



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

TŘÍFÁZOVÝ STŘÍDAČ Z AKUMULÁTORŮ

THREE-PHASE ACCUMULATOR INVERTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Mikulka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Martin Mikulka

ID: 203293

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Třífázový střídač z akumulátorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a zkonstruuje sestavu DC/DC měniče a invertoru na jedné DPS, kdy vstupním napětím bude akumulátorové napětí (ideálně v rozsahu 12-24 V nebo 48 V). Výstupní napětí bude 3-fázové síťové napětí s možností regulace fáze v daném rozsahu. Dále bude možné regulovat výstupní napětí pro možnost práce s 120 V i s 230 V sítí. Výstupní frekvence bude taktéž regulovatelná tak, aby fungovala pro 50 i 60 Hz síťové kmitočty. Deska měniče bude externě říditelná pomocí vybrané sběrnice a bude mít přepínatelné adresy, aby na stejné sběrnici mohly být dvě nebo tři tyto DPS. Měnič bude dále obsahovat displej pro zobrazení důležitých informací jako napětí akumulátoru, jeho proud a výstupní napětí, fáze a výkony nebo proudy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 24.5.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tématem této práce je návrh měniče napětí a 3fázového střídače. Finální měnič bude schopen dodání 3fázového výstupního napětí s volitelným průběhem, primárně však harmonickým sinusovým. Měnič bude mít nastavitelné napětí (amplitudu sinusoidy) v určitém rozsahu a stejně tak i možnost drobné korekce výstupní frekvence a posunu fází tak, aby bylo možné generovat například dvou fázovou 120 V rozvodnou síť nebo jiný testovací průběh.

Klíčová slova

DC/DC měnič, 3fázový střídač, DC/AC invertor, STM32, spínané měniče, digitální řízení, ethernet, CAN, generování frekvenčních průběhů, výkonný měnič

Abstract

The topic of this work is the design of a voltage converter and a 3-phase inverter. The final converter will be able to supply a 3-phase output voltage with a selectable waveform, but primarily a harmonic sinusoidal. The inverter will have an adjustable voltage (sinusoidal amplitude) in a certain range, as well as the possibility of a small correction of the output frequency and phase shift so that it is possible to generate, for example, a two-phase 120 grid or other, test course.

Keywords

DC / DC converter, 3-phase inverter, DC / AC inverter, STM32, switched converters, digital control, ethernet, CAN, frequency waveform generation, powerful converter

Bibliografická citace

MIKULKA, M. *Třífázový střídač z akumulátorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2021. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Martin Mikulka*

VUT ID studenta: *203293*

Typ práce: *Diplomová práce*

Akademický rok: *2021/22*

Téma závěrečné práce: *Třífázový střídač z akumulátorů*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 20. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Házemu, Ph.D. za účinnou pedagogickou a odbornou pomoci a cenné připomínky ke zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Michalu Pavlíkovy, Ph. D. za cenné rady a odbornou pomoc.

V Brně dne: 20. května 2022

podpis autora

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Blokové schéma zapojení jednoduchého obvodu střídače a MPPT.....	12
Obr. 2: Obdélníkový průběh na výstupu střídače.....	13
Obr. 3: Schodovitý průběh na výstupu střídače	13
Obr. 4: Lichoběžníkový průběh na výstupu střídače	14
Obr. 5: Sinusový průběh na výstupu střídače	15
Obr. 6: Zapojení střídače typu PWM-DAC, tedy střídače s výstupním LC filtrem.....	16
Obr. 7: Zjednodušené schéma zapojení DC/DC měniče s plným můstkem.....	18
Obr. 8: Blokové schéma PID regulátoru.....	20
Obr. 9: Blokový popis mikrokontroléru STM32G474 [10]	22
Obr. 10: Blokové schéma měniče a řídicí části.....	24
Obr. 11: Komunikační rámec CAN přenosu.....	28
Obr. 12: Náhled možnosti zobrazení dat na webu Grafany [17].....	29
Obr. 13: zesílené cesty na DPS [18].....	32
Obr. 14: Rozdíl délky izolační DPS mezi DPS samotnou (A) a DPS s frézováním (B)	33
Obr. 15: Blokové schéma silové části měniče	38
Obr. 16: Blokové schéma řídicí části měniče.....	40
Obr. 17: Kompenzační obvody a náhled přenosové funkce.....	45
Obr. 18: Obvod pro stanovení přenosové funkce.....	46
Obr. 19: Zjednodušené obecné zapojení blokujícího měniče s UCC2813	47
Obr. 20: Zapojení tvarovačů a budiče GDT.....	50
Obr. 21: zjednodušený blokový diagram výstupního střídače	53
Obr. 22: Zjednodušené schéma měřicí aparatury na vysokonapěťovém bloku	57
Obr. 23: Obrázek posloupnosti měření převodníků AD	60
Obr. 24: DS18B20 zapojená k MCU v parazitním režimu operace	61
Obr. 25: Náhled webové stránky se surovými poli připravenými pro data.....	67
Obr. 26: Snímek z VNC serveru aktuální obrazovky měniče s odporovou zátěží.....	68
Obr. 27: Blokové schéma zapojení pomocného měřicího zařízení	71
Obr. 28: Zjednodušený vývojový diagram měření	72
Obr. 29: Zaznamenaná data z měření měniče v provozu	73
Obr. 30: Graf naměřeného výstupního THD na první fázi	74

