde:  $K_{t_{ON/A/T2}}$ ,  $K_{t_{ON/B/T2}}$  ... jsou časové konstanty pro jednotlivé intervaly ( $-$ )

$C_{ISS/T2}$  ... je vstupní kapacita tranzistoru T2 z datového listu ( $F$ )

$$K_{t_{ON/A/T2}} \approx \ln\left(\frac{V_{CC/Driver}}{V_{CC/Driver} - V_{PL}}\right) - \ln\left(\frac{V_{CC/Driver}}{V_{CC/Driver} - V_{GS/TH/MAX}}\right) =$$

$$= \ln\left(\frac{12}{12 - 5,25}\right) - \ln\left(\frac{12}{12 - 5}\right) \cong 0,036 \quad (6.2.147)$$

$$K_{t_{ON/B/T2}} \approx \ln\left(\frac{V_{CC/Driver}}{V_{CC/Driver} - 0,9 \cdot V_{GS@R_{DS/ON/MAX/T2}}}\right) - \ln\left(\frac{V_{CC/Driver}}{V_{CC/Driver} - V_{PL}}\right) =$$

$$= \ln\left(\frac{12}{12 - 0,9 \cdot 10}\right) - \ln\left(\frac{12}{12 - 5,25}\right) \cong 0,847 \quad (6.2.148)$$

kde:  $V_{GS@R_{DS/ON/MAX/T2}}$  ... je napětí na elektrodě gate, při nejvyšším specifikovaném odporu vodivého kanálu tranzistoru T2 z datového listu ( $V$ )

$$t_{OFF/A/T2} = K_{t_{OFF/A/T2}} \cdot R_{OH/Total} \cdot C_{ISS/T2} \quad (6.2.149)$$

$$t_{OFF/B/T2} = K_{t_{OFF/B/T2}} \cdot R_{OL/Total} \cdot C_{ISS/T2} \quad (6.2.150)$$

kde:  $K_{t_{OFF/A/T2}}$ ,  $K_{t_{OFF/B/T2}}$  ... jsou časové konstanty pro jednotlivé intervaly (-)

$$K_{t_{OFF/A/T2}} \approx \ln\left(\frac{0,9 \cdot V_{GS@R_{DS/ON/T2/MAX}}}{V_{PL}}\right) = \ln\left(\frac{0,9 \cdot 10}{5,25}\right) \cong 0,539 \quad (6.2.151)$$

$$K_{t_{OFF/B/T2}} \approx \ln\left(\frac{V_{PL}}{V_{GS/TH/MAX}}\right) = \ln\left(\frac{5,25}{5}\right) \cong 0,049 \quad (6.2.152)$$

Po dosazení do předchozích vztahů:

$$t_{ON/A/T2} = 0,036 \cdot 7,23 \cdot 1,047 \cdot 10^{-8} = 2,73 ns \quad (6.2.153)$$

$$t_{ON/B/T2} = 0,847 \cdot 5,37 \cdot 1,047 \cdot 10^{-8} = 49,14 ns \quad (6.2.154)$$

$$t_{OFF/A/T2} = 0,539 \cdot 7,23 \cdot 1,047 \cdot 10^{-8} = 40,80 ns \quad (6.2.155)$$

$$t_{OFF/B/T2} = 0,049 \cdot 5,37 \cdot 1,047 \cdot 10^{-8} = 2,76 ns \quad (6.2.156)$$

$$P_{SW/ON/T2} \approx \left( \frac{2,73 \cdot 10^{-9} \cdot 0,61 + 49,14 \cdot 10^{-9}}{0,5 \cdot (0,61 + 40 \cdot 1,1 \cdot 5,9 \cdot 10^{-3})} \right) \cdot 40 \cdot 10^5 \cong 0,092 W \quad (6.2.157)$$

$$P_{SW/OFF/T2} \approx \left( \frac{40,8 \cdot 10^{-9} \cdot 0,61 + 2,76 \cdot 10^{-9}}{0,5 \cdot (0,61 + 40 \cdot 1,1 \cdot 5,9 \cdot 10^{-3})} \right) \cdot 40 \cdot 10^5 \cong 0,104 W \quad (6.2.158)$$

$$P_{SW/T2} = P_{SW/ON/T2} + P_{SW/OFF/T2} = 0,092 + 0,104 = 0,196 W \quad (6.2.159)$$

Ztráty vzniklé nabíjením kapacity řídicí elektrody tranzistorů byly již uvedeny ve výpočtech ztrát na budičích a odpovídají:

$$P_{SW/GL/T1} = P_{SW/GL/T2} = P_{GATE/FET} = 0,222 W \quad (6.2.160)$$

$P_{GATE/FET}$ . Ztráty vznikající vlivem nabíjení a vybíjení výstupní kapacity tranzistorů a diody D1 se spočtou:

$$P_{SW/OCL/T1} = 0,5 \cdot C_{OSS} \cdot V_{DS/MAX/T1}^2 \cdot f_{PWM} = 0,5 \cdot 9,77 \cdot 10^{-10} \cdot 90^2 \cdot 10^5 = 0,396 W \quad (6.2.161)$$

$$P_{SW/OCL/T2} = 0,5 \cdot C_{OSS} \cdot V_{DS/MAX/T2}^2 \cdot f_{PWM} = 0,5 \cdot 9,77 \cdot 10^{-10} \cdot 90^2 \cdot 10^5 = 0,396 W \quad (6.2.162)$$

$$P_{SW/OCL/D1} = 0,5 \cdot C_J \cdot V_{KA/MAX/D1}^2 \cdot f_{PWM} = 0,5 \cdot 3 \cdot 10^{-10} \cdot 90^2 \cdot 10^5 = 0,122 W \quad (6.2.163)$$

kde:  $C_{OSS}$  ... je výstupní kapacita tranzistorů T1 a T2 z datového listu [85] ( $F$ )

$C_J$  ... je kapacita přechodu diody D1 zjištěná z datového listu [83] ( $F$ )

Závěrné zotavovací ztráty substrátové diody tranzistoru T2 se spočtou:

$$P_{SL/BDRL/T2} = Q_{rr@(103A/125^{\circ}C)} \cdot V_{DS/MAX/T2} \cdot f_{PWM} = 7,58 \cdot 10^{-7} \cdot 90 \cdot 10^5 = 6,822W \quad (6.2.164)$$

kde:  $Q_{rr@(103A/125^{\circ}C)}$  ... je maximální závěrný zotavovací náboj substrátové diody tranzistoru T2, získaný z datového listu [85] (C)

Celkové ztráty na jednotlivých součástkách budou:

$$P_{T1/max.} = P_{CL/ON/T1} + P_{CL/OFF/T1} + P_{SW/T1} + P_{SW/GL/T1} + P_{SW/OCL/T1} = 7,936 + 0,01935 + 4,239 + 0,222 + 0,396 \cong 12,81W \quad (6.2.165)$$

$$P_{T2/max.} = \frac{P_{CL/ON/T2} \cdot P_{CL/ON@(T2||D1)}}{P_{CL/ON/T2} + P_{CL/ON/D1}} + \frac{P_{CL/BD/DEAD/T2} \cdot P_{CL@(BD/T2&DEAD/D1)}}{P_{CL/BD/DEAD/T2} + P_{CL/DEAD/D1}} + P_{CL/OFF/T2} + P_{SW/T2} + P_{SW/GL/T2} + P_{SW/OCL/T2} + P_{SL/BDRL/T2} = \frac{8,125 \cdot 6,21}{8,125 + 26,354} + \frac{2,08 \cdot 0,778}{2,08 + 1,242} + 0,0189 + 0,176 + 0,222 + 0,396 + 6,822 \cong 9,59W \quad (6.2.166)$$

$$P_{D1/max.} = \frac{P_{CL/ON/D1} \cdot P_{CL/ON@(T2||D1)}}{P_{CL/ON/T1} + P_{CL/ON/D1}} + \frac{P_{CL/DEAD/D1} \cdot P_{CL@(BD/T2&DEAD/D1)}}{P_{CL/BD/DEAD/T2} + P_{CL/DEAD/D1}} + P_{CL/OFF/D1} + P_{SW/OCL/D1} = \frac{26,354 \cdot 6,21}{8,125 + 26,354} + \frac{1,242 \cdot 0,778}{2,08 + 1,242} + 0,0378 + 0,122 \cong 5,197W \quad (6.2.167)$$

Při výpočtech ztrát polovodičových součástek byla použita literatura [117-136], kde lze také dohledat odvození a podrobnější vysvětlení použitých vztahů.

Maximální teplota čipu tranzistorů T1, T2 a diody D1 v provozu, bez přidaného externího chladiče se spočte:

$$\mathcal{G}_{j/max./T1} = \mathcal{G}_{a/max.} + \Delta \mathcal{G}_{j/max./T1} = \mathcal{G}_{a/max.} + P_{T1/max.} \cdot R_{g(j \rightarrow c)/max./T1} = 50 + 12,81 \cdot 0,29 \cong 53,7^{\circ}C \quad (6.2.168)$$

$$\mathcal{G}_{j/max./T2} = \mathcal{G}_{a/max.} + \Delta \mathcal{G}_{j/max./T2} = \mathcal{G}_{a/max.} + P_{T2/max.} \cdot R_{g(j \rightarrow c)/max./T2} = 50 + 9,59 \cdot 0,29 \cong 52,8^{\circ}C \quad (6.2.169)$$

$$\mathcal{G}_{j/max./D1} = \mathcal{G}_{a/max.} + \Delta \mathcal{G}_{j/max./D1} = \mathcal{G}_{a/max.} + P_{D1/max.} \cdot R_{g(j \rightarrow c)/max./D1} = 50 + 5,197 \cdot 0,55 \cong 52,9^{\circ}C \quad (6.2.170)$$

Maximální povolené trvalé pracovní teploty všech tří součástek jsou mnohem vyšší, proto není nezbytně nutné opatřovat je chladičem. Ze stejných důvodů jako v případě třífázového usměrňovače byly malé chladiče doplněny a to jeden společný pro T1 i T2 a druhý samostatný pro diodu D1, oba s tepelným odporem přibližně 5 K/W.

Účinnost celého výkonového měniče se spočte:

$$\eta_{DC/DC} = \frac{P_{OUT/AGR/max.} \cdot 100}{P_{OUT/AGR/max.} + P_{C_{IN}/max.} + P_{C_{OUT}/max.} + P_{L1/max.} + P_{T1/max.} + P_{T2/max.} + P_{D1/max.}} = \frac{400 \cdot 100}{400 + 0,121 + 0,007313 + 4,37 + 12,81 + 9,59 + 5,197} \cong 92,6\% \quad (6.2.171)$$

Výsledek platí pro nejhorší případ pracovních podmínek agregátu. Pro synchronní sestupné měniče je účinnost nad 90% typická, což je také zajištěno dobrými parametry použitých součástek a jejich značným předimenzováním. Ovšem díky tomu, že v průběhu výpočtů byla provedena řada zaokrouhlení, zjednodušujících předpokladů a některé ztráty byly zanedbány, je pravděpodobné, že reálná hodnota bude o něco nižší. Každopádně prvotní odhad 80% byl velmi pesimistický.

## 5.3 Měření napětí

Sledované veličiny (napětí, proud, otáčky) budou měřeny pomocí A/D převodníku buď přímo, nebo v případě proudu zprostředkovaně, mezipřevodem na napětí.

### 5.3.1 Výběr A/D převodníku

Při volbě vhodného IO ADC se zvažovala především dostatečná rychlost vzorkování a rozlišení. Záměrně byl použit jeden vícekanálový převodník, čímž se zjednodušila obsluha z MCU a návrh DPS. Využit byl nakonec poměrně běžný 12-ti bitový osmikanálový A/D převodník s postupnou aproximací (SAR) **MCP3208** [92] od firmy Microchip. Protože standardní lineární stabilizátor který bude obvod napájet nemá vyhovující přesnost, ani teplotní stabilitu, aby mohl posloužit jako zdroj referenčního napětí, bude zde k tomuto účelu využít separátní IO.

Referenční napětí bylo zvoleno:

$$V_{REF} = 5,00V \quad (6.3.1)$$

Rozlišení převodníku se vybralo tak, aby napěťová velikost jednoho vzorku byla mnohem menší, než maximální zvlnění stabilizovaného SS napětí na výstupu agregátu. Řídící jednotka musí mít informaci o velikosti odchylky ještě před dosažením jejího povoleného maxima, aby mohla v čas provést odpovídající regulační zásah.

Při rozlišení 12 bitů je počet vzorků:

$$n_{SAMPLE} = 2^{12} = 4096 \quad (6.3.2)$$

Velikost jednoho vzorku pak bude:

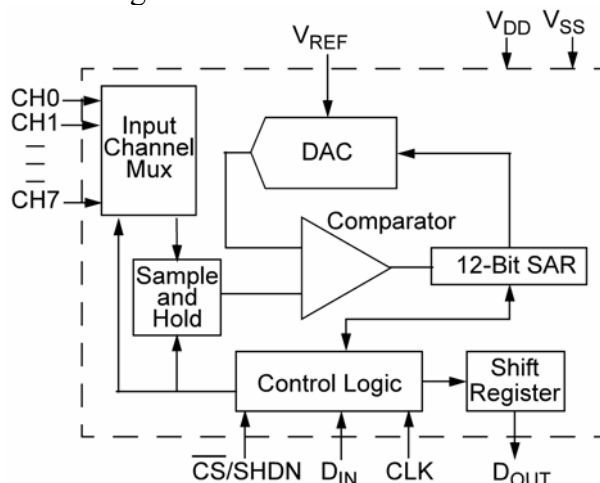
$$V_{SAMPLE} = \frac{V_{REF}}{n_{SAMPLE}} = \frac{5}{4096} \cong 1,221mV \ll \frac{\Delta V_{OUT/AGR/DC/max.}}{d_{VOUT}} = \frac{0,1}{4} = 25mV \quad (6.3.3)$$

kde:  $d_{VOUT}$  ... je dělicí poměr na příslušném analogovém vstupu převodníku (–)

Při napájecím napětí 5V je obvod schopen dosáhnout konverzní rychlosti až 100 ksps. Se správnou obsluhou z MCU bude díky tomu možné získávat dostatečné množství údajů pro vytvoření rychlé regulační smyčky, kvůli dobré reakci na skokové změny zátěže.

### 5.3.2 Princip funkce ADC

Na **Obr. 6.22** se nachází blokové schéma vnitřního uspořádání použitého obvodu, kde lze dobře demonstrovat princip funkce převodníku architektury SAR, tedy ADC s postupným aproximačním registrem.

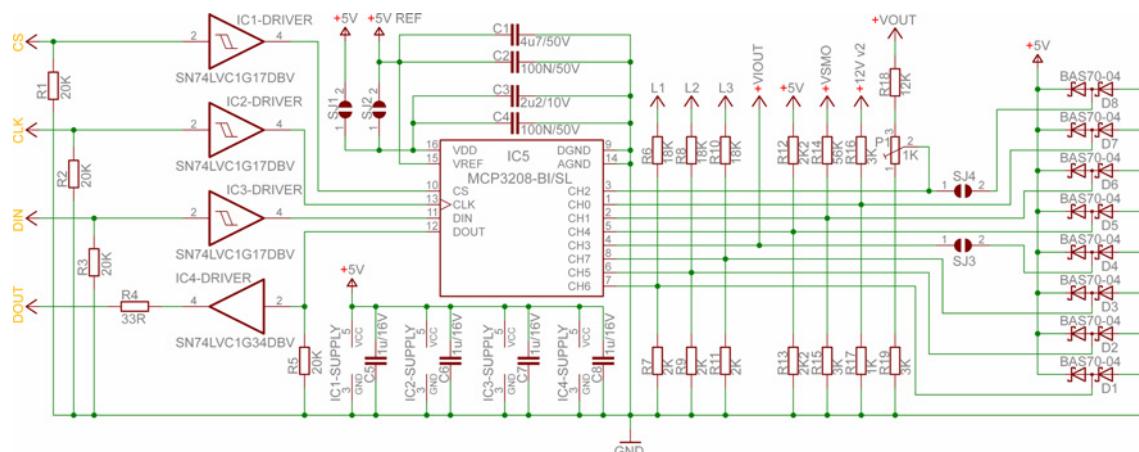


**Obrázek 6.22** : Princip funkce ADC – architektura s využitím SAR (převzato a upraveno z [92])

Kontrolní logika nejprve na základě předchozí komunikace s MCU vybere jeden z osmi multiplexovaných analogových vstupů. Napětíová úroveň daného kanálu je poté zachycena obvodem „Sample and Hold“ (S&H), který ji na svém výstupu udrží konstantní po celou dobu konverze. Digitálně – analogový převodník (blok DAC) je přímo řízen 12-ti bitovým slovem uloženým v registru SAR, přičemž amplituda výsledného napětí je opřena o referenci  $V_{REF}$ . Konverze začíná tím, že se v SAR nastaví MSB na log. 1 a DAC na výstupu tím pádem vytvoří polovinu referenčního napětí. Komparátor následně toto napětí porovnává s napětím zaznamenaným blokem S&H. Výsledek operace se zapíše do MSB v SAR. Proces se postupně opakuje ještě v jedenácti krocích, přičemž výsledky se zapisují do ostatních MSB bitů v SAR. Získané bity jsou kontrolní logikou předávány do výstupního posuvného registru již během konverze, což umožňuje rychlejší práci převodníku a urychlení komunikace s MCU. V podstatě je zde využíváno metody pulených intervalů.

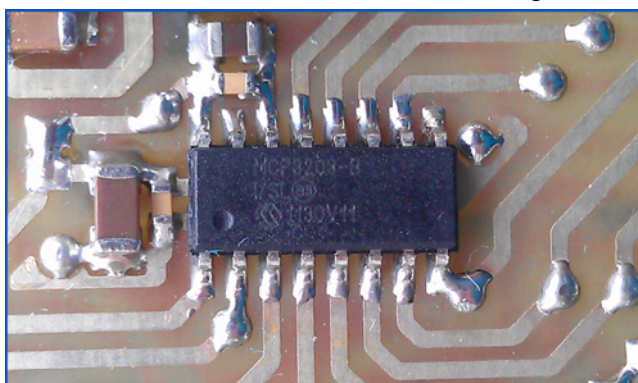
### 5.3.3 Obvod pro měření napětí

Schéma zapojení celého obvodu s A/D převodníkem se nachází na **Obr. 6.23**.



**Obrázek 6.23** : Schéma zapojení obvodu k měření napětí

Komunikace s MCU zde probíhá přes čtyřvodičovou SPI sběrnici. U konektoru k propojení s řídicí jednotkou jsou na DPS opět umístěny nejprve budiče sběrnice IC1 až IC4, spolu s rezistory R1 až R5, kvůli impedančnímu přizpůsobení, vzhledem k dlouhému propojovacímu kabelu. Pokud jde o IC5, důraz byl kladen na jeho umístění co nejbližší k hlavním měřeným napětím, tj. výstupnímu konektoru měniče a proudovému senzoru. K napájení převodníku i budičů je použito napětí 5V z lineárního stabilizátoru. U blokovacích kondenzátorů C1 až C4 je dle doporučení [92] více než jindy důležité umístění v těsné blízkosti vývodů SMD pouzdra převodníku. Pájitelné propojky SJ1 až SJ4 umožnily provést postupné oživení zapojení a ověřit jeho správnou funkci. Pouzdro převodníku SOIC18 s montáží na DPS lze spatřit na **Obr. 6.24**.



**Obrázek 6.24** : Ukázka montáže A/D převodníku – pouzdro SOIC18



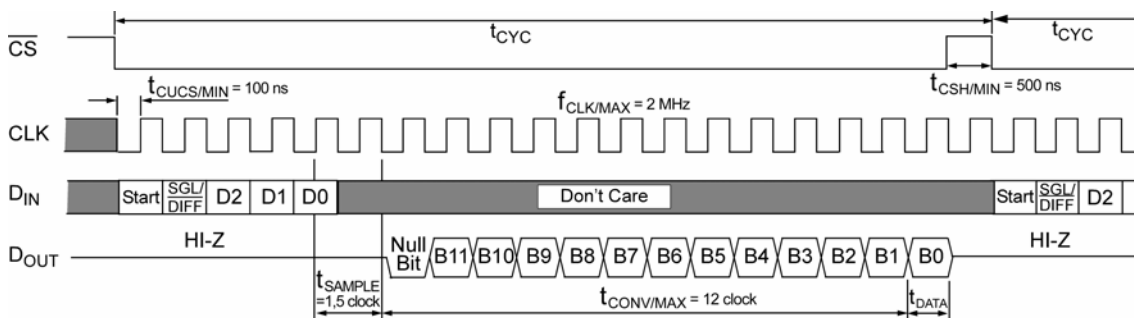
### 5.3.4 Snímaná napětí a jejich úprava

Napětí přiváděná na jednotlivé analogové vstupy musí být vždy menší, než použité referenční i napájecí napětí obvodu, jinak dojde k poškození daného kanálu. Většina měřených napětí je výrazně větší a proto jsou upraveny pomocí přesných odporových děličů. Zapojení s OZ zde použito nebude. Dále jsou přidány dvojité ochranné diody D1 až D8, které v případě výskytu kladného či záporného přepětí překračující 5V provedou svod buď na zem, nebo na kladné napájecí napětí +5V. Tímto způsobem jsou dodatečně ochráněny všechny kanály. Aby byly děliče dostatečně „tvrdé“ a nedocházelo k ovlivňování měřených veličin, trvale protékající proudy skrz ně jsou voleny v řádu jednotek mA. Dělicí poměry jsou voleny tak, aby výsledná hodnota byla vždy bezpečně v rozsahu referenčního napětí.

Výpadek jedné z fází generátoru, například náhodným povytažením konektoru, by mohl zapříčinit přetížení zbývajících vinutí generátoru. Proto se napětí všech tří fází L1 až L3 sledují a takový chybový stav je řídicí jednotkou detekován. Otáčky jsou měřeny prostřednictvím velikosti napětí v SMO, které musí odpovídat KV poměru osazeného generátoru. Do děliče pro měření výstupního napětí je včleněn navíc víceotáčkový cermetový trimr, kvůli možnosti přesného dostavení. Proud je měřen zprostředkovaně mezipřevodem na napětí proudovým senzorem. Na jeho výstupu se může vyskytnou maximálně napětí přibližně 4,5V a proto se na tomto kanálu žádný dělič nenachází. Napětí +5V a +12V v2 jsou sledována pouze z důvodů využití zbývajících kanálů převodníku, přičemž řídicí jednotka hlásí problém při překročení jejich nastaveného tolerančního pásma.

### 5.3.5 Komunikace s převodníkem po SPI sběrnici

Komunikace s MCU na řídicí jednotce probíhá přes SPI sběrnici, která se skládá ze čtyř funkčních vodičů: CS (Chip Select), CLK (Clock), DIN (Data Input) a DOUT (Data Output). Přičemž MCU zde hraje roli řídicího obvodu (Master) a ADC je jediné zařízení (Slave). Popis komunikace včetně časování je graficky znázorněn na **Obr. 6.25**.



**Obrázek 6.25** : Komunikace s A/D převodníkem po SPI sběrnici (převzato a upraveno z [92])

V klidovém stavu musí být CS v log. 1, přičemž na stavu ostatních vodičů nezáleží. Komunikace začíná, když CS přejde do log. 0. Po uplynutí času potřebného k aktivaci obvodu, může MCU vyslat první náběžnou hranu hodinového signálu, během které již obvod kontroluje stav vodiče DIN, kde je očekáván „Start Bit“, který musí být vždy log. 1. Při dalších čtyřech náběžných hranách CLK si obvod z DIN převezme čtyři bity kontrolního slova. První bit označený „SGL/DIFF“ určuje jestli kanál se kterým se bude pracovat má fungovat v samostatném, či diferenciálním módu [92]. Všech 8 kanálů zde bude fungovat v režimu samostatném, proto tento bit bude vždy log. 1. Další 3 bity D2 až D0 reprezentují binárně psané číslo kanálu, ze kterého se bude vzorkovat, přičemž D2 je MSB. S příchodem následující, v pořadí již páté náběžné hrany CLK, začíná 1,5 hodinového taktu trvající časový interval, potřebný k bezpečnému zaznamenání analogové hodnoty v bloku S&H (nabíjí se zde kondenzátor).

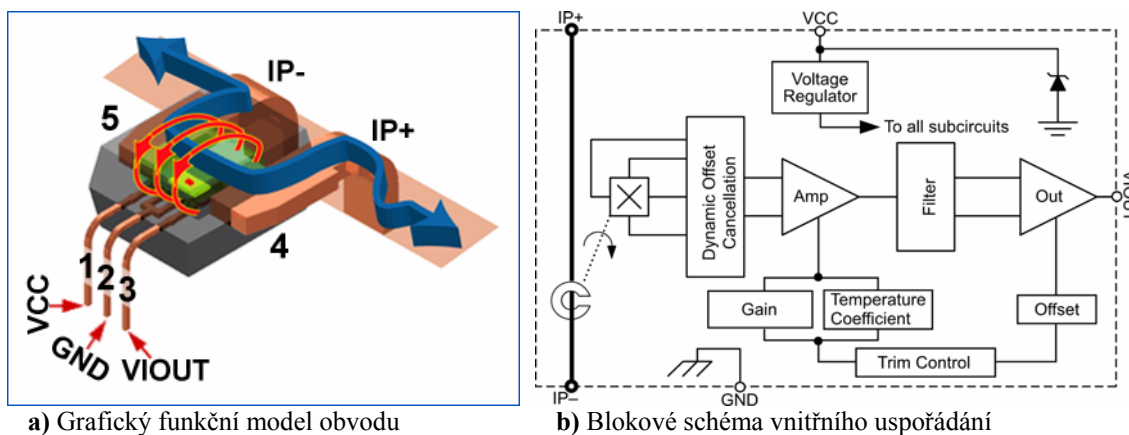
Po uplynutí této doby, spolu se sestupnou hranou CLK, přechází vodič DOUT ze stavu vysoké impedance do stavu log. 0, což je počátek uvozujícího „Null Bitu“. Ten mikrokontroléru sděluje, že kontrolní slovo bylo přijal a konverze, která probíhá následujících dvanáct hodinových taktů, může začít. Data jsou na vodič DOUT vysílána průběžně, vždy se sestupnou hranou CLK. Podprogram pro komunikaci MCU s převodníkem byl kvůli rychlejšímu sběru vzorků ze všech kanálů napsán v assembleru. Pro zajištění bezchybné komunikace při vyšších frekvencích CLK je nutné dodržet i některá další časování, jak je uvedeno v [92].

## 5.4 Měření proudu

Má-li být výkon spalovacího motoru optimálně regulován, je potřeba získávat informaci o výkonu který je aktuálně dodáván na výstup agregátu do připojené zátěže. Napětí je zde sice konstantní, ale výstupní proud nikoliv a proto musí být sledován. To se obvykle provádí měřením úbytku napětí na nízko odporovém výkonovém rezistoru, nebo pomocí snímacího proudového transformátoru. V dnešní době se otevírá ještě třetí možnost a to využití polovodičového proudového senzoru. Výhoda tohoto řešení spočívá v jednoduché aplikaci s minimalizací průchozího odporu a zachování dobré přesnosti, citlivosti, odezvy a snadného vyhodnocení výsledku měření.

### 5.4.1 Princip funkce proudového senzoru

K měření proudu do zátěže bude použit polovodičový integrovaný proudový senzor ACS750SCA-100 od firmy Allegro Micro Systems [69]. Vhodný je k měření AC i DC proudu v obou směrech až do 100A. Na Obr. 6.26 se nachází grafický funkční model obvodu a blokové schéma jeho vnitřního uspořádání.



a) Grafický funkční model obvodu

b) Blokové schéma vnitřního uspořádání

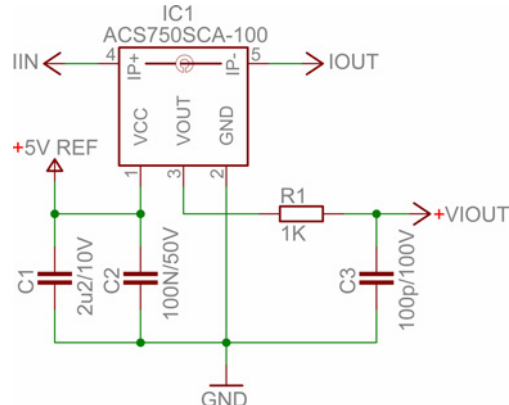
Obrázek 6.26 : Proudový senzor ACS750SCA-100 (převzato a upraveno z [69, 90])

Využito je zde dobře známého Hallova jevu, kdy elektrony pohybuující se ve vodiči jsou vychylovány vlivem vnějšího kolmo působícího magnetického pole, což dává na přiložených elektrodách vzniknout Hallovu napětí. Konkrétněji, obvod sestává z precizního nízko offsetového lineárního Hallova senzoru, vytvořeného na polovodičovém čipu technologií BiCMOS, v jehož těsné blízkosti je vedena masivní měděná vodivá cesta. Magnetické pole vytvářené průchodem proudu skrz ni je senzorem převáděno úměrně na napětí. Odpor vodivé cesty mezi vývod 4 a 5 je pouze přibližně  $130 \mu\Omega$ , což zcela minimalizuje výkonové ztráty. Výstup senzoru je navržen tak, že při nulovém proudu zde lze naměřit polovinu napájecího napětí. Se zvyšujícím se proudem ve směru od IP+ do IP- napětí roste a naopak při toku proudu ve směru opačném klesá. Citlivost senzoru je udávána přibližně 20mV na jeden ampér v obou směrech. V této aplikaci bude potřebné měřit proud pouze v jednom směru a to jen přibližně do poloviční velikosti rozsahu senzoru, v souladu s (3.6).

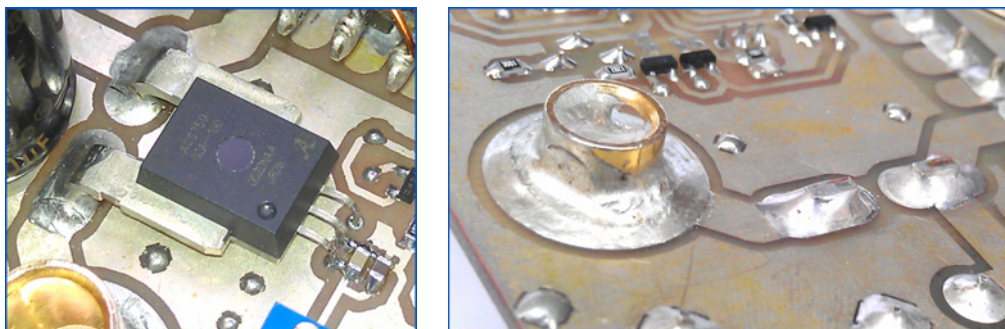
### 5.4.2 Obvod pro měření proudu

Schéma zapojení proudového senzoru v obvodu na výkonové jednotce ukazuje **Obr. 6.27**. Dle výrobce byl každý kus individuálně továrně trimován pro napájecí napětí 5V, proto není doporučeno volit odlišné. Protože referenční zdroj napětí použitý u A/D převodníku je schopen dodat až 50mA a proud do senzoru nepřesáhne 10mA, bude napájen z něj, což zaručí dobrou přesnost měření. Externích součástek je zde zapotřebí minimální počet. Na DPS těsně u pouzdra jsou umístěny pouze blokovací kondenzátory C1 a C2.

Protože výstupní napětí senzoru VIOUT nikdy nepřesáhne 5V, lze ho A/D převodníkem snímat přímo. Nachází se zde pouze vazební rezistor R1 a kondenzátor C3, který eliminuje vysokofrekvenční šum, obojí dle doporučení z datového listu senzoru [90]. Proudový senzor po montáži na DPS si lze prohlédnout na **Obr. 6.28**.



**Obrázek 6.27** : Schéma zapojení proudového senzoru



**Obrázek 6.28** : Ukázka montáže proudového senzoru

## 5.5 Návrh napájecího zdroje pro výkonovou jednotku

Na výkonové jednotce se nachází několik obvodů, které vyžadují odlišná napájecí napětí. Především se musí vytvořit jedno zcela galvanicky oddělené napětí 12V pro výkonový budič T1 (větev 1) a druhé taktéž 12V pro budič T2 (větev 2). Dále je nutné zajistit univerzálně použitých 5V a již zmíněné  $V_{REF}$ . Tyto dvě napětí bude možné vytvořit z druhé 12V větve pomocí samostatných IO.

Proudové požadavky jsou dány především špičkovým odběrem budičů MOSFETů výkonového měniče. Tranzistory nejsou nikdy spínány současně, takže za minimální celkový potřebný proud z obou větví lze považovat špičkový proud jednoho budiče, což je přibližně 2,25A. Všechny ostatní přítomné obvody mají proudový odběr v porovnání s tím zanedbatelný, v řádu nejvýše desítek mA.

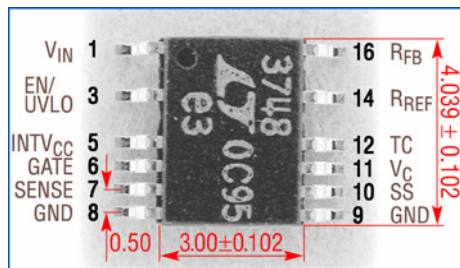
První zvažovaná možnost jak vyřešit napájení byla pomocí hybridního DC/DC modulu pro montáž na DPS, kterých existuje mnoho druhů. Problematické se ukázalo nalézt typ s potřebným rozsahem vstupního napětí, protože energie musí být odebírána přímo ze SMO, kde se může vyskytnout teoreticky až 90V.

Další možností bylo navrhnout a postavit vlastní malý spínaný zdroj s využitím některého z řídicích IO, což bylo preferováno s tím, že obdobně bude později řešeno i napájení na ostatních modulech agregátu. Výpočty ztrátových výkonů jednotlivých součástek zde nebudou z důvodu rozsahu práce uváděny, přestože byly kvůli jejich dimenzování zvažovány. Návrh je proveden celkově se snahou o minimalizaci ztrát.

### 5.5.1 Výběr a popis funkce řídicího obvodu

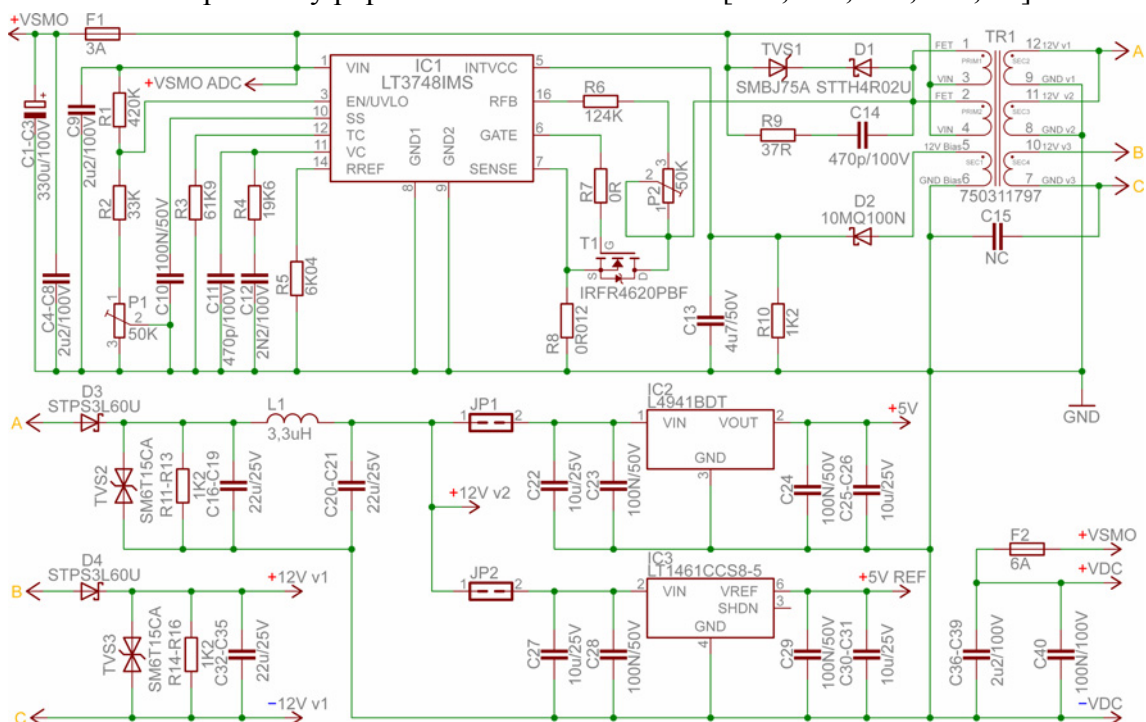
Napajec musí fungovat zcela nezávisle na řídicí jednotce agregátu a měl by poskytovat všechna napětí pokud možno ihned po nastartování spalovacího motoru. Po prostudování nabídky řídicích obvodů spínaných zdrojů několika výrobců, byl nalezen zajímavý obvod **LT3748** od firmy Linear Technology [62]. Pouzdro lze spatřit na **Obr. 6.29** i s popisem vývodů.

Jedná se o kontrolér spínaného zdroje izolované topologie typu FLYBACK s využitím impulsového transformátoru. Pracuje v hraničním režimu s proměnnou frekvencí a je vhodný pro výkony až několik desítek watt. Jeho integrovaný budič externího MOSFETu je schopen dodat průměrný proud až 1,9A. Obvod je pozoruhodný hned v několika ohledech. Za prvé schopností zpracovat značný rozsah napětí od 5V až do 100V. Dále tím, že nevyžaduje žádné zpětnovazební vinutí, optočlen, ani jiný obvod pro určení regulační odchylky.



**Obrázek 6.29** : Kontrolér spínaného zdroje LT3748 – pouzdro MSOP16 (převzato a upraveno z [62])

Informace o velikosti výstupního napětí je zde totiž získávána přímo z primárního vinutí, vzorkováním velikosti zpětně indukovaného pulsu, odraženého ze sekundárního vinutí v době, kdy je primární MOSFET rozepnut. To umožňuje zjednodušit celé zapojení a minimalizovat počet externích součástek. Dále je zde k dispozici nadproudová ochrana, podpětový zámek s hysterezí a „měkký“ start. Schéma zapojení celého napajec se nachází na **Obr. 6.30**. Topologie FLYBACK je dobře známá a podrobný popis lze dohledat v literatuře [155, 158, 159, 122, 62].



**Obrázek 6.30** : Schéma zapojení napájecí části výkonové jednotky

Celý spínaný zdroj je napájen ze SMO přes tavnou pojistku F1. Součástky okolo IC1 tvoří externí síť specifikující jeho chování. Dále se zde nalézá externí výkonový tranzistor T1, který spíná proud do primárního vinutí TR1. Síť tvořená C14, R9, TVS1 a D1 je tlumič oscilací vznikajících na drainu tranzistoru. Větev sekundárního vinutí s označením „Bias“ společně s D2, C13 a R10 tvoří napájecí obvod pro vnitřní struktury IC1, především budič MOSFETu.

Na sekundární straně se nachází standardní jednocestné usměrňovače, předzátěže, filtrační kapacity a v případě větve se stabilizátory ještě LC filtr. Zkratovací propojky JP1 a JP2 se využily při postupném oživení obvodu. Následuje klasické zapojení lineárního stabilizátoru a reference. Tavná pojistka F2 společně s kapacitami C36 až C40 je zde kvůli napájení řídicí jednotky ze SMO přes propojovací kabel. Proud pojistky 6A je volen kvůli špičkovému odběru servomotoru, při současném chodu nabíječky baterií. Celkový návrh se řídil především doporučeními a postupy z datového listu IC1 [62]. Nutno podotknout, že zapojení SMD součástky s takto malou roztečí vývodů běžnými prostředky byl poměrně obtížný úkol.

### 5.5.2 Impulsový transformátor

Parametry spínaného zdroje jsou z velké části předurčeny použitým impulsovým transformátorem. Nebylo nutné jej vyrábět, protože lze zakoupit již hotový. Firma [68] v kooperaci s [62] jich nabízí mnoho typů, přímo navržených k použití s IO LT3748, s ohledem na rozptylovou indukčnost a poměr závitů primárního a sekundárního vinutí. Zvolen byl transformátor s označením **750311797** [111], realizovaný na bázi jádra EFD20 s 12-ti pinovou SMD kostrou. Na zdvojené primární vinutí lze aplikovat značný rozsah napětí od 18 až 100V. Sekundární vinutí jsou zde čtyři, z hlediska počtu závitů identické, navržené za účelem poskytnutí napětí **12V**, přičemž jedno je vyhrazeno pro napájení samotného obvodu LT3748 a zbývající tři lze libovolně konfigurovat. Souhrnně mohou sekundární vinutí dodat proud až **2,5A**.

### 5.5.3 Proudový snímací rezistor

Obvod proudového omezení se skládá pouze z rezistoru R8, jehož odpor se vypočte:

$$R_8 = \frac{0,1}{I_{LIM}} \quad (6.5.1)$$

kde:  $I_{LIM}$  ... je zvolené proudové omezení, které by mělo být vždy menší než saturační proud transformátoru ( $A$ )

V každé spínací periodě IC1 kontroluje, jestli úbytek napětí na R8 nepřekročil 100mV. Pokud ano, dojde k proudovému omezení, aby nedošlo k překročení  $I_{LIM}$  a případně k saturaci jádra TR1. Zlom nastává, je-li detekováno napětí větší než 130mV. To indikuje, že sekundární vinutí může být ve zkratu a spínání T1 je zastaveno zcela. Proudový limit závisí především na zvoleném minimálním vstupním napětí, při němž má spínaný zdroj ukončit činnost, které bude zvoleno:

$$V_{IN/OFF} = 9V \quad (6.5.2)$$

Dále je nutné zjistit mezní hodnotu pracovního cyklu zdroje:

$$D_{max.} = \frac{(V_{OUT} + V_{F/max.}) \cdot N_{PS/TR1}}{V_{IN/OFF} + (V_{OUT} + V_{F/max.}) \cdot N_{PS/TR1}} = \frac{(12 + 0,62) \cdot 2,5}{9 + (12 + 0,62) \cdot 2,5} \cong 0,778 \quad (6.5.3)$$

kde:  $V_{OUT}$  ... je výstupní napětí spínaného zdroje, určené TR1 [111] ( $V$ )

$V_{F/max.}$  ... je nejvyšší úbytek napětí usměrňovacích diod D3 a D4 ( $V$ )

$N_{PS/TR1}$  ... je poměr závitů primárního a sekundárního vinutí TR1 [111]

Potřebný proudový limit se určí:

$$I_{LIM/Teor.} = \frac{I_{SEC/TR1/max.} \cdot 2}{0,85 \cdot (1 - D_{max.}) \cdot N_{PS}} = \frac{2,5 \cdot 2}{0,85 \cdot (1 - 0,778) \cdot 2,5} \cong \cong 10,6A < I_{SAT/TR1} = 11,5A \quad (6.5.4)$$

kde:  $I_{SEC/TR1/max.}$  ... je maximální povolený proud ze sekundárních vinutí TR1 ( $A$ )

$I_{SAT/TR1}$  ... je saturační proud TR1 deklarován v [111] ( $A$ )

Po dosažení se určí:

$$R_8 = \frac{0,1}{10,6} = 9,43m\Omega \approx 12m\Omega \Rightarrow I_{LIM} = \frac{0,1}{0,012} \cong 8,3A \quad (6.5.5)$$

Jak je vidět, skutečné proudové omezení bude o něco nižší, díky zaokrouhlení výpočtu na nejbližší dostupnou hodnotu. Odpor je velmi malý a proto je nutné zajistit mimořádně krátké cesty mezi drainem tranzistoru i zemí. Protože zde teče celý proud do primárního vinutí TR1, je také důležité adekvátní výkonové dimenzování. Proto byl použit SMD rezistor velikosti 2512 s povolenou výkonovou ztrátou 3W.

### 5.5.4 Výběr tranzistoru

Proudové namáhání tranzistoru je zde dáno:

$$I_{D/T1/RMS} \geq \sqrt{I_{LIM}^2 \cdot \frac{D_{max.}}{3}} = \sqrt{8,3^2 \cdot \frac{0,778}{3}} \cong 4,23A \quad (6.5.6)$$

Napěťové namáhání bude:

$$V_{DS/T1} \geq V_{SMO/AV/max.} + N_{PS} \cdot (V_{OUT} + V_{F/max.}) = 90 + 2,5 \cdot (12 + 0,62) \cong 122V \quad (6.5.7)$$

Je potřeba zvolit tranzistor s minimálním odporem kanálu, minimálním nábojem hradla a musí se vzít v potaz i výkonová ztráta. K dispozici byl tranzistor **IRFR4620** [86] v pouzdru D-Pak. Povolený proud drainu je 24A, napětí drain-source 200V, odpor kanálu maximálně 78mΩ a náboj hradla pouze 25nC. Tyto parametry jsou vyhovující.

### 5.5.5 Výběr usměrňovacích diod

Usměrňovací diody D3 a D4 by měly mít opět co nejmenší úbytek napětí, kvůli dobré účinnosti spínaného zdroje. Proudové dimenzování musí být alespoň:

$$I_{F/RMS} \geq \sqrt{(I_{LIM} + N_{PS})^2 \cdot \frac{1-D_{max.}}{3}} = \sqrt{(8,3 + 2,5)^2 \cdot \frac{1-0,778}{3}} \cong 2,94A \quad (6.5.8)$$

Napěťové dimenzování:

$$V_{RRM} \geq \frac{V_{SMO/AV/max.}}{N_{PS}} + V_{OUT} = \frac{90}{2,5} + 12 = 48V \quad (6.5.9)$$

Použity budou diody **STPS3L60U** s parametry  $I_{F/RMS} = 10A$  a  $V_{RRM} = 60V$ . Úbytek napětí mají nejvýše:  $V_{F/max.} = 0,62V$ .

Skrz D2 teče proud mnohem menší, byla zde proto použita méně výkonná dioda **10MQ100N**.

### 5.5.6 Zpětnovazební rezistor

Rezistor R6 je společně s R5 přímo zodpovědný za velikost výstupního napětí. Zatímco R5 musí být přesně 6,04kΩ±1%, odpor R6 je potřeba vypočítat.

$$R_{6/Teor.} = \frac{R_5 \cdot N_{PS} \cdot (V_{OUT} + V_{F/max.} + V_{TC})}{V_{BG}} = \frac{6040 \cdot 2,5 \cdot (12 + 0,62 + 0,55)}{1,223} \cong 162,606k\Omega \quad (6.5.10)$$

kde:  $V_{TC}$  ... je teplotní koeficient obvodu (V)

$V_{BG}$  ... je napětí interní reference typu bandgap (V)

Vzhledem k tomu, že přesné napětí je stejně nutné nastavit iterativní metodou až v reálném zapojení, bude použita menší hodnota R6 = 124kΩ, sériově spojená s víceotáčkovým cermetovým trimrem P2 = 50kΩ.



### 5.5.7 Vstupní a výstupní filtrační kapacity

Na výstupu obou napájecích větví byly použity čtyři keramické kondenzátory o kapacitě 22 $\mu$ F. Výsledné zvlnění se spočte:

$$\Delta V_{OUT/MAX} = \frac{L_{PRI} \cdot I_{LIM}^2}{2 \cdot C_{OUT} \cdot V_{OUT}} = \frac{1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 10^2}{2 \cdot 4 \cdot 2,2 \cdot 10^{-5} \cdot 12} \cong 663mV \quad (6.5.11)$$

Hodnota se zdá být vysoká, ale platí pouze pro maximální proud.

Na vstupu spínaného zdroje je velice důležitý kondenzátor C9, umístěný těsně u vývodu VIN (1) IC1, jinak zdroj nepracuje. Dále je doporučováno umístit na vstup další kapacitu desítek až stovek  $\mu$ F, kvůli eliminaci rušení od zpětně indukovaných pulsů, způsobených rozptylovou indukčností primárního vinutí, které překračují hodnotu napětí v SMO a mohou se šířit dále do obvodu. Další důvody jsou v podstatě stejné jako bylo popsáno v (6.2.6). Použity zde byly nízkoimpedanční hliníkové kondenzátory C1 až C3, každý s kapacitou 330 $\mu$ F [78] a několik keramických kondenzátorů C4 až C8. U všech muselo být dodrženo napěťové dimenzování 100V.

### 5.5.8 Určení velikosti předzátěže

Spínané zdroje obvykle ke správnému chodu minimální zátěž vyžadují. Vzhledem ke způsobu jakým je u IC1 realizována zpětná vazba je zde předzátěž velice důležitá. Na rozdíl od „klasické“ koncepce spínaných zdrojů, musí IC1 k aktualizaci informace o velikosti výstupního napětí stále spínat tranzistor T1, protože zpětně indukovaný puls na primárním vinutí, ze kterého se stanovuje regulační odchylka, vzniká až při jeho rozepnutí. Aby zdroj udržel konstantní napětí, při nízké zátěži přechází z hraničního do nespojitého režimu. Přejde-li výstup do stavu zcela bez zatížení, napětí na něm výrazně narůstá, protože minimální spínací frekvence je limitována hodnotou přibližně 42kHz. To samozřejmě může vést přinejlepším k poškození výstupních keramik, které na o mnoho vyšší napětí dimenzovány obvykle nejsou. Podle [62] postačí, když předzátěž bude přibližně 2% ze zátěže maximální, což poskytne potřebnou energii zpětně indukovaných napěťových pulsů pro regulaci.

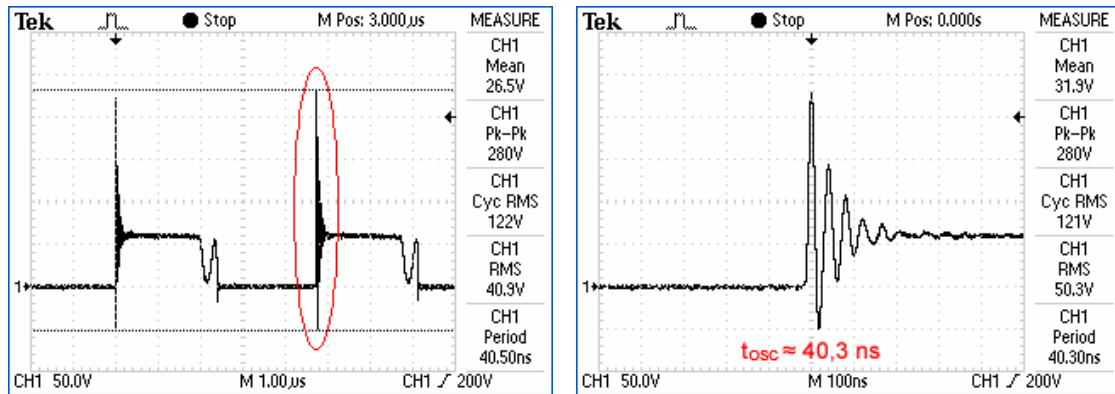
Předzátěž byla realizována rezistory R11 až R16, které obě větve zatěžují proudem 30mA. Jiné časté řešení je využití jedné i více zenerových diod. Dále jsou zde transily TVS2 a TVS3 kvůli ochraně připojených obvodů během eventuelní závady.

### 5.5.9 Návrh tlumícího ochranného obvodu

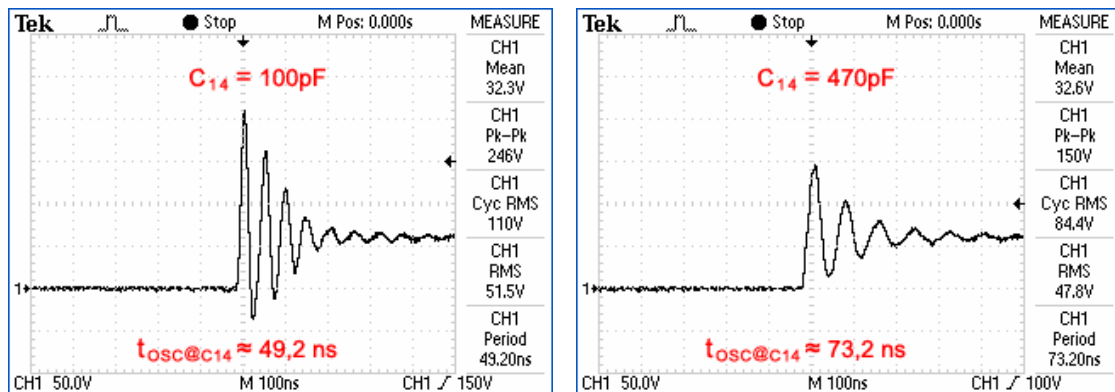
Obvod tvořený C14, R9, TVS1 a D1 je tlumič přepětí na drainu T1, které zde vzniká v podobě VN oscilace mezi rozptylovou indukčností vinutí transformátoru  $L_{LEAK}$  a výstupní kapacitou tranzistoru  $C_{OSS}$ . Pokud je  $L_{LEAK}$  malá a povolené  $V_{DS}$  T1 dostatečně velké, zapojení se obejde bez tlumiče, případně postačí jednoduchý RC člen. Je-li velká, lze přidat navíc rychlou schottkyho diody v sérii s transilem, nebo jiná zapojení s diodami.

Největší napěťové špičky se vyskytují při maximálním výstupním proudu. Na **Obr. 6.31 a)** se nachází celá spínací perioda průběhu napětí na drainu T1, bez jakéhokoliv tlumiče a na **Obr. 6.31 b)** je detail pouze vysokonapěťových oscilací. K návrhu tlumiče byl použit postup doporučený v [62]. Nejprve je nutné změřit periodu oscilací bez tlumiče  $t_{OSC}$ . Měření se opakuje po připojení C14, jehož hodnota se postupně zvyšuje, počínaje 100pF, až perioda oscilací  $t_{OSC@C14}$  dosáhne 1,5 až 2 násobku oproti  $t_{OSC}$ . Jak je vidět na **Obr. 6.32**, taková situace nastává až při hodnotě 470pF. Ze změny periody je poté možné určit hodnotu parazitní kapacity  $C_{PAR}$ , parazitní indukčnosti  $L_{PAR}$  a nakonec hodnotu odporu R9 na kterém se rozptýlí výkon při kritickém tlumení oscilací.





a) Celá spínací perioda s vyznačenou VN oscilací      b) Vysokonapěťové oscilace v přiblížení  
**Obrázek 6.31** : Průběhy napětí na elektrodě drain tranzistoru T1 bez tlumiče, při:  $V_{IN}=30V$ ,  $I_{OUT}=2,2A$



a) Oscilace na drainu T1 při  $C_{14} = 100pF$       b) Oscilace na drainu T1 při  $C_{14} = 470pF$   
**Obrázek 6.32** : Průběhy napětí na drainu tranzistoru T1 po připojení  $C_{14}$ , při:  $V_{IN}=30V$ ,  $I_{OUT}=2,2A$

$$C_{PAR} = \frac{C_{14}}{\left(\frac{t_{OSC@C14}}{t_{OSC}}\right)^2 - 1} = \frac{4,7 \cdot 10^{-10}}{\left(\frac{7,32 \cdot 10^{-8}}{4,03 \cdot 10^{-8}}\right)^2 - 1} \cong 204 pF \quad (6.5.12)$$

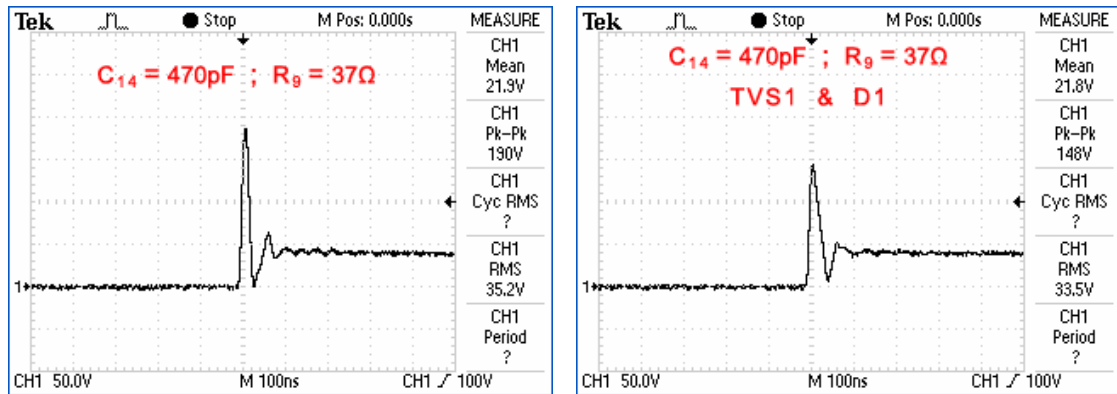
$$L_{PAR} = \frac{t_{OSC}^2}{C_{PAR} \cdot 4 \cdot \pi^2} = \frac{(4,03 \cdot 10^{-8})^2}{2,04 \cdot 10^{-10} \cdot 4 \cdot \pi^2} \cong 202 nH \quad (6.5.13)$$

$$R_9 = \sqrt{\frac{L_{PAR}}{C_{PAR}}} = \sqrt{\frac{2,02 \cdot 10^{-7}}{2,04 \cdot 10^{-10}}} \cong 31,5 \Omega \approx 37 \Omega \quad (6.5.14)$$

Výsledek byl zaokrouhlen na nejbližší dostupnou hodnotu.

Na **Obr. 6.33 a)** je vidět jak vypadá tlumení po osazení kompletního RC členu. Oscilace jsou téměř odstraněny, zůstává jen VN špička 190V. Protože povolené napětí  $V_{DS}$  tranzistoru T1 je poměrně blízko (200V), bude ještě použit ochranný obvod s diodami.

Transil TVS1 je s průrazným napětím okolo 90V@1mA a D1 je velmi rychlá schottkyho dioda s dobou zotavení pouze 16ns, napětovým dimenzováním 200V a proudovým 4A. Na obrázku **Obr. 6.33 b)** je k nahlédnutí výsledný průběh, který je již vyhovující. Bylo také nutné zaobírat se množstvím energie rozptýlené tlumičem, především na rezistoru, aby nedošlo k překročení přípustného ztrátového výkonu.



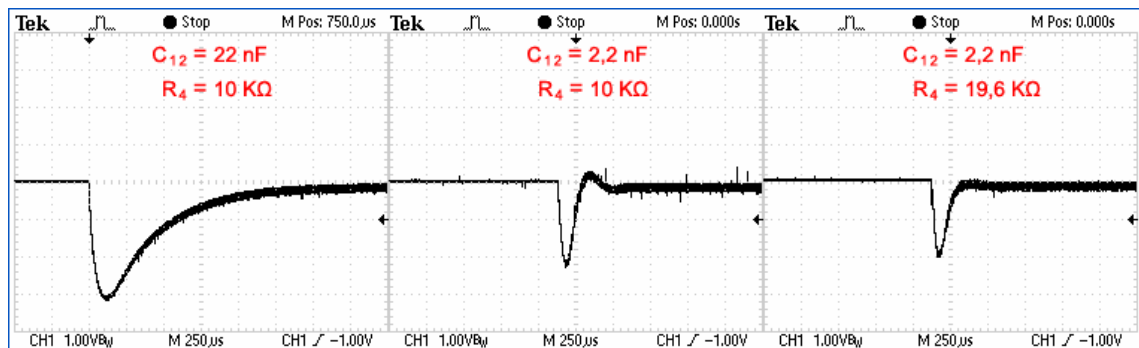
a) Překmit po zatlumení RC členem

b) Překmit po zatlumení RCD obvodem

Obrázek 6.33 : Průběhy napětí na drainu T1 po aplikaci RC tlumiče, při:  $V_{IN}=12V$ ,  $I_{OUT}=2,2A$

### 5.5.10 Přechodová odezva

Na vývodu 11 obvodu IC1 se provádí kompenzace interního zesilovače odchylky, což přímo ovlivňuje rychlost reakce regulační smyčky. Připojením vhodného RC členu vůči zemi ( $R_4$  a  $C_{12}$ ), lze vyladit přechodovou odezvu zdroje. Přemostřující kondenzátor  $C_{11}$  pomáhá eliminovat šum. Bude-li odezva příliš rychlá, může se obvod rozkmitat. Naopak bude-li příliš pomalá, utrpí přechodový výkon. Při návrhu RC členu byl použit postup doporučený v [62] a [151]. Výchozím bodem jsou hodnoty  $R_4 = 10k\Omega$  a  $C_{12} = 22nF$ , při kterých je odezva na skokovou zátěž velmi pozvolná. Přijatelnější začíná být až při zmenšení kapacity na  $C_{12} = 2,2nF$ . K eliminaci overshootu musela být následně hodnota rezistoru zvětšena na  $R_4 = 19,6k\Omega$ . Výslednou přechodovou odezvu lze porovnat na Obr. 6.34.



Obrázek 6.34 : Přechodová odezva spínaného zdroje při:  $V_{IN}=30V$ ,  $I_{OUT}=2,2A$

### 5.5.11 Dělič podpět'ového zámku

Podpět'ový zámek má za úkol deaktivovat napaječ v případě poklesu vstupního napětí pod zvolenou úroveň  $V_{OFF}$ . U obvodu IC1 je realizován na vývodu č. 3 za pomoci externího napět'ového děliče, kde  $R_2$  společně s  $P_1$  definuje napětí  $V_{OFF}$ . Pomocí  $R_1$  se volí hystereze zajišťující, že napaječ zůstane vypnut dokud napětí v SMO opět nepřekročí prahovou hodnotu  $V_{ON}$ , která bude nyní stanovena:

$$V_{ON} = 10V \quad (6.5.15)$$

Hystereze je tedy 1V. Potřebné odpory se spočtou:

$$R_1 = \frac{V_{ON} - V_{OFF}}{2,4 \cdot 10^{-6}} = \frac{10 - 9}{2,4 \cdot 10^{-6}} \cong 417k\Omega \approx 420k\Omega \quad (6.5.16)$$

$$R_{2/Teor.} = \frac{R_1 \cdot V_{BG}}{V_{OFF} - V_{BG}} = \frac{4,7 \cdot 10^5 \cdot 1,223}{9 - 1,223} \cong 74k\Omega \quad (6.5.17)$$

Kvůli možnosti experimentování byl  $R_2 = 33k\Omega$ , sériově spojen s víceotáčkovým trimrem  $P1 = 50k\Omega$ , aby napětí  $V_{OFF}$  bylo nastavitelné. Uzemněním děliče lze zdroj také externě vypínat, což je využito u napaječe nabíječky baterií.

### 5.5.12 Měkký start

Funkce „soft start“ oddaluje začátek spínání tranzistoru T1 o dobu danou kapacitou kondenzátoru C10, nabíjeného z konstantního zdroje proudu  $5\mu A$ . Obvod startuje po překročení  $0,65V$ . To je obvykle kvůli ustálení poměrů po zapnutí zařízení užitečné. Zde není nutné volit příliš dlouhý čas. Standardní kapacita  $100nF$  poskytne zpoždění:

$$t_{SS} = C10 \cdot \frac{0,65}{5 \cdot 10^{-6}} = 10^{-7} \cdot \frac{0,65}{5 \cdot 10^{-6}} = 13ms \quad (6.5.18)$$

### 5.5.13 Rezistor teplotní kompenzace

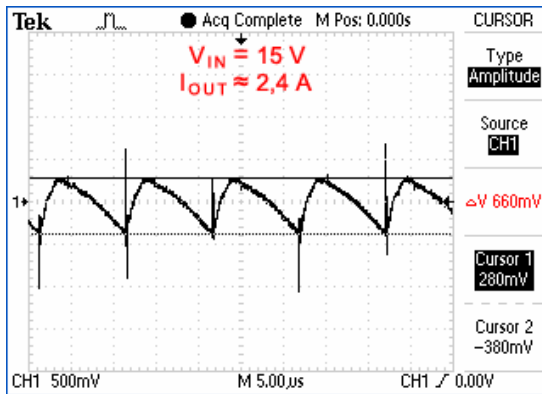
Pomocí rezistoru R3 se provádí kompenzace teplotní závislosti výstupního napětí zdroje, která je způsobena hlavně teplotním koeficientem usměrňovacích diod D3 a D4, protože samotný IC1 je vnitřně kompenzován. Podle [62] je možné určit potřebnou hodnotu R3 takto:

$$R_3 = \frac{R_{FB}}{N_{PS}} \cdot \frac{1,85 \cdot 10^{-3}}{\Delta V_{OUT}} = \frac{R_{FB} \cdot 1,85 \cdot 10^{-3}}{N_{PS} \cdot \frac{V_{OUT@t1} - V_{OUT@t2}}{t_1 - t_2}} = \frac{1,43 \cdot 10^5 \cdot 1,85 \cdot 10^{-3}}{2,5 \cdot \frac{12,0 - 12,09}{20 - 60}} \cong 47k\Omega \quad (6.5.19)$$

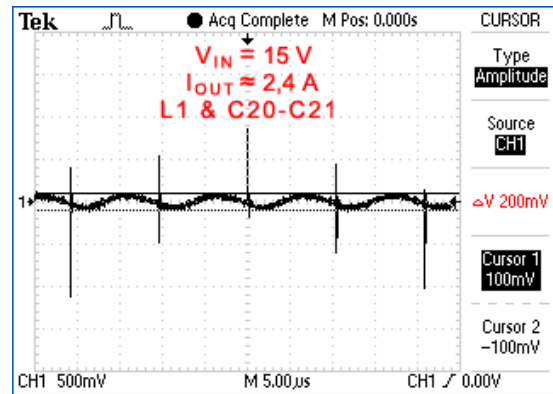
kde:  $R_{FB}$  ... je odpor R6 + P2, změřený po nastavení  $V_{OUT} = 12V$  ( $\Omega$ )  
 $\Delta V_{OUT}$  ... je diference výstupního napětí při změně teploty ( $V$ )  
 $V_{OUT@t1}; V_{OUT@t2}$  ... je výstupní napětí zdroje při teplotě  $t_1$  a  $t_2$  ( $V$ )  
 $\Delta t$  ... je diference teploty ( $^{\circ}C$ )  
 $t_1 ; t_2$  ... jsou teploty působící současně na IC1, D3 a D4, změřené teplotní sondou multimetru Metex M-3660D ( $^{\circ}C$ )

### 5.5.14 Stabilizátor a reference

Ostatní přítomná napětí jsou vytvořena z  $12V$  větve za pomoci IC2 a IC3. Napětí je nejprve vedeno přes LC filtr složený z L1, C20 a C21, kvůli lepšímu vyhlazení. Na oscilogramu **Obr. 6.35** a **Obr. 6.36** lze porovnat zvlnění výstupního napětí napaječe před filtrem a za ním, při malém a velkém vstupním napětí. Je vidět jak zvlnění v obou případech výrazně poklesne. Potřebných  $5V$  se získá s využitím LDO stabilizátoru **L4941** [97]. Celkové proudové nároky zde budou odhadem v řádu desítek, špičkově maximálně stovek mA, proto jeho schopnost dodat  $1A$  bude postačující. Referenční napětí  $5V$  poskytne obvod **LT1461CCS8-5** [93], což je precizní nízkoúbytková napěťová reference s přesností  $0,04\%$ . Neobvyklý je zde na referenci vysoký výstupní proud kontinuálně až  $50mA$ , což je záměrně zvoleno kvůli napájení proudového senzoru. Povolené vstupní napětí je u IC2 i IC3 dostatečně velké,  $30$  a  $20V$ . V obou případech bylo použito standardní zapojení s doporučenými hodnotami blokovacích kondenzátorů. Vývod SHDN, kterým lze IC3 vypínat zde není využit a má zůstat otevřený.

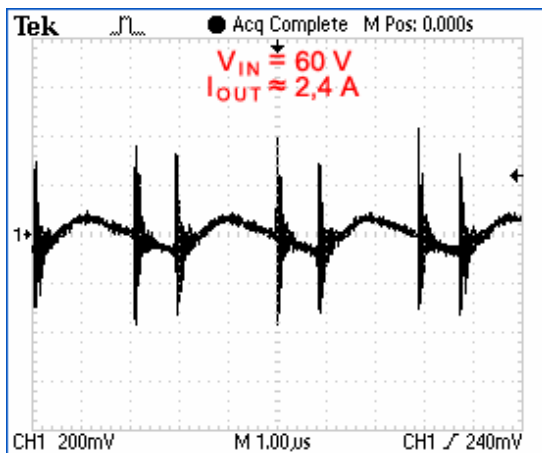


a) Bez použití výstupního LC filtru

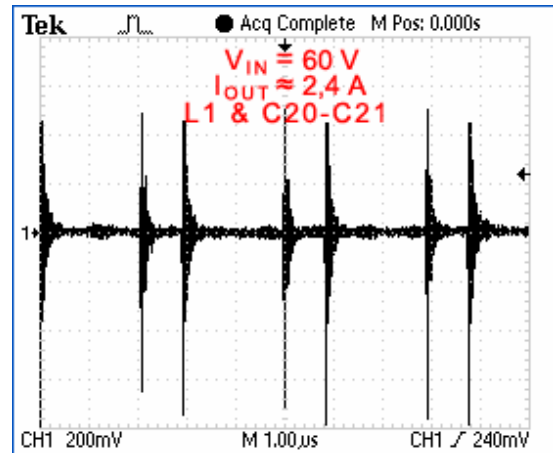


b) S použitím výstupního LC filtru

**Obrázek 6.35** : Ukázka zvlnění výstupního napětí napaječe při  $V_{IN} = 15V$ ,  $I_{OUT} \approx 2,4A$



a) Bez použití výstupního LC filtru



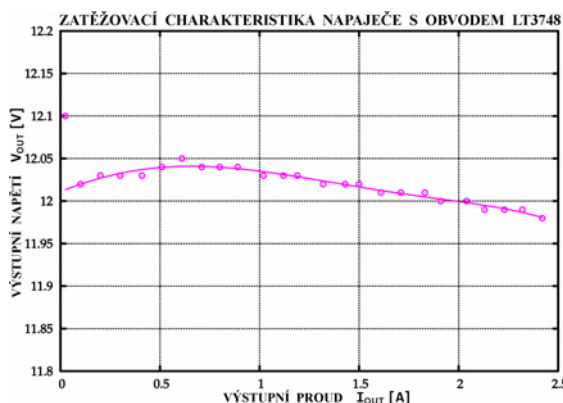
b) S použitím výstupního LC filtru

**Obrázek 6.36** : Ukázka zvlnění výstupního napětí napaječe při  $V_{IN} = 60V$ ,  $I_{OUT} \approx 2,4A$

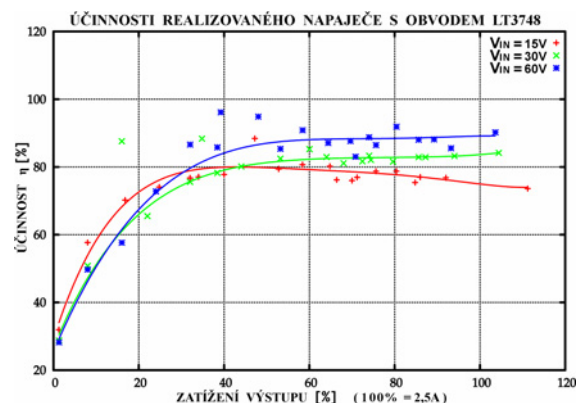
Výrazné oscilace jsou způsobeny přeléváním energie mezi parazitní kapacitou výstupní usměrňovací diody a rozptylovou indukčností sekundárního vinutí transformátoru, pokaždé když tranzistor zapne a vypne. Úkaz je markantnější při vyšším vstupním napětí zdroje, když je ukládaná energie větší. Oscilace mohou někdy dokonce přesáhnout povolené závěrné napětí diod, které pak musí být přemostěny RC tlumičem. Takové opatření zde nebude nutné, protože největší překmity byly naměřeny pouze v řádu jednotek voltů špička-špička.

### 5.5.15 Celkové zhodnocení navrženého napaječe

Na zatěžovací charakteristice **Obr. 6.37 a)** je dobře patrná regulace napětí v celém rozsahu výstupního proudu.



a) Zatěžovací charakteristika

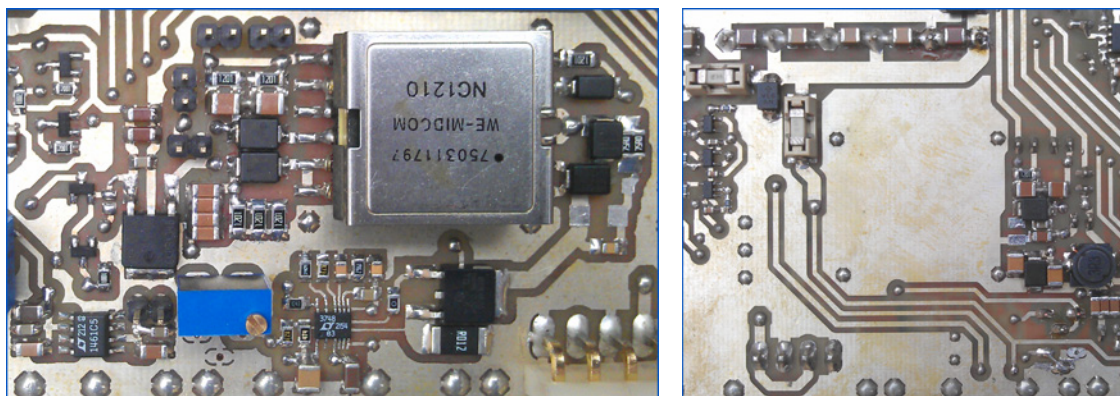


b) Účinnost

**Obrázek 6.37** : Měření vlastností realizovaného napaječe s obvodem LT3748

Dále byla změřena účinnost na grafu **Obr. 6.37 b)**. V relevantní pracovní oblasti se pohybuje okolo 85%, což je v souladu s předpoklady.

Napajec s obvodem LT3748 byl nejprve vyroben na samostatné leptané DPS kvůli ověření funkce a chování obvodu v praxi. S úpravami byl následně realizován na první verzi výkonové jednotky, kde se potvrdila nutnost lokalizovat některé součástky co nejtěsněji u vývodů pouzdra obvodu a striktního dodržení dalších doporučení ohledně layoutu DPS, dle [62]. Získané poznatky byly zapracovány při návrhu napaječe na druhé, finální verzi výkonové jednotky. Výsledek si lze prohlédnout na **Obr. 6.38**.



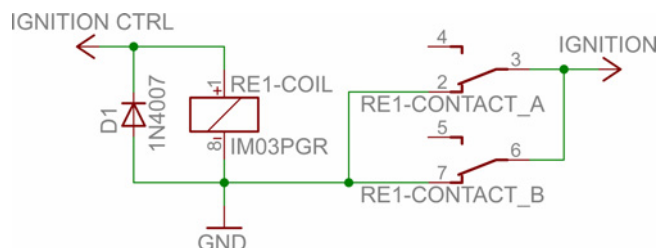
a) Svrchní strana plošného spoje

b) Spodní strana plošného spoje

**Obrázek 6.38** : Ukázka osazeného napaječe s obvodem LT3748 na výkonové jednotce

## 5.6 Obvod spínače zapalování motoru

Zařízení je koncipováno tak, že bez zapnuté řídicí jednotky spalovací motor nepůjde nastartovat, protože dříve musí být zkontrolována poloha serva plynu, ověřeny úkony elektronické knihy údržby a zkontrolovány chybové stavy systému. Proto bude obvod zapalování v klidovém stavu zkratován a k jeho rozpojení dojde pouze na povel řídicí jednotky. Takové chování lze zajistit vícero způsoby. Použité zapojení je na **Obr. 6.40**.



**Obrázek 6.39** : Obvod spínání zapalování spalovacího motoru

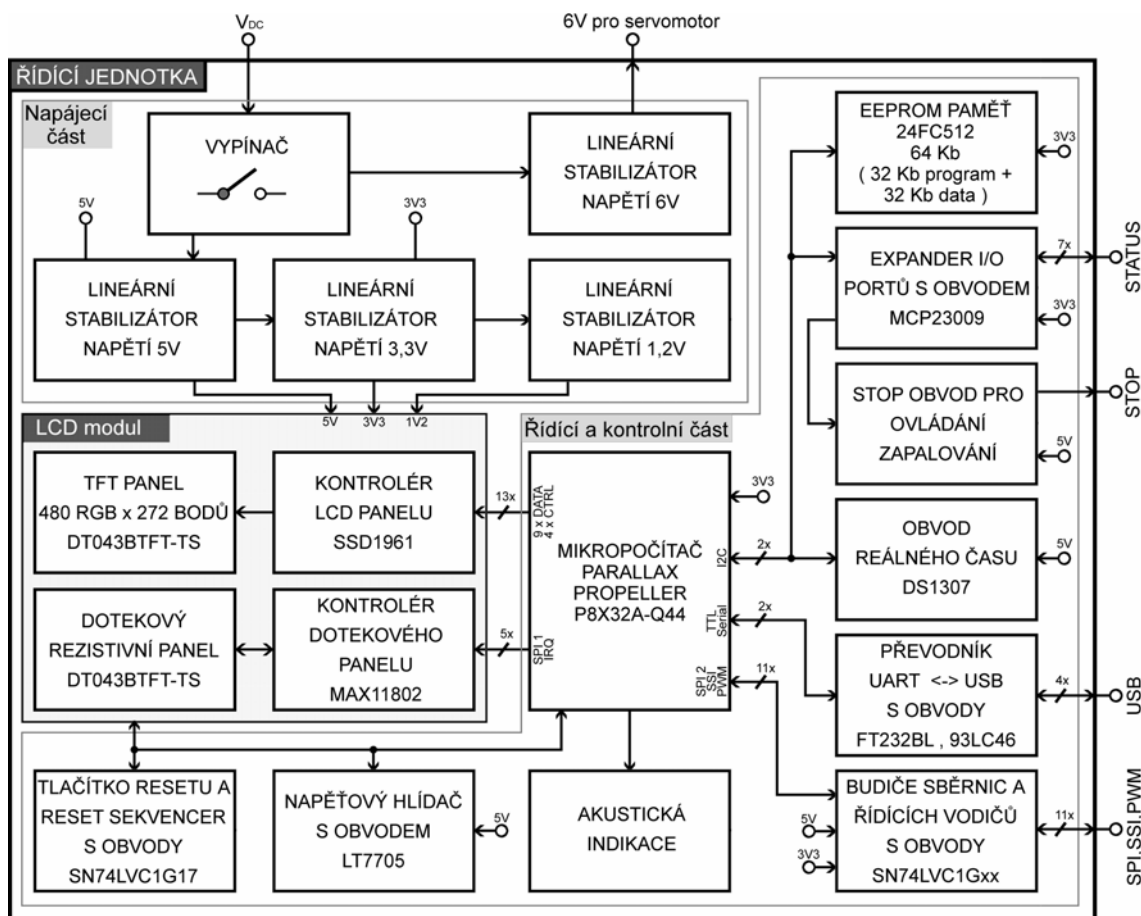
Zvažovala se možnost použití NC (Normally Closed) SSR relé, ale nakonec bylo využito miniaturní SMD relé **IM03PGR** [115] se dvěma přepínacími kontakty na napětí 250VAC a proud 4A, které je zapojeno paralelně s nouzovým vypínačem. Cívka která má velmi malou spotřebu je ovládána napětím 5V z řídicí jednotky. Obvyčejná dioda D1 eliminuje napěťové přemkity při vypnutí relé.

## 5.7 Celkové zapojení výkonové jednotky

Na výkonové jednotce se dále nachází konektor PSL26W pro plochý kabel k připojení řídicí jednotky, dvě masivní zlacené nástrčné dutinky o průměru 8mm k propojení s výstupními svorkami agregátu a dva konektory PSH04-02PG k připojení nouzového vypínače a propojení se zapalováním motoru. Celkové schéma zapojení, jakožto i podklady pro výrobu DPS se nachází v příloze A, kde lze spatřit i fotografie celé osazené DPS.

## 6. Řídicí jednotka

Dalším realizovaným modulem je řídicí jednotka, jejíž zjednodušené blokové schéma si lze prohlédnout na **Obr. 7.1**.



**Obrázek 7.1** : Zjednodušené blokové schéma řídicí jednotky

Centrálním bodem je zde mikrokontrolér obsluhující několik různých sběrnic. Zásadní je I2C sběrnice sdílená pro 3 zařízení: EEPROM paměť, expander I/O portů a RTC obvod. Dále jsou přítomny dvě samostatné SPI sběrnice. Jedna pro komunikaci s A/D převodníkem na výkonové jednotce a druhá pro kontrolér dotykového panelu na LCD modulu, který se na horní straně DPS vkládá do dvou lišt. Po SSI sběrnici probíhá komunikace s magnetickým enkodérem instalovaným v servomotoru.

Díky stejné architektuře SPI a SSI sběrnice, kdy rozdíly jsou dány pouze způsobem probíhající komunikace, byly nejprve ve snaze o zmenšení počtu využitých portů mikrokontroléru, tyto tři sběrnice sloučeny fyzicky do jedné a komunikace se řídila softwarově vhodnou distribucí časových rámců. Tento koncept byl ve druhé verzi řídicí jednotky opuštěn hlavně z důvodu, že zařízení komunikují každé jinou rychlostí, což značně komplikovalo řízení toku dat. Ve výsledku docházelo k brždění komunikace ADC a zvyšování chybovosti při přenosu. Proto jsou sběrnice separátní i za cenu využití většího počtu I/O portů MCU, což také vyústilo v nutnost použití expanderu.

Všechny vodiče vedoucí mimo plošný spoj jsou i zde opatřeny budiči, které ve směru ven dodávají energii do kapacity dlouhého spojovacího kabelu a ve druhém směru rekonstruují deformovaný příchozí signál.

Jak je vidět přítomna je zde řada stabilizátorů napětí. Z tohoto ohledu nejnáročnější je LCD modul, který ke své funkci vyžaduje jednak 5V pro regulátor podsvícení ale také 3,3V a 1,2V pro ostatní přítomné IO.



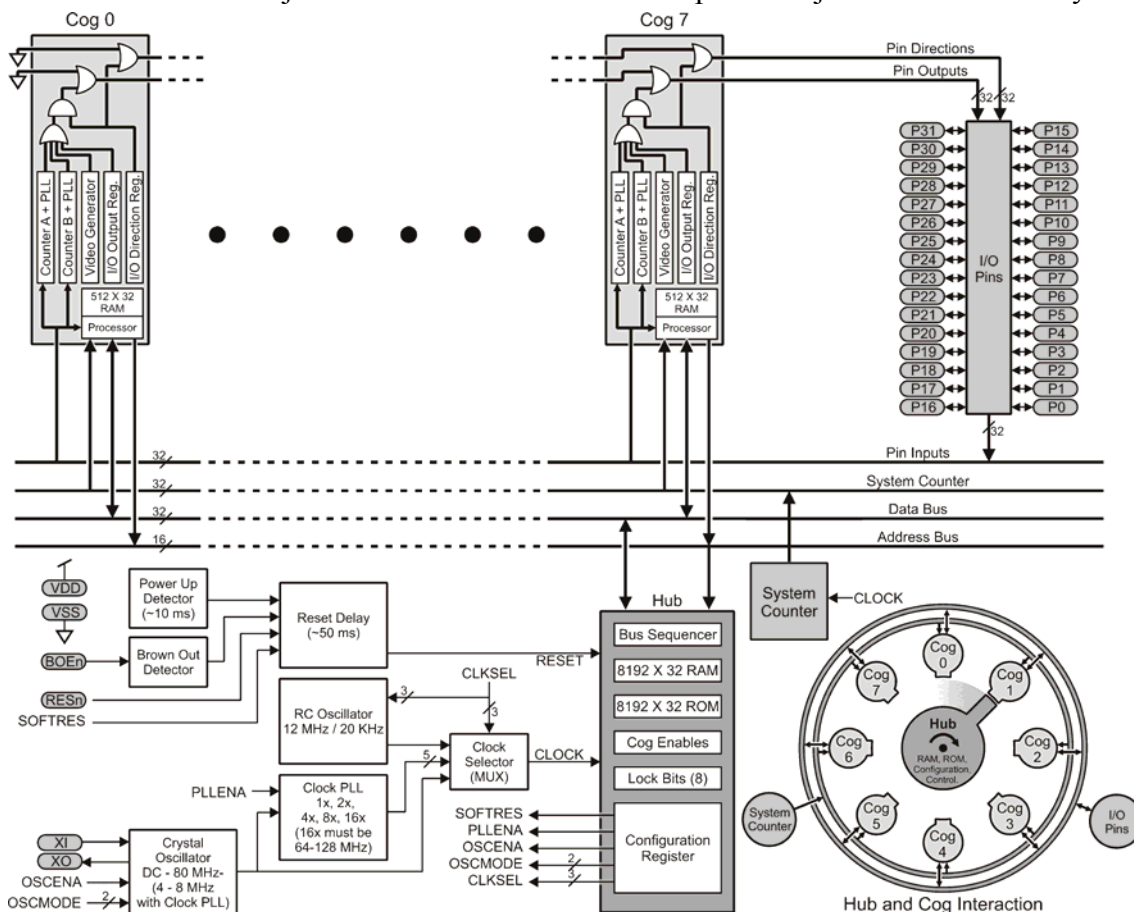
Servomotor byl nejprve napájen ze společného 5V / 2A stabilizátoru, ale poté co se ukázalo, že může způsobovat značné rušení ostatních přítomných obvodů a při záběru někdy vyvolávat proudové přetížení s následkem resetu jednotky, byl pro něj vybrán samostatný výkonný 3A stabilizátor. Napětím 6V v horní provozní hranici je dosaženo větší záběrné síly a posílila se tak i schopnost udržení polohy.

Dále stojí za zmínku dva bloky, které realizují reset celé řídicí jednotky. Poněvadž se zde nachází čtyři integrované obvody jenž vyžadují reset v daném pořadí a tři zdroje resetovacího signálu, situace se poněkud komplikuje a byla vyřešena pomocí separátních IO.

Řídicí jednotka také přímo obsahuje zapojení umožňující programovat zařízení přes USB port počítače.

## 6.1 Mikrokontrolér Parallax Propeller P8X32A

Srdcem řídicí jednotky, potažmo celého agregátu, je integrovaný obvod **Propeller P8X32A-Q44** [137] od firmy **Parallax** [60]. Jedná se o jednočipový, 32-bitový, multijádrový mikropočítač architektury RISC s výpočetním výkonem až 160 MIPS. Na **Obr. 7.2** se nachází zjednodušené blokové schéma uspořádání jeho vnitřní struktury.



**Obrázek 7.2** : Blokové schéma vnitřního uspořádání mikropočítače Parallax Propeller P8X32A (převzato a upraveno z [137])

Obvod nevyužívá žádných přerušení, protože k dispozici je zde 8 identických jader s vlastním procesorem nazývajícím se **Cogy**, které pracují simultánně a to buď zcela nezávisle, nebo ve vzájemné kooperaci. Každý Cog má také svou vlastní programovou paměť RAM o velikosti 2KByte, dva vysoce konfigurovatelné čítače a VGA/NTSC/PAL videogenerátor. Periferií je zde tedy oproti jiným MCU minimální počet a předpokládá se spíše softwarové řešení všech druhotných potřeb.