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Návrh sekundárního vinutí transformátoru AUX měniče	48
Tabulka 2: Rozdělení adresy CAN standard protokolu	63

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Fotografie hotového zařízení
Příloha B: Schéma zapojení desky měniče
Příloha C: Motiv a osazovací plán desky měniče
Příloha D: Schéma zapojení řídicí desky
Příloha E: Motiv a osazovací plán řídicí desky
Příloha F: Výkresy chladičů pro desku měniče

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	7
SEZNAM TABULEK.....	7
SEZNAM PŘÍLOH.....	7
ÚVOD	10
1. ZPRACOVÁNÍ NAPĚTÍ AKUMULÁTORU, STRÍDAČE.....	11
1.1 STRÍDAČE.....	11
1.2 ZPŮSOBY GENERACE VÝSTUPNÍHO STRÍDAVÉHO NAPĚTÍ.....	15
1.3 DC/DC MĚNIČ Z AKUMULÁTORŮ NA PRACOVNÍ NAPĚTÍ.....	17
2. ŘÍZENÍ MĚNIČE A STRÍDAČŮ.....	19
2.1 ŘÍZENÍ MĚNIČE A STRÍDAČE.....	20
2.2 KOMUNIKACE S UŽIVATELEM.....	22
3. TEORIE ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT MĚNIČE	25
3.1 MĚŘENÍ PARAMETRŮ VSTUPNÍHO MĚNIČE	25
3.2 MĚŘENÍ PARAMETRŮ MEZIOBVODU	25
3.3 MĚŘENÍ PARAMETRŮ VÝSTUPNÍCH STRÍDAČŮ	26
3.4 ZPRACOVÁNÍ DALŠÍCH DAT Z MĚNIČE, PRÁCE S DATY.....	26
3.5 ZOBRAZENÍ DAT NA LCD	28
3.6 STAVOVÝ AUTOMAT MĚNIČE A REGULÁTORY PID	29
4. DĚLENÍ ZAŘÍZENÍ A NÁVRHOVÁ PRAVIDLA.....	31
4.1 DPS PRO SILOVOU ČÁST	31
4.2 DPS PRO ŘÍDICÍ ČÁST	34
4.3 ROZLOŽENÍ DPS DLE DŮLEŽITÝCH ČÁSTÍ.....	34
4.3.1 <i>Silové vedení na DPS.....</i>	35
4.3.2 <i>Vysoké napětí na DPS.....</i>	35
4.3.3 <i>Datové sběrnice na DPS.....</i>	36
4.3.4 <i>Blokové schéma silového měniče</i>	36
4.3.5 <i>Blokové schéma řídicí části.....</i>	38
4.4 ODDĚLENÍ DIGITÁLNÍ KOMUNIKACE.....	40
4.4.1 <i>Rozhraní CAN.....</i>	40
4.4.2 <i>Rozhraní USB – VCP.....</i>	41
4.5 RYCHLÉ SBĚRNICE NA DPS, NÁVRHOVÁ PRAVIDLA	41
4.5.1 <i>Připojení LCD panelu.....</i>	41
4.5.2 <i>Propojení paměti na DPS</i>	42
4.5.3 <i>Vedení diferenciálních párů na DPS – ethernet, USB</i>	42
4.5.4 <i>Rychlé sériové sběrnice – SD karta</i>	42
4.5.5 <i>Rozdělení periferií na MCU dle místa vývodu</i>	43
4.6 NAPÁJENÍ ŘÍDICÍ DPS A LCD.....	43
4.7 NAPÁJENÍ SILOVÉ DPS – AUX ZDROJ.....	44
5. NÁVRH ZDROJOVÝCH ČÁSTÍ DPS	45
5.1 KOMPENZAČNÍ OBVODY	45