Z 32 přítomných vstupně-výstupních portů/pinů, jsou dva pevně vyhrazeny pro účely programování a další dva pro připojení externí 32KByte EEPROM, kam se ukládá uživatelský program. Vždy po resetu obvodu je odtud celý zkopírován do hlavní paměti RAM, která má totožnou kapacitu. Sdílena je mezi všemi Cogy pomocí vysoce výkonného přepínače (**Hub**), díky němuž mohou samostatně přistupovat i k dalším exkluzivním prostředkům, jako jsou kontrolní a konfigurační registry. Hlavní program je spuštěn vždy v Cogu 0 a programy do ostatních Cogů jsou nahrávány již operativně. Dalších 32KByte adresního prostoru je paměť typu ROM, kde jsou pro potřeby uživatele uloženy bitmapy znaků, tabulky různých matematických konstant a především zavaděč, který provádí počáteční inicializaci obvodu.

Programovat lze buď přímo s využitím přibližně 80-ti instrukcí assembleru, nebo pomocí vysokoúrovňového objektově orientovaného jazyka „**Spin**“, který sice vyniká jednoduchým zápisem, ale jakožto interpretovaný jazyk je o něco pomalejší. Interpret je uložen v paměti ROM, odkud se podle potřeby kopíruje do RAM Cogů.

Kvůli zachování malých rozměrů řídicí jednotky, která má lícovat s LCD modulem, bylo z nabízených pouzder Propelleru vybráno 44 pinové LQFP. Zapojení v obvodu je snadné, protože kromě uvedených 32 I/O pinů jsou zde navíc pouze dva pro připojení volitelného externího oscilátoru, reset a pin na kterém lze nízkou úrovní aktivovat 2,7V hlídač podpětí. Zbývajících 8 pinů je napájecích, 4 pro zem a 4 pro napětí 3,3V, kde je nutné umístit blokovací keramické kondenzátory.

Při základním zapojení s 5MHz krystalem a šestnáctinásobným fázovým závěsem, pracuje Propeller na frekvenci 80MHz, ale kvůli rychlejšímu vykreslování obrazových dat na LCD displej, s využitím pouze jednoho Cogu, byl za pomoci 6MHz krystalu přetaktován na 96MHz, bez negativních projevů.

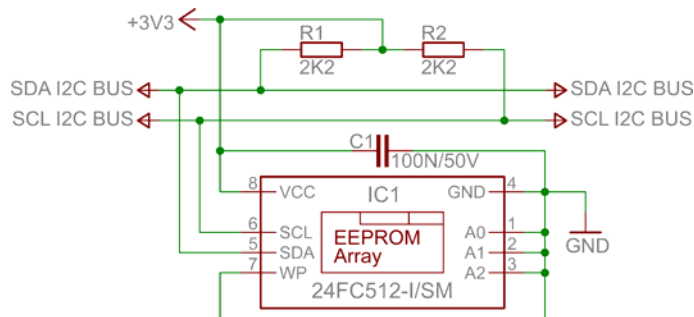
Při vývoji byl používán experimentální kit „Propeller Demo Board“ [139]. Ostatní informační materiály využité při práci s tímto mikropočítačem jsou [137-141].

## 6.2 Programová paměť Propelleru

Uživatelský program Propelleru je uložen v externí EEPROM, která se prostřednictvím I2C sběrnice připojuje k pinům č. 35 a 36. Na nich lze ihned po resetu zaznamenat automaticky probíhající komunikaci, to když vestavěný zavaděč provádí vyčtení obsahu do interní RAM. Podporovány jsou pouze běžné sériové paměti s 8-mi bitovým datovým slovem a nejvýše 16-ti bitovou adresou. Protože zavaděč čte pouze prvních 32 Kbyte, bude-li použita paměť s kapacitou větší, zbývající prostor lze v programech libovolně upotřebit, případně zde uložit potřebná data předem. Místo standardní pomalé EEPROM 24LC256 se použila rychlejší **24FC512-I/SM** [105] s kapacitou 64 Kbyte.

### 6.2.1 Zapojení EEPROM paměti

Paměť byla zapojena standardním způsobem, jak je patrné ve schématu na **Obr. 7.3**.



**Obrázek 7.3** : Schéma zapojení EEPROM paměti na řídicí jednotce

Napájecí napětí muselo být použito ve shodě s MCU, tedy 3,3V a je blokováno pomocí C1. Pull-Up rezistory R1 a R2 jsou v architektuře I2C sběrnice stěžejní. Jejich odpor se volí podle komunikační frekvence, která musí korespondovat s kapacitou sběrnice. Ta závisí na její rozlehlosti, celkovém layoutu a počtu připojených zařízení. Paměť IC1 je schopna komunikovat na frekvenci nejvýše 1MHz s doporučenými pull-up rezistory okolo 2kΩ [105]. Povolené minimum je obvykle okolo 1,5kΩ. Protože sběrnice není příliš dlouhá, použity mohou být odpory 2,2kΩ. Míra deformace hodinového signálu byla na osciloskopu ověřena a shledána přijatelnou.

Vývod WP (Write Protect) je ochrana proti zápisu, která zde není nijak využita a spojením se zemí se deaktivuje.

Každé zařízení na I2C sběrnici má svou adresu, obvykle sedmibitovou, což umožňuje teoreticky připojit až 128 různých IO. První 4 bity jsou pevně daný kontrolní kód, specifikující druh zařízení. U paměti řady 24xx je kontrolní kód '1010'. Zbývající 3 bity jsou většinou uživatelsky konfigurovatelné a identifikují různá zařízení stejného druhu, kterých tedy může být na jedné sběrnici nejvýše 8. Nastavení těchto bitů se zde provádí pomocí pinů A0 až A2 a jelikož zavaděč Propelleru očekává, že adresa programové EEPROM bude '1101\_000', jsou všechny tyto piny uzemněny.

### 6.2.2 Rozdělení paměťového prostoru

K dispozici je celkem 64 Kbyte adresovatelných po osmibitových slovech. Rozsah adresního prostoru použité EEPROM je tedy \$0000 až \$FFFF. Je možné číst buď z jednotlivých adres (Random Access), nebo úseky paměti z adres po sobě jdoucích (Sequential Access). V případě zápisu je situace poněkud odlišná, protože adresní prostor je rozdělen na stránky o velikosti 128 Byte. Celkem je zde tedy 512 stránek. Zápis na jednotlivou adresu (Random Write) je sice možný, ale obvod vždy vnitřně aktualizuje celou stránku do které tato adresa spadá. Při zápisu na více adres jdoucích po sobě (Sequential Write) je nutné hranice stránek pohlídat.

V první polovině paměti, tedy až do adresy \$7FFF včetně, se nachází obraz programu Propelleru. Prostor od adresy \$8000 do \$817F včetně, tedy 3 stránky, je vyhrazen pro ukládání různých systémových nastavení a pro záznam provozních hodnot, která se mohou během chodu programu měnit. Ve zbývající oblasti od adresy \$8180 do \$FFFF se nachází formátované textové řetězce a definice různých grafických elementů, které lze spatřit v menu řídicí jednotky. K jejich uložení byl napsán speciální jednoúčelový program. Pro práci s EEPROM byl vytvořen samostatný objekt, který umožňuje zápis bez ohledu na hranice stránek a je schopen velmi rychlého čtení, což zajišťuje nízké latence při pohybu mezi nabídkami v menu. Zvýšenou pozornost bylo potřeba věnovat tomu, aby při běhu programu nemohlo v žádném případě dojít k zápisu do první poloviny paměti, protože to poškodí zde uložený bitový obraz a po resetu zařízení již nepracuje korektně.

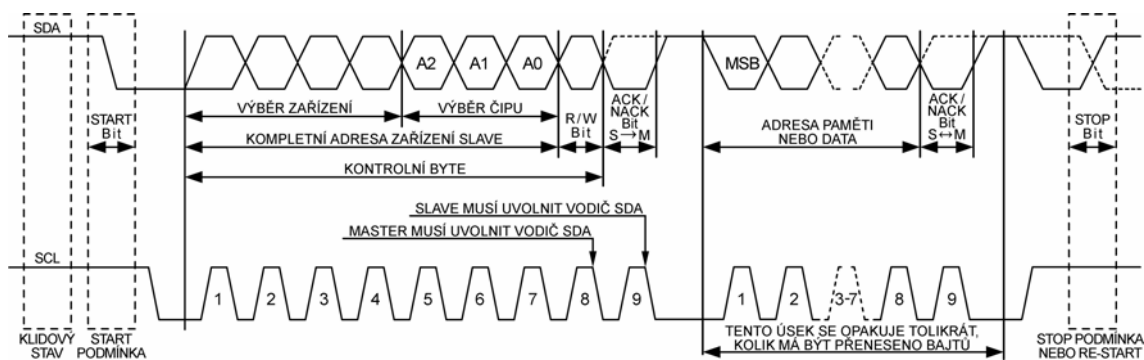
Při psaní programu byl brán zřetel i na malé opotřebení paměťových buněk, především při realizaci počítačla provozního času motoru.

### 6.2.3 Komunikace po I2C sběrnici

Oproti SPI jde o pokročilejší typ sběrnice schopné zprostředkovat obousměrnou komunikaci mezi velkým počtem zařízení. Nejméně jedno z nich musí řídit přenos, proto se nazývá „Master“. Tuto úlohu zde bude zastávat Propeller. Ostatní zařízení se označují „Slave“ a jsou mu podřízeny. Budou zde tři: EEPROM, Expander a RTC obvod. I2C sběrnice se skládá pouze ze dvou vodičů: SDA (Serial Data) na kterém probíhá přenos dat a SCL (Serial Clock) pro Mastrem generovaný hodinový signál, kterým se datový tok synchronizuje. Pomocí R1 a R2 (**Obr 7.3**) jsou oba vodiče trvale taženy k napěťové úrovni 3,3V (H), která datově odpovídá Log. 1.

Nízkou úroveň (L) může kterýkoliv připojený IO nastavit pokud daný vodič přímo uzemní. Skrz rezistory pak poteče proud, zde 1,5mA. Chce-li obvod ponechat úroveň L, postačí když svůj I/O pin přivede do stavu s vysokou impedancí, aby vodič nebyl nijak ovlivněn a zůstal přitažen k úrovni H. Budič v IO tedy musí mít výstup typu „Open Drain“.

Aby na dvouvodičové sběrnici nedocházelo ke kolizím, jsou stanovena pevně daná obecná pravidla, které lze vysvětlit na **Obr. 7.4**.



**Obrázek 7.4 :** Komunikace po I2C sběrnici (převzato a upraveno z [105])

Časový diagram začíná klidovým stavem, při němž se oba vodiče nachází na úrovni H. Jakákoliv komunikace je iniciována Mastrem za pomoci startovní podmínky, během které SDA vodič přechází z H do L. Přenos dat následně probíhá v 9 bitových paketech. První který následuje vždy po startovní podmínce obsahuje kontrolní bajt s adresou zařízení Slave, které chce Master oslovit.

Stažením SCL do L začíná první hodinový takt, během kterého se již do Slave přenáší první bit adresy. Při tom platí, že změny na SDA vodiči se musí striktně odehrávat v době kdy je SCL v L, protože změny SDA je-li SCL v H jsou rezervovány pro účely iniciace a ukončení komunikace. Po odeslání celé sedmibitové adresy následuje R/W (Read/Write) bit, který určuje směr přenosu dat v následujících paketech, až do odeslání dalšího kontrolního bytu. Pokud je log. 0, odesílá bude Master. V případě že je log. 1, data odesílá Slave. Při sestupné hraně osmého hodinového taktu již musí Master uvolnit SDA sběrnici, aby umožnilo zařízení Slave vyslat ACK (Acknowledge) bit, kterým potvrzuje, že předchozích 8 bitů přijalo a je připraveno pokračovat. Tento potvrzovací bit vysílá vždy přijímač. Zařízení Slave by mělo vodič SDA uvolnit nejpozději při sestupné hraně devátého hodinového taktu. Další paket je vyslán zařízením podle R/W bitu a obsahuje již 1 byte užitečných dat. Protistrana poté opět vyšle ACK bit. Následovat může libovolný počet paketů, ale vždy když má dojít ke změně směru toku dat, kontrolní byte musí být opět odeslán. Po něm může následovat opakovaná Start podmínka, má-li přenos pokračovat. Pokud ne, komunikace se ukončí pomocí Stop podmínky, která nastává při sestupné hraně na vodiči SDA, zatímco vodič SCL je ve stavu H.

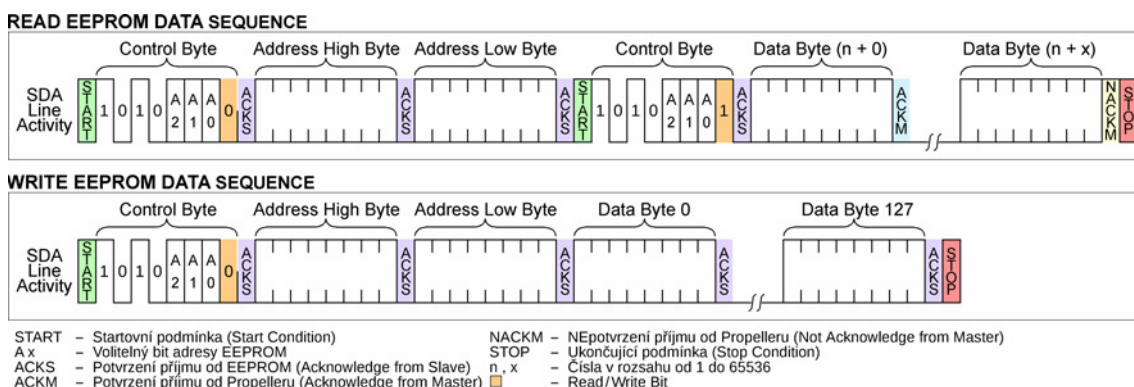
Rutiny pro práci s I2C sběrnici byly napsány přesně v souladu s uvedenými pravidly, přičemž přihlédnuto muselo být i k časování z datových listů jednotlivých IO.

Jak vypadají komunikační rámce konkrétně u zde použité paměti EEPROM lze posoudit na **Obr. 7.5**. První tři pakety jsou při čtení i zápisu identické. Adresa paměti je 16-ti bitová a proto musí být rozdělena do dvou.

Při čtení stojí za povšimnutí, že Propeller přijetí posledního bytu nesmí potvrdit, aby si tím neznemožnil vyslání stop podmínky. Díky tomu paměť nechá SDA vodič uvolněný a nebude se pokoušet odesílat další bit z dat.

Při zápisu je podstatné, že najednou lze odeslat vždy pouze jednu stránku, tedy 128 byte, což je dáno velikostí vyrovnávací paměti v obvodu.

Po přenesení 127 bytu je vždy nutné vyslat stop podmínku, protože tím se teprve iniciuje zápis z bufferu do paměťových buněk, což u celé stránky může trvat až 5ms.



**Obrázek 7.5** : Průběh komunikace po I2C sběrnici mezi EEPROM a Propellerem

Hranice jednotlivých stránek je nutné pečlivě hlídat, protože při špatné adresaci může dojít ke ztrátě dat, nebo dokonce k přepsání začátku stránky.

Číst a zapisovat do použité EEPROM lze samozřejmě i po jednotlivých bytech, pak jde o takzvaný náhodný přístup do paměti.

## 6.3 Programování Propelleru

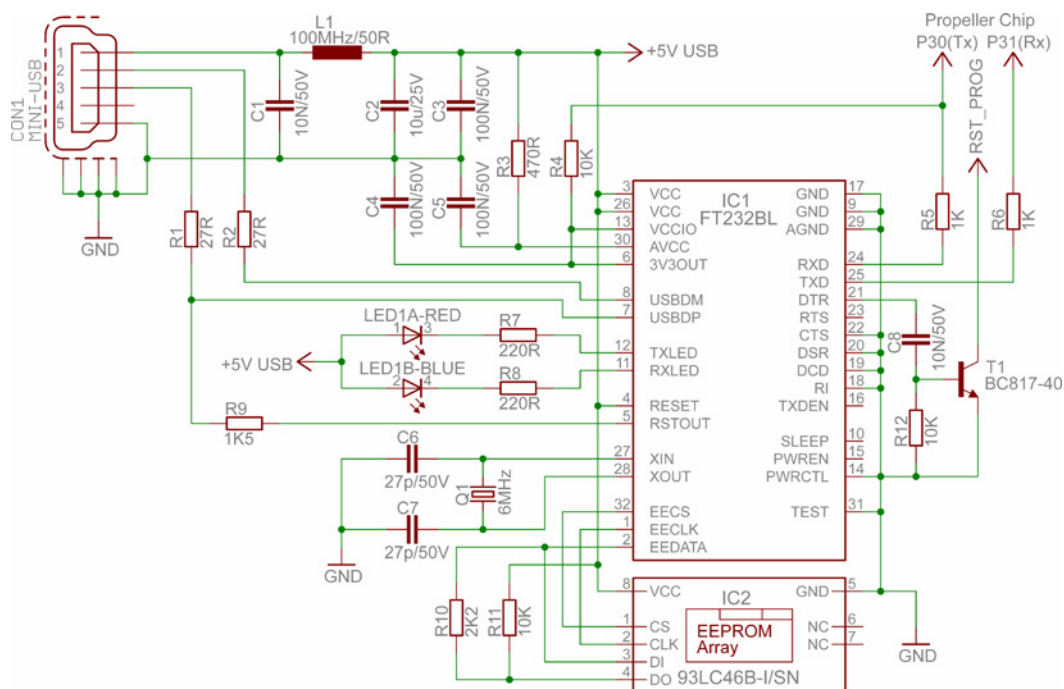
Firmware pro řídicí jednotku vznikl na PC ve vývojovém prostředí „Propeller Tool“, které firma Parallax poskytuje ke stažení na svém webu [60] zdarma. Vytvořené programy v něm lze nahrávat buď přímo do paměti RAM Propelleru, což je kvůli rychlosti při ladění kódu výhodné, nebo se dají zapisovat trvale do připojené EEPROM. K propojení s PC může v zásadě posloužit buď COM port (9-pinový D-Sub), nebo USB port, což byla varianta preferovaná. Na straně MCU komunikace probíhá přes sériovou asynchronní linku, umístěnou na pinech č. 37 (TxD) a 38 (RxD). Zdejší 3,3V TTL logické úrovně je potřeba převést na diferenciální standard USB. K tomu lze od výrobce mikropočítače zakoupit již hotový přípravek, ovšem díky znalosti jeho zapojení [140], bude možné takový převodník integrovat přímo na DPS řídicí jednotky, což je z hlediska kompaktnosti praktičtější.

### 6.3.1 Zapojení převodníku UART↔USB

Je realizováno na bázi známých převodníků UART↔USB od firmy FTDI [61]. Použit zde byl poněkud starší obvod **FT232BL**, který má ještě EEPROM externí a vyžaduje o něco větší počet vnějších součástek. Schéma zapojení se nachází na **Obr. 7.6** a v podstatě vychází přímo z datového listu obvodu [103].

Paměť IC2 je konfigurovatelná prostřednictvím speciálního nástroje „FT Prog“. Lze do ní ukládat různá nastavení a identifikační řetězce, jako jméno výrobce, název zařízení a sériové číslo, které je kvůli bezproblémové identifikaci v OS nutné nechat vygenerovat. Ukázalo se, že korektní navázání spojení zavaděče Propelleru s počítačem na těchto záznamech nezávisí a že postačuje i ponechání výchozího nastavení obvodu.

Celý převodník je plně napájen 5V z hostitelského zařízení, přičemž IC1 obsahuje 3,3V LDO regulátor. Protože obvod pracuje interně s frekvencí 48MHz, může se po USB kabelu přenášet rušení do PC. Z toho důvodu je zde umístěn EMI filtr složený z C1 a L1. Násobička osmi je napájena samostatně přes R3. Dále se zde nachází blokovací kondenzátory C2 až C5. Rezistory R1 a R2 provádí impedanční přizpůsobení výstupu budičů. Nemá-li momentálně IC1 ve stavu resetu, Pull-Up rezistor R9 táhne vodič Data+ k napětí 3,3V, čímž informuje že hostovaná zařízení je zde připojeno a připraveno k činnosti.



**Obrázek 7.6** : Schéma zapojení převodníku UART↔USB k programování Propelleru

Pull-Up rezistor R4 zabezpečuje, že vstup RxData IC1 bude mít definovanou úroveň napětí i pokud je po resetu MCU port 30 ještě nastaven jako vstupní. Standardní obvod oscilátoru je složen z Q1, C6 a C7. Pomocí R10 a R11 jsou oba datové vodiče IC2 sloučeny do jednoho obousměrného, kvůli napojení na IC1. Dvojitá dioda LED1 řízená přes předřadné rezistory R7 a R8 informuje o směru momentálně probíhající komunikace. Na DPS byla umístěna vedle USB konektoru. Byl-li již USB kabel připojen, samotnému navázání komunikace musí předcházet reset Propelleru iniciovaný programátorem z PC. K tomu účelu slouží zapojení tvořené z C8, R12 a T1. Délka resetovacího pulsu, respektive přizemnění vodiče reset, je dána konstantou tohoto RC článku.

## 6.4 Rozšíření I/O portů Propelleru

Ke zvýšení počtu I/O portů Propelleru byl použit integrovaný obvod **MCP23009** [106] od firmy Microchip [64], což je osmibitový expander, ovladatelný přes I2C sběrnici.

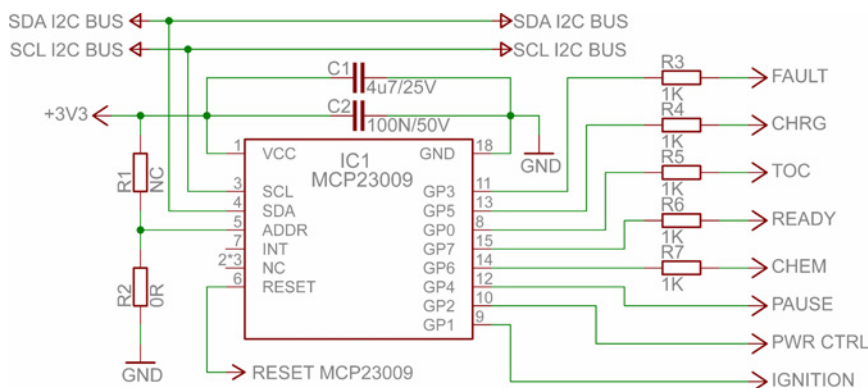
### 6.4.1 Zapojení expanderu

Zapojení v obvodu je snadné, jak je vidět na **Obr. 7.7**. K napájení bylo použito napětí 3,3V, blokováno pomocí C1 a C2.

Přes port GP1 je ovládáno relé zapalování na výkonové jednotce. Zbývající porty slouží k řízení a kontrole nabíječky vestavěných baterií napájecí jednotky. Přesnější pomocí GP2 se zapíná napajec nabíječky a přes GP4 lze aktivovat pauzu v nabíjení. Zbývajícími porty s vazebními rezistory R3 až R7 jsou sledovány stavové piny IO nabíječky.

Expander je zapojen jako další zařízení typu Slave na I2C sběrnici. Pull-Up rezistory zde již nejsou zobrazeny. Oproti EEPROM se v tomto případě adresa IO volí odlišně, pomocí napěťové hladiny vytvořené děličem na pinu ADDR [64]. Na DPS jsou k tomu připraveny pozice pro R1 a R2. Protože jde o jiný typ obvodu s unikátní pevnou částí adresy, může být nastavitelná část zvolena opět '000'. Proto se místo R1 použije nulový můstek a R2 se neosadí. Celá adresa expanderu pak bude '0100\_000'.





Obrázek 7.7 : Schéma zapojení expanderu I/O portů Propelleru

Pin INT je určen pro účely externího přerušení v systémech kde se využívá a zůstává proto nezapojen. Vývod RESET je veden dále na samostatný obvod resetu.

### 6.4.2 Nastavení registrů expanderu

Expander obsahuje 11 osmibitových registrů [64] ze kterých lze číst, nebo do nich zapisovat obdobným způsobem jako v případě EEPROM. Většina z registrů zůstává ve výchozím nastavení, které je po restartu obvodu log. 0. Všechny porty jsou typu „Open Drain“, proto se nastavuje pouze registr GPPU (0x6), kterým lze aktivovat vnitřní Pull-Up rezistory, dále registr IODIR (0x0), který určuje bude-li port vstupní či výstupní a pro čtení a změnu hodnot z portů jsou využity registry GPIO (0x9) a OLAT (0xA).

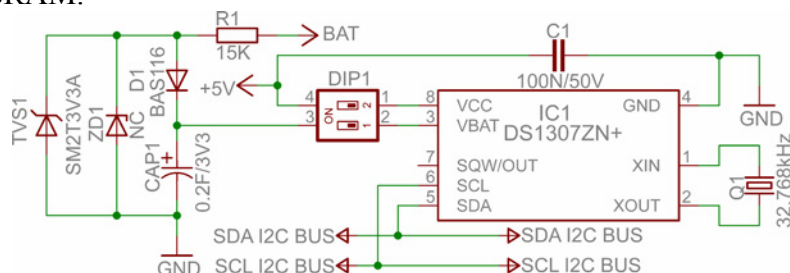
## 6.5 Obvod reálného času

Aby bylo možné zrealizovat záměr naprogramovat do menu řídicí jednotky knihu údržby spalovacího motoru, musí zařízení obsahovat také obvod reálného času. Figurují zde dva druhy časových údajů po jejichž uplynutí je nutné provést předepsaný úkon. Například olej se musí měnit vždy po 50 hodinách provozu (provozní interval), ale současně po 6 měsících (časový interval) je-li agregát pouze uskladněn. Provozní intervaly je možné odměřovat z údaje počítadla provozního času, který se ukládá do EEPROM. Ovšem k určení časových intervalů údržby je potřeba znát reálný čas.

Použit byl běžný RTC obvod DS1307 [107] s možností externího zálohování superkapacitorem, který obsahuje datum, čas, kalendář a uživatelskou SRAM.

### 6.5.1 Zapojení RTC obvodu

Obvod je zapojen podle schématu na Obr. 7.8. Pracuje jako třetí zařízení typu Slave na I2C sběrnici. Pull-Up rezistory zde již nejsou zobrazeny. Protože v systému se většinou nachází pouze jeden obvod reálného času, celá adresa '1101\_000' je zde pevně naprogramována při výrobě. Frekvence krystalu Q1 je přesně stanovena a vybrán byl typ s vyšší přesností kmitočtu. Připojuje se co nejtěsněji u pinů XIN a XOUT. Pomocí vývodu VBAT je zabezpečen nepřetržitý chod oscilátoru s čítačem, včetně napájení uživatelské SRAM.



Obrázek 7.8 : Schéma zapojení obvodu reálného času

K tomu byl použit miniaturní SMD superkapacitor 0,2F nabíjený přes R1 z baterií napájecí jednotky. Smyslem je překlenout výpadek během výměny baterií a případně zajistit dočasnou funkčnost pokud nejsou vloženy. Při plném nabití se na nich může vyskytnout až 8V. Ke sražení napětí na přibližně 3,3V byl použit transil TVS1, protože je schopna operovat i při velice malém protékajícím proudu, při jakém se běžná zenerova dioda ještě neotevře. Díky tomu jsou šetřeny baterie. Místo pro ZD1 bylo na DPS vytvořeno pouze z experimentálních důvodů. Dioda D1 má velmi nízký svodový proud a zabraňuje zpětnému vybíjení CAP1. Je-li řídicí jednotka aktivována, IC1 se napájí z 5V. Při poklesu napětí pod VBAT, které musí být v rozmezí 1,2 až 3,5V se obvod dále napájí odsud, přičemž kmitání zabraňuje hystereze 0,2V. Obě napětí lze odpojit pomocí přepínačů DIP1, což se používalo při vývoji ke kompletnímu resetu obvodu. Protože IC1 má velice malou spotřebu, doba zálohování s plně nabitým CAP1 je poměrně dlouhá, v řádu týdnů.

Vývod č. 7, jenž může být zdrojem obdélníkového signálu není využit a zůstává nezapojen.

### 6.5.2 Nastavení registrů RTC obvodu

Obvod obsahuje celkem 64 osmibitových registrů, přičemž pomocí prvních sedmi lze v menu řídicí jednotky nastavit čas, datum a letopočet. Osmý registr ovládá pin č. 7 který se nepoužívá. Zbývajících 56 registrů je uživatelská SRAM, ve které se používá pouze prvních 15 bytů pro realizaci počítadla provozního času motoru a to kvůli menšímu opotřebení EEPROM.

## 6.6 Modul LCD displeje

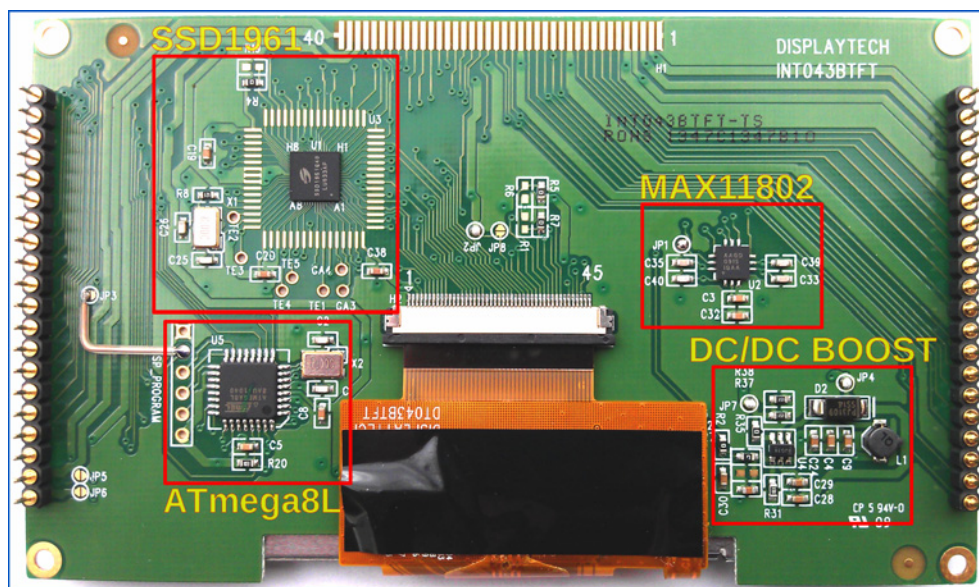
Pro ovládání řídicí jednotky agregátu byl pořízen modul LCD displeje s dotekovým panelem. Při výběru se bral ohled na dostatečnou velikost, dobrou čitelnost, snadné připojení a přijatelnou cenu. Preferován byl rezistivní dotekový panel, který je odolnější a lze ovládat i pomocí nevodivých předmětů. Vybral se modul s označením **INT043BTFT-TS** [142] od firmy Displaytech [74], jenž se nachází na **Obr. 7.9** a **Obr. 7.10**.



**Obrázek 7.9** : Modul LCD displeje INT043BTFT-TS – vrchní strana

Osazen je 4,3" TFT panelem DT043BTFT-TS s rozlišením 480 x 272 (WQVGA) RGB bodů řízený řadičem **HX8257**, umístěným v pouzdru COG přímo na skleněném podkladovém substrátu. Na obrázcích proto tento obvod není viditelný.





Obrázek 7.10 : Modul LCD displeje INT043BTFT-TS – spodní strana

Panel dále obsahuje 10 podsvětlujících LED diod a čtyřvodičový rezistivní dotekový panel. Uvedené komponenty jsou přes ohebnou pásku propojeny s obslužnou elektronikou na nosném oboustranném plošném spoji, kde se nachází kontrolér LDC displeje **SSD1961** [143], mikropočítač **ATmega8L** k jeho inicializaci, kontrolér dotekového panelu **MAX11802** [145] a zvyšující měnič z 5V na 16V, pro napájení LED. K propojení s řídicí jednotkou se využily prokovené průchody po stranách DPS, kam byly připájeny 20-ti pinové precizní kolíkové lišty. Propeller má přímý přístup pouze k obvodům SSD1961 a MAX11802. Způsob zapojení modulu je možné spatřit až na celkovém schématu v příloze **B.1**. K jeho studiu se použila literatura [142-145].

### 6.6.1 Kontrolér LCD Displeje

Obvod SSD1961 je prostředníkem mezi MCU a řadičem TFT panelu. Přimo na čipu obsahuje 675Kbyte RAM pro uchování dat jednoho celého snímku obrazovky. To je velká výhoda, protože grafická data zde ukládaná se ihned zcela automaticky čtou a odesílají do řadiče, který je neprodleně na panelu zobrazí. Velikost paměti je dána pracovní 18-ti bitovou barevnou hloubkou, tedy 6-ti bitovým rozlišením pro každou barvu subpixelu a schopností obvodu ovládat i panely s VGA rozlišením.

Sběrnice k propojení s MCU je 18 bitová a komunikace po ní může probíhat buď 8, 9, 12, 16, nebo 18-ti bitově. Z hlediska rychlosti je nejlepší připojení plně 18-ti bitové, protože data pro jeden pixel se pak z MCU mohou odesílat najednou. Ovšem z důvodu šetření s I/O piny Propelleru, byla použita 9-ti bitová a jeden pixel se tedy odesílá nadvakrát. Stejná sběrnice slouží také k přenosu osmibitových příkazů z nichž mnohé mají i několik návazných taktéž osmibitových parametrů. Příkazů je přibližně 80 [144], přičemž část je určena k hardwarové manipulaci s daty v RAM, což ovlivňuje způsob zobrazení a pomocí ostatních se provádí nastavení rozličných funkcí obvodu. Jsou zde i prostředky k pokročilému ovládání podsvícení. Přenos po sběrnici je řízen pomocí čtyř vodičů **CS** (Chip Select), **DC** (Data/Command Select), **RD** (Read Enable), **WR** (Write Enable) a navíc je zde vodič RESET. Pin RD je sice s Propellerem propojen, ale vůbec se nevyužívá, protože číst z RAM ani z registrů zde není potřebné. Jako plovoucí ovšem zůstat nemůže, proto je nutné zde připojit Pull-Up rezistor, jinak se při zápisu objevuje řada nevyzpytatelných chyb. Při obsluze obvodu se použilo pouze několik příkazů:

- 0xF0 – pro nastavení 9-bitové komunikace
- 0x2A, 0x2B, 0x2C – pro odesílání obrazových dat do RAM
- 0xD0, 0xBE – pro regulaci jasu podsvícení

Výhodné je, že veškerá nastavení registrů obvodu, potřebná pro korektní spolupráci s panelem DT043BTFT-TS provádí ihned po připojení napájecích napětí zmíněný vestavěný MCU ATmega8L, který zde jinou úlohu nemá. Komunikační diagramy s časováním se nachází v [144] a nebudou důvodu rozsahu uváděny.

## 6.6.2 Kontrolér dotekového panelu

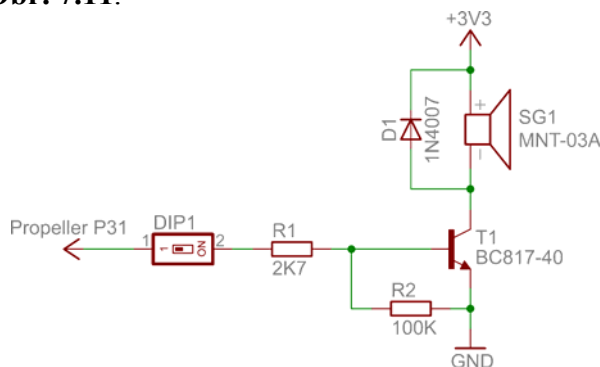
Obvod MAX11802 obsluhuje přítomný čtyřvodičový rezistivní dotekový panel. Měření potřebná k identifikaci dotekové události se provádí pomocí integrovaného 12-ti bitového SAR A/D převodníku. Výsledkem jsou souřadnice X, Y místa doteku na ploše panelu a třetí údaj Z, který informuje o síle stisku. Dále lze měřit z externího vstupu AUX, který byl využit pro sledování napětí na bateriích.

Obvod obsahuje 12 osmibitových konfiguračních registrů z nich většinu bylo třeba vhodně nastavit [145]. Měření souřadnic se provádí pomocí 16-ti tzv. konverzních příkazů. K vyčtení naměřených dat slouží dalších 10 příkazů.

Komunikace s Propellerem probíhá přes SPI sběrnici, přičemž vodiče DIN a DOUT byly pomocí rezistoru sloučeny. Navíc je zde vodič TIRQ, který je stále sledován, protože poskytuje okamžitou informaci o nastalé dotekové události.

## 6.7 Akustická indikace

Lepší ovladatelnosti může být dosaženo s akustickou odezvou při doteku na panelu. S její pomocí mohou být též indikovány některé události. Funkce byla realizována za pomoci obvodu na **Obr. 7.11**.

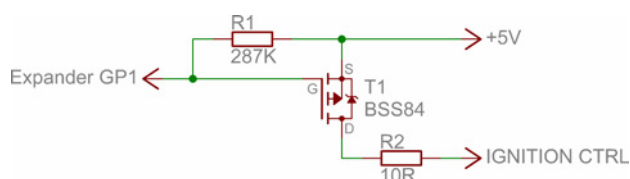


**Obrázek 7.11** : Schéma zapojení obvodu akustické indikace

Akustický měnič SG1 [116] je buzen z napětí 3,3V přes tranzistor T1, který je ovládán pomocí Portu 31 Propelleru. Ten se primárně využívá při programování, proto lze obvod kvůli hluku odpojit pomocí přepínače DIP1. Ačkoliv SG1 je v miniaturním SMD provedení pracuje na elektrodynamickém principu, tudíž obsahuje cívku. Proto zde musí být umístěna dioda D1, která eliminuje vznikající napěťové špičky.

## 6.8 Ovládání relé zapalování

Relé zapalování na výkonové jednotce je ovládáno přes spojovací kabel napětím 5V, pomocí MOSFETu s kanálem typu P. Schéma zapojení je vidět na **Obr. 7.12**.

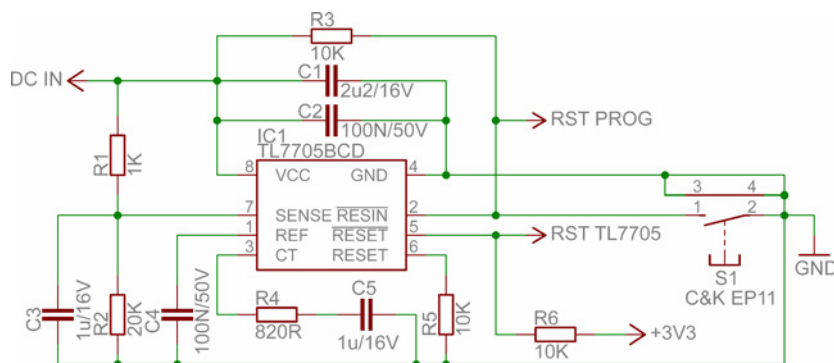


**Obrázek 7.12** : Schéma zapojení obvodu ovládání relé zapalování

Díky R1 je po zapnutí řídicí jednotky T1 vždy bezpečně uzavřen, což je požadované chování, protože motor má jít nastartovat až po stisknutí tlačítka na displeji. K otevření T1 dochází až při uzemnění gatu, poté co je nastavena log. 0 na portu GP1 expanderu. Pak je relé sepnuto a obvod zapalování se rozpojí, což umožní motor nastartovat. Rezistor R2 chrání T1 a cesty na DPS proti proudovému přetížení.

## 6.9 Napěťový hlídač

Především kvůli LCD modulu, jehož regulátor podsvícení vyžaduje 5V s 5% tolerancí a také aby se zabránilo nadměrnému vybíjení baterií, byl na řídicí jednotku začleněn obvod napěťového dohledu **LT7705** [102], který je zároveň kombinován se zapojením resetovacího obvodu s tlačítkem, které bylo v průběhu doladování firmwaru často potřebné. Použité schéma se nachází na **Obr. 7.13**.



**Obrázek 7.13** : Schéma zapojení obvodu napěťového dohledu s tlačítkem reset

Napětí DC IN pochází z bateriové jednotky a může dosahovat nejvýše přibližně 8V. Vedeno je přímo na pin VCC hlídače IC1, který má povolené napájecí napětí 18V. Umístěny jsou zde obvyklé blokovací kondenzátory C1 a C2. Kondenzátor C4 na pinu REF je povinný, redukuje vliv rychlých změn napájecího napětí. Velikost vstupního napětí je po úpravě děličem z R1, R2 a C3 snímána na pinu SENSE.

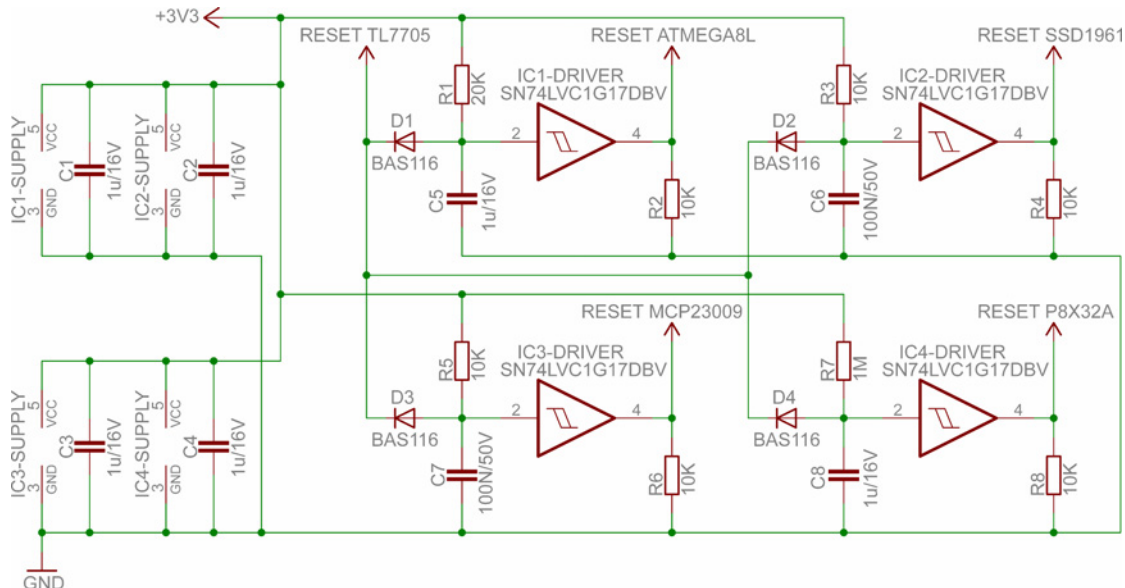
Po zapnutí řídicí jednotky DC IN postupně narůstá až dosáhne úrovně 1V, při které již výstupy RESET a RESE mají definované stavy L a H. Oba jsou s otevřeným kolektorem, proto je první přes R6 tažen k 3,3V a druhý jenž není nijak využit přes R5 pouze uzemněn. Po dosažení úrovně typicky 4,55V na pinu SENSE, začíná ubíhat interval volitelný kombinací R4 a C5, který poskytuje čas k plnému ustálení napětí. S uvedenými hodnotami je prodleva přibližně 17ms. Po jejím uplynutí již výstup RESE přechází do stavu H a signál je dále veden do reset sekvenceru, který v potřebném pořadí aktivuje jednotlivé IO.

Aby byla při napájení z baterií zaručena spolehlivá funkce všech zapojení na řídicí jednotce, včetně externího servomotoru, napěťový resetovací práh je pomocí děliče z R1 a R2 zvýšen přesně na 5V. Kvůli zabránění oscilacím s následkem reset smyčky je pin SENSE ošetřen hysterezí 30mV. Ovšem krátkodobý pokles napětí na vybitých bateriích může být i větší. Proto byl přidán kondenzátor C3, kterým je citlivost vůči kolísání napětí výrazně potlačena.

Nearetovaným tlačítkem S1 je možné řídicí jednotku kdykoliv zrestartovat. Zákmity na něm vznikající eliminuje uvedená prodleva. Využit je zde vstup RESIN, který má díky R3 od počátku definován stav H a uzemněním přes S1 přechází do stavu L. Paralelně k němu je připojen také resetovací obvod programátoru Propelleru.