5.2	NÁVRH AUX ZDROJE	46
5.2.1	<i>Topologie a základy zapojení</i>	47
5.2.2	<i>Návrh transformátoru</i>	48
5.2.3	<i>Návrh chlazení měniče</i>	49
5.3	NÁVRH SILOVÉHO MĚNIČE	50
5.3.1	<i>Návrh silového transformátoru</i>	51
5.3.2	<i>Návrh pracovní indukčnosti</i>	52
5.3.3	<i>Stanovení ztrát pro návrh chlazení</i>	52
5.4	NÁVRH VÝSTUPNÍHO BLOKU STRÍDAČE	53
5.4.1	<i>Návrh výstupních indukčností</i>	54
5.4.2	<i>Stanovení ztrát pro návrh chlazení</i>	55
5.4.3	<i>Shrnutí ztrát v obvodu, volba chladiče</i>	55
6.	NÁVRH MĚŘICÍCH ČÁSTÍ DPS	57
6.1	MĚŘENÍ PROUDU NA VN STRANĚ	58
6.2	MĚŘENÍ PROUDU AKUMULÁTORU	58
6.3	MĚŘENÍ VYSOKÉHO VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ A NAPĚTÍ MEZI OBVODU	58
6.4	MĚŘENÍ VSTUPNÍHO NAPĚTÍ AKUMULÁTORU	59
6.5	ROZDĚLENÍ PŘEVODNÍKŮ AD Z HLEDISKA PROCESU MCU	59
6.6	MĚŘENÍ TEPLoty MĚNIČE	60
7.	SPRÁVA DAT MĚNIČE A FIRMWAROVÁ OBSLUHA.....	62
7.1	PROPRIETÁRNÍ PROTOKOL CAN.....	63
7.2	DATOVÁ PROPUSTNOST SBĚRNICE CAN.....	63
7.3	POUŽITÍ SYSTÉMU RTOS.....	64
	TERMINÁL NA SÉRIOVÉ LINCE	65
7.4	65
7.5	SOUBOROVÝ SYSTÉM A UKLÁDÁNÍ DAT	65
7.6	ETHERNET A WEBOVÁ STRÁNKA	66
7.7	LCD A OVLÁDACÍ OBRAZOVKY.....	67
8.	MĚŘENÍ VÝSTUPŮ MĚNIČE	70
8.1	MĚŘENÍ PARAMETRŮ MĚNIČŮ A JEJICH LADĚNÍ	70
	TESTOVACÍ PROVOZ A ZÁTĚŽOVÉ TESTY	72
8.2	72
9.	ZÁVĚR.....	75
9.1	PLÁNY DO BUDOUCNA.....	76
	LITERATURA.....	78
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	81

ÚVOD

Cílem této práce je návrh a realizace zařízení sloužícího pro transformaci elektrické energie z akumulátorové banky domácí solární elektrárny na třífázové síťové napětí, které je použitelné k pohonu běžných elektrických spotřebičů, nebo jejich testování. Výsledné zařízení je použitelné ke generování výstupních napětí harmonických průběhů i průběhů složených z více harmonických složek. Zařízení je dále možné provozovat s různými výstupními parametry, jako je napětí a proud, frekvence výstupního signálu či fázové zpoždění mezi jednotlivými fázemi. Díky těmto vlastnostem je zařízení velmi flexibilní z hlediska možnosti napájení různých zařízení nebo jejich testování.

Výstupní průběhy napětí, či proudu, jsou nastavitelné uživatelem pomocí speciálních před generovaných look-up tabulek. Dále i jejich frekvence je uživatelem nastavitelná v zajišťujícím rozsahu pro testování spínaných měničů, ale i zařízení pro správu rotačních generátorů, včetně jejich fázového souběhu, a to díky možnosti nastavení pozice fáze na jednotlivých výstupních fázích. Nastavení probíhá pomocí uživatelské konzole, za pomoci dotekového panelu a na lokálním webu hostovaném na řídicím panelu. Jednotlivé informace o aktuálním stavu měniče jsou pro uživatele zobrazeny na LCD panelu a také na zmíněné webové stránce.

Celé zařízení se skládá celkem ze dvou částí, části měniče a řídicí části sloužící pro komunikaci s uživatelem a měničem samotným. Řídicí část zařízení obsahuje uživatelské periferie pro připojení k počítači, nebo do sítě internetu (lokální webhost), LCD panelu a také možnost připojení například SD karty pro přenos dat. Dále je na desce měniče k dispozici možnost připojení sériového terminálu, pro možnost omezeného ovládání i bez řídicí části, kde by tento terminál měl sloužit zejména při operaci měniče bez řídicí DPS. Řídicí část umožňuje připojení více měničů najednou, kdy je schopna zajistit jejich synchronizaci pomocí samostatného vedení. Mimo měničů je k řídicí části možno připojit i několik dalších zařízení používající kompatibilní proprietární protokol, jako jsou například MPPT měnič nebo hlídač životnosti a stavu akumulátoru, nicméně tyto zařízení nejsou součástí této práce.

1. ZPRACOVÁNÍ NAPĚTÍ AKUMULÁTORU, STŘÍDAČE

Solární panely generují stejnosměrné napětí, které je obvykle ukládáno do akumulátorů, kde se následně s touto uloženou energií pracuje. Akumulátory na vysoké napětí by byly značně drahé a zpracování energie by se posléze prodražilo a bylo neefektivní, z toho důvodu se do obvodu mezi solární panely a akumulátory vkládá jistá forma měniče, například MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) měnič, jež napětí z akumulátorů sníží na napětí nízké, které je následně ukládáno do akumulátorové banky. Nízké napětí akumulátorů, které je navíc stejnosměrného charakteru, je ovšem nevhodné pro většinu spotřebičů a je tedy potřeba jej dále zpracovat. Většina dnešních spotřebičů potřebuje vstupní napětí sinusového charakteru, jehož amplituda a kmitočet se může lišit podle země. V České republice je používáno fázové napětí s efektivní hodnotou 230 V při kmitočtu 50 Hz a celkem třemi fázemi, které mají vzájemně posunutou fázi o 120 °.

Jednoduché střídače, jež jsou poměrně dobře dostupné a používané například v záložních zdrojích, často používají výstup typu obdélníku nebo tvaru „schodů“, kde tyto průběhy částečně nahrazují funkce střídavého sinusového průběhu a pro většinu zařízení je taková náhrada bezproblémová. Tyto jednoduché střídače mají možnost vynechání výstupního můstku, který by se staral o vzorkování sinusového průběhu. Namísto něho používají vzorkování přímo spínáním primárního vinutí plechového transformátoru. Tohle řešení je levné a poměrně malé, co se konstrukce týče, nicméně je nevhodné pro zařízení spoléhající na sinusový signál jako je například motor nebo jiná zátěž s indukčním charakterem. Další problém je se zaneseným rušením do jeho výstupu, díky vyšším harmonickým složkám z obdélníkového signálu a tím jsou nevhodné pro další zařízení.

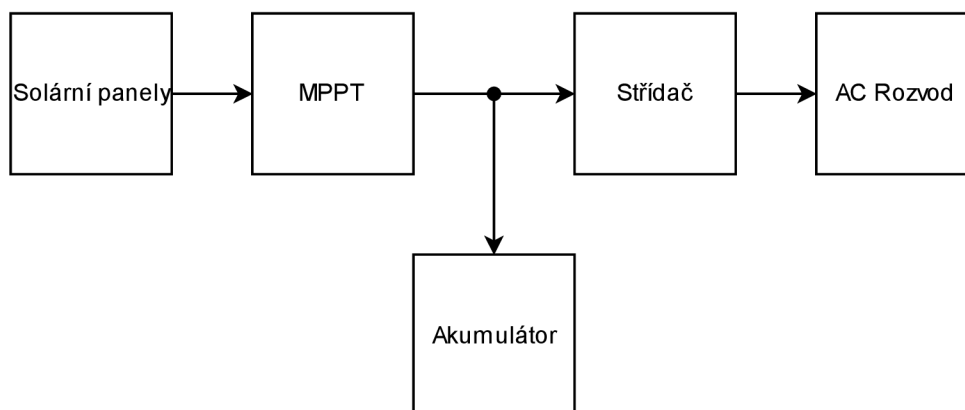
Střídače, které na výstupu tvoří čistý sinusový signál, jsou pak používány pro solární měniče velkých výkonů, kde je energie vracena do sítě. Tyto střídače poté zajišťují vše potřebné pro provoz jakéhokoli zařízení, čímž jsou příliš drahé a zároveň jsou omezeny na danou lokalitu, díky jejich konfiguraci výstupních napětí a kmitočtech. Bohužel kvůli jejich modulaci čistého sinu jsou také obvykle nákladné.