## 6.10 Reset sekvencer

Reset celé řídicí jednotky může nastat ze tří příčin. Poklesem napájecího napětí pod 5V, stisknutím resetovacího tlačítka, nebo díky programátoru Propelleru. Pomine-li událost která ho vyvolala, přítomné integrované obvody se musí zaktivovat v takovém pořadí, aby se celé zařízení korektně zapnulo. Jedná se o čtyři obvody. Na LCD modulu je to driver **SSD1961** a mikrokontrolér **ATmega8L-8AU**. Na řídicí jednotce je to Propeller a Expander. Navrženo k tomu bylo jednoduché zapojení podle **Obr. 7.14**.



**Obrázek 7.14** : Schéma zapojení obvodu postupného resetu

Opět zde byly využity hradla se schmittovým klopným obvodem, kde na vstupu se vždy nachází RC článek s potřebnou časovou konstantou a dioda zabraňující zpětnému vybíjení kondenzátoru. Výstup je vždy zatížen rezistorem 10k $\Omega$  a propojen je přímo s resetovacím pinem příslušného IO. Hradla mají opět své blokovací kondenzátory C1 až C4 a napájeny jsou z 3,3V, jakožto všechny resetované IO.

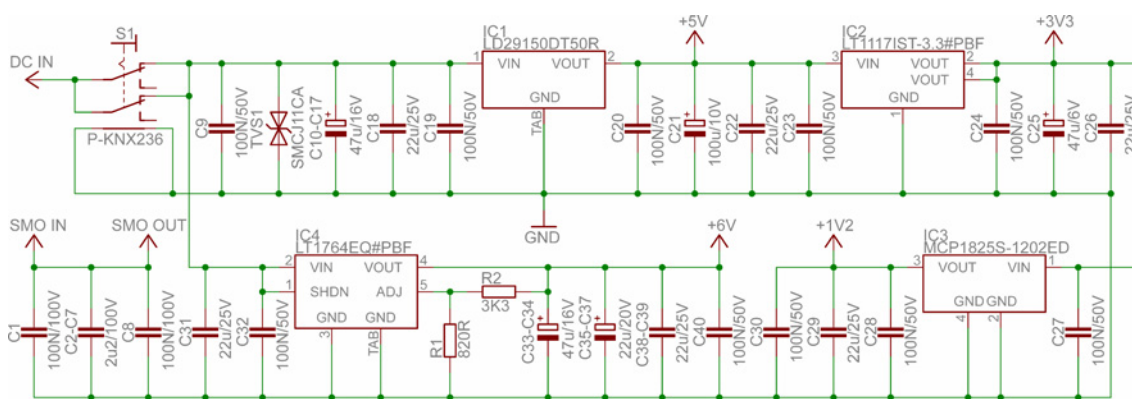
Poté co napájecí napětí překročí hranici 5V, uplyne přibližně 17ms než se na vstupu RESET TL7705 objeví úroveň H. Od tohoto okamžiku jako první vystoupí z resetu obvody SSD1961 a MCP23009 se zpožděním přibližně 650 $\mu$ s, které se přičítá k tomuto intervalu během kterého dochází k ustálení napájecího napětí. Inicializace expanderu trvá pouze 20 $\mu$ s [64], ale driveru displeje to trvá 5ms [144]. Proto je prodleva pro aktivaci ATmegy zvolena přibližně 14ms. Tento MCU následně provádí inicializaci driveru SSD1961, která trvá okolo 500ms [142]. Během této doby se s ním Propeller nesmí pokoušet komunikovat, protože ATmega je připojena na stejnou sběrnici. Jinak se inicializace nezdaří a LCD modul až do nového připojení napájecího napětí nebude pracovat korektně. Propeller je proto vyveden z resetu jako poslední s prodlevou přibližně 800ms.

Jedině tímto způsobem se podařilo dosáhnout kýžených výsledků. Jakékoliv jednodušší zapojení s přímou vazbou resetovacích pinů IO se neosvědčilo.

## 6.11 Lineární stabilizátory napětí

K uspokojení napájecích potřeb všech obvodů řídicí jednotky a servomotoru bylo použito několik lineárních stabilizátorů ve standardním zapojení, jak je vidět na **Obr. 7.15**. Napětí ze SMO výkonové jednotky je přiváděno společným plochým kabelem na řídicí jednotku, odkud se vede dále na bateriový modul.





Obrázek 7.15 : Schéma zapojení napájecí části řídicí jednotky

Kondenzátory C1 až C8 umístěné u konektorů na obou stranách kompenzují jejich přechodové odpory a odpor přívodního kabelu.

Naopak napájecí napětí pro řídicí jednotku přichází z bateriového modulu a je vedeno přímo na spínač S1, kterým se řídicí jednotka zapíná. Těsně u něj se nachází součástky C9 s TVS1 které eliminují případné spínací zákmity. Následuje kaskádové zapojení stabilizátorů k získání napětí 5V, 3,3V a 1,2V. Při jejich výběru byl brán ohled především na dostatečné proudové zatížení, které je největší v případě 5V větve díky podsvícení LCD displeje, které odebírá až 200mA. Druhé kritérium bylo nízký úbytek napětí 5V stabilizátoru, kvůli bateriovému napájení řídicí jednotky. Vybrán byl obvod **LD29150** [98] s úbytkem jen 200mV při výstupním proudu 750mA. Další obvody jsou **LT1117** [99] pro napětí 3.3V/800mA a **MCP1825** [100] pro 1.2V/500mA.

Pro napájení servomotoru je zapojen samostatný **LT1764** [101] poskytující až 3A, přičemž napětí je zde nastaveno pomocí externího děliče z R1 a R2 na 6V. I zde je důležitý nízký úbytek a to pouze 330mV při 1,5A, aby byl servomotor schopen srovnat počáteční polohu plynu i při nízkém stavu nabití baterií. Veškeré blokové kondenzátory jsou použity dle doporučení z datových listů, kromě vstupní kapacity C10 až C17 a kapacity C33 až C37, která vykrývá značné proudové požadavky serva.

## 6.12 Ostatní části řídicí jednotky

Celkové schéma zapojení řídicí jednotky je k vidění v příloze **B.1**. O všech částech bylo výše pojednáno, až na budiče umístěné u všech konektorů odkud signály opouští plošný spoj. Jsou zde ze stejného důvodu jako na výkonové jednotce. K vidění je zde také řada konektorů. K připojení servomotoru slouží osmipinový PSH02-08WG, LCD modul se vkládá do dvou precizních dutinkových lišt AWRF20Z a napájecí bateriová jednotka se připojuje skrz čtyři kusy BL210G. Plošný vodič k propojení s výkonovou jednotkou je i na této straně zakončen konektorem PSL26W. U všech konektorů bylo posuzováno proudové i napěťové namáhání.

Ohledně mechanické stránky, řídicí jednotka se svými rozměry 120 x 73mm lícuje s LCD modulem, který má v rozích otvory pro šrouby M2,5. Připevnění se provedlo pomocí upravených distančních sloupků M3, které jsou dobře patrné na fotografii v příloze **B.7**. Stejným způsobem byla připevněna i napájecí jednotka ze strany druhé.

## 6.13 Popis chování řídicí jednotky

Za předpokladu, že baterie napájecího modulu jsou dostatečně nabitě, po sepnutí spínače S1 se jako první vykreslí demonstrační obrazec odeslaný z ATmegy, který je možné jako podklad spatřit na **Obr. 7.21 a)**. Poté již běží naprogramovaný firmware Propelleru. Nejprve se vykreslí hlavní obrazovka a byl-li dříve RTC obvod zresetován, vyskočí žádost o nastavení data a času, jak je vidět na **Obr. 7.16 a)**.



a) Hlášení - požadavek

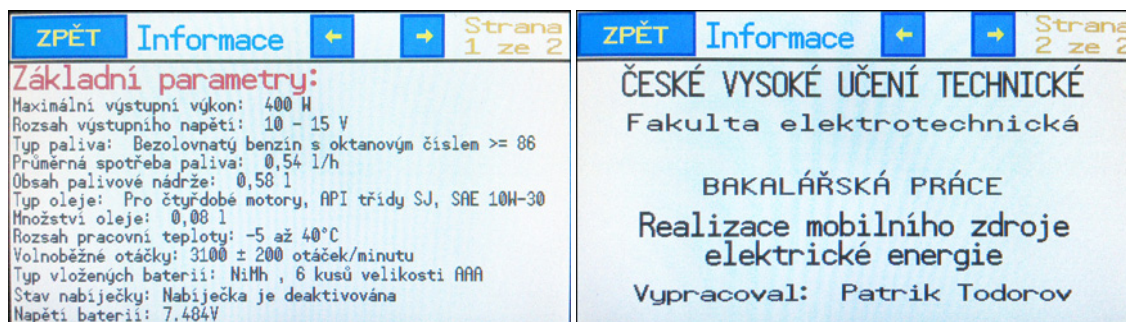
b) Hlavní obrazovka

Obrázek 7.16 : Řídicí jednotka – po zapnutí

Odsouhlasení zprávy vyvolá obrazovku „Nastavení“ (**Obr. 7.20**), kterou není možné opustit dokud požadavek nebude splněn. V případě že kabel servomotoru plynu nebyl připojen, zobrazí se dále hlášení „Chyba sběrnice servomotoru“, protože s magnetickým enkodérem uvnitř serva nelze navázat komunikaci. V opačném případě je poloha plynu srovnána do volnoběžné a servo je prozatím deaktivováno, aby se šetřila energie baterií. Program následně čeká na hlavní obrazovce, kde se dá tlačítkem „ZÁMEK“ aktivovat možnost změny výstupního napětí. Předchází se tak nechtěným zásahům za chodu s již připojeným spotřebičem. Pomocí tlačítek „+“ a „-“ lze nastavit požadované výstupní napětí měniče a to buď krátkým stiskem s krokem 0,05V, nebo při podržení rychlým posuvem. Tlačítkem „ULOŽ“ je možné zvolenou hodnotu zapsat do EEPROM, odkud bude načtena při dalším spuštění. Je-li motor v chodu, zobrazuje se zde dále velikost výstupního napětí, proudu, výsledný výkon a přibližné otáčky motoru.

V horní části hlavní obrazovky se nachází nabídka pro výběr jednotlivých sekcí menu. Pomocí tlačítka „VYPNOUT DISPLEJ“ je možné LCD obrazovku deaktivovat, protože během chodu agregátu svítit nemusí. Zobrazeno je nejprve potvrzovací hlášení. K opětovné aktivaci pak dochází po libovolném doteku na ploše panelu, nebo při výskytu jiné události.

Tlačítko „i“ skrývá dvě stránky jak je ukázáno na **Obr. 7.17**. Navigace byla umístěna vždy do horní části obrazovky,



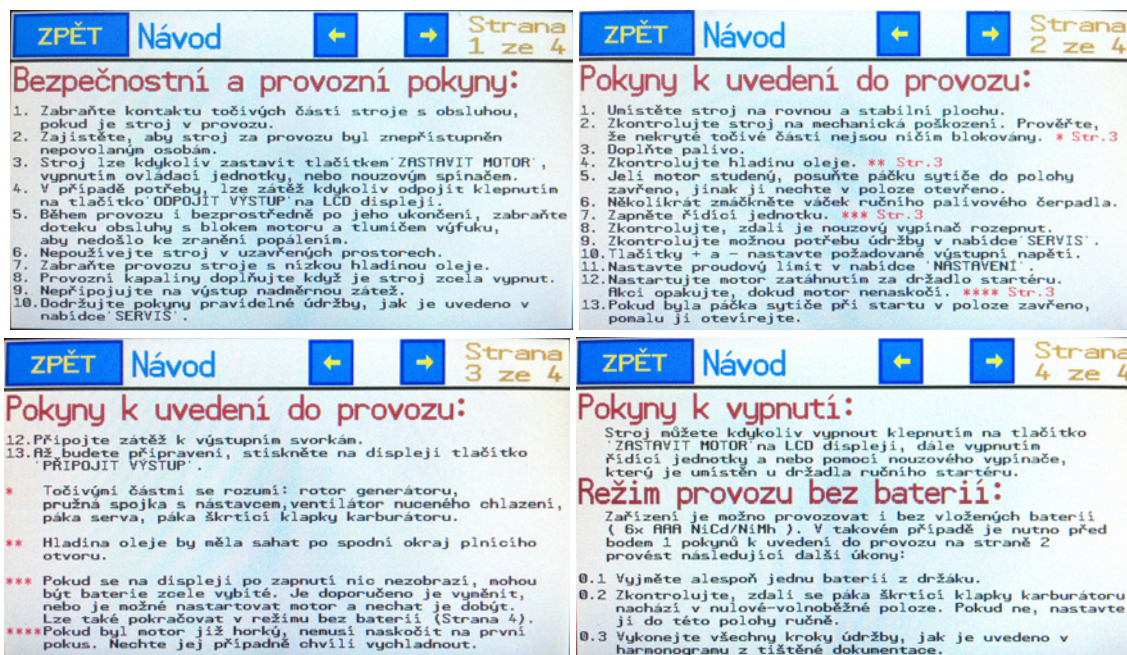
Obrázek 7.17 : Řídicí jednotka – obrazovka „Informace“

Na první jsou základní parametry tohoto zrealizovaného zařízení a informace získávané z napájecího modulu. Konkrétně nastavení typu vložených baterií (NiCd nebo NiMh), aktuální stav v němž se nachází jejich nabíječka a napětí na nich změřené.



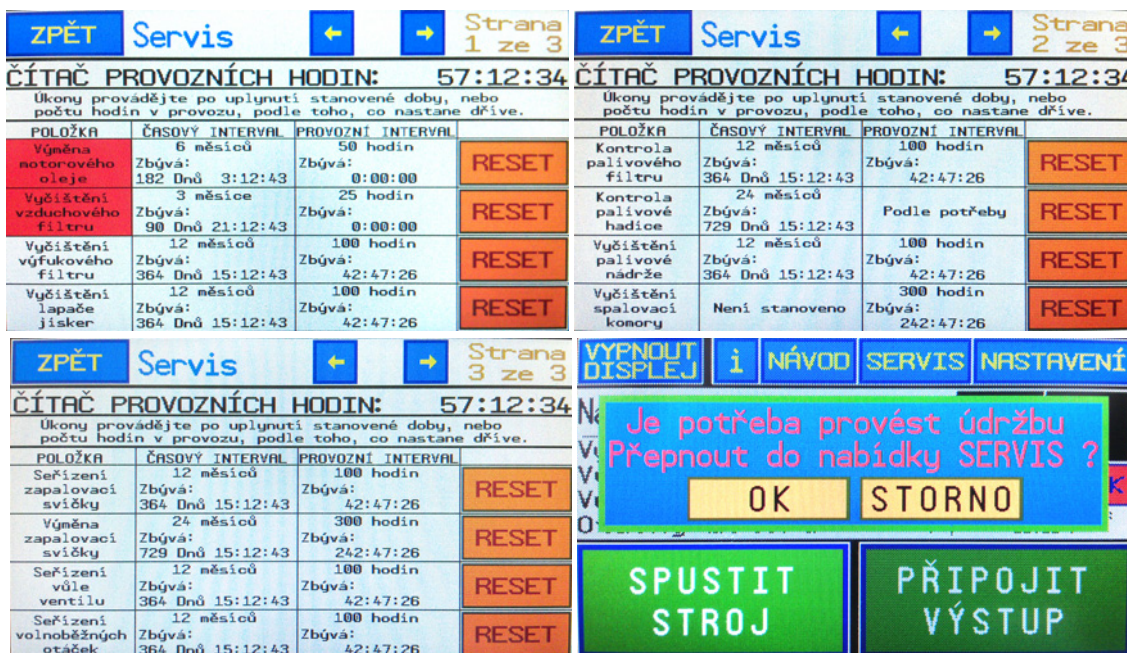
Je-li řídicí jednotka napájena z externího zdroje, dlouhým podržením šipky vlevo se dá zapnout napaječ nabíječky, dalším nabíječku aktivovat a třetím obojí opět vypnout. Jinak se nabíjení baterií aktivuje samo vždy 10 sekund po nastartování motoru. Strana č. 2 obsahuje informace o účelu této práce.

Pomocí „ZPĚT“ se lze vrátit na hlavní obrazovku kde další tlačítko „NÁVOD“ obsahuje 4 stránky, dle Obr. 7.18. Na první jsou zpracovány bezpečnostní a provozní pokyny. Druhá a třetí obsahuje pokyny k uvedení do provozu. Na čtvrté se nachází pokyny k vypnutí a další informace.



Obrázek 7.18 : Řídicí jednotka – obrazovka „Návod“

Další tlačítko na hlavní obrazovce je pojmenováno „SERVIS“. Obsahuje 3 stránky týkající se provádění úkonů údržby spalovacího motoru, které lze spatřit na Obr. 7.19. Nabídka je myšlena jako pokus o elektronickou knihu údržby, která se často v papírové podobě dlouho nedochová.

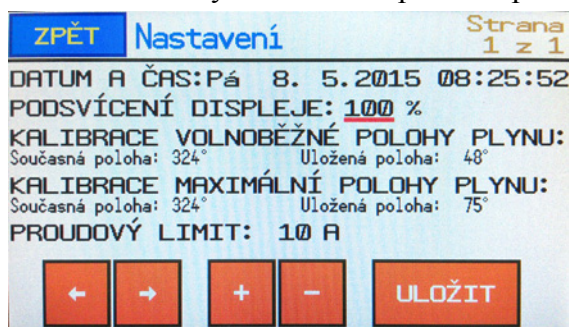


Obrázek 7.19 : Řídicí jednotka – obrazovka „Servis“ (kniha údržby) a související výstraha



Pod navigační lištou se nachází aktuální údaj čítače provozního času. Hodnotu lze vynulovat dlouhým podržením šipky vlevo na první straně této nabídky. Kniha údržby je navržena tak, že po provedení daného úkonu, například výměny oleje, obsluha stiskne přidružené tlačítko „RESET“ načež dochází ke dvěma událostem. Ve sloupci „časový interval“ se údaj obnoví a odpočet pokračuje v reálném čase od začátku. Ve sloupci „provozní interval“ se údaj obnoví taktéž, ale k jeho poklesu dochází až později při navýšení údaje počítadla provozních hodin. Pokud se alespoň jeden z časových údajů vynuluje, měl by se daný úkon údržby neprodleně provést. Intervaly jsou získané z dokumentace k motoru [37]. Nastane-li taková situace když motor neběží, zobrazí se hlášení s možností přesunu na stranu nabídky servis kde k vynulování došlo. Položka je pak červeně zvýrazněna v doprovodu zvukového signálu. Bude-li stav tlačítkem „STORNO“ ignorován, hlášení se za 30 vteřin opět objeví. Pokud některý interval údržby vyprší když je agregát v provozu, začne pouze červeně blikat tlačítko „SERVIS“. Jiná restriktivní opatření nejsou naprogramována, ale motor by mohl být teoreticky po nějaké době i zastaven, aby nedošlo k jeho poškození. Pokud je časový údaj v RTC chybný, odečet z intervalů se zastaví a po opravě data a času opět bezchybně pokračuje.

Poslední tlačítko v horní liště hlavní obrazovky je „NASTAVENÍ“ (Obr. 7.20). V této nabídce se lze mezi položkami pohybovat buď pomocí šipek, nebo přímým stiskem hodnoty. Změna se provádí pomocí „+“ a „-“, opět s rychlým posuvem při podržení. Údaj se zaznamená do EEPROM tlačítkem „ULOŽIT“.



Obrázek 7.20 : Řídicí jednotka – obrazovka „Nastavení“

V prvním řádku se nastavuje datum a čas v RTC obvodu. Na druhém lze měnit intenzitu podsvícení displeje, což je užitečné kvůli šetření baterií. Další údaje se týkají úhlu natočení ramena servomotoru plynu. Obě položky nadepsané „Současná poloha“ ukazují aktuální úhel natočení serva, které je po vylepšení schopno otáčení v rozsahu 360°.

Ve snaze o univerzálnost byl navržen následující postup k instalaci serva. Rameno se na drážkovou hřídel nasadí v libovolné poloze. Lanko bowdenu se na něj zafixuje a ručně napne. Poloha se uloží jako volnoběžná. Následně se ručně klapka plynu vytočí do požadované pozice, například 50% z celého rozsahu a poloha se uloží jako maximální. Takto je možné limitovat výkon motoru. Po uložení nových mezních poloh plynu je také potřeba provést jejich kalibraci. Ta se provádí automaticky buď po opuštění nabídky, případně až po resetu jednotky, jak je vidět na Obr. 7.21 a). Jedná se o proces hledání takové šířky pulsu PWM signálu řízení polohy serva, která přesně odpovídá uložené poloze z magnetického enkodéru.



a) Hlášení – Oznámení

b) Hlášení – Chyba

Obrázek 7.21 : Řídicí jednotka – hlášení se vztahem k servomotoru

Díky této synchronizaci je možné nepřetržitě hlídat, zdali regulátorem nastavená poloha plynu odpovídá poloze reálné. Lze tedy detekovat poruchové stavy, například vzpříčení páky plynu či jiný problém. Bylo také možné optimálně nastavit velikost odporové síly kladené pohybu páky, při níž se motor zastaví a jednotka nahlásí problém, jak je vidět na **Obr. 7.21 b)**.

Poslední položka na obrazovce „Nastavení“ slouží k určení proudového limitu, při kterém dochází k odpojení výstupu od zátěže. Motor zůstává v chodu.

V dolní části hlavní obrazovky se dále nachází tlačítka „SPUSTIT STROJ“, jehož stisknutím se odehraje několik událostí. Dojde k nastavení volnoběžné polohy plynu a servo již zůstává aktivováno. Relé zapalování sepne a zobrazí se výzva dle **Obr. 7.22 a)**. Úspěšný rozběh motoru je automaticky detekován, načež text tlačítka se změní na „ZASTAVIT STROJ“. Tlačítkem „PŘIPOJIT VÝSTUP“, které se zpřístupnilo může být aktivován výkonový měnič a na výstupu se objeví stabilizované stejnosměrné napětí nastavené velikosti. Zastavení motoru lze kdykoliv provést tlačítkem „ZASTAVIT STROJ“, což je vidět na **Obr. 7.22 b)**.



a) Nastartování motoru

b) Zastavení motoru

**Obrázek 7.22 :** Řídicí jednotka – spuštění a zastavení motoru

Vyskytne-li se za provozu nějaká chyba, motor je pomocí relé zapalování ihned zastaven s následným hlášením obsahujícím zdůvodnění. Další naprogramovaná chybová hlášení mimo již zmíněné jsou:

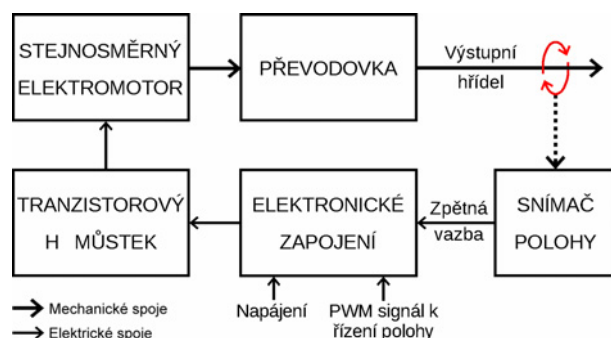
- „Chyba magnetu/enkodéru serva“ – Pravděpodobně došlo k uvolnění magnetu enkodéru a k jeho pohybu v osách x, y, z, mimo přípustnou toleranci.
- „Chyba generátoru - fáze L\*“ – Kde místo \* je číslo fáze 1 až 3. Fázové napětí není detekováno. Možná příčina je odpojený kabel z generátoru.
- „Chyba napájecího zdroje“ – Na výkonové jednotce překročena tolerance napájení  $\pm 10\%$  u 12V nebo  $\pm 5\%$  z 5V. Blíže neurčitelná závada.

Stavové údaje o nabíječce v nabídce „Informace“ mohou být:

- „Nabíječka je deaktivována“ – Napáječ nabíječky baterií je vypnut.
- „Nabíjení je pozastaveno“ – Napáječ je zapnut, ale nabíječka nikoliv.
- „Připraveno k nabíjení/  
/Automatické dobíjení“ – Nabíječka je zapnuta a může probíhat udržovací dobíjení.
- „Přednabíjení/Rychlé nabíjení“ – Probíhá standardní proces nabíjení baterií.
- „NiMH koncové nabíjení“ – Nastává pokud během fáze rychlého nabíjení došlo k teplotnímu přetížení NiMH baterií.
- „Teplotní limit překročen“ – Nabíjení bylo pozastaveno kvůli teplotě.
- „CHYBA nabíječky baterií“ – Nabíječka hlásí chybu, například napětí baterií je příliš nízké, nebo nejsou vůbec vloženy.

## 7. Servomotor a snímání polohy

Běžný modelářský servomotor jaký byl zde k ovládání polohy plynu použit, pracuje způsobem naznačeným na **Obr. 8.1**.



**Obrázek 8.1** : Blokové funkční schéma servomotoru

K pohonu se nejčastěji používá levný stejnosměrný elektromotor s kartáčovou komutací a permanentními magnety na statickém plášti. Buzení vinutí rotoru se provádí H můstkem, jaký je k vidění na **Obr. 2.16**. Převodovka nutná ke zvýšení kroutící síly na úkor otáček je vždy umístěna v samostatné sekci krabičky serva. Zde je také přímo na výstupní hřídeli elektronicky snímána poloha a získaná informace se předává do bloku s řídicí elektronikou. Ta v principu obsahuje monostabilní klopný obvod, součtový člen a zesilovač odchylky. Prakticky zde může být zapojení s OZ, MCU, nebo speciální zakázkový obvod.

### 7.1 Řízení polohy servomotoru

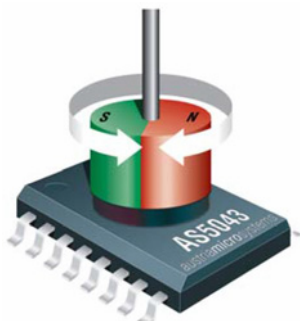
Standardně má modelářský servomotor 3 připojovací vodiče. Dva jsou napájecí a jeden pro řídicí signál. Nastavení polohy se provádí pomocí pulzně šířkové modulace s konstantní frekvencí 50Hz. Perioda je tedy 20ms a střída pak určuje polohu natočení hřídele. Bez úprav je servo schopno pohybu v rozsahu 0 až 180°, při šířce pulsu PWM signálu 600 až 2400μs. Používá se tedy střída menší než 0,5 a řídicí signál má podobu úzkých kladných obdélníkových pulsů. Rozsah polohy je omezen jednak mechanickými dorazy, ale také délkou odporové dráhy potenciometru a schopnostmi řídicího IO. Obvod HT7003 osazený v servu HS-625MG reaguje na šířku pulsu od 500 do 2500μs. Zůstane-li servo bez řídicích pulsů, páka není nucena setrvat v dané poloze a může se navzdory odporu kladeného převodovkou volně pohybovat.

### 7.2 Magnetický enkodér

Největším nedostatkem většiny běžných servomotorů je snímání polohy výstupní hřídele pomocí obyčejného potenciometru, který je zřejmě nejvíce poruchovou částí. Výrobci ho navíc obvykle jako náhradní díl vůbec nedodávají. Hřídelka potenciometru bývá přímo spojena s posledním ozubeným kolem převodovky, které přechází přímo ve výstupní drážkovou hřídel. Nízká životnost potenciometru je dána přímým působením vibrací na jeho odporovou dráhu. Proto mají některá lepší serva nepřímý náhon potenciometru s vlastním převodem. Ovšem i při běžném používání se uhlíková dráha velmi rychle opotřebuje, což má poté za následek cukání a zadržávání při pohybu páky. To by mohlo mít při ovládání plynu karburátoru spalovacího motoru nepříjemné konsekvence. Při značných vibracích na platformě spalovacího motoru je rychlé opotřebení potenciometru nevyhnutelné a proto byl navržen způsob jak provést jeho náhradu za jiný spolehlivější snímací člen.



První zvažovaná možnost byla provést výměnu za optický inkrementální snímač polohy, ovšem jeho vestavění do daného prostoru krabičky serva se zdálo být problematické. Jako další možnost se nabízela použití magnetického enkodéru. Po prostudování nabídky byl vybrán integrovaný obvod **AS5043** [146] od firmy Austria MicroSystems, který je určen k přímé náhradě analogových potenciometrů.

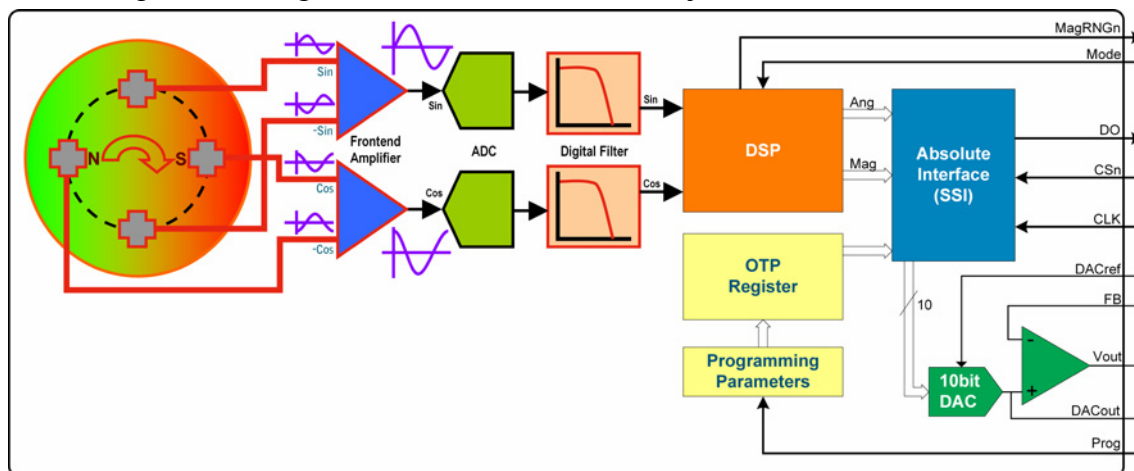


**Obrázek 8.2** : Magnetický enkodér (převzato z [146])

Měření polohy provádí zcela bezkontaktně, za pomoci malého magnetu pevně spojeného se sledovanou osou otáčení, jak je vidět na **Obr. 8.2**. Samotný obvod má miniaturní pouzdro SSOP16 a musí být umístěn v blízkosti magnetu se stanovenou tolerancí. Jedná se o velmi elegantní způsob snímání polohy v rozsahu  $360^\circ$  s desetibitovým rozlišením. Informaci o úhlu natočení obvod poskytuje jednak na široce přizpůsobitelném analogovém výstupu, ale také v digitální podobě přes přítomnou sériovou synchronní sběrnici (SSI). Jejím prostřednictvím je také například možné naprogramovat nulovou polohu, nebo zmenšit snímací rozsah při zachování rozlišení. Obvod také podporuje jednorázové trvalé naprogramování, které ovšem kvůli možnosti dalšího experimentování nebylo provedeno a proto se potřebná nastavení provádí vždy při startu řídicí jednotky. Přítomny jsou i další funkce jako pokročilý alarm polohy i pohybu magnetu a možnost jeho elektronického vycentrování na střed pouzdra. Při studiu obvodu byla použita literatura [146-150, 165].

### 7.2.1 Princip funkce magnetického enkodéru

Ke snímání magnetického pole vně umístěného magnetu se využívá Hallova jevu. Vnitřní uspořádání magnetického enkodéru znázorňuje **Obr. 8.3**.



**Obrázek 8.3** : Princip funkce a vnitřní uspořádání magnetického enkodéru (převzato a upraveno z [149, 165])

Na čipu je technologií CMOS vytvořena kruhová síť oddělených laterálních Hallových senzorů, která je přesně vycentrována se středem pouzdra obvodu. Díky tomu může vhodně polarizovaný rotující magnet generovat napětíové signály  $\pm\sin(x)$  a  $\pm\cos(x)$ , které reprezentují kolmo působící magnetickou indukci. Signály ze dvou protějších senzorů jsou vždy zkombinovány v diferenciálním zesilovači, čímž se získají signály  $\sin(x)$  a  $\cos(x)$  s dvojitou amplitudou. Jedná se vlastně o goniometrické vyjádření pravoúhlých souřadnic X a Y. Signály jsou následně AD převodníkem digitalizovány a vedeny přes filtr k odstranění digitálního chvění. Tyto filtry lze deaktivovat pomocí pinu Mode, což umožní rychlejší snímání polohy za cenu vyššího šumu analogového výstupu. Dále data proudí do signálového procesoru, který provádí transformaci koordinátů na polární souřadnice.

Výsledkem je úhel natočení magnetu a magnituda odpovídající velikosti indukce. Oba údaje se ukládají do SSI registru, odkud je připojený MCU (Propeller) může kdykoliv přečíst. Úhel je přímo odtud odečítán DA převodníkem analogového výstupu a o velikosti indukce magnetu v omezené míře informuje také samostatný pin MagRngn. Vyhodnocení pomocí DSP umožňuje rozpoznat i pohyb magnetu ve směru osy Z, což je rovněž indikováno stavovými bity v SSI registru.

Díky uspořádání senzorů a diferenciálnímu měření je obvod velmi tolerantní vůči vychýlení magnetu v osách X, Y a má značnou imunitu vůči působení okolních rušivých magnetických polí, což je kvůli elektromotoru serva nacházejícího se v blízkosti poměrně podstatné. Vyhodnocení přes signály  $\pm\sin$  a  $\pm\cos$  zase zajišťuje odolnost vůči změnám vzduchové mezery magnet–pouzdro a změnám teploty.

## 7.2.2 Zapojení magnetického enkodéru

Obvod je z kategorie „system-on-chip“ se všemi potřebnými zapojeními v jednom pouzdru a minimálním počtem externích součástek. Použité schéma zapojení se nachází v příloze **D.1**. S využitím vestavěného LDO stabilizátoru je obvod možné napájet nejvýše 5,5V. Ovšem servo je napájeno 6V takže musel být použit externí 3,3V LDO stabilizátor. V takové konfiguraci musejí být piny 15 a 16 propojeny. Použit byl stabilizátor LE33CZ ve standardním zapojení. Piny SSI sběrnice jsou uzpůsobeny k propojení s MCU i pomocí dlouhého vedení a proto mohou být připojeny přímo ke kabelu serva [150]. Pin MagRngn je sice vyveden na pájecí bod, ale nepoužívá se, protože informaci kterou poskytuje lze vyčíst i přes sběrnici. Rezistor R6 zajišťuje minimální potřebnou zátěž výstupu OZ. Tím že pin Mode zůstává volně je ponechán aktivní pomalý mód snímání polohy, což zajistí přesnější měření s nízkým šumem. Kondenzátor C5 je velice důležitý při permanentním programování, které ale provedeno nebylo a proto je neosazen. Pozice pro rezistory R3, R4, R7 sloužily pouze k odladění zapojení a ve finální podobě zůstávají prázdné. Ostatní piny IC2 se nepoužívají a musí zůstat nezapojeny.

## 7.2.3 Nastavení napětí analogového výstupu

Maximální velikost napětí na analogovém výstupu závisí na dvou věcech. Za prvé na referenci DAC, kterou lze zvolit v OTP registru. Zvolit je možné buď externí, nebo interní, která je rovna polovině napájecího napětí. Druhé nastavení bylo použito. Dále závisí na zisku navázaného operačního zesilovače, který je v základním neinvertujícím zapojení. Zisk se tedy nastavuje zpětnovazebním děličem. V OTP registru lze zvolit buď interní s dvojnásobným ziskem, nebo externí na pinu FB. Měřením bylo zjištěno, že původní potenciometr v krajní poloze dává na běžci napětí přibližně 2V. Potřebný zisk se spočte:

$$G = \frac{V_{OUT/MAX}}{V_{REF}} = \frac{2 \cdot 2}{\frac{V_{CC}}{3,3}} = \frac{2 \cdot 2}{3,3} \cong 1,21 \quad (8.2.1)$$

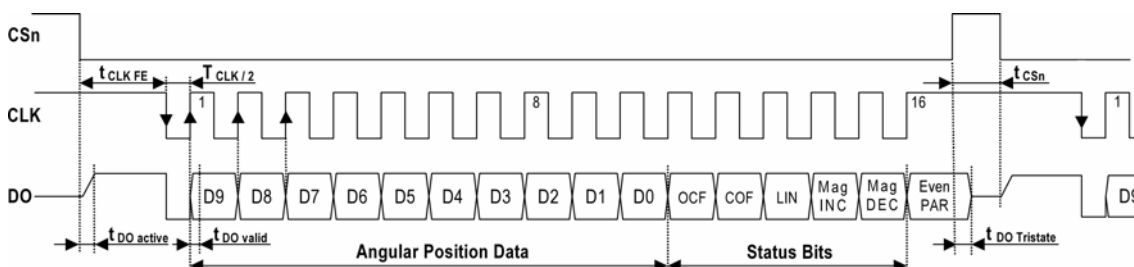
Vychází-li se opět ze schématu v příloze **D.1**, rezistor R1 je doporučován volit v rozmezí 10 až 50kΩ, aby nebyl výstup OZ zbytečně přetěžován. Použita bude hodnota blízká středu tohoto intervalu. Rezistor R2 se následně spočte:

$$R_1 = 33k\Omega \quad (8.2.2)$$

$$R_2 = \frac{R_1}{G - 1} = \frac{3,3 \cdot 10^4}{1,21 - 1} \cong 157k\Omega \approx 150k\Omega \quad (8.2.3)$$

## 7.2.4 Komunikace po SSI sběrnici a OTP registr

SSI sběrnice je fyzicky podobná SPI sběrnici. Taktěz obsahuje 4 vodiče s totožnou funkcí. Ovšem komunikace se řídí odlišnými pravidly. Vyčtení 16-ti bitového registru s absolutní úhlovou pozicí včetně stavových bitů se provádí podle diagramu na **Obr. 8.4**.

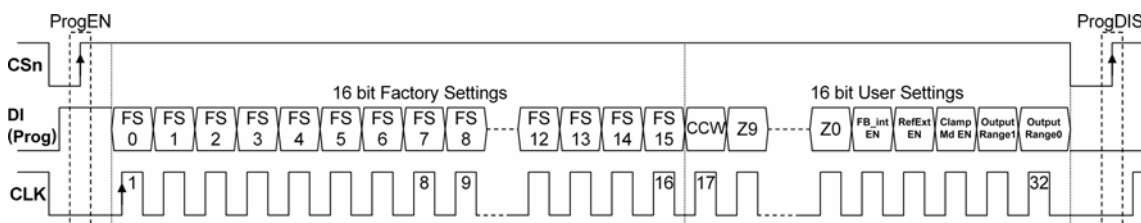


**Obrázek 8.4** : Synchronní sériová sběrnice a čtení úhlových pozičních dat (převzato a upraveno z [146])

V klidovém stavu jsou vodiče CS i CLK v log. 1. Komunikace začíná sestupnou hranou signálu CS, po kterém vodič DO přechází ze stavu vysoké impedance do log. 1. Na výstup jsou data odesílána vždy sestupnou hranou CLK. Komunikace se ukončí opětovným nastavením CS do log. 1.

Spolu s deseti bity absolutní úhlové pozice lze získat i 5 stavových bitů a jeden paritní bit umožňující elementární kontrolu integrity dat. Bit OCF v log. 1 indikuje, že algoritmus kompenzace offsetu byl dokončen a poloha je validní. Pomocí bitu COF v log. 1 informuje DSP o chybném rozsahu vstupních koordinátů, takže nelze spočítat novou polohu a zůstává v platnosti stará. Příčinou je vychýlení magnetu v osách X, Y, Z. Bit LIN v log. 1 podává informaci, že měřená poloha nemusí být přesná, protože indukce je mimo lineární oblast. Příčina je opět pohyb magnetu mimo toleranční limity. Bit INC v log. 1 signalizuje přibližování magnetu směrem k čipu a bit DEC naopak jeho oddalování. Poloha je tedy zaručené platná, jsou-li stavové bity '10000'. Paritní bit je sudý a vztahuje se na všech předchozích 15 bitů. Data je možné číst s hodinovým kmitočtem až 1Mz, ovšem takové rychlosti zde není vůbec potřeba, takže komunikační frekvence se použila jen přibližně 18kHz.

Enkodér má dále jeden 32 bitový tzv. OTP (One Time Programmable) registr, kde 16 bitů jsou neměnná tovární nastavení a zbytek slouží k přizpůsobení chování obvodu. Navzdory názvu registru může uživatel těchto 16 bitů naprogramovat i dočasně, ovšem zápis se musí vždy po připojení napájecího napětí zopakovat a kontrolu dočasného nastavení není možné zpětným vyčtením provést, protože získána jsou tak pouze trvalá data. Komunikace při zápisu do OTP registru probíhá podle diagramu na **Obr. 8.5**.

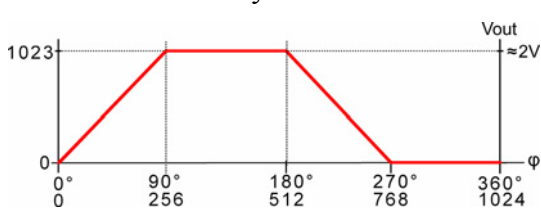


**Obrázek 8.5** : Synchronní sériová sběrnice a zápis do OTP registru (převzato a upraveno z [146])

Proceduře musí předcházet přečtení všech 32 bitů ze kterých se vyseparuje tovární nastavení. To může být kus od kusu obvodu odlišné a zde bylo zjištěno 3001h. Jakmile je jednou známé, dále již čtení z OTP registru není potřeba a proto zde nebude popisováno. Nejprve se musí vodiče CLK i CS z klidového stavu nastavit na log. 0 a vodič DI do log. 1. Zápis se iniciuje náběžnou hranou signálu CS. Data se poté mohou aplikovat na pin DI, přičemž do OTP registru jsou nasouvána s každou náběžnou hranou CLK.



Jako první se odesílají dříve vyčtená tovární data a následně uživatelská nastavení. První bit (CCW) určuje směr otáčení a následuje 10 bitů určujících nulovou polohu. Dalšími dvěma bity se volí externí/interní zpětnovazební dělič pro OZ a reference pro DAC. Čtrnáctý bit specifikuje zdali bude analogový výstup poskytovat 0-100%, nebo 10-90% z napájecího napětí. První možnost je implicitní a byla ponechána. Pomocí posledních dvou bitů je možné omezit snímací rozsah z 360° na 180°, 90° a 45°.



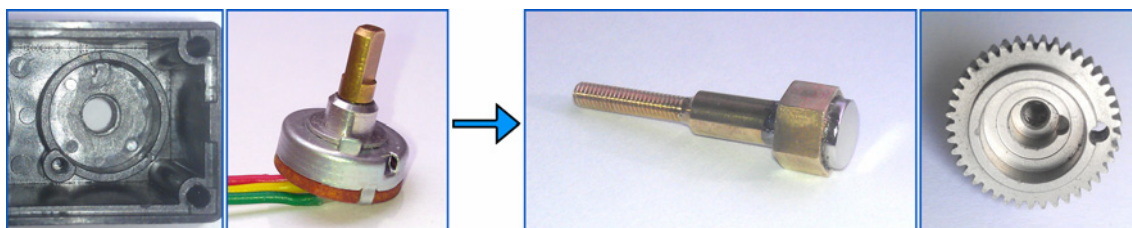
**Obrázek 8.6** : Napětí analogového výstupu mag. enkodéru (převzato a upraveno z [146])

Protože k ovládání lanka plynu plný rozsah není potřebný, byla zvolena možnost 90°, při které ještě zůstává zachováno 10-ti bitové rozlišení polohy. Zápis se ukončí další náběžnou hranou signálu CS, při vodičích DI a CLK v log. 0. Výsledný průběh napětí s tímto nastavením ukazuje **Obr. 8.6**.