1.1 Střídače

Existuje několik typů střídačů dělených dle jejich základního principu operace. Tyto typy jsou síťové, hybridní a střídače pro ostrovní systémy.

Síťové střídače, nebo také on-grid střídače, jsou přímo propojeny se sítí, kterou používají pro synchronizaci a bez ní nemohou pracovat, tedy při výpadku sítě se vypnou i tyto střídače. Obvykle jsou navíc vybaveny tzv back-up režimem, kdy do vybrané větve jsou schopny generovat sinusoidu i při výpadku sítě. Jedná se o funkci podobnou UPS, kdy pro vybrané zásuvky je zajištěna dodávka elektrické energie i při výpadku sítě.

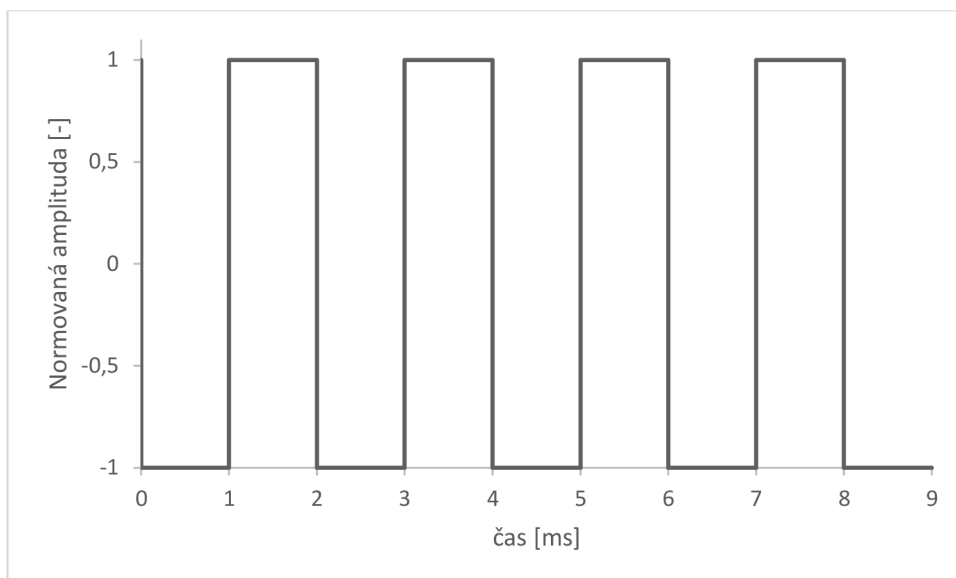
Hybridní střídače pracují po většinu času s energií napřímo, tedy pokud je to možné tak dodávají energii ze solárů, pokud to možné není, tak ze sítě. Energie jimi může téct oběma směry a do akumulátorů ji ukládají jen v nezbytné chvíle, obvykle tedy spojují funkci MPPT a střídače dohromady [1].



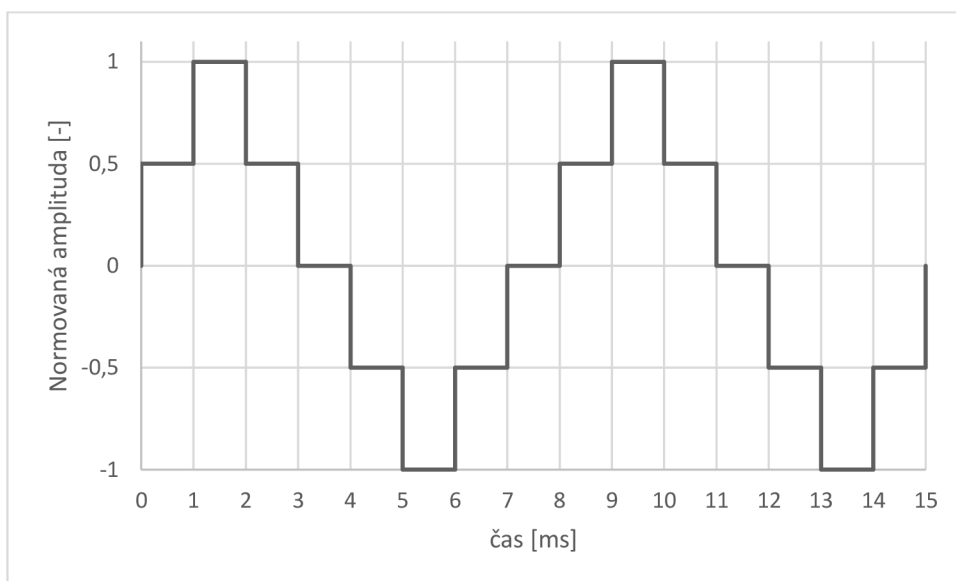
Obr. 1: Blokové schéma zapojení jednoduchého obvodu střídače a MPPT