7.2.5 Umístění enkodéru a magnetu uvnitř servomotoru

Používají se magnety cylindrické s magnetováním v horizontální ronivě. Doporučovány jsou kvalitní druhy s velkou remanentní indukci vyrobené ze vzácných zemin jako NdFeB, nebo SmCo. Průměr by se měl pohybovat od 4 do 6 mm a výška typicky 2,5mm. Kvůli experimentování jich bylo u firmy MAGSY [50] zakoupeno hned několik různých druhů. Požit byl nakonec NdFeB magnet s rozměry 6 x 2,5 mm a niklovou povrchovou úpravou. Pro tento účel se ukázal jako ideální.

Nahrazení potenciometru magnetem se provedlo za pomoci speciálně na míru vyrobeného nástavce, který je ukázán na **Obr. 8.7**.



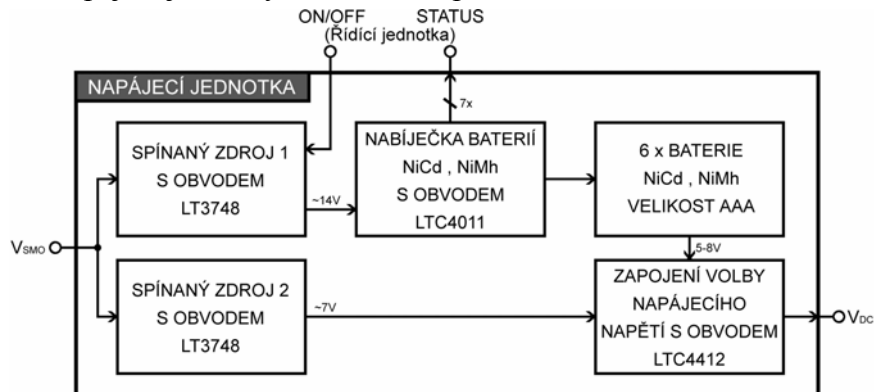
**Obrázek 8.7** : Nahrazení potenciometru magnetem

Původně je na dně šachty pro elektroniku, která je již prázdná vidět na obrázku vlevo, umístěn potenciometr zajištěný jedním šroubem. Jeho hřídel zde prostupuje do prostoru převodovky, kde je pomocí již odstraněné plastové objímky zafixována do středu ozubeného kola na obrázku vpravo. To je usazeno na dvou kuličkových ložiskách a má uprostřed závit M2,5, čehož se využilo. Potenciometr byl odebrán a místo něj se zde trubkovým klíčem zašrouboval nástavec s magnetem. Dle literatury [149, 146] může být magnet v kontaktu pouze se zcela nemagnetickými materiály, protože jinak dochází k deformaci siločar, která znemožní správnou funkčnost. Bylo ověřeno, že tento vliv je opravdu markantní. Rozhodnutí vyrobit nástavec z nemagnetické mosazi se ukázalo jako správné. Při jeho návrhu byla potřeba vzít v potaz, že mezera mezi magnetem a pouzdrem enkodéru musí být 0,5 až 3 mm a střed magnetu by měl lícovat se středem čipu s tolerancí 0,25mm. Nástavec byl vyroben z modelářské spojky se závitem M2,5 a distančního sloupku M7, do kterého byl vyfrézován kruhový otvor. Do něj byl magnet přilepen dvousložkovým epoxidovým lepidlem.

Pro magnetický enkodér byl vyroben plošný spoj, který lze spatřit v příloze **D.6**. Jeho rozměry jsou takové, aby přesně pasoval na dno šachty a je zde i otvor pro uchycení DPS šroubem, původně určeným pro potenciometr. Magnet, který z nástavce mírně vystupuje, úmyslně částečně zasahuje do otvoru ve středu plošného spoje.

## 8. Napájecí jednotka

Poslední vyrobený modul je napájecí jednotka, jejíž blokové schéma ukazuje **Obr. 9.1**. Obsahuje dva samostatné spínané zdroje s různým výstupním napětím. Z nich to vyšší napájí autonomní nabíječku baterií, přičemž baterie jsou vestavěny. Nabíječka poskytuje stavové signály řídicí jednotce pro monitoring, která může nabíjení buď pozastavit, nebo pomocí vstupu ON/OFF zcela resetovat. Jeden ze STATUS vodičů také poskytuje napětí baterií pro účely měření a zobrazení na LCD displeji. O výběr zdroje napájení pro řídicí jednotku se stará samostatný obvod. Může být vedeno z baterií, nebo z druhého spínaného zdroje, který má menší výstupní napětí. Schéma zapojení celé napájecí jednotky se nachází v příloze C.1.



Obrázek 9.1 : Zjednodušené blokové schéma napájecí jednotky

### 8.1 Napájecí řídicí jednotky a nabíječky baterií

Tyto spínané zdroje jsou zásobovány energií ze SMO, takže mohou pracovat pouze je-li agregát nastartován. Oba jsou opět založeny na integrovaném obvodu LT3748, který je schopen zpracovat široký rozsah napětí v SMO. Jejich návrh byl proveden obdobným způsobem jako na výkonové jednotce v kapitole 6.5 a proto zde nebude duplicitně popisován. Schéma zapojení obou zdrojů lze spatřit v příloze C.1. Jeden poskytuje 7V pro napájení řídicí jednotky včetně serva a druhý dodává 14V pro přítomnou nabíječku baterií. Tento zdroj je díky R25 implicitně deaktivován a zapíná se až přivedením kladného napětí na bázi tranzistoru T3 z řídicí jednotky. Zapnut je pouze má-li být aktivována i nabíječka. První zdroj využívá opět transformátor 750311797 [111] a druhý 750311597 [112].

### 8.2 Nabíječka baterií

Jako první bylo třeba zvolit druh a počet baterií, které musely poskytnout alespoň 6V k zajištění normálního chodu řídicí jednotky včetně servomotoru v době kdy agregát není nastartován. Vejít se musely na DPS napájecí jednotky, která má shodně s řídicí jednotkou rozměry 120 x 73 mm. Jako nejvhodnější se jevílo použití běžných a dostupných baterií typu NiMh v počtu šesti kusů [114] s držákem [113] v SMD provedení. K nabíjení byl poté vybrán obvod LTC4011 [108] od firmy Linear Technology [62] a to kvůli jeho účelnosti, snadné aplikaci a malému počtu externích součástek. Pracuje zcela samostatně s vlastním komplexním nabíjecím algoritmem a podporuje také NiCd baterie. Schéma zapojení, které bylo navrženo v souladu s datovým listem, se nachází v příloze C.1. Obvod bude popsán jen stručně. V první řadě vstupní napětí nabíječky by mělo být větší než [108]:

$$V_{IN/MIN} = (n_{BAT} \cdot 2) + 0,3 = (6 \cdot 2) + 0,3 = 12,3V \quad (9.2.1)$$

kde:  $n_{BAT}$  ... je počet baterií (-)

Proto má napaječ výstupní napětí 14V. Nachází se zde sestupný spínaný zdroj tvořený T5, D7 a L3, který pracuje na frekvenci 550kHz v proudovém režimu. Nabíjecí proud je snímán rezistorem R35, který musí být patřičně výkonově dimenzován a důležité u něj bylo dodržet Kelvinovo připojení snímacích cest [108]. Použité baterie mají kapacitu 750mAh a nabíjecí proud by se měl pohybovat mezi 0,5C až 2C. Zvolen byl proud 1A což odpovídá přibližně 1,3C. Rezistor R35 se pak určí [108]:

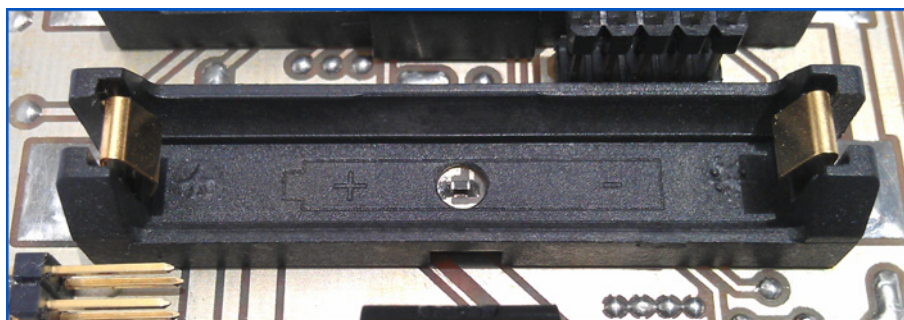
$$R_{35} = \frac{0,1}{I_{PROG}} = \frac{0,1}{1} = 0,1\Omega \quad (9.2.2)$$

kde:  $I_{PROG}$  ... je naprogramovaný nabíjecí proud (A)

Potřebná indukčnost L3 se spočte [108]:

$$L_3 = 6,5 \cdot 10^{-6} \cdot V_{IN} \cdot R_{35} = 6,5 \cdot 10^{-6} \cdot 13 \cdot 0,1 = 8,45 \mu H \approx 10 \mu H \quad (9.2.3)$$

Použita byla nejbližší dostupná a současně doporučená hodnota. Tato indukčnost spolu s T5, D7 a T4 jsou proudově i napětově dimenzovány dostatečně. Tranzistory T4 je ovládán přímo z IC3 a za úkol má zabránit vybíjení akumulátorů směrem do napaječe. Maximální nabíjecí časy jsou nastaveny pomocí R27. Uplatní se například nedojde-li k regulárnímu ukončení rychlého nabíjení díky  $-\Delta V$  poklesu během stanovené doby [108]. K detekci průměrného napětí na jedné baterii, potažmo k jejich vložení a odebrání je používán dělič z R30, R31 a C48, jehož poměrem se nastavuje počet připojených článků. Spínačem S1 je možné zvolit typ (NiMh-ON, NiCd-OFF). Obvod také podporuje připojení termistoru ke sledování teploty baterií. Nabíjení pak může být ukončeno nebo pozastaveno při překročení teplotních limitů. Použit byl NTC termistor s doporučeným odporem a teplotním koeficientem. Umístěn byl pod držák BAT4 kde je v přímém kontaktu s článkem, jak je ukázáno na Obr. 9.2.



Obrázek 9.2 : Umístění termistoru nabíječky baterií

Termistor je součástí sítě složené z C47, R32 až R34, jejichž hodnoty jsou také dle doporučení z datového listu. Piny 3 až 4, 13 a 19 poskytují informace o stavu ve kterém se nabíjení aktuálně nachází, proto jsou propojeny s řídicí jednotkou, kde může Propeller tyto informace zobrazit na displeji.

### 8.3 Obvod výběru napětí pro řídicí jednotku

Schéma zapojení se opět nachází v příloze C.1. Aby nebyl proces nabíjení baterií nijak ovlivňován, použilo se zapojení takzvané ideální diody s tranzistorem T6 a T7, které jsou ovládány pomocí obvodu LTC4412 [109]. Je-li k dispozici napětí 6V po nastartování motoru, obvod to na pinu SENSE rozpozná, rozepne T6 a s velmi malou prodlevou sepne T7. Je-li poté motor vypnut a toto napětí poklesne, obvod uzavře T7 a s nepatrným zpožděním otevře T6 čímž přivede na výstup napětí z baterií. Součástky R36 až R37, C52, C53 a ZD1 pomáhají přepínací zpoždění zmenšit na minimum. Jejich hodnoty byly určeny empiricky. Výstupní kondenzátory C54 až C57 taktéž pomáhají pokles při výběru napětí potlačit. Před výstupní konektorem je ještě zařazena tavná pojistka F1, která chrání baterie před zkratem na řídicí jednotce nebo v servomotoru.

## 9. Návrh a výroba plošných spojů

Schéματα i motivy plošných spojů, které se nachází v přílohách **A** až **D**, byly navrženy v programu Eagle. Kvůli malým cílovým rozměrům desek se v co největší míře použily součástky s povrchovou montáží. Velký počet vodivých spojů si vyžádal použití oboustranných DPS. Prokovy jsou prováděny vždy pomocí několika tenkých měděných vodičů. Drátové propojky se nepoužívají. Aby se prokovy a především větší součástky dobře pájely, byly všude vytvořeny termální průchody. Součástky jsou na deskách rozvrženy se snahou o co nejlepší uspořádání jednotlivých funkčních celků, které se dále navrhovaly v souladu s doporučeními z datových listů jednotlivých integrovaných obvodů. Mimo to se návrh řídil obecně platnými pravidly [161]. Promyslet bylo třeba proudové dimenzování jednotlivých cest i samotných prokovů. Blokovací kondenzátory, ale i další součástky dle doporučení se umísťovaly co nejbližší pouzdrům IO. U všech spínaných zdrojů byla snaha o minimalizaci plochy vysokofrekvenční proudové smyčky. Důraz se kladl také na pečlivé rozložení a prokovení zemnicích ploch obou stran desek. Konektory a ovládací prvky se umísťovaly tak, aby byly dobře dostupné, většinou na okraj desky. Některé plošky jsou tak malé, že bylo potřeba nastavit nízkou pájecí teplotu a dbát nejvyšší opatrnosti aby se nepoškodily. Tlumící obvody jsou umísťovány vždy co nejbližší tranzistorům a cesty od budiče k řídicí elektrodě jsou kvůli parazitní indukčnosti co nejkratší. Budiče sběrnic zase co nejbližší výstupním konektorům. Napájecí napětí jsou po deskách distribuována co nejkratšími cestami. AD převodník byl umístěn co nejbližší měřených napětí.

Plošné spoje byly vyráběny pozitivní fotocestou. Použitý materiál je cuprexit tloušťky 1,5mm se silou mědi 35 $\mu$ m. Předlohy byly vyexportovány ve vhodném formátu (EPS) a na laserové tiskárně ve vysokém rozlišení vytištěny na průhledné fólie a to tak, aby mohla strana s tonerem přilnout k mědi. Vždy tři až čtyři fólie byly pod lupou slícovány a slepeny tak aby se dosáhlo minimální průhlednosti černých ploch. Desky byly vyříznuty na požadovaný rozměr a hrany zarovnané. Povrchy byly umyty tekutým pískem a odmaštěny isopropylalkoholem. Na ně byla následně v temnu nanášena vrstva pozitivní fotoemulze „POSITIV 20“. Vrstva musí být velmi tenká a rovnoměrná. Schnutí laku probíhalo ve zkrácené době pod infračervenou lampou. Lak je aplikován nejprve na jednu a poté na druhou stranu. Na desky se následně přiloží připravená fólie s motivem plošného spoje a zatíží se skleněnou deskou. Nad střed desky se následně umístí UV lampa kterou se motiv přiměřenou dobu osvítil. Je-li to možné, provádí se následně ihned osvit i druhé strany, přičemž slícování se docílí pomocí předem připravených značek na fólii. Následně je deska vyvolána v roztoku hydroxidu sodného 10g na 1 litr vody, který rozpustí osvětlené plochy. Byla-li vrstva fotoemulze dostatečně tenká a diference mezi tmavými a průsvitnými plochami předlohy velká, vyvolání probíhá nejvýše několik desítek vteřin. Následně byly desky leptány v roztoku chloridu železitého, čímž se odstraní neosvětlené plochy a vzniká deska s motivem plošných spojů. Zbývající fotoemulze se odstraní lihem. Po umytí ve vodě mají spoje tendenci okamžitě korodovat. Tomu bylo zabráněno postříbřením v lázni „AG-1“. Před vložením se deska znovu odmastila a lázeň se zahřála na přibližně 50°C, čímž lze dosáhnout kvalitní tlusté vrstvy stříbra. Takto upravená deska je schopna odolávat vzdušné vlhkosti velmi dlouhou dobu i bez ochranného laku.

Jako poslední úkon se vyvrtaly otvory pro šrouby, prokovy a součástky s THT montáží.

Osazování probíhalo po jednotlivých funkčních blocích od napájení, přes Propeller a dále ostatní IO.

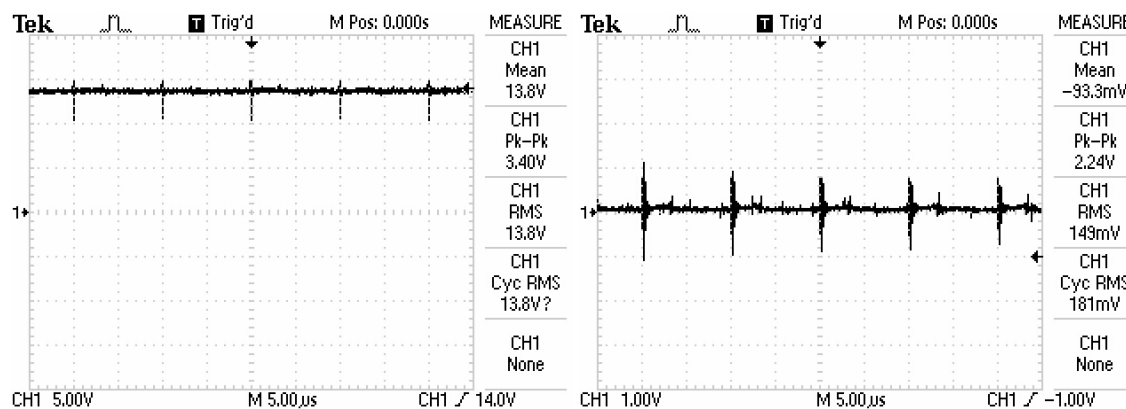
## 10. Závěr

Prototyp mobilního zdroje elektrické energie poháněného spalovacím motorem se podařilo nejen navrhnout a i postavit, přičemž splněny byly všechny cíle vytyčené v kapitole 3. Výsledkem je poměrně komplexní zařízení s širokými možnostmi. Celkové provedení lze spatřit v příloze E.

Přestože je účinnost benzínového spalovacího motoru velice nízká, uvádí se okolo 25%, návrh výkonových obvodů byl proveden s ohledem na vysokou účinnost, protože efektivní konverze energie může ušetřit z dlouhodobého hlediska nezanedbatelné množství paliva. Přínosem se zdá být ovládání stroje pomocí řídicí jednotky s velkým a čitelným dotekovým LCD displejem, což v segmentu přenosných agregátů zatím nemá obdoby. Z mechanického hlediska je celkové provedení velice robustní, orientováno na bezpečnost a spolehlivost.

V průběhu realizace bylo navrženo několik technických řešení, které jsou zajímavé i samostatně. Jedním z nich je přestavba servomotoru na aktuátor s magnetickým enkodérem. Protože cena podobných servomotorů je v současné době mnohonásobně vyšší než těch s obyčejným potenciometrem, jedná se o velice užitečné vylepšení. Tímto způsobem je možné zvýšit spolehlivost i u běžných levných servomotorů. Část práce se odehrála i v rovině softwarové, při návrhu firmwaru. Vytvořena byla univerzálně použitelná struktura menu s interaktivními prvky. Elektronická kniha údržby se jeví jako zajímavý a praktický koncept. Řídicí jednotka je také schopna hlídat některé běžné poruchové stavy, což je velmi užitečné.

Na Obr. 11.1 si lze prohlédnout charakter zvlnění výstupního napětí realizovaného agregátu. Vyskytují se zde sice velmi úzké špičky amplitudy jednotek volt, ovšem jejich energie je malá a efektivní hodnota zvlnění se pohybuje okolo cílových 100mV. Po připojení větší zátěže dochází jen k malým poklesům napětí.



Obrázek 11.1 : Ukázka zvlnění výstupního napětí agregátu při výstupním výkonu  $\approx 300\text{W}$

Většího rozsahu SS stabilizovaného napětí než 10 – 15V, by se dalo dosáhnout při použití jiného generátoru, případně návrhem výkonového měniče s odlišnou topologií. Zařízení sice teoreticky zvládne dodat i výkon větší než 400W, ovšem to už pracuje na hranici možností. Výkon je nejvíce limitován spalovacím motorem a následně dimenzováním některých součástek.

Přesto že potenciál mikropočítače Parallax Propeller byl slušně zužitkovan, prostor pro vylepšování zde sále zůstává. Například při instalaci GSM modulu by agregát mohl poslat zprávu o výskytu nějakého problému, jako nutnosti vykonání servisního úkonu či nedostatku paliva. Motor by také mohl obsahovat olejové čidlo a čidlo hladiny paliva, což by umožnilo podávat zprávy o jeho spotřebě a stavu. Sledována by také mohla být teplota bloku motoru. Při akceptování většího akumulátoru by se také dal nainstalovat místo ručního elektrický startér.

## 11. Literatura a použité zdroje

### Výrobci mobilních zdrojů elektrické energie

- [1] *Honda Generators: Portable Generator Power for Home, Work, and Play*: [online] ; © 2015 ; American Honda Motor Co., Inc. ; Výrobce agregátů - stránky EN ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.powerequipment.honda.com/generators](http://www.powerequipment.honda.com/generators)
- [2] *Elektrocentrály Honda (generátory, záložní zdroje)*: [online] ; © 2012 ; Honda Motor Co., Ltd. - Team Honda Power Equipment: BG Technik cs, a.s. ; Výrobce agregátů - stránky CZ ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.hondastroje.cz/katalog-produktu/industry-program/elektrocentrally.html](http://www.hondastroje.cz/katalog-produktu/industry-program/elektrocentrally.html)
- [3] *Generators | Energy | Honda (UK)*: [online] ; © 2012 ; Honda Motor Europe Limited T/A Honda (UK) ; Výrobce agregátů - stránky EN ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.honda.co.uk/energy](http://www.honda.co.uk/energy)
- [4] *Produkty - HITACHI Power Tools Czech*: [online] ; © 1994 – 2008 ; Hitachi Power Tools Czech ; Výrobce agregátů - stránky CZ ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.hitachi-elektronaradi.cz/produkty](http://www.hitachi-elektronaradi.cz/produkty)
- [5] *Mitsubishi Engine North America, Inc.*: [online] ; © 2015 ; Mitsubishi Engine North America, Inc. ; Výrobce agregátů - stránky EN ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.mitsubishi-generators.com](http://www.mitsubishi-generators.com)
- [6] *Honeywell | Generators*: [online] ; © 1998 – 2015 ; Generac Power Systems, Inc. ; Výrobce agregátů - stránky EN ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.honeywellgenerators.com](http://www.honeywellgenerators.com)
- [7] *Yamaha Motor Canada :: Products :: Power Equipment*: [online] ; © 2015 ; Yamaha Motor Canada Ltd. ; Výrobce agregátů - stránky EN ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.yamaha-motor.ca/products/?group=PP](http://www.yamaha-motor.ca/products/?group=PP)
- [8] *Subaru Robin - Generators*: [online] ; © 2015 ; Subaru - Fuji Heavy Industries LTD. ; Výrobce agregátů - stránky EN ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.subarupower.com/generators.aspx](http://www.subarupower.com/generators.aspx)
- [9] *Hyundai Power Equipment*: [online] ; © 2015 ; Hyundai Power Equipment Canada ; Výrobce agregátů - stránky EN ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.hyundaipower.ca/generators.php](http://www.hyundaipower.ca/generators.php)
- [10] *Power generation - Stationary Tools - Tools: Einhell Germany AG*: [online] ; © 2015 ; Einhell Germany AG ; Výrobce agregátů - stránky EN ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.einhell.com/com\\_en/shop/4862/4891/4918.html](http://www.einhell.com/com_en/shop/4862/4891/4918.html)
- [11] *Generátory proudu | Hecht*: [online] ; WERCO, spol. s r.o. ; © 2015 ; eBRÁNA s.r.o. ; Výrobce agregátů - stránky CZ ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.hecht.cz/product-catalogue/generatory-proudu-cz.htm](http://www.hecht.cz/product-catalogue/generatory-proudu-cz.htm)
- [12] *Stromerzeuger*: [online] ; © 2015 ; GÜDE GmbH & Co. KG ; Výrobce agregátů - stránky DE ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.guede.com](http://www.guede.com)
- [13] *Metallwarenfabrik Gemmingen: Produkte*: [online] ; © 2014 ; Metallwarenfabrik Gemmingen GmbH ; Výrobce agregátů - stránky DE ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.metallwarenfabrik.com/en/produkte](http://www.metallwarenfabrik.com/en/produkte)
- [14] *Portable Battery Chargers DC Generators and APUs. Gas, Diesel, Propane Fuel for Mining Marine Telecom Solar*: [online] ; © 2011 ; American Power Systems, Inc. ; Výrobce SS agregátů - stránky EN ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.americanpowerinc.com/DC%20Gen.htm](http://www.americanpowerinc.com/DC%20Gen.htm)
- [15] *ALTEN DC | DC Generators*: [online] ; © 2015 ; ALTEN USA, Inc. ; Výrobce SS agregátů - stránky EN ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.altendc.com/dc-generators.html](http://www.altendc.com/dc-generators.html)
- [16] *DC Generator Sets-DC Generator Sets-DC Generator Sets-3Tech*: [online] ; © 1998 – 2013 ; 3Tech Co., Ltd. ; Výrobce SS agregátů - stránky EN ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.3tech.net/index.php?ac=article&at=list&tid=34](http://www.3tech.net/index.php?ac=article&at=list&tid=34)
- [17] *DC-Generators*: [online] ; © 2015 ; Disclaimer Eniquest Pty Ltd. ; Výrobce SS agregátů - stránky EN ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.eniquest.com.au/categories/dc-generators](http://www.eniquest.com.au/categories/dc-generators)
- [18] *Polar Power | DC Generators*: [online] ; © 2015 Polar Power Inc. ; Výrobce SS agregátů - stránky EN ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.polarpower.com/products/dc-generators](http://www.polarpower.com/products/dc-generators)
- [19] *WhisperPower - Green Energy Solutions - Generating Confidence*: [online] ; © 2015 ; WhisperPower B.V. ; Výrobce SS agregátů - stránky EN ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.whisperpower.com/4/products.html](http://www.whisperpower.com/4/products.html)
- [20] *Alpha Technologies Inc. - Generators*: [online] ; © 2015 ; Alpha Technologies Inc. ; Výrobce SS agregátů - stránky EN ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.alpha.com/index.php/outside-plant-power/generators](http://www.alpha.com/index.php/outside-plant-power/generators)



Agregáty – informační materiály, návody, katalogy a servisní manuály

- [21] Alpha Technologies Inc. ; *Alphagen DC Generator DCX3000 Owner's manual*: [online] ; © 2004 – 2008 ; 31ZS9711 ; 00X31-ZS9-7100 ; Uživatelský manuál k SS agregátu DCX3000 – Regulace prostřednictvím DC/DC měniče ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.alpha.com/download/pdf/31ZS9711\\_combined.pdf](http://www.alpha.com/download/pdf/31ZS9711_combined.pdf)
- [22] American Honda Motor Co., Inc. ; *Honda Generator EX7, Owner's manual*: [online] ; © 2008 ; 36ZT3710 ; 00X36-ZT3-7100 ; Uživatelský manuál k agregátu Honda EX7 – Regulace pomocí cyklokonvertoru ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.hondampe.com.au/docs/owning\\_a\\_honda/owners\\_manuals/pe/ex7owners.pdf](http://www.hondampe.com.au/docs/owning_a_honda/owners_manuals/pe/ex7owners.pdf)
- [23] American Honda Motor Co., Inc. ; *Honda Generators Brochure*: [online]; © 2014; Revision 4 ; CO530 ; Informační brožura o generátorech firmy Honda ; [cit. 1.2.2015]; Dostupné na adrese: [http://cdn.powerequipment.honda.com/pe/pdf/Brochures/generator\\_brochure.pdf](http://cdn.powerequipment.honda.com/pe/pdf/Brochures/generator_brochure.pdf)
- [24] American Honda Motor Co., Inc. ; *Honda Generator Range Brochure*: [online]; © 2012–2013; Informační brožura o generátorech firmy Honda ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.tablelandhonda.com.au/images/power\\_equipment/generator\\_brochure.pdf](http://www.tablelandhonda.com.au/images/power_equipment/generator_brochure.pdf)
- [25] Hitachi Koki Co., Ltd. ; *Hitachi, Generátory, Katalog*: [online] ; © 2008 ; Informační brožura o generátorech firmy Hitachi ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.hitachi-elektronaradi.cz/files/catalogs/2008\\_13\\_generatory.pdf](http://www.hitachi-elektronaradi.cz/files/catalogs/2008_13_generatory.pdf)
- [26] Metallwarenfabrik Gemmingen GmbH ; *Power Generating Systems – EISEMANN*: [online] ; © May 2009 ; Release 05.2009 ; Katalog agregátů osazených synchronním generátorem ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.eisemann.com.pl/files/File/KATALOGI/EISEMANN\\_EN.pdf](http://www.eisemann.com.pl/files/File/KATALOGI/EISEMANN_EN.pdf)
- [27] Metallwarenfabrik Gemmingen GmbH ; *Power Generating Systems – GEKO*: [online] ; © March 2010 ; Release 03.2010 ; Katalog agregátů osazených asynchronním generátorem ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.din-stromerzeuger.de/fileadmin/content/dokumente/geko\\_10\\_03\\_eng.pdf](http://www.din-stromerzeuger.de/fileadmin/content/dokumente/geko_10_03_eng.pdf)
- [28] Yamaha Motor Corporation, U.S.A. ; *Yamaha Generator Theory and Diagnostics Guide 2009*: [online] ; © 2008 by Yamaha Motor Corporation, U.S.A. ; December 2008 ; 08-1169 ; p.n.: LIT-BKTEC-GN-01 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.gen-tech.net/fullpanel/uploads/files/theory--diagnostics-guide.pdf](http://www.gen-tech.net/fullpanel/uploads/files/theory--diagnostics-guide.pdf)
- [29] American Honda Motor Co., Inc., Service Communications Department ; *eu2000i\_k0-Companion z supplement*: [online] ; Servisní manuál k agregátu Honda EU2000i – Regulace pomocí inverteru ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.halcyonlines.files.wordpress.com/2012/10/eu2000i-repair-manual.pdf](http://www.halcyonlines.files.wordpress.com/2012/10/eu2000i-repair-manual.pdf)
- [30] Fuji Heavy Industries Ltd. ; *Technical Data & Overhaul Instructions – Service manual – Robin Generator R650*: [online] ; © January 1998 ; Japan ; ISSUE EMD-GS0455 ; Servisní manuál k agregátu Robin R650 – Regulace kapacitní ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.jackssmallengines.com/pdf\\_documents/Robin%20equipment/manuals/GS0455.pdf](http://www.jackssmallengines.com/pdf_documents/Robin%20equipment/manuals/GS0455.pdf)
- [31] Fuji Heavy Industries Ltd. ; *Technical Data & Overhaul Instructions – Service manual – Robin Generator R1200*: [online] © April 1984 ; Japan ; ISSUE EMD-GS0095 ; Servisní manuál k agregátu Robin R1200 – Regulace AVR ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.jackssmallengines.com/pdf\\_documents/Robin%20equipment/manuals/GS0095.pdf](http://www.jackssmallengines.com/pdf_documents/Robin%20equipment/manuals/GS0095.pdf)
- [32] Fuji Heavy Industries Ltd. ; *Service manual – Robin Generator RGV12000/13000T*: [online] ; © 2000 ; USA ; PUB-GS1328 ; Revision OI/OO ; Servisní manuál k agregátům Robin RGV12000 a 13000T – Regulace kompaundní ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.subarupower.com/media/manuals/128479357253016840.pdf](http://www.subarupower.com/media/manuals/128479357253016840.pdf)
- [33] Yamaha Motor Corporation, U.S.A. ; *Yamaha Supplementary service manual – EDL20000TE, EDL 26000TE*: [online] ; © 2002 ; Japan ; Q9C-28197-E0 ; 310132 ; Servisní manuály k agregátům s regulací typu AVR ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [ftp.yamaha.ua/Power\\_manuals/EDL20000TE,EDL26000TE\\_Q9C-28197-E0.PDF](ftp://yamaha.ua/Power_manuals/EDL20000TE,EDL26000TE_Q9C-28197-E0.PDF)
- [34] Honeywell International Inc. ; *Honeywell Portable Electrical Generator Service Manual*: [online] ; © 2010 ; Milwaukee, USA ; Northshore Power Systems, LLC ; p.n.: 101290D ; Servisní manuály k různým agregátům s regulací typu AVR ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.hwportables.com/pdfs/2010/06/25/101290\\_portable\\_service\\_manual.pdf](http://www.hwportables.com/pdfs/2010/06/25/101290_portable_service_manual.pdf)

Spalovací motor – informace a návody

- [35] *Honda Engines | Small Engine Models, Manuals, Parts, & Resources | Official Site*: [online] ; © 2015 ; American Honda Motor Co., Inc. ; Výrobce spalovacích motorů – stránky EN ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.engines.honda.com](http://www.engines.honda.com)

- [36] *Honda Engines | GX25 Mini 4-Stroke Engine*: [online] ; © 2015 ; American Honda Motor Co., Inc. ; Specifikace, uživatelské manuály, obrázky, grafy a podrobné informace ke spalovacímu motoru Honda GX25 – stránky EN ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.engines.honda.com/models/model-detail/gx25](http://www.engines.honda.com/models/model-detail/gx25)
- [37] Honda Motor Co., Inc. ; *Honda GX25, GX35 - Owner's Manual*: [online] ; © 2006 ; 32Z6J602 ; 00X32-Z6J-6020 ; Uživatelský manuál ke spalovacímu motoru Honda GX25, GX35 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.hondampe.com.au/repository/owning\\_a\\_honda/owners-manuals/OM-GX25-35.pdf](http://www.hondampe.com.au/repository/owning_a_honda/owners-manuals/OM-GX25-35.pdf)
- [38] American Honda Motor Co., Inc. ; *Honda, General purpose engine, GX25, Parts Catalogue 2, © 2007, 13Z0H0E2*: [online] ; Konstrukční plány a katalog náhradních dílů pro spalovací motor Honda GX25 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.aco39.ru/files/new.folder/honda.gx.25.ii.pdf](http://www.aco39.ru/files/new.folder/honda.gx.25.ii.pdf)
- [39] JOHN B. Heywood ; *Two-stroke Cycle Engine: It's Development, Operation and Design* ; CRC Press, 1999 ; ISBN-10: 1560328312

### Mechanický kovový materiál – prodejci

- [40] *Ferona, a.s. - Velkoobchod hutním materiálem*: [online] ; © 2015 ; Ferona, a.s. ; Prodejce kovových konstrukčních materiálů - stránky CZ ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.ferona.cz/cze](http://www.ferona.cz/cze)
- [41] *Hliníkové profily, ploché hliníkové tyče, trubky-ALUCAD Bohemia, s. r. o.*: [online] ; © 2010 ; ALUCAD Bohemia s.r.o. ; Prodejce kovových konstrukčních materiálů - stránky CZ ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.alucad.cz](http://www.alucad.cz)
- [42] *Spojovací materiál, šrouby a matice | Fabory online*: [online] ; © 2009 – 2012 ; Fabory CZ Holding s.r.o. ; Prodejce spojovacích a konstrukčních materiálů - stránky CZ ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.fabory.cz](http://www.fabory.cz)

### Pružná spojka

- [43] *R+W | ELASTOMER COUPLINGS*: [online] ; © 2014 ; R+W Antriebselemente GmbH ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.rwcouplings.com/products/elastomer\\_couplings](http://www.rwcouplings.com/products/elastomer_couplings)
- [44] R+W Antriebselemente GmbH ; *Catalogs of R+W Couplings*: [online] ; © March 2014 ; D-ZM-16029-01-01 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.rwcouplings.com/catalogs\\_downloads/catalogs\\_pdf/pdf/RW\\_PK\\_Auf13\\_EN\\_screen.pdf](http://www.rwcouplings.com/catalogs_downloads/catalogs_pdf/pdf/RW_PK_Auf13_EN_screen.pdf)
- [45] *BIBUS s.r.o.*: [online] ; © 2011 ; BIBUS s.r.o. ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.bibus.cz/cs/domu](http://www.bibus.cz/cs/domu)

### Generátor

- [46] *Aeolian Motor*: [online] ; © 2012 ; Aeolian Motor ; Výrobce modelářských motorů typu outrunner ; [cit. 1.2.2013] ; Dostupné na adrese: [www.aeolianmotor.com](http://www.aeolianmotor.com)

### Servomotor – mechanická část

- [47] *HS-625MG High Speed Metal Gear Premium Sport Servo*: [online] ; © 2014 ; Hitec RCD USA, Inc. ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.hitecrcd.com/products/servos/sport-servos/analog-sport-servos/hs-625mg-high-speed-metal-gear-servo/product](http://www.hitecrcd.com/products/servos/sport-servos/analog-sport-servos/hs-625mg-high-speed-metal-gear-servo/product)
- [48] Hitec RCD USA, Inc. ; *Hitec General Servo Information*: [online] ; © March 2002 ; Version 2.00 ; 20020307 ; Obecné informace o vlastnostech servomotorů firmy Hitec ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: <http://physics.ucsd.edu/~tmurphy/phys120b/labs/doc/Servomanual.pdf>
- [49] *MP JET s.r.o.*: [online] ; © 2002-2013 ; MP JET s.r.o. ; Prodejce potřeb pro modeláře - stránky CZ ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.mpjet.info](http://www.mpjet.info)
- [50] *Magnety | MAGSY, s.r.o. Zlín*: [online] ; MAGSY, s.r.o. ; Prodejce magnetů - stránky CZ ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.magsy.cz/24670-magnety](http://www.magsy.cz/24670-magnety)
- [51] *Pull-Pull Wheel: Futaba, Small (HAN3513): Hangar 9*: [online] ; © 2014 ; Horizon Hobby, LLC ; Kladka servomotoru ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.hangar-9.com/Products/Default.aspx?ProdID=HAN3513](http://www.hangar-9.com/Products/Default.aspx?ProdID=HAN3513)

### Elektronické součástky a jiné komponenty – prodejci

- [52] *GES-ELECTRONICS - Internetový obchod s elektronickými součástkami*: [online] ; ©1991–2015 ; GES-ELECTRONICS, a.s. ; Prodejce elektronických součástek - stránky CZ ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.ges.cz](http://www.ges.cz)
- [53] *GM electronic | elektronika, kterou znáte*: [online] ; © 1990 – 2015 ; GM electronic, spol. s r.o. ; Prodejce elektronických součástek - stránky CZ ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.gme.cz](http://www.gme.cz)

- [54] *TME Czech Republic s.r.o. - Elektronické součástky*: [online] ; © 2015 TME Czech Republic s.r.o. ; Prodejce elektronických součástek - stránky CZ ; [cit. 1.2.2015] ;  
Dostupné na adrese: [www.tme.eu/cz/katalog](http://www.tme.eu/cz/katalog)
- [55] *Semic - eshop elektro součástky*: [online] ; © 2015 Semic Trade, s.r.o. ; Prodejce součástek - stránky CZ ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.semic.cz](http://www.semic.cz)
- [56] *Farnell element14 Česká republika-Distributor elektronických součástek*: [online] ; © 2014 ; Premier Farnell plc. ; Prodejce elektronických součástek - stránky CZ/EN ; [cit. 1.2.2015] ;  
Dostupné na adrese: [www.cz.farnell.com](http://www.cz.farnell.com)
- [57] *RS | Elektronické komponenty, pasivní prvky, kabely, konektory, přepínací vybavení, průmyslový spotřební materiál*: [online] ; © 2015 ; RS Components Sp. z o.o. ;  
Prodejce elektronických součástek - stránky CZ/EN ; [cit. 1.2.2015] ;  
Dostupné na adrese: [www.cz.rs-online.com/web](http://www.cz.rs-online.com/web)
- [58] *Conrad Electronic – obchod s elektronikou a technikou*: [online] ; © 2015 ;  
Conrad Electronic Česká republika, s.r.o. ; Prodejce elektronických součástek - stránky CZ ;  
[cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: <http://velkoobchod.conrad.cz/>
- [59] *DigiKey Electronics - Electronic Components Distributor*: [online] ; © 1995 – 2014 ;  
Digi-Key Corporation. ; Prodejce elektronických součástek - stránky EN ; [cit. 1.2.2015] ;  
Dostupné na adrese: [www.digikey.com](http://www.digikey.com)

#### Pasivní a aktivní součástky – výrobci

- [60] *Parallax Inc | Equip your genius ®*: [online] ; © 2015 ; Parallax Inc. ; [cit. 1.2.2015] ;  
Dostupné na adrese: [www.parallax.com](http://www.parallax.com)
- [61] *FTDI Chip Home Page*: [online] ; © 2015 Future Technology Devices International Ltd.;  
[cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.ftdichip.com](http://www.ftdichip.com)
- [62] *Linear Technology - Home Page*: [online] ; © 2015 ; Linear Technology Corporation ;  
[cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.linear.com](http://www.linear.com)
- [63] *Analog, Embedded Processing, Semiconductor Company, Texas Instruments – TI.com*:  
[online] ; © 1995 – 2014 ; Texas Instruments Incorporated ; [cit. 1.2.2015] ;  
Dostupné na adrese: [www.ti.com](http://www.ti.com)
- [64] *Microchip Technology Inc.*: [online] ; © 1998 – 2014 ; Microchip Technology Inc. ;  
[cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.microchip.com](http://www.microchip.com)
- [65] *ST Microelectronics*: [online] ; © 2015 ; ST Microelectronics ; [cit. 1.2.2015] ;  
Dostupné na adrese: [www.st.com](http://www.st.com)
- [66] *International Rectifier*: [online] ; © 1995 – 2015 ; International Rectifier ;  
[cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.irf.com](http://www.irf.com)
- [67] *IXYS CORPORATION*: [online] ; © 2015 ; IXYS Corporation ; [cit. 1.2.2015] ;  
Dostupné na adrese: [www.ixys.com](http://www.ixys.com)
- [68] *WE Home | Würth Elektronik: Würth Elektronik Group*: [online] ; © 2015 ;  
Würth Elektronik GmbH & Co. KG, Germany: [cit. 1.2.2015] ;  
Dostupné na adrese: [www.we-online.com/web/en/wuerth\\_elektronik/start.php](http://www.we-online.com/web/en/wuerth_elektronik/start.php)
- [69] *Allegro MicroSystems LLC*: [online] ; © 2015 ; Allegro MicroSystems, LLC ;  
[cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.allegromicro.com](http://www.allegromicro.com)
- [70] *ams-design and manufacturer of sensors, sensor interfaces, power management and wireless ICs*: [online] ; © 2015 ; ams AG. ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.ams.com](http://www.ams.com)
- [71] *Analog, Mixed - signal & Optoelectronic Semiconductors | Avago Technologies*: [online] ;  
© 2005 – 2015 ; Avago Technologies ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese:  
[www.avagotech.com/pages/home](http://www.avagotech.com/pages/home)
- [72] *EPCOS AG - Home*: [online] ; © 2015 ; EPCOS AG ; [cit. 1.2.2015] ;  
Dostupné na adrese: [www.epcos.com](http://www.epcos.com)
- [73] *HITANO ENTERPRISE CORP.*: [online] ; © 2013 ; HITANO Enterprise Corp. ;  
[cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.hitano.com.tw](http://www.hitano.com.tw)
- [74] *Liquid Crystal Display Modules & LCD Screens-Get A Quote Now!*: [online] ; © 2004-2014 ;  
Displaytech, Ltd. ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.displaytech-us.com](http://www.displaytech-us.com)
- [75] *Solomon Systech Limited*: [online] ; © 2015 ; Solomon Systech ; [cit. 1.2.2015] ;  
Dostupné na adrese: [www.solomon-systech.com](http://www.solomon-systech.com)
- [76] *Analog, linear, and mixed-signal devices from Maxim*: [online] ; © 2015 ;  
Maxim Integrated ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.maximintegrated.com](http://www.maximintegrated.com)

Kondenzátory – katalogové listy

- [77] TDK Corporation – EPCOS AG ; *Aluminum electrolytic capacitors - Capacitors with screw terminals - Series/Type: B41560, B41580*: [online] ; © December 2014 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [http://en.tdk.eu/inf/20/30/db/aec\\_2015/B41560\\_B41580.pdf](http://en.tdk.eu/inf/20/30/db/aec_2015/B41560_B41580.pdf)
- [78] Nippon Chemi-Con Corporation ; *Miniature aluminium electrolytic capacitors-LXV Series*: [online] ; CAT. No. E10010 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.chemi-con.co.jp/e/catalog/pdf/al-e/al-sepa-e/004-lead/al-lxv-e-140701.pdf](http://www.chemi-con.co.jp/e/catalog/pdf/al-e/al-sepa-e/004-lead/al-lxv-e-140701.pdf)
- [79] *CKG57NX7S2A226M500JH|Multilayer Ceramic Chip Capacitors|TDK GLOBAL*: [online] ; © 1996–2015 ; TDK Corporation ; [cit.1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [http://product.tdk.com/capacitor/mlcc/detailed\\_information.php?lang=en&part\\_no=CKG57NX7S2A226M500JH](http://product.tdk.com/capacitor/mlcc/detailed_information.php?lang=en&part_no=CKG57NX7S2A226M500JH)
- [80] HITANO ENTERPRISE CORP. ; *EXR SERIES - Characteristics*: [online] ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.hitano.com.tw/download/EXR\\_20141128.pdf](http://www.hitano.com.tw/download/EXR_20141128.pdf)
- [81] Man Yue Technology Holdings Limited. ; *GF Series*: [online] ; [cit.1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.weltron.de/DB-Pool/SMX\\_GF.pdf](http://www.weltron.de/DB-Pool/SMX_GF.pdf)

Diody – katalogové listy

- [82] ST Microelectronics ; *STPS30150C - High voltage power Schottky rectifier*: [online] ; © November 2010 ; Document ID:7757 ; Rev.8 ; [cit.1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00002412.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00002412.pdf)
- [83] ST Microelectronics ; *STTH10002 - Ultrafast recovery diode*: [online] ; © October 2012 ; Document ID: 12363 ; Rev. 2 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00110354.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00110354.pdf)
- [84] Littelfuse, Inc. ; *Product Catalog & Design Guide - Transient Voltage Suppression Diode Devices*: [online] ; © 2013 ; EC111Nv0813 ; Informace o výběru a použití ochranných diod transil, včetně katalogu ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.littelfuse.com/~media/electronics/product\\_catalogs/littelfuse\\_tvs\\_diode\\_catalog.pdf.pdf](http://www.littelfuse.com/~media/electronics/product_catalogs/littelfuse_tvs_diode_catalog.pdf.pdf)

Tranzistory – katalogové listy

- [85] International Rectifier ; *IRFP4568PbF – HEXFET® Power MOSFET*: [online] ; © August 2009 ; PD-96175 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfp4568pbf.pdf](http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfp4568pbf.pdf)
- [86] International Rectifier ; *IRFR4620PbF, IRFU4620PbF-HEXFET® Power MOSFET*: [online] ; © August 2009 ; PD-96207A ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfr4620pbf.pdf](http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfr4620pbf.pdf)
- [87] International Rectifier ; *IRF9358PbF - HEXFET® Power MOSFET*: [online] ; © 2011 ; PD-97616 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf9358pbf.pdf](http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf9358pbf.pdf)
- [88] International Rectifier ; *IRF7389PbF - HEXFET® Power MOSFET*: [online] ; © 2004 ; PD-95462 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf7389pbf.pdf](http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf7389pbf.pdf)

Integrované obvody – katalogové listy

- [89] Avago Technologies ; *HCPL-3180 - 2.5 Amp Output Current, High Speed, Gate Drive Optocoupler*: [online] ; © March 2009 ; AV02-0165EN ; Datový list k optobudiči HCPL-3180 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.avagotech.com/docs/AV02-0165EN](http://www.avagotech.com/docs/AV02-0165EN)
- [90] Allegro MicroSystems, LLC ; *ACS750xCA – Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with High Voltage Isolation and a Low - Resistance Current Conductor*: [online] ; © 2004 – 2009 ; ACS750100-DS ; Revision 11 ; Datový list k proudovému senzoru ACS750SCA-100 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS750-100-Datasheet.ashx](http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS750-100-Datasheet.ashx)
- [91] Linear Technology Corporation ; *LT3748 - 100V Isolated Flyback Controller*: [online] ; © 2010 ; 3748fa ; LT1010 ; Revision A ; Datový list k driveru spínaného zdroje LT3748 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3748fa.pdf>
- [92] Microchip Technology Inc. ; *MCP3204/320 - 2.7V 4-Channel/8-Channel 12-Bit A/D Converters with SPI Serial Interface*: [online] ; © 2008 ; DS21298E ; Datový list k AD převodníku MCP3208-BI/SL ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21298e.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21298e.pdf)
- [93] Linear Technology Corporation ; *LT1461 - Micropower Precision Low Dropout Series Voltage Reference Family*: [online] ; © 1999 ; 1461f LT/LCG\_0800\_4K ; Datový list k referenčnímu zdroji napětí LT1461CCS8-5#PBF ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1461f.pdf>

- [94] Texas Instruments Incorporated ; *SN74LVC1G17 Single Schmitt-Trigger Buffer*: [online] ; © July 2001 ; Revised: April 2014 ; SCES351V ; Datový list k budiči SN74LVC1G17DBV; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc1g17.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc1g17.pdf)
- [95] Texas Instruments Incorporated ; *SN74LVC1G34 Single Buffer Gate*: [online] ; © December 2003, Revised: April 2014; SCES519L; Datový list k budiči SN74LVC1G34DBV; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc1g34.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc1g34.pdf)
- [96] Texas Instruments Incorporated ; *SNx545xB, Dual Peripheral Drivers For High-Current Switching at Very High Speeds*: [online] ; © December 1976 ; Revised: September 1999 ; SLRS021B ; Datový list k budiči SN75451B ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.ti.com/lit/ds/symlink/sn75451b.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn75451b.pdf)
- [97] ST Microelectronics ; *L4941- Very low drop 1A regulator*: [online] ; © September 2006 ; Revision 5 ; Datový list k LDO stabilizátoru napětí L4941; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000443.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000443.pdf)
- [98] ST Microelectronics ; *LD29150 - 1.5 A, very low drop voltage regulators*: [online] ; © December 2013 ; Document ID 9614 ; Revision 19 ; Datový list k LDO stabilizátoru napětí LD29150 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00003403.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00003403.pdf)
- [99] Linear Technology Corporation; *LT1117x-800mA Low Dropout Positive Regulators*: [online] ; © 1993 ; 1117fd ; LT0410 ; Revision D ; Datový list k LDO stabilizátoru napětí LT1117IST – 3.3 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1117fd.pdf>
- [100] Microchip Technology Inc.; *MCP1825x - 500 mA, Low Voltage, Low Quiescent Current LDO Regulator*: [online]; © 2008; DS22056B; Datový list k LDO stabilizátoru napětí LT1117IST-3.3; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/22056b.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/22056b.pdf)
- [101] Linear Technology Corporation ; *LT1764 Series – 3A, Fast Transient Response, Low Noise, LDO Regulators*: [online] ; © 2005 ; 1764fb ; LT1205 ; Revision B ; Datový list LDO stabilizátoru LT1764EQ ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1764fb.pdf>
- [102] Texas Instruments Incorporated; *TL77xxB-Supply Voltage Supervisors*: [online] ; © September 1989 ; Revised: May 2003 ; SLVS037M ; Datový list k napěťovému hlídači a obvodu resetu LT7705BCD ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.ti.com/lit/ds/symlink/tl7705b.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl7705b.pdf)
- [103] Future Technology Devices International Limited ; *FTDI FT232BL/BQ USB UART IC*: [online] ; © November 2011 ; Document Number: FT\_000329 ; Version 2.2 ; Datový list k obvodu FT232BL ; [cit. 1.2.2015]; Dostupné na adrese: [www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT232BL\\_BQ.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232BL_BQ.pdf)
- [104] Microchip Technology Inc. ; *93LC46/56/66-1K/2K/4K 2.5V Microwire Serial EEPROM*: [online]; © 2012; DS21712C; Datový list k EEPROM paměti 93LC46B-I/SN; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21712C.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21712C.pdf)
- [105] Microchip Technology Inc. ; *24AA512/24LC512/24FC512-512K I2C™ Serial EEPROM*: [online] ; © 2010 ; DS21754M ; Datový list k obvodu 24FC512-I/SM ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21754M.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21754M.pdf)
- [106] Microchip Technology Inc. ; *MCP23009/MCP23S09-8-Bit I/O Expander with Open-Drain Outputs*: [online]; © 2014; DS20002121C; Datový list k expanderu MCP23009; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20002121C.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20002121C.pdf)
- [107] Maxim Integrated Products, Inc. ; *DS1307 64x8, Serial, I2C Real - Time Clock*: [online] ; © 2008 ; Revision 100208 ; Datový list k obvodu reálného času DS1307ZN+ ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1307.pdf>
- [108] Linear Technology Corporation ; *LTC4011 - High Efficiency Standalone Nickel Battery Charger*: [online]; © 2005; 4011fb; LT0110; Revision B; Datový list k nabíječi baterií LTC4011; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/4011fb.pdf>
- [109] Linear Technology Corporation ; *LTC4412 - Low Loss PowerPath Controller in ThinSOT*: [online] ; © 2002 ; 4412fa ; LT0607 ; Datový list k obvodu výběru napájení LTC4412 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/4412fa.pdf>
- Ostatní součástky a konstrukční díly – katalogové listy
- [110] EPCOS AG ; *TDK - EPCOS data book 2013 - Ferrites and accessories*: [online] ; © 2012 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.epcos.com/blob/519704/download/2/ferrites-and-accessories-data-book-130501.pdf](http://www.epcos.com/blob/519704/download/2/ferrites-and-accessories-data-book-130501.pdf)
- [111] Würth Elektronik GmbH & Co. KG ; *TRANSFORMER*: [online] ; © February 2011 ; Revision: 6B ; p.n.: 750311797 ; Datový list k impulsovému transformátoru 750311797 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: <http://katalog.we-online.de/pbs/datasheet/750311797.pdf>

- [112] Würth Elektronik GmbH & Co. KG ; *TRANSFORMER p.n.: 750311597*: [online] ; © February 2011 ; Revision: 6B ; Datový list k impulsovému transformátoru 750311597 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: <http://katalog.we-online.de/pbs/datasheet/750311597.pdf>
- [113] Keystone Electronics Corp. ; *SMT Low Profile Lithium & Alkaline Cell Holders*: [online] ; © July 2007; Astoria, NY; 1105-2017 ; List z katalogu–SMD držáky baterií ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.keyelco.com/userAssets/file/M60-2p18-20%281%29.pdf](http://www.keyelco.com/userAssets/file/M60-2p18-20%281%29.pdf)
- [114] Panasonic Corporation ; *Sanyo Twicell Eneloop Cell Type HR-4UTGA Specification*: [online] ; © October 2009 ; Specifikace nabíjecí baterie NiMh ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.fenixtactical.com/manuals/sanyo-eneloop-aaa-manual.pdf](http://www.fenixtactical.com/manuals/sanyo-eneloop-aaa-manual.pdf)
- [115] Tyco Electronics Corporation & TE Connectivity Ltd. Company ; *AXICOM - IM Relay*: [online] ; © April 2011 ; Revision 0411 ; Datový list k relé IM03PGR ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.farnell.com/datasheets/1717896.pdf](http://www.farnell.com/datasheets/1717896.pdf)
- [116] Star Micronics Inc. ; *Audio Components Catalog*: [online] ; Parametry akustického měniče MNT-03A ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.farnell.com/datasheets/1676834.pdf](http://www.farnell.com/datasheets/1676834.pdf)

#### Výkonový DC/DC měnič – aplikační poznámky a jiné informační materiály

- [117] KLEIN, John ; Fairchild Semiconductor International, Inc. ; *Synchronous buck MOSFET loss calculation with Excel model*: [online] ; © 2014 ; Application Note AN-6005 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-6005.pdf](http://www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-6005.pdf)
- [118] KHAN, Namdar, Jamshed ; Avago Technologies ; *Design Consideration in Using the Inverter Gate Driver Optocouplers for Variable Speed Motor Drives - White Paper*: [online] ; © March 2010 ; AV02-0803EN ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: <http://s.eeweb.com/articles/2012/03/20/Optocouplers-and-Variable-Speed-Motor-Drives-1332260998.pdf>
- [119] Vishay Intertechnology, Inc. ; *Optocouplers and Solid-State Relays - IGBT/MOSFET Gate Drive Optocoupler*: [online] ; © October 2011 ; Application note: 91 ; Document Number: 81227; Rev.:1.3; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.vishay.com/docs/81227/81227.pdf](http://www.vishay.com/docs/81227/81227.pdf)
- [120] RIVET, B. ; ST Microelectronics ; *TRANSISTOR PROTECTION BY TRANSIL*: [online] ; © August 2001 ; Application note: AN587 ; [cit.1.2.2015] ; Dostupné na adrese: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXyzyst.pdf>
- [121] Texas Instruments Incorporated ; *Understanding Buck Power Stages In Switchmode Power Supplies*: [online] ; © March 2014 ; Application report: SLVA057 ; [cit.1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.ti.com/lit/an/slva057/slva057.pdf](http://www.ti.com/lit/an/slva057/slva057.pdf)
- [122] JAUNAY, Serge – BROWN, Jess ; Vishay Intertechnology, Inc. ; *DC-to-DC Design Guide*: [online] ; © October 2002 ; Application note: AN607 ; Document Number: 71917 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.vishay.com/docs/71917/71917.pdf](http://www.vishay.com/docs/71917/71917.pdf)
- [123] EJURY, Jens ; Infineon Technologies North America (IFNA) Corp. ; *Buck Converter Design*: [online] ; © January 2013 ; Design Note: DN2013-01, V1.0 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.mouser.com/pdfdocs/buckconverterdesignnote.pdf](http://www.mouser.com/pdfdocs/buckconverterdesignnote.pdf)
- [124] SCHELLE, Donald – CASTORENA, Jorge ; *Buck – Converter Design Demystified ; Power Electronics Technology*: [online] ; June, 2006 ; Str.: 46,48-50,52,53 ; Dostupné na adrese: <http://powerelectronics.com/site-files/powerelectronics.com/files/archive/powerelectronics.com/mag/606PET25.pdf>
- [125] ON Semiconductor Components Industries, LLC ; *LC Selection Guide for the DC-DC Synchronous Buck Converter*: [online] ; © April 2013 ; Application note: AND9135/D; Rev. 0 ; [cit.1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.onsemi.com/pub/Collateral/AND9135-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND9135-D.PDF)
- [126] ROHM Semiconductor Co., Ltd. ; *Inductor Calculation for Buck converter IC*: [online] ; © November 2012; Application note No.: 12027ECY01; Revision C ; R1120A ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [http://rohms.rohm.com/en/products/databook/applnote/ic/power/switching\\_regulator/inductor\\_calculation\\_appli-e.pdf](http://rohms.rohm.com/en/products/databook/applnote/ic/power/switching_regulator/inductor_calculation_appli-e.pdf)
- [127] ROHM Semiconductor Co., Ltd. ; *Capacitor Calculation for Buck converter IC*: [online] ; © February 2014 ; Application note No.: 14027ECY02 ; Revision C ; R1102A ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [http://rohms.rohm.com/en/products/databook/applnote/ic/power/switching\\_regulator/capacitor\\_calculation\\_appli-e.pdf](http://rohms.rohm.com/en/products/databook/applnote/ic/power/switching_regulator/capacitor_calculation_appli-e.pdf)
- [128] JAUREGUI, David-WANG, Bo-RENAGANG, Chen; Texas Instruments Incorporated; *Power Loss Calculation With Common Source Inductance Consideration for Synchronous Buck Converters,PMP-Power Stage*: [online] ; © July 2011; Revised July 2011 ; Application Report: SLPA009A ; [cit.1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.ti.com/lit/an/slpa009a/slpa009a.pdf](http://www.ti.com/lit/an/slpa009a/slpa009a.pdf)
- [129] ARVIND, Raj ; Texas Instruments Incorporated ; *Calculating Efficiency: PMP-DCDC Controllers*: [online] ; © February 2010 ; Application Report: SLVA390 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.ti.com/lit/an/slva390/slva390.pdf](http://www.ti.com/lit/an/slva390/slva390.pdf)



- [130] GRAOVAC, Dušan – PÜRSCHER, Marco – KIEP, Andreas ; Infineon Technologies Corporation ; *MOSFET Power Losses Calculation Using the Data-Sheet Parameters, Automotive Power*: [online] ; © July 2006 ; Application Note v1.1 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.btipnow.com/library/white\\_papers/MOSFET%20Power%20Losses%20Calculation%20Using%20the%20Data-Sheet%20Parameters.pdf](http://www.btipnow.com/library/white_papers/MOSFET%20Power%20Losses%20Calculation%20Using%20the%20Data-Sheet%20Parameters.pdf)
- [131] ON Semiconductor Components Industries, LLC ; *MOSFET Gate-Charge Origin and its Application*: [online] ; © August 2014 ; Application note: AND9083/D, Rev. 1 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/AND9083-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND9083-D.PDF)
- [132] Silicon Semiconductor Corp. ; *Examination of reverse recovery losses in a synchronous buck converter circuit*: [online] ; © 2003 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.u.dianyuan.com/bbs/u/41/1148348695.pdf](http://www.u.dianyuan.com/bbs/u/41/1148348695.pdf)
- [133] ST Microelectronics group of companies ; *Calculation of conduction losses in a power rectifier*: [online] ; © August 2011 ; Application note: AN604 ; Document ID: 3607 ; Revision 3 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.st.com/st-web-ui/static/active/jp/resource/technical/document/application\\_note/CD00003894.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/jp/resource/technical/document/application_note/CD00003894.pdf)
- [134] KLEIN, John ; Fairchild Semiconductor International, Inc. ; *“Shoot-through” in Synchronous Buck Converters*: [online] ; © April 2003 ; Application note: AN-6003 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-6003.pdf](http://www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-6003.pdf)
- [135] Infineon Technologies Corporation ; *Thermal Resistance Theory and Practice – Special Subject Book*: [online] ; © January 2000 ; Ordering Number: B112-H7482-G1-X-7600 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.infineon.com/dgdl/smdpack.PDF?folderId=db3a304412b407950112b417b3e623f4&fileId=db3a304412b407950112b417b42923f5](http://www.infineon.com/dgdl/smdpack.PDF?folderId=db3a304412b407950112b417b3e623f4&fileId=db3a304412b407950112b417b42923f5)
- [136] International Rectifier Corporation ; *Gate Drive Characteristics and Requirements for HEXFET<sup>®</sup> Power MOSFETs*: [online] ; Application Note: AN-937 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.irf.com/technical-info/appnotes/an-937.pdf](http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-937.pdf)

#### Mikrokontrolér – datový list a aplikační poznámky

- [137] Parallax Semiconductor Inc. ; *Propeller<sup>™</sup> P8X32A Datasheet – 8 Cog Multiprocessor Microcontroller*: [online] ; © June 2011 ; Revision 1.4 ; Datový list k mikropočítači P8X32A ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.parallax.com/sites/default/files/downloads/P8X32A-Propeller-Datasheet-v1.4.0\\_0.pdf](http://www.parallax.com/sites/default/files/downloads/P8X32A-Propeller-Datasheet-v1.4.0_0.pdf)
- [138] Parallax Semiconductor Inc. ; *Propeller Manual*: [online] ; © 2006 – 2011 ; Version 1.2 ; ISBN: 9781928982593 ; 1.2.0-11.06.14-CWR ; Podrobný manuál k obvodu P8X32A ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.parallax.com/sites/default/files/downloads/P8X32A-Web-PropellerManual-v1.2\\_0.pdf](http://www.parallax.com/sites/default/files/downloads/P8X32A-Web-PropellerManual-v1.2_0.pdf)
- [139] Parallax Semiconductor Inc. ; *Propeller Demo Board Rev. D/E/F/G Schematic*: [online] ; © June 2010 ; Schéma zapojení k vývojovému kitu „Propeller Demo Board“ ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.parallax.com/sites/default/files/downloads/32100-Propeller-Demo-Board-Schematic-RevG\\_0.pdf](http://www.parallax.com/sites/default/files/downloads/32100-Propeller-Demo-Board-Schematic-RevG_0.pdf)
- [140] Parallax Semiconductor Inc. ; *USB2SER (#28024) FTDI FT232BM USB to Serial Development Tool*: [online] ; © December 2005 ; Revision 1.1 ; Schéma zapojení USB programovacího modulu ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/2109368a.pdf](http://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/2109368a.pdf)
- [141] Parallax Semiconductor Inc. ; *Propeller P8X32A Counters*: [online] ; © 2011 ; Application Note: AN001 ; Revision 1.0 ; Aplikační poznámky věnované čítačům mikrokontroléru P8X32A ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.parallax.com/sites/default/files/downloads/AN001-P8X32ACounters-v2.0.pdf](http://www.parallax.com/sites/default/files/downloads/AN001-P8X32ACounters-v2.0.pdf)

#### Modul LCD displeje – datové listy a aplikační poznámky

- [142] Displaytech Ltd. ; *LCD Module Product Specification - INT043BTFT & INT043BTFT-TS 4.3" Integrated TFT Display Module (480RGBx272DOTS)*: [online] ; © January 2013 ; Revision 2.2 ; Specifikace LCD modulu s dotekovým panelem ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [http://cdn.displaytech-us.com/sites/default/files/display-data-sheet/int043btft-v22\\_0.pdf](http://cdn.displaytech-us.com/sites/default/files/display-data-sheet/int043btft-v22_0.pdf)
- [143] Solomon Systech ; *Application Note for SSD1961/2/3*: [online] ; © Jan 2013 ; Revision 1.7 ; Aplikační poznámky k driveru LCD panelu SSD1961 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.solomon-systech.com/files/ck/files/SSD1961\\_2\\_3\\_Application\\_note\\_v1.7.pdf](http://www.solomon-systech.com/files/ck/files/SSD1961_2_3_Application_note_v1.7.pdf)
- [144] Solomon Systech ; *SSD1961 - Advance Information - 675KB Embedded Display SRAM LCD Display Controller*: [online] ; © July 2011 ; Revision 1.3 ; Podrobné aplikační poznámky k driveru LCD panelu SSD1961 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [www.displaytech-us.com/sites/default/files/driver-ic-data-sheet/SSD1961\\_1.3.pdf](http://www.displaytech-us.com/sites/default/files/driver-ic-data-sheet/SSD1961_1.3.pdf)

- [145] Maxim Integrated Products ; *MAX1180x, Low-Power, Ultra-Small Resistive Touch-Screen Controllers with I2C/SPI Interface*: [online] ; © October 2010 ; 19-4711; Revision 3 ; Datový list ke kontroléru rezistivního dotekového panelu MAX11802 ; [cit. 1.2.2015] ;  
Dostupné na adrese: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX11800-MAX11803.pdf>

#### Magnetický enkodér pro servomotor – datový list a aplikační poznámky

- [146] austriamicrosystems AG ; *AS5043 Data Sheet-Programmable 360° Magnetic Angle Encoder with Absolute SSI and Analog Outputs*: [online] ; © 1997 – 2009 ; Revision 1.80 ;  
Datový list k magnetickému enkodéru AS5043 ; [cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese:  
[www.ams.com/eng/content/download/1287/7220/495](http://www.ams.com/eng/content/download/1287/7220/495)
- [147] austriamicrosystems AG; *AS5043–Programmable 360° Magnetic Angle Encoder with Absolute SSI and Analog Outputs* ; Application Note: AN5043-10 ; © September 2006 ; Revision 1.3
- [148] austriamicrosystems AG; *AS5040/AS5043/AS5045-360° Magnetic Angle Encoder Features Of Easyzap OTP Programming And C Sample*; App. Note: AN5000-20; © August 2006; Rev. 1.0
- [149] austriamicrosystems AG ; *Magnet Selection Guide - AS5000 Series Magnetic Sensor Circuits* ;  
Application Note ; © 2009 ; Revision 1.4
- [150] austriamicrosystems AG ; *AS5040–10 BIT Programmable Magnetic Rotary Encoder: Data Transmission Over Long Cables*; Application Note: AN5040-10; © October 2005; Revision 1.1
- [165] austriamicrosystems AG ; *AS5000 Series Magnetic Sensor Circuits - Magnets for Extended Vertical Range* ; Application Note ; Revision 1.0  
Dostupné na adrese: <http://ams.com/eng/content/download/11688/209449/version/1>

#### Aplikační poznámky - různé

- [151] Texas Instruments Incorporated ; *Load Transient Testing Simplified*: [online] ;  
© November 2007 ; Application Note: AN-1733 ; SNOA507 ;  
Dostupné na adrese: [www.ti.com/lit/an/snoa507/snoa507.pdf](http://www.ti.com/lit/an/snoa507/snoa507.pdf)

#### Knížní literatura

- [152] PELLY B. R. ; *Thyristor phase-controlled converters and cycloconverters: Operation, control, and performance* ; New York: Wiley-Interscience, 1971, 434 stran, ISBN: 0471677906
- [153] PAVELKA, Jiří – ČEŘOVSKÝ, Zdeněk ; *Výkonová elektrotechnika* ; Skriptum ČVUT ;  
Praha: Nakladatelství ČVUT 2005 ; ISBN: 8001020940
- [154] KREJČÍŘÍK, Alexandr ; *DC/DC Měníče* ; Praha: Technická literatura BEN 2001 ;  
ISBN: 8073000458
- [155] HUSÁK, Miroslav ; *Návrh napájecích zdrojů pro elektroniku – přednášky* ;  
Skriptum ČVUT FEL ; Praha: Nakladatelství ČVUT 2006 ; ISBN: 8001033988
- [156] VOŽENÍLEK, Petr – NOVOTNÝ, Vladimír – MINDL, Pavel ; *Elektromechanické měniče* ;  
Skriptum ČVUT FEL ; Praha: Nakladatelství ČVUT 2007 ; EAN: 9788001031377
- [157] VOŽENÍLEK, Petr – JANOUŠEK, Josef ; *Základy silnoproudé elektrotechniky* ;  
Skriptum ČVUT FEL ; Praha: Nakladatelství ČVUT 2005 ; ISBN: 8001031357
- [158] FAKTOR, Zdeněk ; *Transformátory a cívky* ; Praha: Technická literatura BEN 1999 ;  
ISBN: 808605649X
- [159] FAKTOR, Zdeněk ; *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje* ;  
Praha: Technická literatura BEN 2002 ; ISBN: 8086056910
- [160] VOBECKÝ, Jan – ZÁHLAVA, Vít ; *ELEKTRONIKA: Součástky a obvody, principy a příklady* ;  
Praha: Nakladatelství Grada 2005 ; Třetí vydání ; ISBN: 8024712415
- [161] ZÁHLAVA, Vít ; *Metodika návrhu plošných spojů* ; Praha: Nakladatelství ČVUT 2000 ;  
ISBN: 8001021939

#### Ostatní použité informační zdroje

- [162] *Datasheet archive*: [online] ; © 2015 ; Datasheet Archive ; [cit. 1.2.2015] ;  
Dostupné na adrese: [www.datasheetarchive.com](http://www.datasheetarchive.com)
- [163] BROUČEK, Jan ; *Stabilizace napětí* ; Praha: ČVUT 2009 ; Diplomová práce ČVUT,  
Fakulta elektrotechnická, Katedra telekomunikační techniky
- [164] *Měřič indukčnosti 1uH až 1H*: [online] ; ©2000-2015; Pandatron.cz-Elektrotechnický magazín ;  
[cit. 1.2.2015] ; Dostupné na adrese: [http://pandatron.cz/?119&meric\\_indukcnosti\\_1uh\\_az\\_1h](http://pandatron.cz/?119&meric_indukcnosti_1uh_az_1h)

## 12. Seznam obrázků

<b>Obrázek 2.1</b>	: Ukázka provedení kufříkového agregátu – Honda EU20i (převzato z [3]) .....	12
<b>Obrázek 2.2</b>	: Ukázka provedení rámového agregátu – Honda ECT7000P (převzato z [2]) ...	12
<b>Obrázek 2.3</b>	: Orientační charakter deformace harmonického průběhu napětí u některých .... používaných typů regulací AC agregátů (převzato a upraveno z [1]) .....	13 13
	<b>a)</b> Kapacitní, <b>b)</b> AVR, <b>c)</b> Cyklokonvertor, <b>d)</b> Inverter.....	13
<b>Obrázek 2.4</b>	: Princip funkce elektrocentrály .....	15
<b>Obrázek 2.5</b>	: Řez synchronním generátorem (převzato a upraveno z [26]) .....	16
	<b>a)</b> Varianta s budicí armaturou, <b>b)</b> Varianta s kartáči a sběracími kroužky.....	16
<b>Obrázek 2.6</b>	: Multipólový alternátor s permanentními magnety a rotačním pláštěm.....	18
	<b>a)</b> Konstrukce alternátoru s permanentními magnety.....	18
	(převzato a upraveno z [28]) .....	18
	<b>b)</b> Dopad na velikost soustrojí motor-generátor (převzato a upraveno z [1])....	18
<b>Obrázek 2.7</b>	: Řez asynchronním generátorem (převzato a upraveno z [27]).....	19
<b>Obrázek 2.8</b>	: Buzení synchronního generátoru SS napětím – využití samobudicího obvodu..	20
	rotoru (převzato a upraveno z [30]) .....	20
<b>Obrázek 2.9</b>	: Buzení synchronního generátoru SS napětím – využití AVR jednotky a .....	21
	generátoru s kartáči a sběracími kroužky (převzato a upraveno z [31]).....	21
<b>Obrázek 2.10</b>	: Buzení synchronního generátoru SS napětím – využití AVR jednotky a .....	22
	generátoru s budicí armaturou (převzato a upraveno z [33]).....	22
<b>Obrázek 2.11</b>	: Buzení synchronního generátoru SS napětím – využití proudového .....	22
	transformátoru (převzato a upraveno z [32]) .....	22
<b>Obrázek 2.12</b>	: Příklad zapojení cyklokonvertoru .....	23
<b>Obrázek 2.13</b>	: Cyklokonvertor – 100% ze vstupního napětí (převzato z [152]) .....	23
<b>Obrázek 2.14</b>	: Cyklokonvertor – 50% ze vstupního napětí (převzato z [152]) .....	23
<b>Obrázek 2.15</b>	: Princip inverteru (převzato a upraveno z [29]).....	24
<b>Obrázek 2.16</b>	: Zjednodušené schéma zapojení inverteru.....	24
<b>Obrázek 2.17</b>	: Ukázka možného způsobu buzení asynchronního alternátoru .....	25
<b>Obrázek 4.1</b>	: Motor Honda GX25 – Vnější pohled (převzato a upraveno z [35]).....	28
<b>Obrázek 4.2</b>	: Motor Honda GX25 – Schéma obvodu zapalování (převzato a upraveno z [37])..	29
<b>Obrázek 4.3</b>	: Motor Honda GX25 – Výkonová charakteristika (převzato a upraveno z [36])..	29
<b>Obrázek 4.4</b>	: Motor Honda GX25 – Vnitřní konstrukční uspořádání (převzato z [36]).....	30
<b>Obrázek 4.5</b>	: Výkresy konstrukčních částí vyrobených k upevnění spalovacího motoru .....	31
<b>Obrázek 4.6</b>	: Motor Honda GX25 – Ukázka připevnění lanka plynu.....	32
	(převzato a upraveno z [37]) .....	32
<b>Obrázek 4.7</b>	: Servomotor Hitec HS-625MG (převzato a upraveno z [47]).....	33
<b>Obrázek 4.8</b>	: Kladka serva (převzato a upraveno z [51]) .....	34
<b>Obrázek 4.9</b>	: Rameno servomotoru.....	34
<b>Obrázek 4.10</b>	: Možné způsoby připevnění lanka plynu k ramenu.....	34
<b>Obrázek 4.11</b>	: Výkresy konstrukčních částí vyrobených k upevnění servomotoru – část A ....	34
<b>Obrázek 4.12</b>	: Výkresy konstrukčních částí vyrobených k upevnění servomotoru – část B ....	35
<b>Obrázek 4.13</b>	: Celkový pohled na mechanismus ovládní plynu spalovacího motoru .....	35
<b>Obrázek 4.14</b>	: Motor/Generátor Aeolian C6374-KV170.....	38
<b>Obrázek 4.15</b>	: Výkresy konstrukčních částí vyrobených k upevnění generátoru – část A.....	39
<b>Obrázek 4.16</b>	: Výkresy konstrukčních částí vyrobených k upevnění generátoru – část B.....	40
<b>Obrázek 4.17</b>	: Motor Honda GX25 – Výstup hnací síly.....	40
<b>Obrázek 4.18</b>	: První pokus o mechanické napojení hřídele generátoru na hnací výstup motoru.	41
<b>Obrázek 4.19</b>	: Pružné spojky firmy R+W (převzato a upraveno z [43]).....	42
	1.:EK7 - s rozpěrným kuželem ; 2.:EK6 - s kuželovým upínacím kroužkem....	42
	3.:EKH - s děleným upínacím pouzdrům ; 4.:EK1 - s drážkou pro hřídel.....	42
<b>Obrázek 4.20</b>	: Spojovací nástavec – Výkres pro výrobu.....	42
<b>Obrázek 4.21</b>	: Spojovací nástavec – Ukázka provedení hotového výrobku.....	43
<b>Obrázek 4.22</b>	: Výkres základnové desky agregátu.....	43
<b>Obrázek 4.23</b>	: Výkres silenbloku (převzato a upraveno z [42]) .....	44
<b>Obrázek 4.24</b>	: Výkres profilu pro uchycení výstupních svorek a pojistkového pouzdra .....	44
<b>Obrázek 4.25</b>	: Výkres profilu pro uchycení nouzového vypínače motoru.....	45
<b>Obrázek 4.26</b>	: Celkové mechanické uspořádání realizovaného prototypu agregátu .....	46
<b>Obrázek 6.1</b>	: Zjednodušené blokové schéma výkonové jednotky.....	49
<b>Obrázek 6.2</b>	: Schéma zapojení třífázového usměrňovače.....	50
<b>Obrázek 6.3</b>	: Průběhy na třífázovém usměrňovači korespondující se schématem na Obr. 6.2..	51

<b>Obrázek 6.4</b>	: Ukázka pouzdra TO247 diod STPS30150CW, zapojení vývodů a.....	54
	provedení montáže.....	54
<b>Obrázek 6.5</b>	: Náhradní schéma kondenzátoru .....	57
<b>Obrázek 6.6</b>	: Ukázka pouzdra a úchyty použitého kondenzátoru Epcos B41580-A9109M ...	58
	(převzato a upraveno z [57]).....	58
<b>Obrázek 6.7</b>	: Porovnání zvlnění výstupního napětí šestipulsního usměrňovače při .....	58
	vysokých otáčkách generátoru: <b>a)</b> Bez použití výstupní filtrační kapacity;.....	58
	<b>b)</b> S připojenou výstupní filtrační kapacitou.....	58
<b>Obrázek 6.8</b>	: DC/DC měnič jako dvojbřan.....	62
<b>Obrázek 6.9</b>	: PWM modulace a pracovní cyklus DC/DC měniče.....	63
<b>Obrázek 6.10</b>	: Schéma zapojení snižujícího akumulárního měniče s topologií „BUCK“ .....	64
<b>Obrázek 6.11</b>	: Průběhy napětí a proudů akumulárního měniče s topologií typu „BUCK“, .....	65
	pro případ kontinuálního režimu a činitele plnění řídicího impulsu $\delta = 0,5$ .....	65
<b>Obrázek 6.12</b>	: Průběhy napětí a proudů akumulárního měniče s topologií typu „BUCK“, .....	66
	pro případ přerušovaného režimu a činitele plnění řídicího impulsu $\delta = 0,25$ ....	66
<b>Obrázek 6.13</b>	: Ukázka časování při řízení tranzistorů synchronního měniče typu „BUCK“....	68
<b>Obrázek 6.14</b>	: Ukázka pouzdra TO-247AC a zapojení vývodů tranzistoru IRFP4568PbF.....	71
<b>Obrázek 6.15</b>	: Ukázka pouzdra ISOTOP a zapojení vývodů diody STTH10002TV1 .....	71
<b>Obrázek 6.16</b>	: Ukázka použitého feritového jádra PM62/49, kostry pro vinutí a montážní.....	73
	sady (převzato a upraveno z [59]).....	73
<b>Obrázek 6.17</b>	: Ukázka vyrobené akumulární indukčnosti pro měnič .....	75
<b>Obrázek 6.18</b>	: Ukázka SMD pouzdra 5750 (převzato a upraveno ze [79]).....	77
	a jeho povrchové montáže .....	77
<b>Obrázek 6.19</b>	: Ukázka baterie výstupních filtračních kondenzátorů měniče po osazení .....	79
<b>Obrázek 6.20</b>	: Schéma zapojení budících obvodů tranzistorů MOSFET .....	80
<b>Obrázek 6.21</b>	: Ukázka pouzdra a montáže výkonových budičů tranzistorů MOSFET .....	83
<b>Obrázek 6.22</b>	: Princip funkce ADC – architektura s využitím SAR.....	94
	(převzato a upraveno z [92]).....	94
<b>Obrázek 6.23</b>	: Schéma zapojení obvodu k měření napětí .....	95
<b>Obrázek 6.24</b>	: Ukázka montáže A/D převodníku – pouzdro SOIC18.....	95
<b>Obrázek 6.25</b>	: Komunikace s A/D převodníkem po SPI sběrnici .....	96
	(převzato a upraveno z [92]).....	96
<b>Obrázek 6.26</b>	: Proudový senzor ACS750SCA-100 (převzato a upraveno z [69, 90]).....	97
	<b>a)</b> Grafický funkční model obvodu ; <b>b)</b> Blokové schéma vnitřního uspořádání... ..	97
<b>Obrázek 6.27</b>	: Schéma zapojení proudového senzoru .....	98
<b>Obrázek 6.28</b>	: Ukázka montáže proudového senzoru .....	98
<b>Obrázek 6.29</b>	: Kontrolér spínaného zdroje LT3748 – pouzdro MSOP16.....	99
	(převzato a upraveno z [62]).....	99
<b>Obrázek 6.30</b>	: Schéma zapojení napájecí části výkonové jednotky .....	99
<b>Obrázek 6.31</b>	: Průběhy napětí na elektrodě drain tranzistoru T1 bez tlumiče, při: .....	103
	VIN=30V, IOU=2,2A; <b>a)</b> Celá spínací perioda s vyznačenou VN oscilací; ..	103
	<b>b)</b> Vysokonapěťové oscilace v přiblížení.....	103
<b>Obrázek 6.32</b>	: Průběhy napětí na drainu tranzistoru T1 po připojení C14, při: .....	103
	VIN=30V, IOU=2,2A ; <b>a)</b> Oscilace na drainu T1 při C14 = 100pF ; .....	103
	<b>b)</b> Oscilace na drainu T1 při C14 = 470pF .....	103
<b>Obrázek 6.33</b>	: Průběhy napětí na drainu T1 po aplikaci RC tlumiče, při: .....	104
	VIN=12V, IOU=2,2A ; <b>a)</b> Překmit po zatlumení RC členem ; .....	104
	<b>b)</b> Překmit po zatlumení RCD obvodem .....	104
<b>Obrázek 6.34</b>	: Přechodová odezva spínaného zdroje při: VIN=30V, IOU=2,2A .....	104
<b>Obrázek 6.35</b>	: Ukázka zvlnění výstupního napětí napaječe při VIN = 15V, IOU ≈ 2,4A ....	106
	<b>a)</b> Bez použití výstupního LC filtru ; <b>b)</b> S použitím výstupního LC filtru.....	106
<b>Obrázek 6.36</b>	: Ukázka zvlnění výstupního napětí napaječe při VIN = 60V, IOU ≈ 2,4A ....	106
	<b>a)</b> Bez použití výstupního LC filtru ; <b>b)</b> S použitím výstupního LC filtru.....	106
<b>Obrázek 6.37</b>	: Měření vlastností realizovaného napaječe s obvodem LT3748.....	106
	<b>a)</b> Zatěžovací charakteristika ; <b>b)</b> Účinnost .....	106
<b>Obrázek 6.38</b>	: Ukázka osazeného napaječe s obvodem LT3748 na výkonové jednotce .....	107
	<b>a)</b> Svrchní strana plošného spoje ; <b>b)</b> Spodní strana plošného spoje.....	107
<b>Obrázek 6.39</b>	: Obvod spínání zapalování spalovacího motoru .....	107
<b>Obrázek 7.1</b>	: Zjednodušené blokové schéma řídicí jednotky.....	108
<b>Obrázek 7.2</b>	: Blokové schéma vnitřního uspořádání mikropočítače Parallax .....	109
	Propeller P8X32A (převzato a upraveno z [137]).....	109

<b>Obrázek 7.3</b>	: Schéma zapojení EEPROM paměti na řídicí jednotce.....	110
<b>Obrázek 7.4</b>	: Komunikace po I2C sběrnici (převzato a upraveno z [105]).....	112
<b>Obrázek 7.5</b>	: Průběh komunikace po I2C sběrnici mezi EEPROM a Propellerem .....	113
<b>Obrázek 7.6</b>	: Schéma zapojení převodníku UART↔USB k programování Propelleru .....	114
<b>Obrázek 7.7</b>	: Schéma zapojení expanderu I/O portů Propelleru .....	115
<b>Obrázek 7.8</b>	: Schéma zapojení obvodu reálného času .....	115
<b>Obrázek 7.9</b>	: Modul LCD displeje INT043BTFT-TS – vrchní strana .....	116
<b>Obrázek 7.10</b>	: Modul LCD displeje INT043BTFT-TS – spodní strana.....	117
<b>Obrázek 7.11</b>	: Schéma zapojení obvodu akustické indikace.....	118
<b>Obrázek 7.12</b>	: Schéma zapojení obvodu ovládání relé zapalování .....	118
<b>Obrázek 7.13</b>	: Schéma zapojení obvodu napětového dohledu s tlačítkem reset .....	119
<b>Obrázek 7.14</b>	: Schéma zapojení obvodu postupného resetu .....	120
<b>Obrázek 7.15</b>	: Schéma zapojení napájecí části řídicí jednotky .....	121
<b>Obrázek 7.16</b>	: Řídicí jednotka – po zapnutí ; <b>a)</b> Hlášení – požadavek; <b>a)</b> Hlavní obrazovka..	122
<b>Obrázek 7.17</b>	: Řídicí jednotka – obrazovka „Informace“.....	122
<b>Obrázek 7.18</b>	: Řídicí jednotka – obrazovka „Návod“.....	123
<b>Obrázek 7.19</b>	: Řídicí jednotka – obrazovka „Servis“(kniha údržby) a související výstraha....	123
<b>Obrázek 7.20</b>	: Řídicí jednotka – obrazovka „Nastavení“.....	124
<b>Obrázek 7.21</b>	: Řídicí jednotka – hlášení se vztahem k servomotoru .....	124
	<b>a)</b> Hlášení – Oznámení ; <b>b)</b> Hlášení – Chyba .....	124
<b>Obrázek 7.22</b>	: Řídicí jednotka – spuštění a zastavení motoru .....	125
	<b>a)</b> Nastartování motoru ; <b>b)</b> Zastavení motoru .....	125
<b>Obrázek 8.1</b>	: Blokové funkční schéma servomotoru.....	126
<b>Obrázek 8.2</b>	: Magnetický enkodér (převzato z [146]).....	127
<b>Obrázek 8.3</b>	: Princip funkce a vnitřní uspořádání magnetického enkodéru .....	127
	(převzato a upraveno z [149, 165]).....	127
<b>Obrázek 8.4</b>	: Synchronní sériová sběrnice a čtení úhlových pozičních dat.....	129
	(převzato a upraveno z [146]).....	129
<b>Obrázek 8.5</b>	: Synchronní sériová sběrnice a zápis do OTP registru.....	129
	(převzato a upraveno z [146]).....	129
<b>Obrázek 8.6</b>	: Napětí analogového výstupu mag. enkodéru (převzato a upraveno z [146])....	130
<b>Obrázek 8.7</b>	: Nahrazení potenciometru magnetem .....	130
<b>Obrázek 9.1</b>	: Zjednodušené blokové schéma napájecí jednotky.....	131
<b>Obrázek 9.2</b>	: Umístění termistoru nabíječky baterií.....	132
<b>Obrázek 11.1</b>	: Ukázka zvlnění výstupního napětí agregátu při výstupním výkonu ≈300W....	134

## 13. Seznam tabulek

<b>Tabulka 4.1</b>	: Motor Honda GX25 – Základní parametry udávané výrobcem.....	29
	(převzato z [36]) .....	29
<b>Tabulka 4.2</b>	: Servomotor Hitec HS-625MG – Parametry výrobce (převzato z [47]).....	33
<b>Tabulka 4.3</b>	: Parametry generátorů udávané výrobcem (převzato z [46]).....	36
<b>Tabulka 6.1</b>	: Porovnání typických parametrů zvažovaných diod pro použití v třífázovém....	52
	usměrňovači (zdroj informací [82], [162]) .....	52
<b>Tabulka 6.2</b>	: Základní parametry použitých diody STPS30150CW (převzato z [82]).....	54
<b>Tabulka 6.3</b>	: Parametry kondenzátoru použitého k filtraci napětí za usměrňovačem .....	58
	(převzato z [77]) .....	58
<b>Tabulka 6.4</b>	: Nejdůležitější parametry použitých tranzistorů IRFP4568PbF (převzato z [85]).	70
<b>Tabulka 6.5</b>	: Nejdůležitější parametry použité diody STTH10002TV1 (převzato z [83]).....	70
<b>Tabulka 6.6</b>	: Parametry použitého feritového jádra (převzato z [110]) .....	72
<b>Tabulka 6.7</b>	: Parametry kondenzátorů použitých pro vstupní filtraci měniče .....	77
	(převzato z [78, 79]).....	77
<b>Tabulka 6.8</b>	: Parametry kondenzátorů použitých ve výstupním filtru výkonového DC/DC... měniče (převzato z [80, 81]).....	79 79
<b>Tabulka 6.9</b>	: Nejdůležitější parametry použitých budičů MOSFETů (převzato z [89]).....	83



## 14. Seznam příloh

### Příloha A : Výkonová jednotka

A.1	: Kompletní schéma zapojení .....	149
A.2	: Seznam všech součástí .....	150
A.3	: Rozvržení součástí na DPS – strana vrchní .....	152
A.4	: Rozvržení součástí na DPS – strana spodní .....	153
A.5	: Motiv pro výrobu DPS – strana vrchní .....	154
A.6	: Motiv pro výrobu DPS – strana spodní .....	154
A.7	: Osazená DPS – strana vrchní .....	155
A.8	: Osazená DPS – strana spodní .....	155

### Příloha B : Řídící jednotka

B.1	: Kompletní schéma zapojení .....	156
B.2	: Seznam všech součástí .....	157
B.3	: Rozvržení součástí na DPS – strana vrchní .....	159
B.4	: Rozvržení součástí na DPS – strana spodní .....	159
B.5	: Motiv pro výrobu DPS – strana vrchní .....	160
B.6	: Motiv pro výrobu DPS – strana spodní .....	160
B.7	: Osazená DPS – strana vrchní .....	161
B.8	: Osazená DPS – strana spodní .....	161

### Příloha C : Napájecí jednotka

C.1	: Kompletní schéma zapojení .....	162
C.2	: Seznam všech součástí .....	163
C.3	: Rozvržení součástí na DPS – strana vrchní .....	165
C.4	: Rozvržení součástí na DPS – strana spodní .....	165
C.5	: Motiv pro výrobu DPS – strana vrchní .....	166
C.6	: Motiv pro výrobu DPS – strana spodní .....	166
C.7	: Osazená DPS – strana vrchní .....	167
C.8	: Osazená DPS – strana spodní .....	167

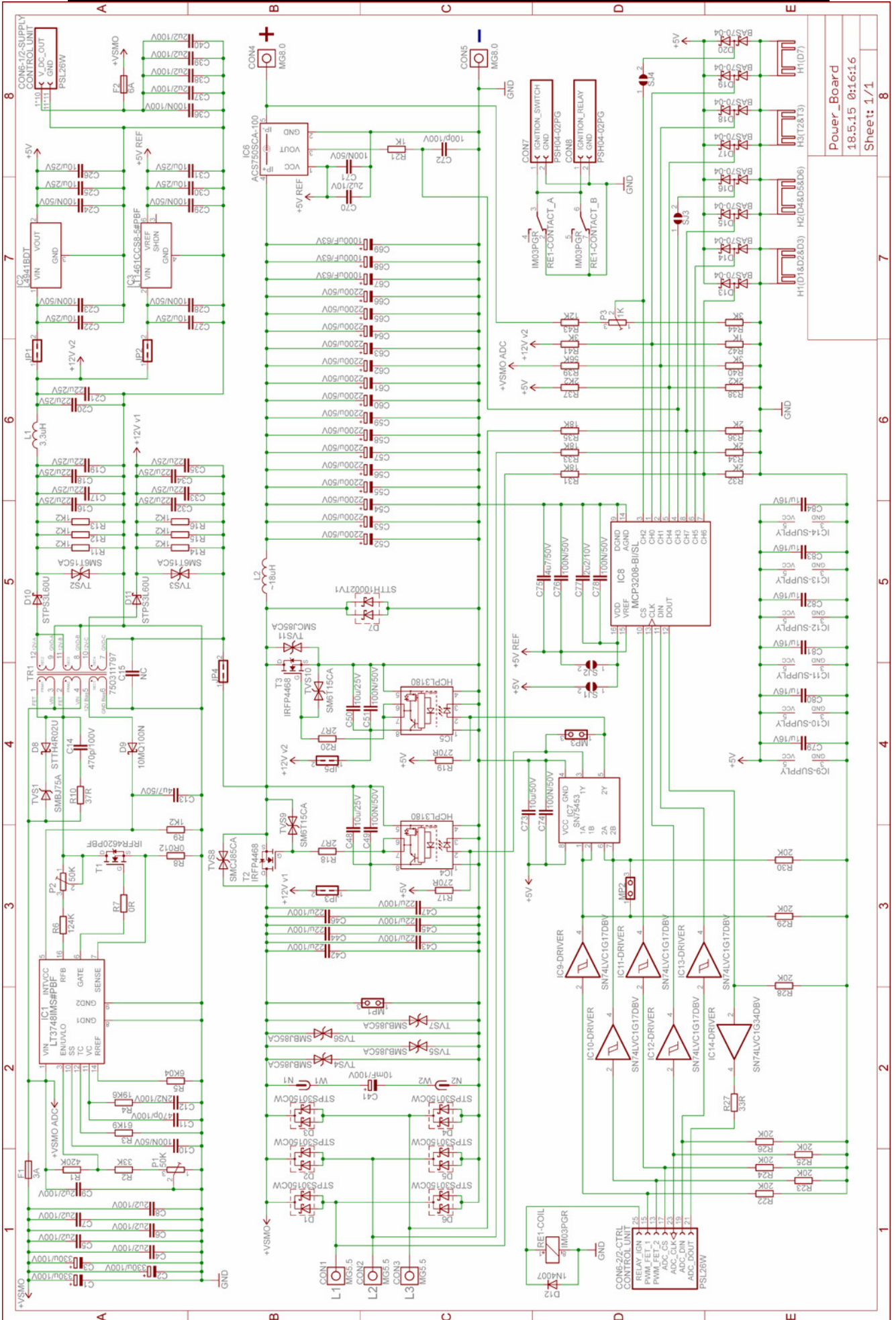
### Příloha D : Modul pro servomotor

D.1	: Kompletní schéma zapojení .....	168
D.2	: Seznam všech součástí .....	168
D.3	: Rozvržení součástí a motiv pro výrobu DPS .....	168
D.4	: Osazená DPS .....	168

### Příloha E : Celkový pohled na prototyp agregátu .....

### Příloha F : Obsah přiloženého datového média DVD-R .....

### Příloha G : Datové médium DVD-R



Příloha A.1 : Výkonová jednotka – Kompletní schéma zapojení

Power\_Board  
18.5.15 0:16:16  
Sheet: 1/1

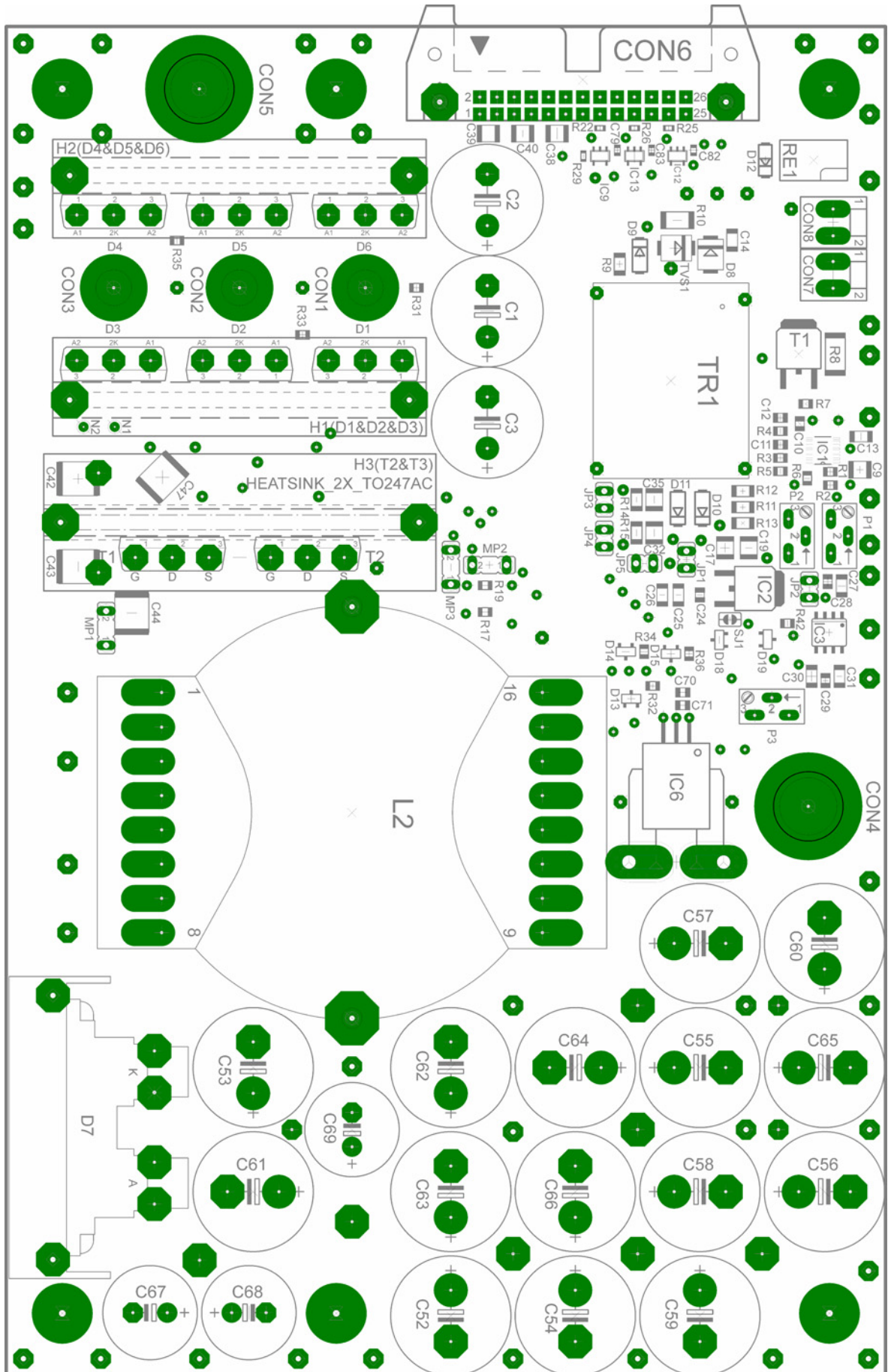
## Příloha A.2 : Výkonová jednotka – Seznam všech součástek ( 1 část )

SOUČÁSTKA	HODNOTA / TYP	POUZDRO	POPIS
R1	420 kΩ	0805	Rezistor
R2	33 kΩ	0805	Rezistor
R3	61,9 kΩ	0805	Rezistor
R4	19,6 kΩ	0805	Rezistor
R5	6,04 kΩ	0805	Rezistor / 1%
R6	124 kΩ	0805	Rezistor
R7	0 Ω	0805	Nulový můstek
R8	12 mΩ	2512	Rezistor
R9	1,2 kΩ	1206	Rezistor
R10	37 Ω	2010	Rezistor
R11 - R16	1,2 kΩ	1206	Rezistor
R17	270 Ω	0805	Rezistor
R18	2,7 Ω	2010	Rezistor
R19	270 Ω	0805	Rezistor
R20	2,7 Ω	2010	Rezistor
R21	1 kΩ	0805	Rezistor
R22 - R26	20 kΩ	0603	Rezistor
R27	33 Ω	0603	Rezistor
R28 - R30	20 kΩ	0603	Rezistor
R31	18 kΩ	0805	Rezistor
R32	2 kΩ	0805	Rezistor
R33	18 kΩ	0805	Rezistor
R34	2 kΩ	0805	Rezistor
R35	18 kΩ	0805	Rezistor
R36	2 kΩ	0805	Rezistor
R37, R38	2,2 kΩ	0805	Rezistor
R39	56 kΩ	0805	Rezistor
R40, R41	3 kΩ	0805	Rezistor
R42	1 kΩ	0805	Rezistor
R43	12 kΩ	0805	Rezistor
R44	3 kΩ	0805	Rezistor
P1, P2	50 kΩ	9,7x5x11,1 mm	Odporový trimr / cermetový / 21 otáček
P3	1 kΩ	9,7x5x11,1 mm	Odporový trimr / cermetový / 21 otáček
C1 - C3	330 μF	30x16 / RM7,5	Elektrolytický kondenzátor / 100V / Low ESR
C4 - C9	2,2 μF	1210	Keramický kondenzátor / 100V / Hmota X7R
C10	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C11	470 pF	0805	Keramický kondenzátor / 100V / Hmota X7R
C12	2,2 nF	0805	Keramický kondenzátor / 100V / Hmota X7R
C13	4,7 μF	1206	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C14	470 pF	0805	Keramický kondenzátor / 100V / Hmota X7R
C15		1210	Neosazen
C16 - C21	22 μF	1210	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C22	10 μF	1206	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C23, C24	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C25 - C27	10 μF	1206	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C28, C29	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C30, C31	10 μF	1206	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C32 - C35	22 μF	1210	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C36 - C40	2,2 μF	1210	Keramický kondenzátor / 100V / Hmota X7R
C41	10 mF		Elektrolytický kondenzátor / 100V / Externí
C42 - C47	15 μF	2220	Keramický kondenzátor / 100V / Hmota X7S
C48	10 μF	1206	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X7R
C49	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C50	10 μF	1206	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X7R
C51	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C52 - C66	2200 μF	35x18 / RM7,5	Elektrolytický kondenzátor / 50V / Low ESR
C67 - C69	1000 μF	35x13 / RM5,0	Elektrolytický kondenzátor / 63V / Low ESR
C70	2,2 μF	0805	Keramický kondenzátor / 10V / Hmota X7R
C71	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C72	100 pF	0805	Keramický kondenzátor / 100V / Hmota X7R
C73	10 μF	1206	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C74	100 nF	0603	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C75	4,7 μF	1206	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C76	100 nF	0603	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C77	2,2 μF	0805	Keramický kondenzátor / 10V / Hmota X7R
C78	100 nF	0603	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C79 - C84	1 μF	0603	Keramický kondenzátor / 16V / Hmota X7R

## Příloha A.2 : Výkonová jednotka – Seznam všech součástek ( 2 část )

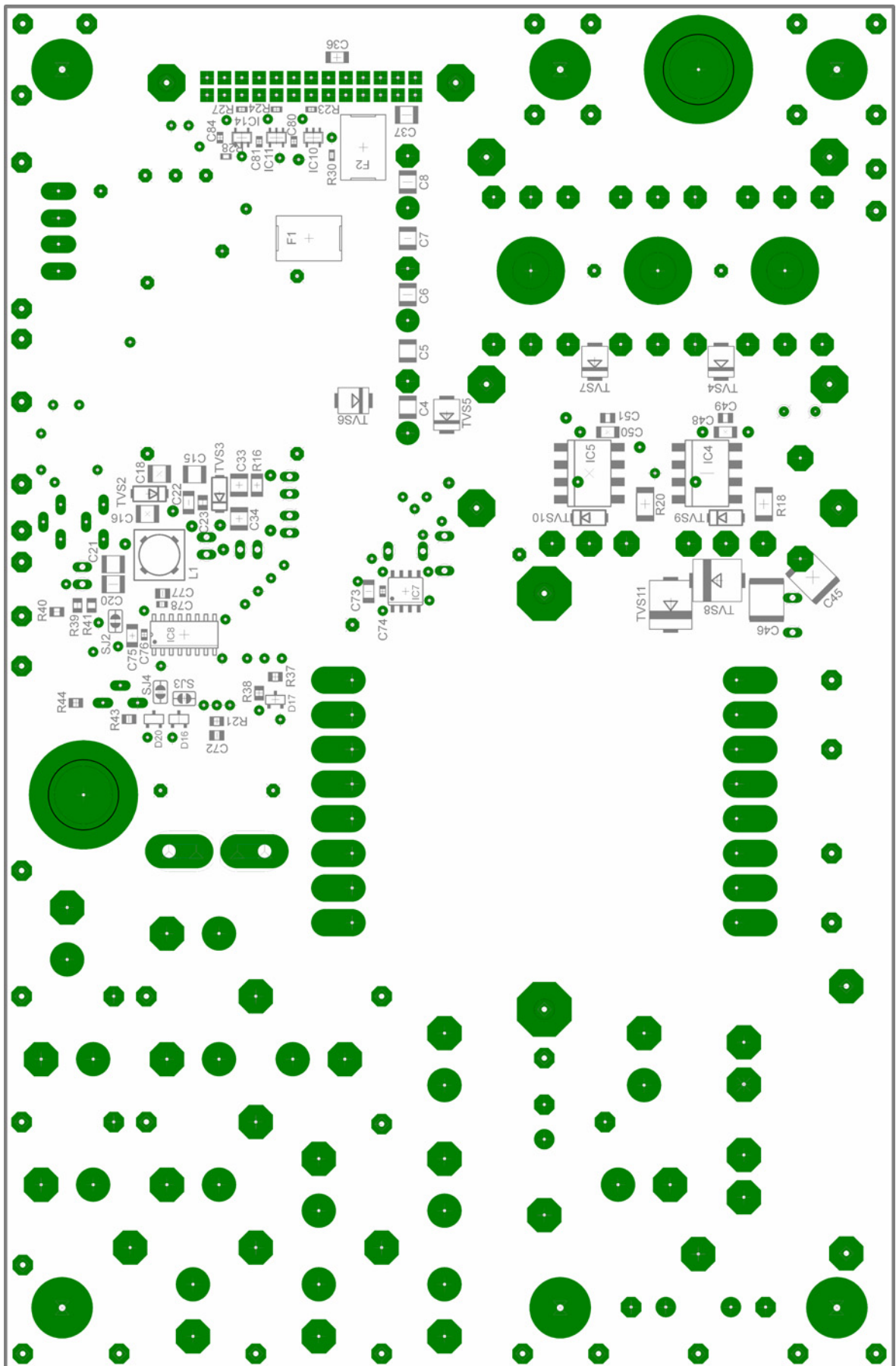
SOUČÁSTKA	HODNOTA / TYP	POUZDRO	POPIS
L1	3,3 µH	SIC74	Tlumivka
L2	180 µH	PM 62/49	Tlumivka
TR1	750311797	EFD20	Impulsový transformátor
D1 - D6	STPS30150CW	TO247	Dioda, schottkyho, dvojitá
D1	STTH4R02U	SMB	Dioda, schottkyho, velmi rychlá
D2	10MQ100N	SMA	Dioda, schottkyho
D3, D4	STPS3L60U	SMB	Dioda, schottkyho, s nízkým úbytkem
D5	STTH10002TV1	ISOTOP	Dioda, schottkyho, dvojitá, výkonová
D6	1N4007	SMA	Dioda
D7 - D14	BAS70-04	SOT23	Dioda, schottkyho
TVS1	SMBJ75A	SMB	Transil, jednosměrný
TVS2, TVS3	SM6T15CA	SMB	Transil, obousměrný
TVS4 - TVS7	SMBJ85CA	SMB	Transil, obousměrný
TVS8	SMCJ85CA	SMC	Transil, obousměrný
TVS9, TVS10	SM6T15CA	SMB	Transil, obousměrný
TVS11	SMCJ85CA	SMC	Transil, obousměrný
T1	IRFR4620PBF	TO252AA	Tranzistor
T2, T3	IRFP4468	TO247AC	Tranzistor
RE1	IM03PGR		Relé, 2 přepínací kontakty
IC1	LT3748IMS#PBF	MSOP16	Integrovaný obvod, kontrolér spínaného zdroje
IC2	L4941BDT	TO252AA	Integrovaný obvod, LDO stabilizátor napětí 5V
IC3	LT1461CCS85#PBF	SOIC8	Integrovaný obvod, referenční zdroj napětí 5V
IC4, IC5	HCPL3180	DIL08-SMD	Integrovaný obvod, výkonový budič MOSFETu
IC6	ACS750SCA-100	CB-PFF	Integrovaný obvod, proudový senzor
IC7	SN75453	SOIC8	Integrovaný obvod, dvojitý univerzální budič
IC8	MCP3208-BI/SL	SOIC16	Integrovaný obvod, A/D převodník
IC9 - IC13	SN74LVC1G17DBV	SOT23-5	Integrovaný obvod, Buffer / Schmitt
CON1 - CON3	MG5.5		Konektor, Ø 5,5 mm, 1 pin
CON4, CON5	MG8.0		Konektor, Ø 8,0 mm, 1 pin
CON6	PSL26W		Konektor pro plochý kabel, 26 pinů
CON7, CON8	PSH04-02PG		Konektor, 2 piny
JP1 - JP5			Kolíková lišta pro zkratovací spojku jumper, 2piny
MP1 - MP3			Precizní dutinková lišta pro měření, 2 piny
SJ1 - SJ4			Pájitelná propojka na plošném spoje
N1, N2			Pájecí kolík
W1, W2			Nástrčný kolík
H1			Chladič pro T2 a T3
H2, H3			Chladiče pro diody 3F můstku
H4			Chladič pro D7
F1	0154003.0		Miniaturní SMD pojistka s držákem / 3,0A
F2	015406.3		Miniaturní SMD pojistka s držákem / 6,3A

Příloha A.3 : Výkonová jednotka – Rozvržení součástek na DPS – strana vrchní



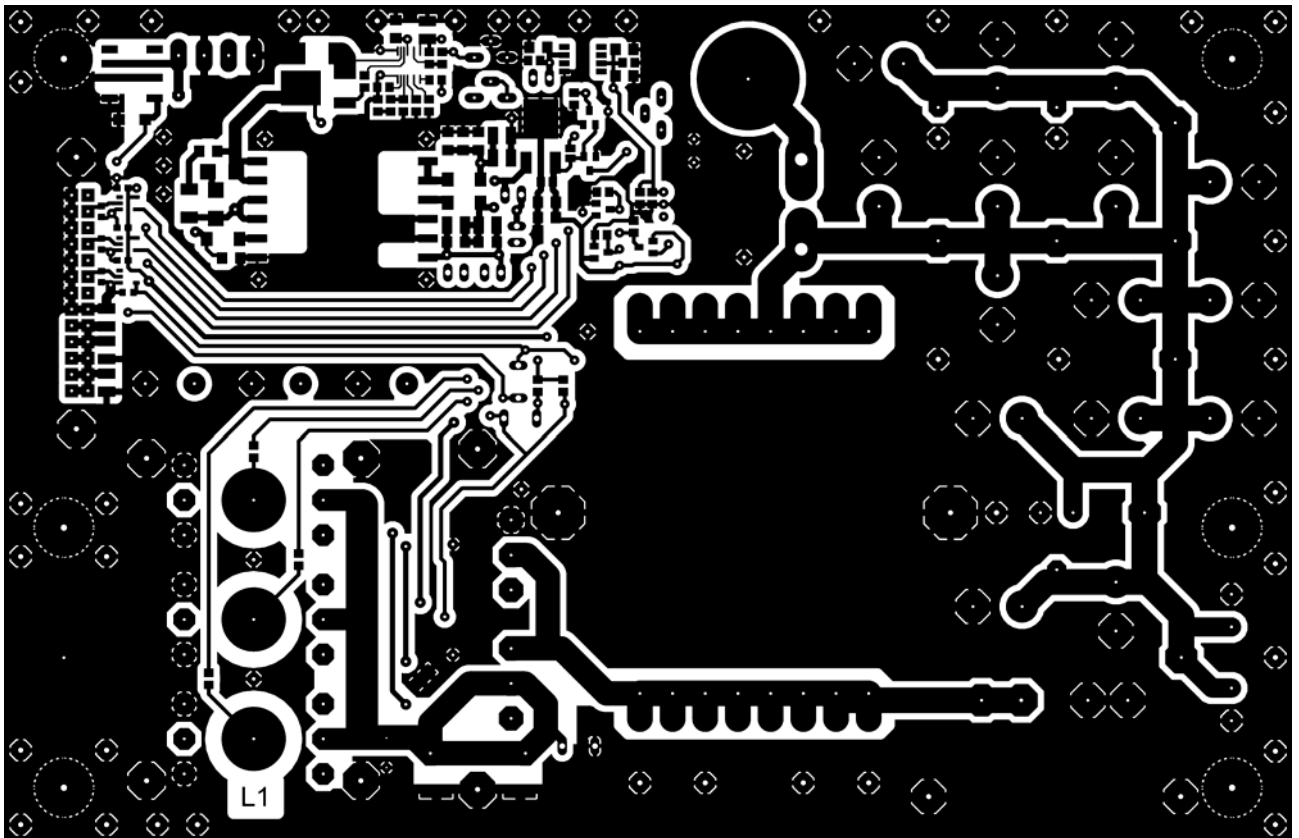


**Příloha A.4 : Výkonová jednotka – Rozvržení součástek na DPS – strana spodní**

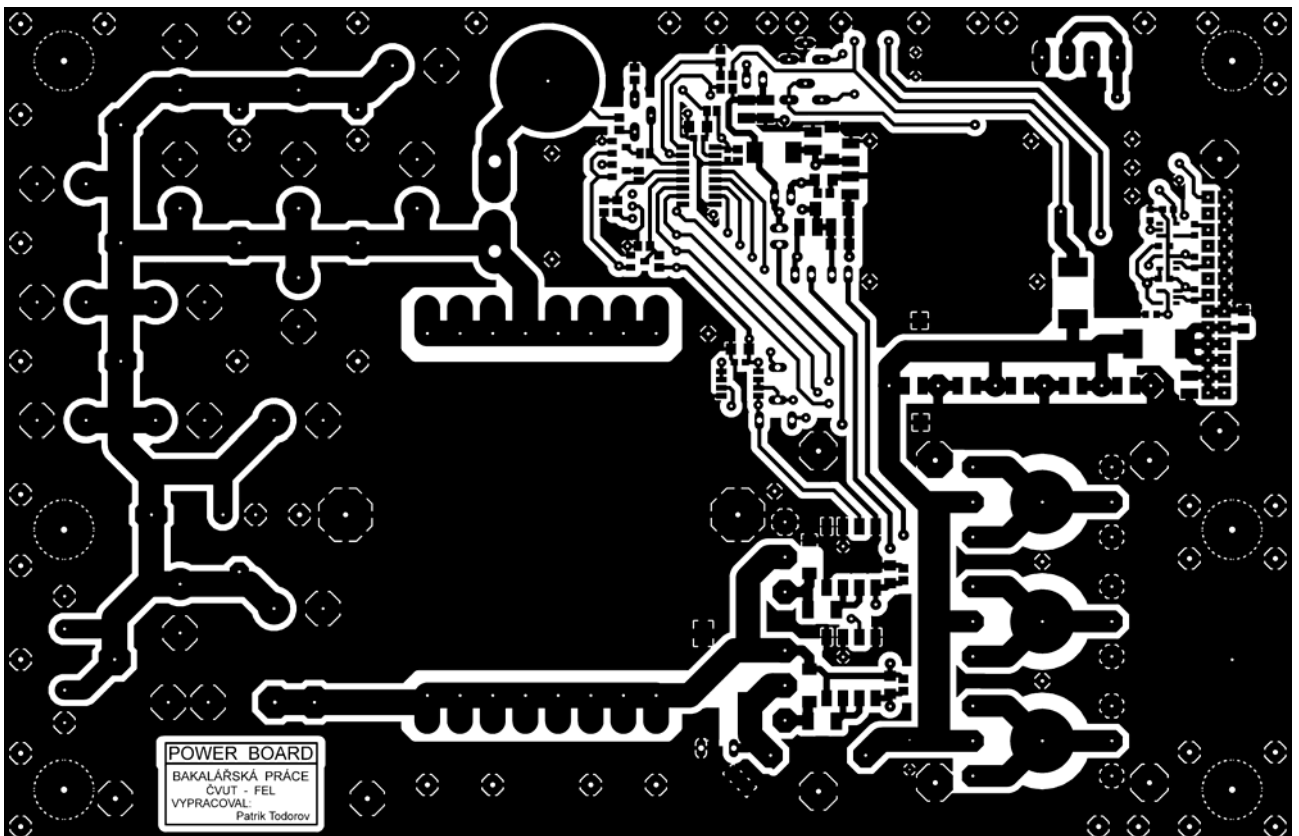




Příloha A.5 : Výkonová jednotka – Motiv pro výrobu DPS – strana vrchní

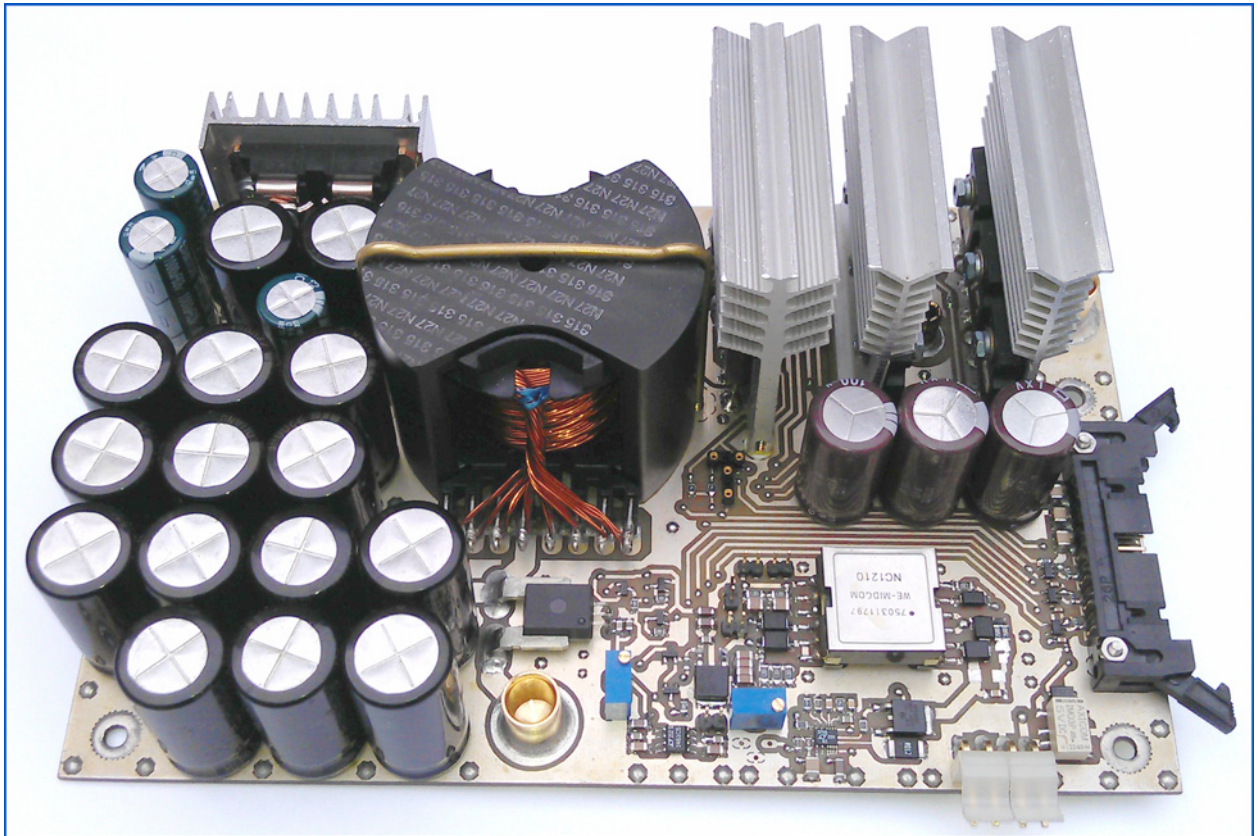


Příloha A.6 : Výkonová jednotka – Motiv pro výrobu DPS – strana spodní

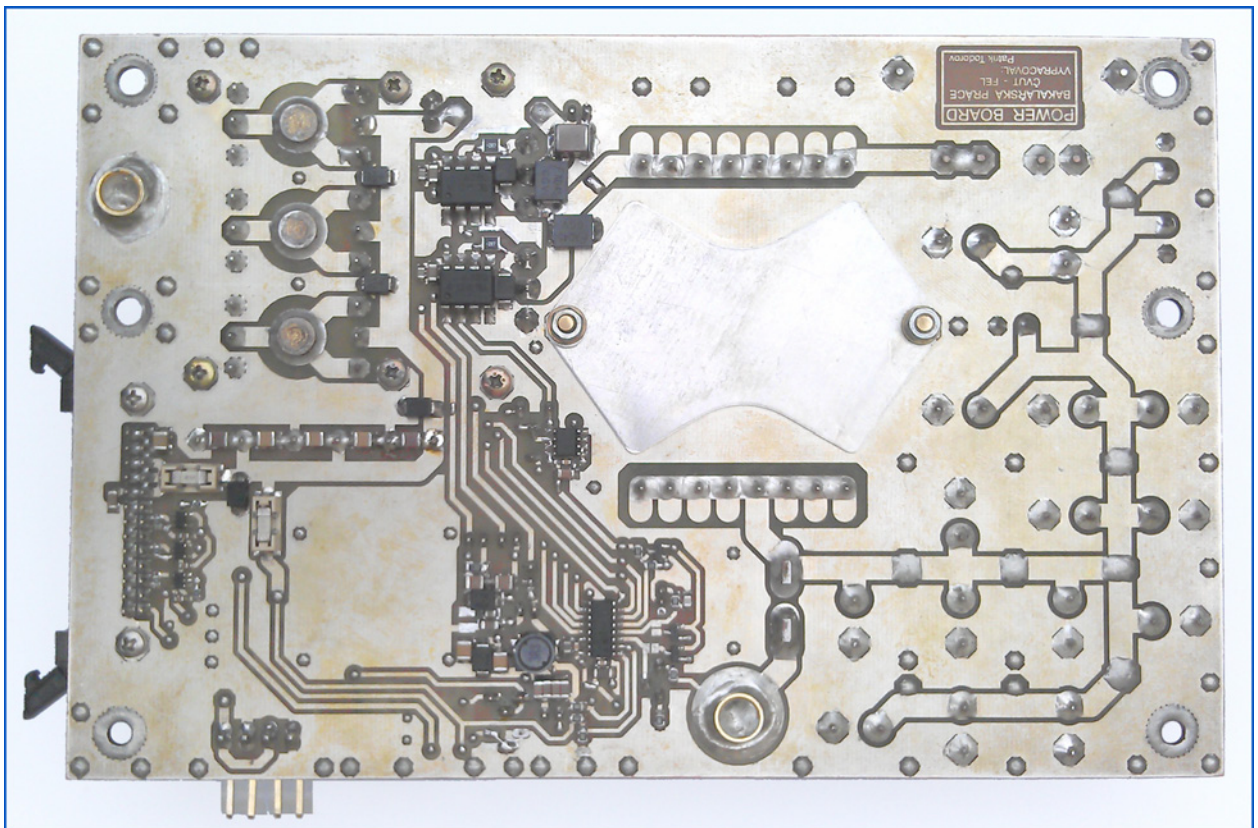


POWER BOARD  
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
ČVUT - FEL  
VYPRACOVAL:  
Patrik Todorov

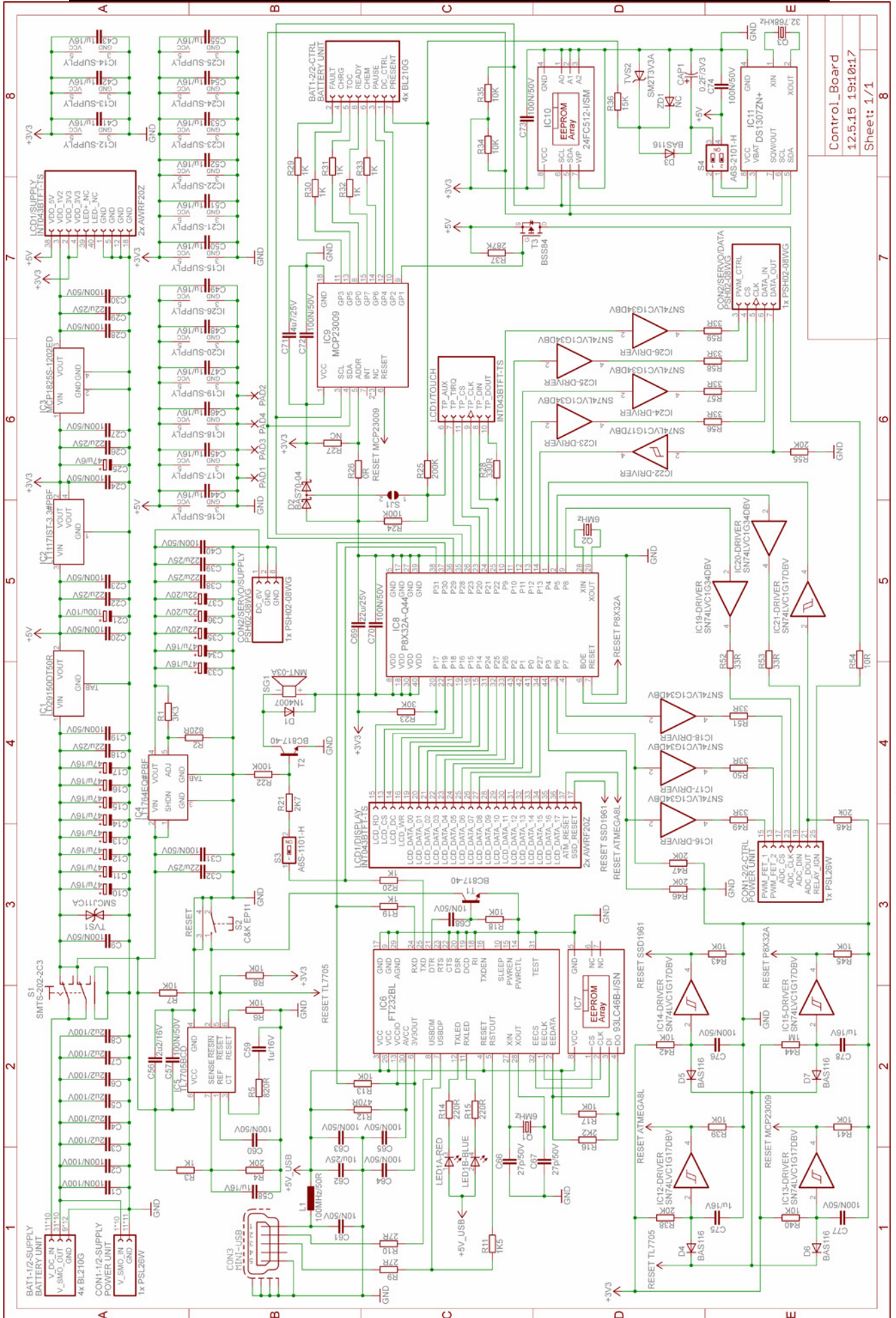
**Příloha A.7 : Výkonová jednotka – Osazená DPS – strana vrchní**



**Příloha A.8 : Výkonová jednotka – Osazená DPS – strana spodní**







Příloha B.1 : Řídicí jednotka – Kompletní schéma zapojení

## Příloha B.2 : Řídící jednotka – Seznam všech součástek ( 1 část )

SOUČÁSTKA	HODNOTA / TYP	POUZDRO	POPIS
R1	3,3 kΩ / 1%	0603	Rezistor
R2	820 Ω / 1%	0603	Rezistor
R3	1 kΩ	0603	Rezistor
R4	20 kΩ	0603	Rezistor
R5	820 Ω	0603	Rezistor
R6 - R8	10 kΩ	0603	Rezistor
R9, R10	27 Ω	0603	Rezistor
R11	1,5 kΩ	0603	Rezistor
R12	470 Ω	0603	Rezistor
R13	10 kΩ	0603	Rezistor
R14, R15	220 Ω	0603	Rezistor
R16	2,2 kΩ	0603	Rezistor
R17, R18	10 kΩ	0603	Rezistor
R19, R20	1 kΩ	0603	Rezistor
R21	2,7 kΩ	0805	Rezistor
R22	100 kΩ	0805	Rezistor
R23	30 kΩ	0603	Rezistor
R24	100 kΩ	0805	Rezistor
R25	200 kΩ	0805	Rezistor
R26	0 Ω	0603	Nulový můstek
R27		0603	Neosazen
R28	330 Ω	0805	Rezistor
R29 - R33	1 kΩ	0603	Rezistor
R34, R35	10 kΩ	0805	Rezistor
R36	15 kΩ	0805	Rezistor
R37	287 kΩ	0805	Rezistor
R38	20 kΩ	0603	Rezistor
R39 - R43	10 kΩ	0603	Rezistor
R44	1 MΩ	0603	Rezistor
R45	10 kΩ	0603	Rezistor
R46 - R48	20 kΩ	0603	Rezistor
R49 - R53	33 Ω	0603	Rezistor
R54	10 Ω	0805	Rezistor
R55	20 kΩ	0603	Rezistor
R56 - R59	33 Ω	0603	Rezistor
C1 - C2	100 nF	1206	Keramický kondenzátor / 100V / Hmota X7R
C3 - C8	2,2 μF	1210	Keramický kondenzátor / 100V / Hmota X7R
C9	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C10 - C17	47 μF	D	Tantalový kondenzátor / 16V
C18	22 μF	1210	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C19, C20	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C21	100 μF	D	Tantalový kondenzátor / 10V
C22	22 μF	1210	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C23, C24	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C25	47 μF	C	Tantalový kondenzátor / 6V
C26	22 μF	1210	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C27, C28	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C29	22 μF	1210	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C30, C31	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C32	22 μF	1210	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C33, C34	47 μF	D	Tantalový kondenzátor / 16V
C35 - C37	22 μF	D	Tantalový kondenzátor / 20V
C38, C39	22 μF	1210	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C40	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C41 - C55	1 μF	0603	Keramický kondenzátor / 16V / Hmota X7R
C56	2,2 μF	0805	Keramický kondenzátor / 16V / Hmota X7R
C57	100 nF	0603	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C58, C59	1 μF	0603	Keramický kondenzátor / 16V / Hmota X7R
C60	100 nF	0603	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C61	10 nF	0603	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota NP0
C62	10 μF	1210	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X7R
C63 - C65	100 nF	0603	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C66, C67	27 pF	0603	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota NP0
C68	10 nF	0603	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C69	22 μF	1210	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C70	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C71	4,7 μF	1210	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X7R

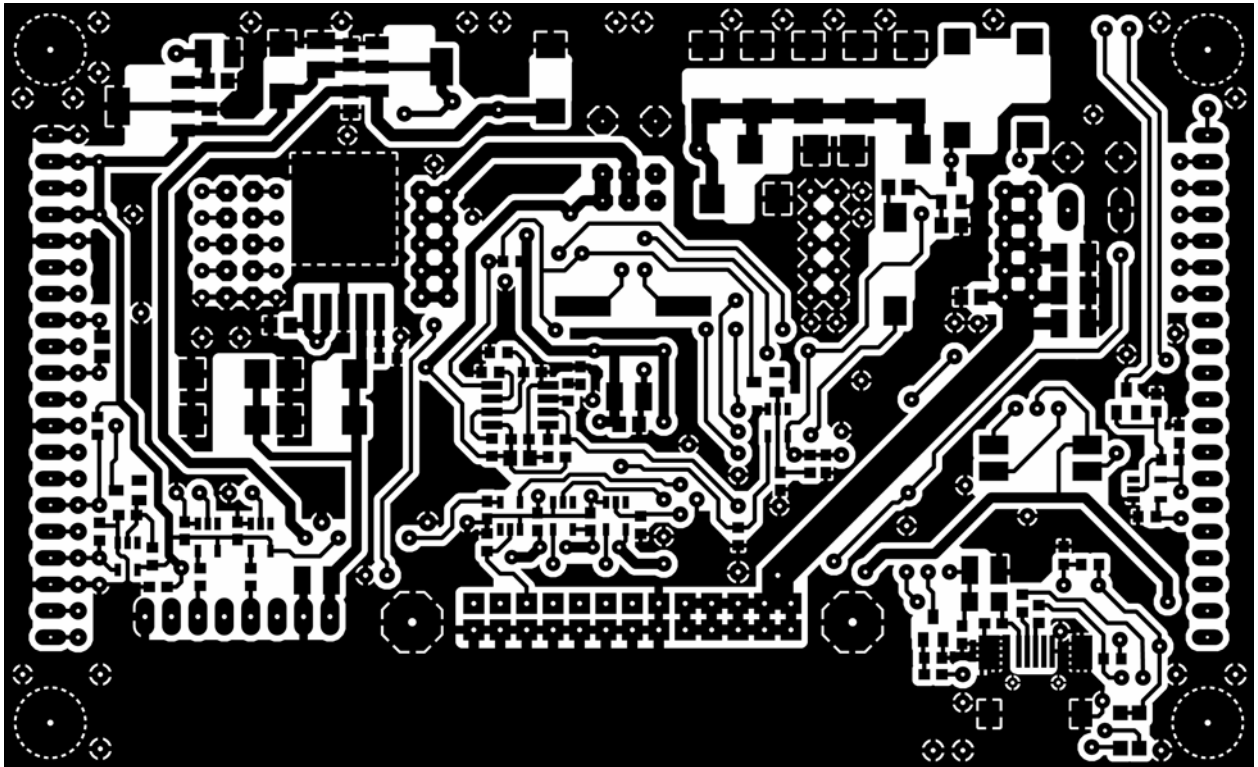
## Příloha B.2 : Řídící jednotka – Seznam všech součástek ( 2 část )

SOUČÁSTKA	HODNOTA / TYP	POUZDRO	POPIS
C72, C73	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C74	100 nF	0603	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C75	1 µF	0603	Keramický kondenzátor / 16V / Hmota X7R
C76, C77	100 nF	0603	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C78	1 µF	0603	Keramický kondenzátor / 16V / Hmota X7R
CAP1	0,2F	AK	Superkapacitor / 3,3V / EECEN0F204AK
L1	LCBC-500	1206	Feritový „korálek“ / 3A / 50Ω@100MHz
D1	1N4007	SMA	Dioda, obyčejná, usměrňovací
D2	BAS70-04	SOT23	Dioda, schottkyho, dvojitá
D3	BAS116	SOT416	Dioda s nízkým svodem
D4 - D7	BAS116	SOT23	Dioda s nízkým svodem
ZD1		SOT23	Neosazena
TVS1	SMCJ11CA	SMC	Obousměrný transil / 1500W
TVS2	SM2T3V3A	DO-216AA	Jednosměrný transil, nízkonapěťový
LED1	150141RB73100		Dvojitá LED dioda / červená + modrá / 2 x 30mA
T1, T2	BC817-40	SOT23	Tranzistor NPN
T3	BSS84	SOT23	Tranzistor P-FET
Q1	9C-6.000MAAJ-T		6 MHz krystal pro USB převodník / 30 ppm
Q2	HC49US		6 MHz krystal pro Propeller / 30 ppm
Q3	MC405		32.768kHz krystal pro RTC obvod / 3 ppm
IC1	LD29150DT50R	TO252AA	LDO stabilizátor napětí 5V / 1,5A
IC2	LT1117IST-3.3#PBF	SOT223	LDO stabilizátor napětí 3,3V / 800mA
IC3	MCP1825S-1202ED	SOT223	LDO stabilizátor napětí 1,2V / 500mA
IC4	LT1764EQ#PBF	TO263-5	LDO stabilizátor napětí nastavitelný / 3A
IC5	TL7705BCD	SOIC8	Obvod napěťového dohledu / resetu
IC6	FT232BL	LQFP32	Převodník UART-USB
IC7	93LC46B-I/SN	SOIC8	EEPROM paměť
IC8	P8X32A-Q44	LQFP	MCU
IC9	MCP23009	SOIC18	8 bit expander I/O portů
IC10	24FC512-I/SM	SOIJ8	EEPROM paměť
IC11	DS1307ZN+	SOIC8	RTC obvod
IC12 - IC15	SN74LVC1G17DBV	SOT23-5	Buffer se Smittovým klopným obvodem
IC16 - IC20	SN74LVC1G34DBV	SOT23-5	Buffer / sledovač
IC21, IC22	SN74LVC1G17DBV	SOT23-5	Buffer se Smittovým klopným obvodem
IC23 - IC26	SN74LVC1G34DBV	SOT23-5	Buffer / sledovač
SG1	MNT-03A		Akustický měnič / 16Ω / max. 4,5V
BAT1	BL210G		4 x konektor pro připojení napájecí jednotky
LCD1	AWRF20Z		2 x konektor pro připojení LCD modulu
CON1	PSL26W		Konektor pro plochý kabel, 26 kontaktů
CON2	PSH02-08WG		Konektor, 8 vodičů
CON3	USB Mini B		Konektor
S1	SMTS-202-2C3		Spínač k zapnutí řídicí jednotky / 3A@125VDC
S2	C&K EP11		Tlačítko resetu řídicí jednotky, bez aretace
S3	A6S-1101-H		1P / Spínač minidip k vypnutí akustické indikace
S4	A6S-2101-H		2P / Spínač minidip k resetu RTC obvodu
SJ1			Pájitelná propojka na plošném spoje
PAD1 - PAD4			Pocínované otvory pro upevnění DPS

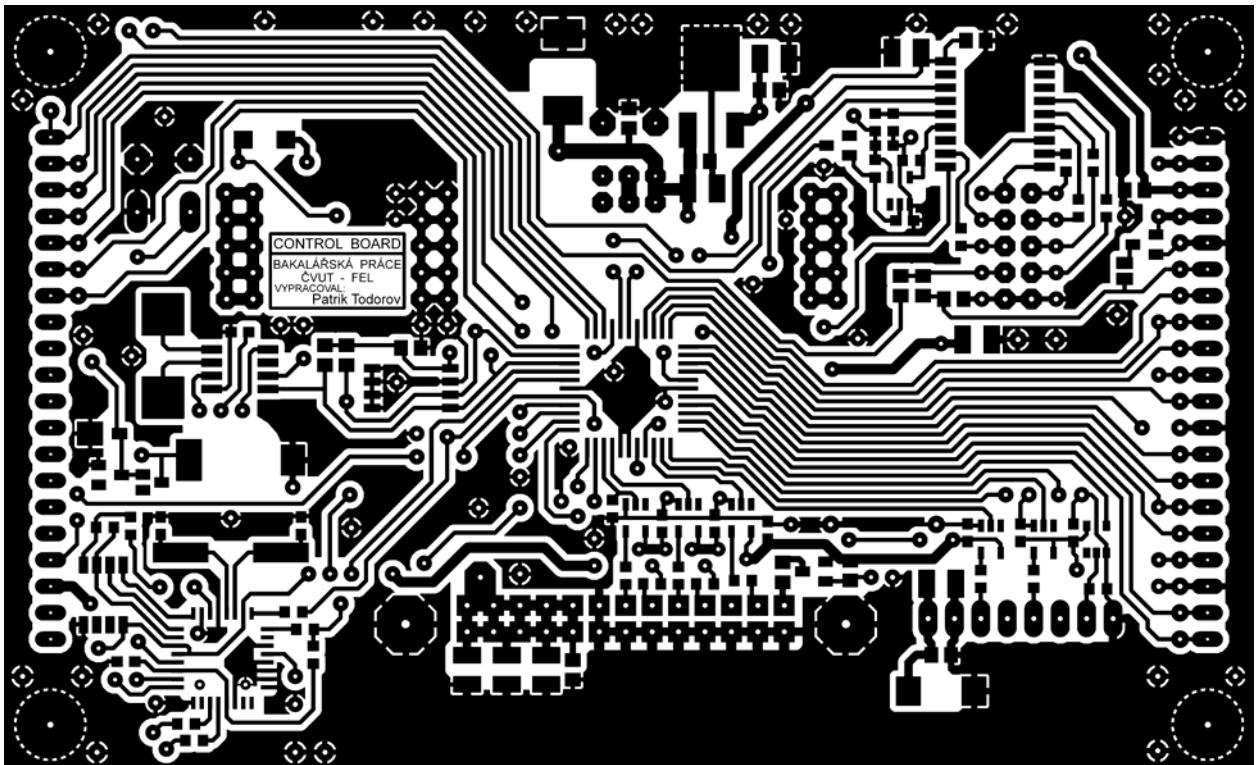




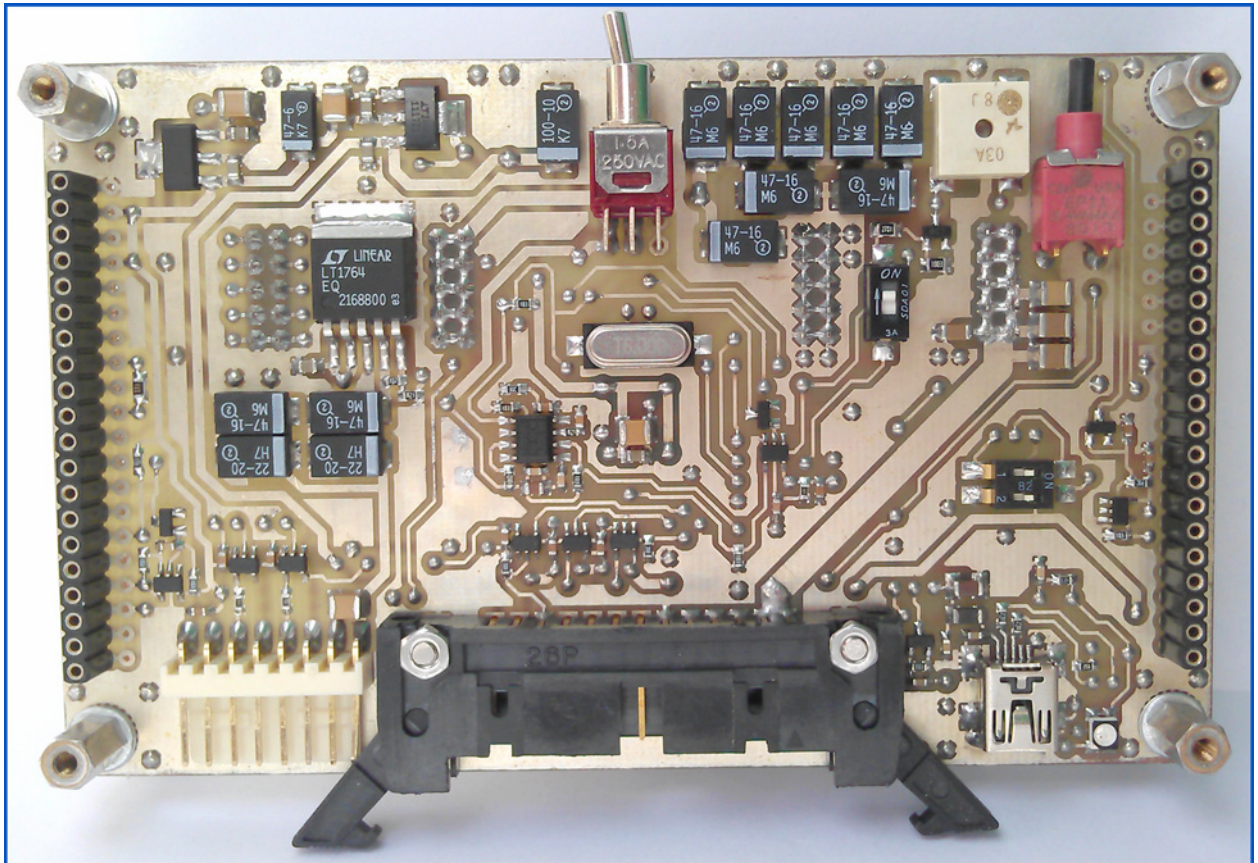
Příloha B.5 : Řídicí jednotka – Motiv pro výrobu DPS – strana vrchní



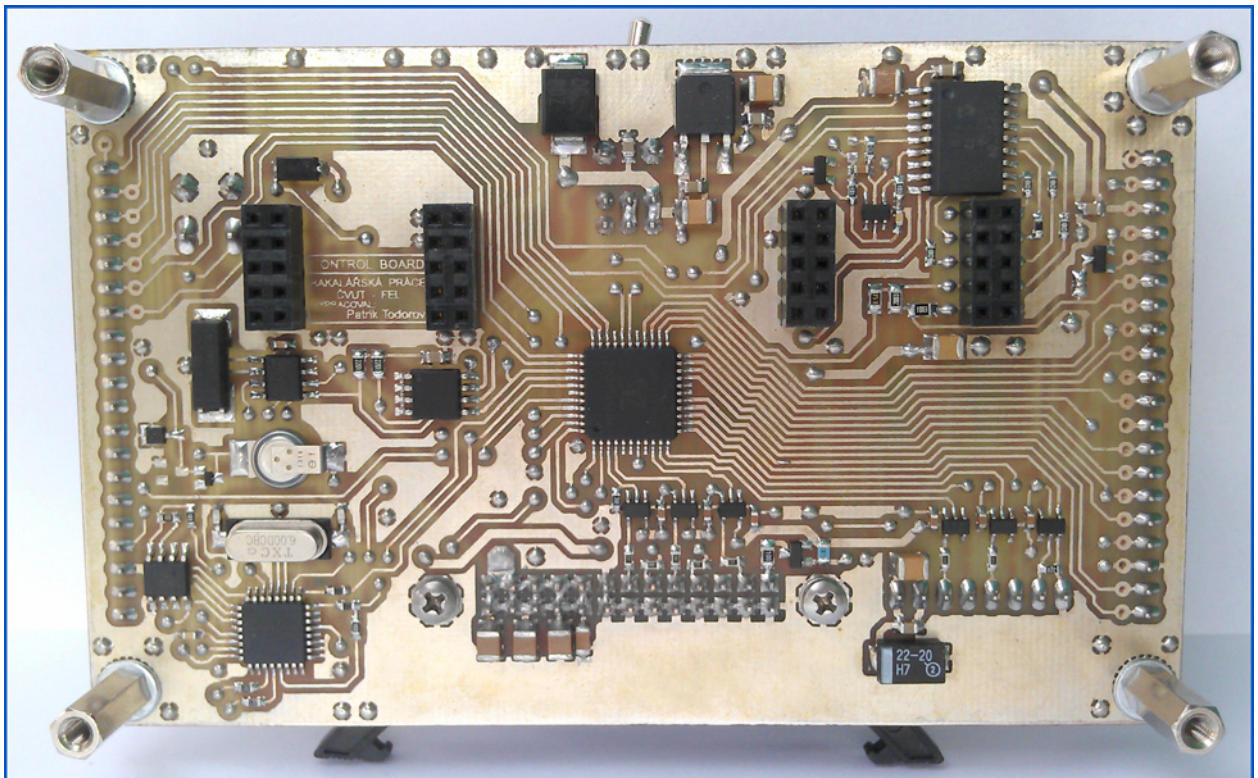
Příloha B.6 : Řídicí jednotka – Motiv pro výrobu DPS – strana spodní



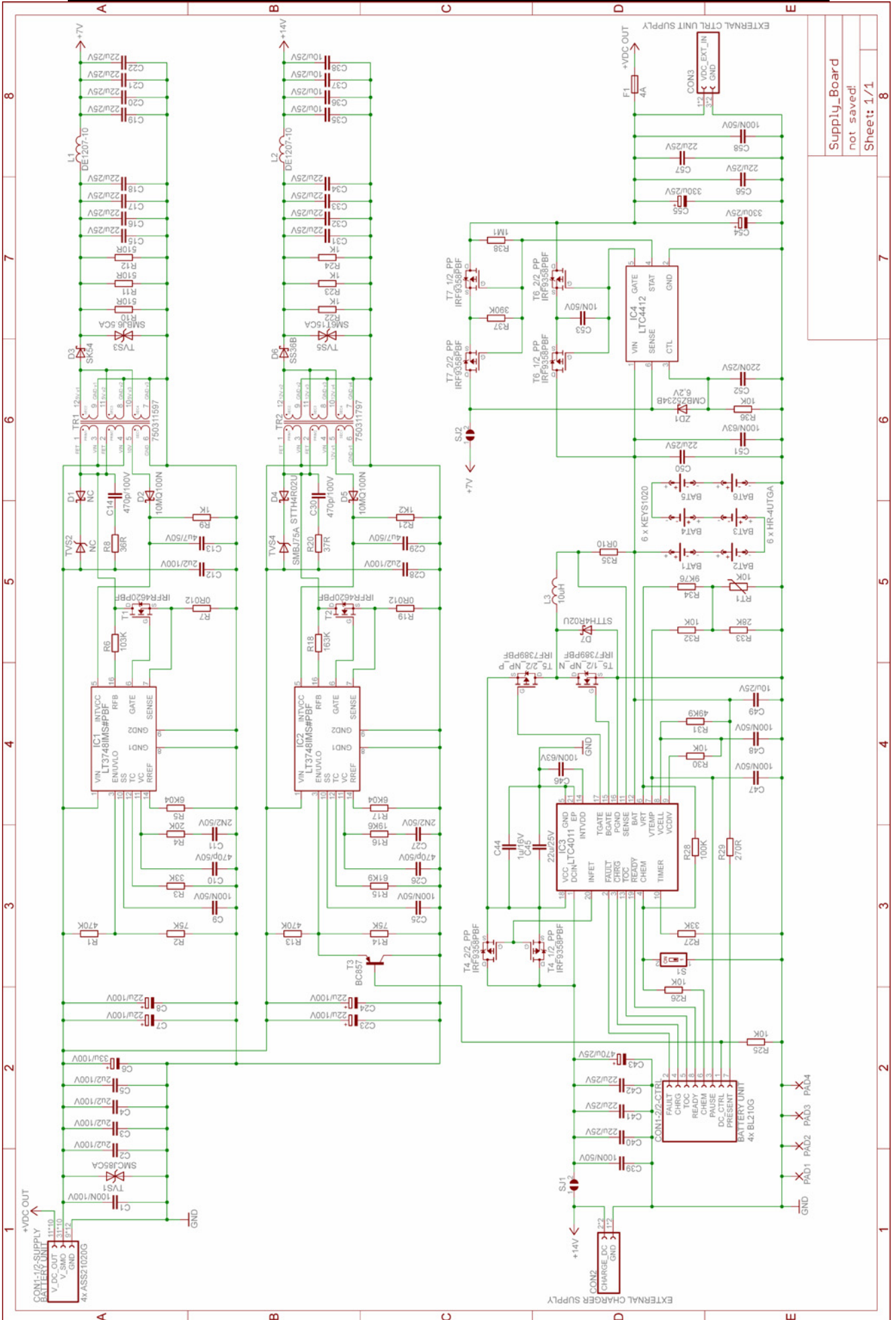
**Příloha B.7 : Řídicí jednotka – Osazená DPS – strana vrchní**



**Příloha B.8 : Řídicí jednotka – Osazená DPS – strana spodní**







Supply\_Board  
not saved!  
Sheet: 1/1

Příloha C.1 : Napájecí jednotka – Kompletní schéma zapojení

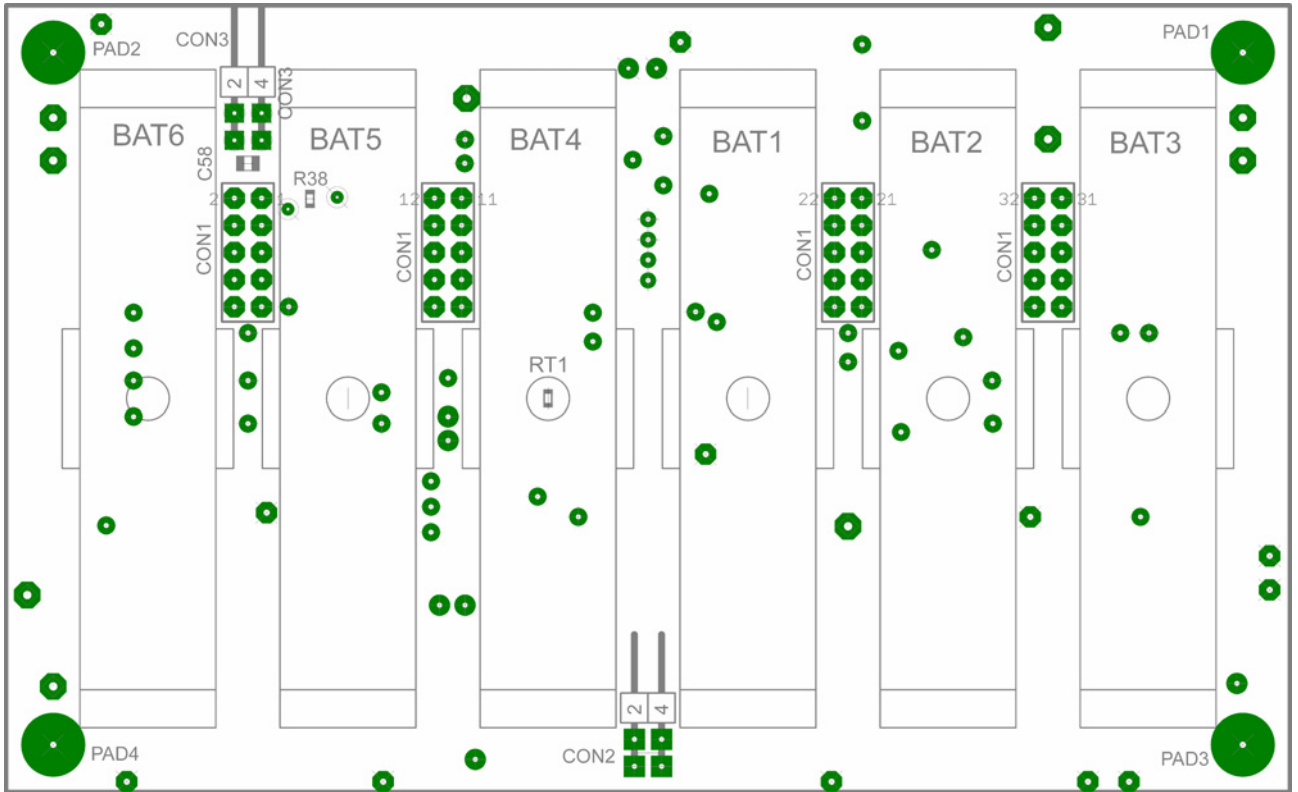
## Příloha C.2 : Napájecí jednotka – Seznam všech součástek ( 1 část )

SOUČÁSTKA	HODNOTA / TYP	POUZDRO	POPIS
R1	470 kΩ	0805	Rezistor
R2	75 kΩ	0805	Rezistor
R3	33 kΩ	0805	Rezistor
R4	20 kΩ	0805	Rezistor
R5	6,04 kΩ	0805	Rezistor
R6	103 kΩ	0805	Rezistor
R7	12 mΩ	2512	Rezistor
R8	36 Ω	2010	Rezistor
R9	1 kΩ	1206	Rezistor
R10 - R12	510 Ω	2010	Rezistor
R13	470 kΩ	0805	Rezistor
R14	75 kΩ	0805	Rezistor
R15	61,9 kΩ	0805	Rezistor
R16	19,6 kΩ	0805	Rezistor
R17	6,04 kΩ	0805	Rezistor
R18	163 kΩ	0805	Rezistor
R19	12 mΩ	2512	Rezistor
R20	37 Ω	2010	Rezistor
R21	1,2 kΩ	1206	Rezistor
R22 - R24	1 kΩ	2010	Rezistor
R25, R26	10 kΩ	0805	Rezistor
R27	33 kΩ	0805	Rezistor
R28	100 kΩ	0805	Rezistor
R29	270 Ω	0805	Rezistor
R30	10 kΩ	0805	Rezistor
R31	49,9 kΩ	0805	Rezistor
R32	10 kΩ	0805	Rezistor
R33	28 kΩ	0805	Rezistor
R34	9,76 kΩ	0805	Rezistor
R35	100 mΩ	2512	Rezistor
R36	10 kΩ	0603	Rezistor
R37	390 kΩ	0603	Rezistor
R38	1,1 MΩ	0603	Rezistor
RT1	10 kΩ	0603	Termistor NTC
C1	100 nF	1206	Keramický kondenzátor / 100V / Hmota X7R
C2 - C5	2,2 μF	1210	Keramický kondenzátor / 100V / Hmota X7R
C6	33 μF	SMD-G	Elektrolytický kondenzátor / 100V / Low ESR
C7, C8	22 μF	SMD-F	Elektrolytický kondenzátor / 100V / Low ESR
C9	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C10	470 pF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C11	2,2 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C12	2,2 μF	1210	Keramický kondenzátor / 100V / Hmota X7R
C13	4,7 μF	1206	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C14	470 pF	1210	Keramický kondenzátor / 100V / Hmota X7R
C15 - C22	22 μF	1210	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C23, C24	22 μF	SMD-F	Elektrolytický kondenzátor / 100V / Low ESR
C25	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C26	470 pF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C27	2,2 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C28	2,2 μF	1210	Keramický kondenzátor / 100V / Hmota X7R
C29	4,7 μF	1206	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C30	470 pF	1210	Keramický kondenzátor / 100V / Hmota X7R
C31 - C34	22 μF	1210	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C35 - C38	10 μF	1206	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X7R
C39	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C40 - C42	22 μF	1210	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C43	470 μF	SMD-F	Elektrolytický kondenzátor / 25V / Low ESR
C44	1 μF	0603	Keramický kondenzátor / 16V / Hmota X7R
C45	22 μF	1210	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C46	100 nF	0603	Keramický kondenzátor / 63V / Hmota X7R
C47, C48	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C49	10 μF	1206	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X7R
C50	22 μF	1210	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C51	100 nF	0603	Keramický kondenzátor / 63V / Hmota X7R
C52	220 nF	0603	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C53	10 nF	0603	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
C54, C55	330 μF	SMD-F	Elektrolytický kondenzátor / 25V / Low ESR

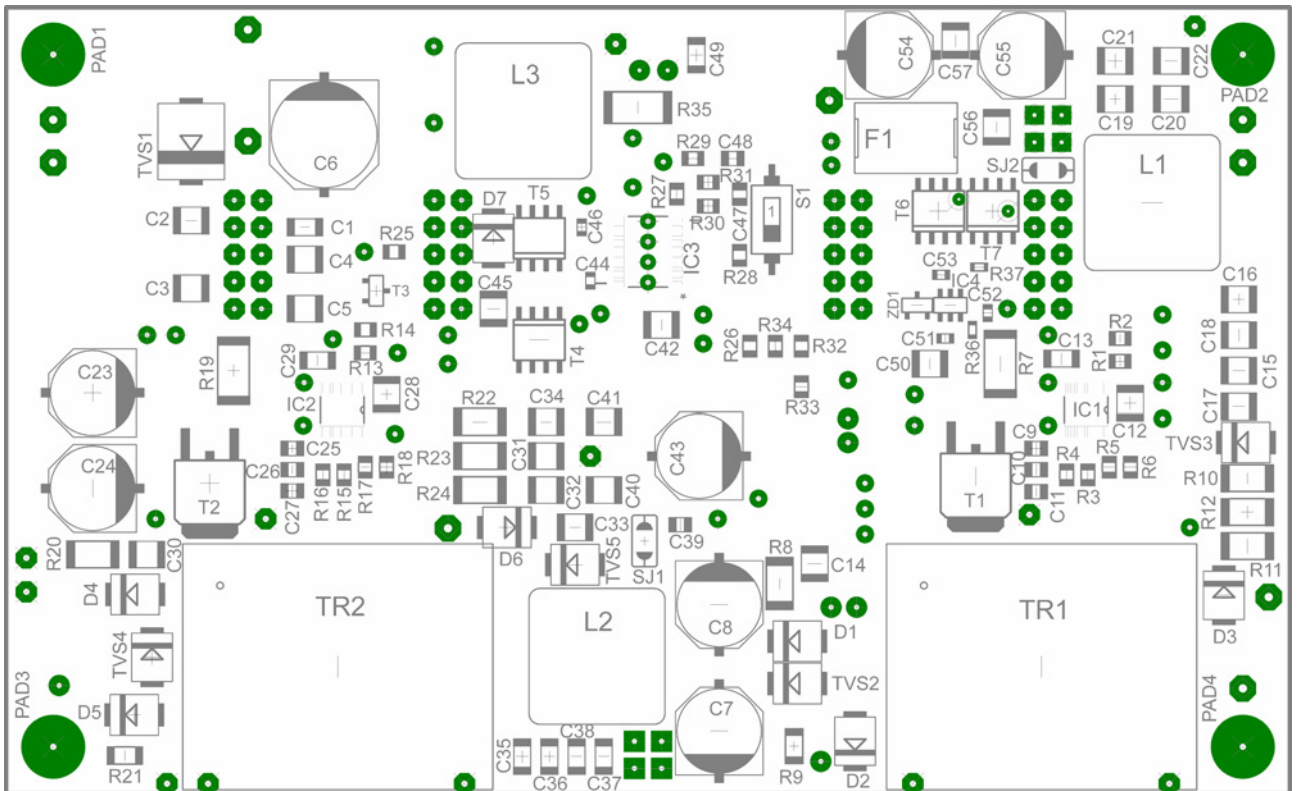
## Příloha C.2 : Napájecí jednotka – Seznam všech součástek ( 2 část )

SOUČÁSTKA	HODNOTA / TYP	POUZDRO	POPIS
C56, C57	22 $\mu$ F	1210	Keramický kondenzátor / 25V / Hmota X5R
C58	100 nF	0805	Keramický kondenzátor / 50V / Hmota X7R
L1 - L3	10 $\mu$ H	12 x 12 x 8mm	Tlumivka / DE1207-10 / 6,7A / 19m $\Omega$
D1			Dioda, není osazena
D2	10MQ100N	SMA	Dioda, schottkyho
D3	SK54	SMB	Dioda, schottkyho
D4	STTH4R02U	SMB	Dioda, schottkyho, velmi rychlá
D5	10MQ100N	SMA	Dioda, schottkyho
D6	SS36B	SMB	Dioda, schottkyho
D7	STTH4R02U	SMB	Dioda, schottkyho, velmi rychlá
ZD1	CMBZ5234B	SOT23	Zenerova dioda 6,2V
TVS1	SMCJ85CA	SMC	Transil, obousměrný
TVS2		SMB	Transil, neosazen
TVS3	SMBJ6.5CA	SMB	Transil, obousměrný
TVS4	SMBJ75A	SMB	Transil, jednosměrný
TVS5	SM6T15CA	SMB	Transil, obousměrný
T1, T2	IRFR4620PBF	TO252AA	Tranzistor, N-FET
T3	BC857	SOT23	Tranzistor, PNP
T4	IRF9358PBF	SOIC8	Tranzistor, dvojitý P-FET
T5	IRF7389PBF	SOIC8	Tranzistor, dvojitý, P-FET + N-FET
T6, T7	IRF9358PBF	SOIC8	Tranzistor, dvojitý P-FET
TR1	750311597	EFD20	Impulsový transformátor
TR2	750311797	EFD20	Impulsový transformátor
IC1, IC2	LT3748IMS#PBF	MSOP16	Integrovaný obvod, kontrolér spínaného zdroje
IC3	LTC4011	TSSOP20	Integrovaný obvod, nabíječka baterií
IC4	LTC4412	SOT23-6	Integrovaný obvod, elektronická dioda
SJ1, SJ2			Pájitelná propojka na plošném spoje
S1			1P / Spínač minidip, volba typu baterií
CON1	ASS21020G		4x lišta, dvouřadá, 10 pinů (2 x 5), výška 20mm
CON2			Lišta, dvouřadá, 4 piny, 90°, délka 15 mm
CON3			Lišta, dvouřadá, 4 piny, 90°, délka 12 mm
BAT1 - BAT6	KEYS1020		Držák baterie AAA
F1	0154004.0		Miniaturní SMD pojistka s držákem / 4,0A
PAD1 - PAD4			Pocínované otvory pro upevnění DPS

**Příloha C.3 : Napájecí jednotka – Rozvržení součástek na DPS – strana vrchní**

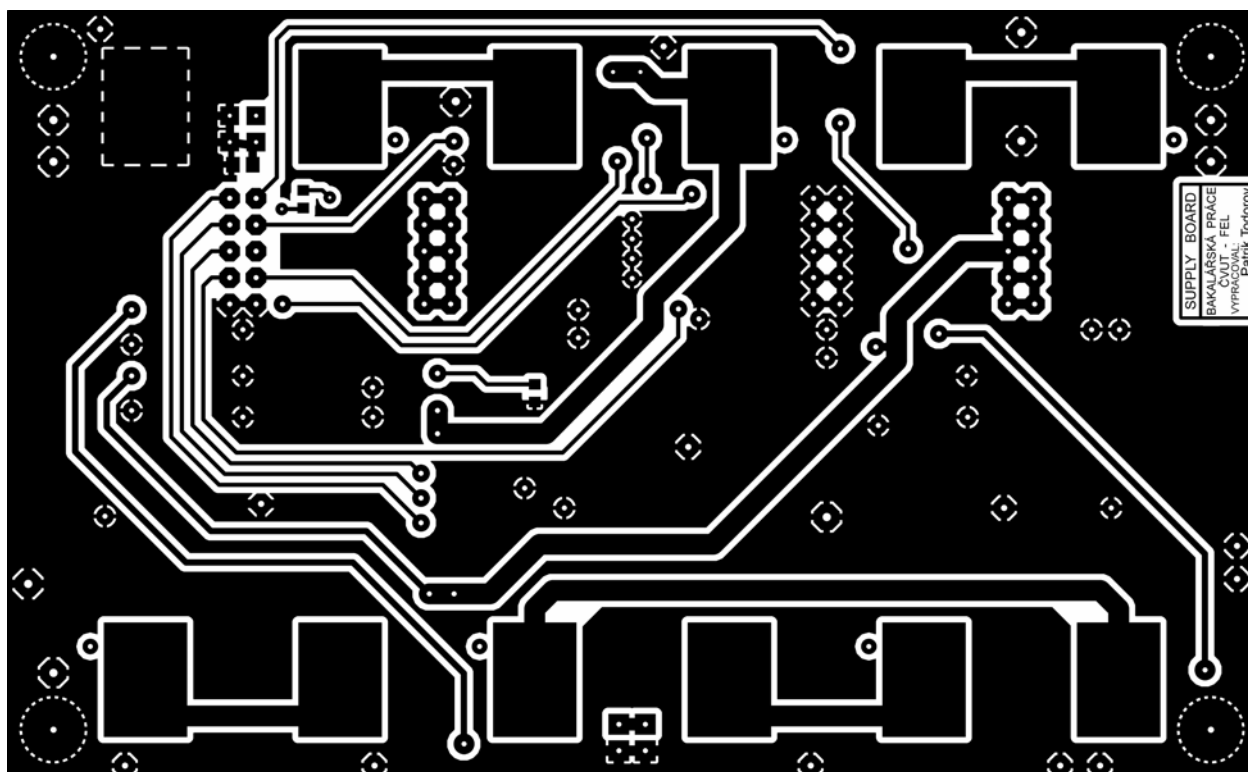


**Příloha C.4 : Napájecí jednotka – Rozvržení součástek na DPS – strana spodní**

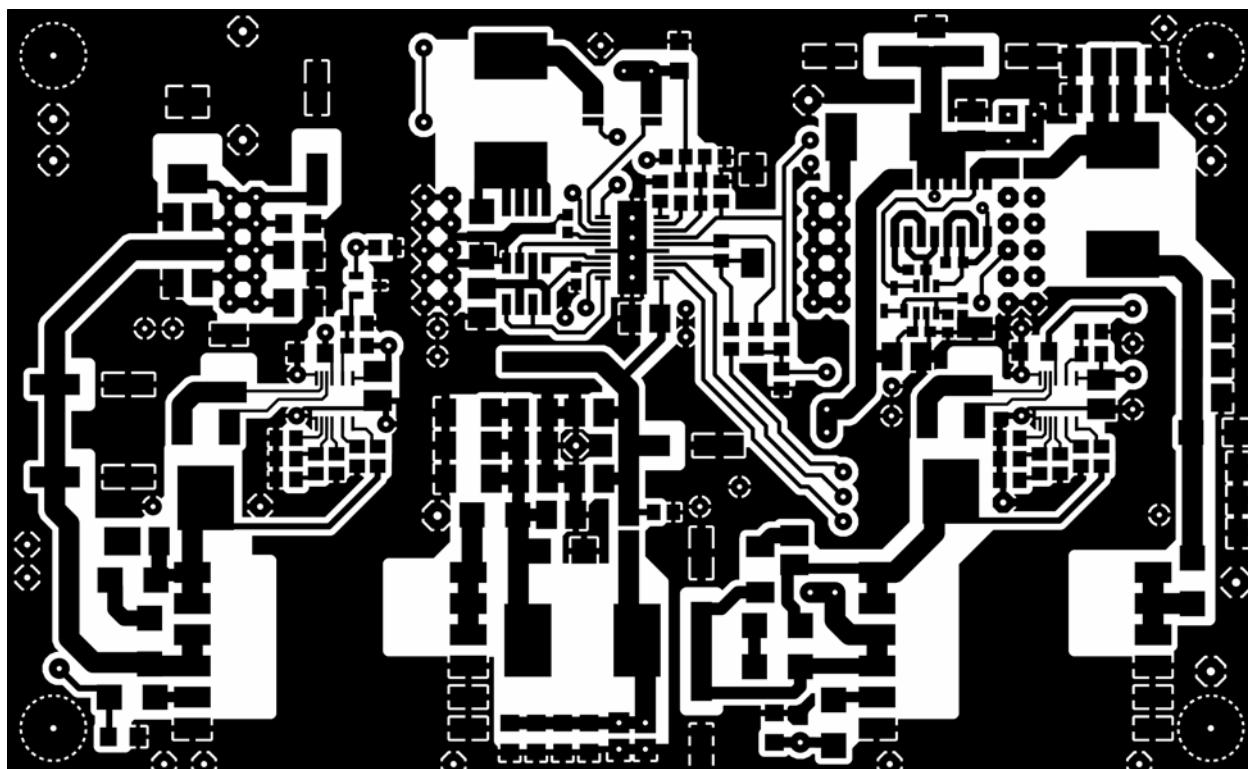




Příloha C.5 : Napájecí jednotka – Motiv pro výrobu DPS – strana vrchní



Příloha C.6 : Napájecí jednotka – Motiv pro výrobu DPS – strana spodní

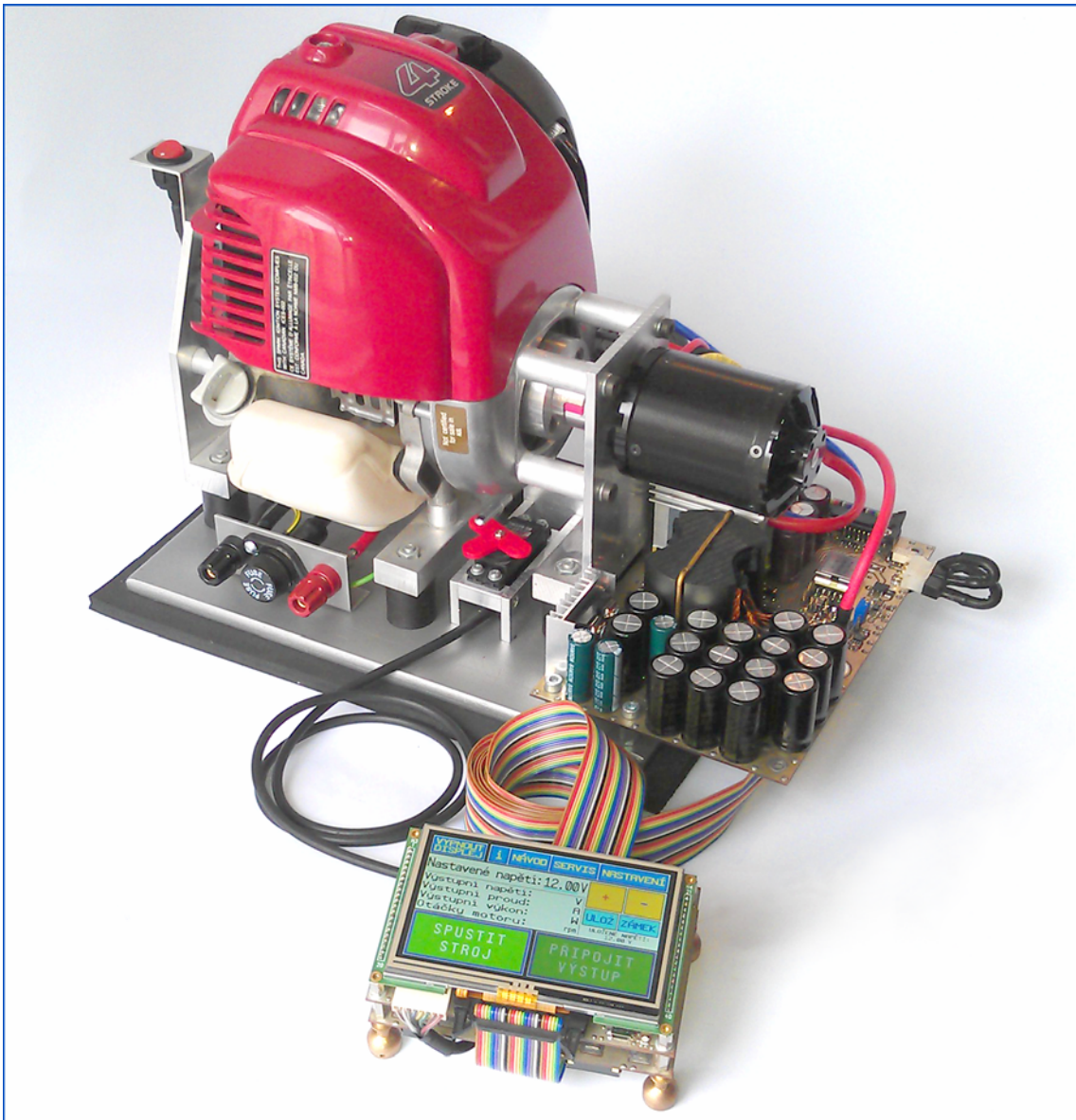








### Příloha E : Celkový pohled na prototyp agregátu



### Příloha F : Obsah přiloženého datového média DVD-R

Adresáře:

literatura – Obsahuje použitou literaturu dostupnou online.

Soubory:

prace.pdf – Tato práce uložena ve formátu PDF.