Střídače pro ostrovní systémy operují pouze se solárními panely a svou akumulátorovou bankou a nemohou být připojeny k rozvodné síti. Jejich uplatnění je tedy výhradně v místech, kde není možné se k rozvodné síti připojit a obvykle s sebou nesou nutnost použití většího množství panelů z důvodu nutnosti pokrytí celé spotřeby připojeného odběru, díky čemuž jsou obvykle stavěny na velké výkony. Tyto měniče jsou obvykle značně robustní a zvládnou poměrně velké přetížení po dobu i několika sekund.

Střídače je dále možno dělit dle tvaru výstupního signálu, rozdělení je poté na střídače s obdélníkovým průběhem napětí, střídače s lichoběžníkovým výstupním napětím, střídače s čistým sinem a poté ostatní střídače (se schodovitým průběhem nebo spojitostí vybraných harmonických složek). Střídač s obdélníkovým průběhem je dostatečný pro zařízení, které mají na vstupu usměrňovací můstek, například spínané zdroje nebo jednoduché spotřebiče typu LED žárovka, nebo nejsou nijak zvláště závislé na vstupním signálu, tedy například odporové zátěže, jako jsou žárovky nebo topná tělesa. Značnou nevýhodou takového napětí je také nemožnost měření spotřeby jeho zátěží pomocí běžných elektroměrů. Běžné elektroměry jsou totiž navrženy pro operaci v režimu střídavého signálu s přepočtem RMS hodnoty, která ale u obdélníkového signálu nevyjde. Další nevýhodou je také nestabilita fáze, kdy při vícefázové soustavě je takový měnič nutno řídit fázově, nikoli napěťově [2].

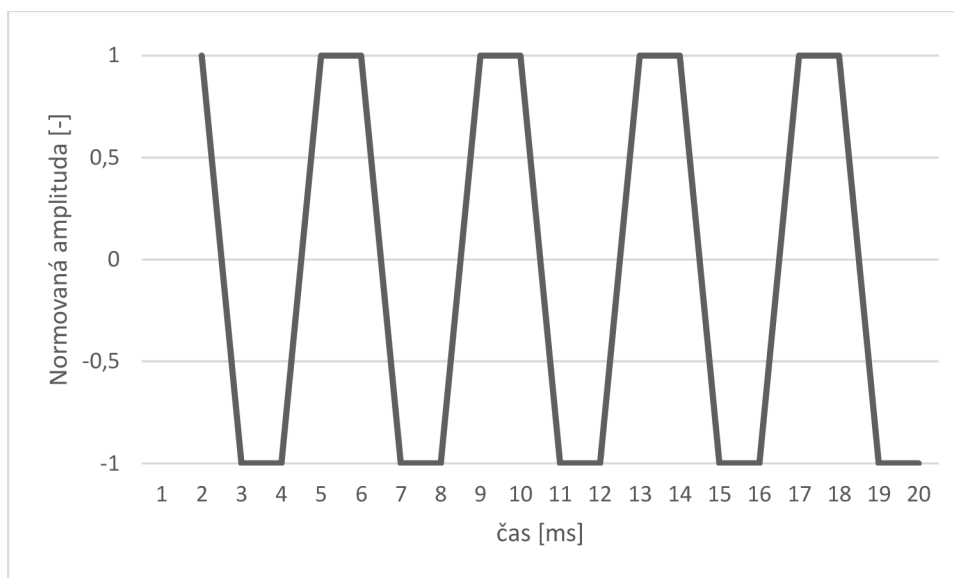


Obr. 2: Obdélníkový průběh na výstupu střídače



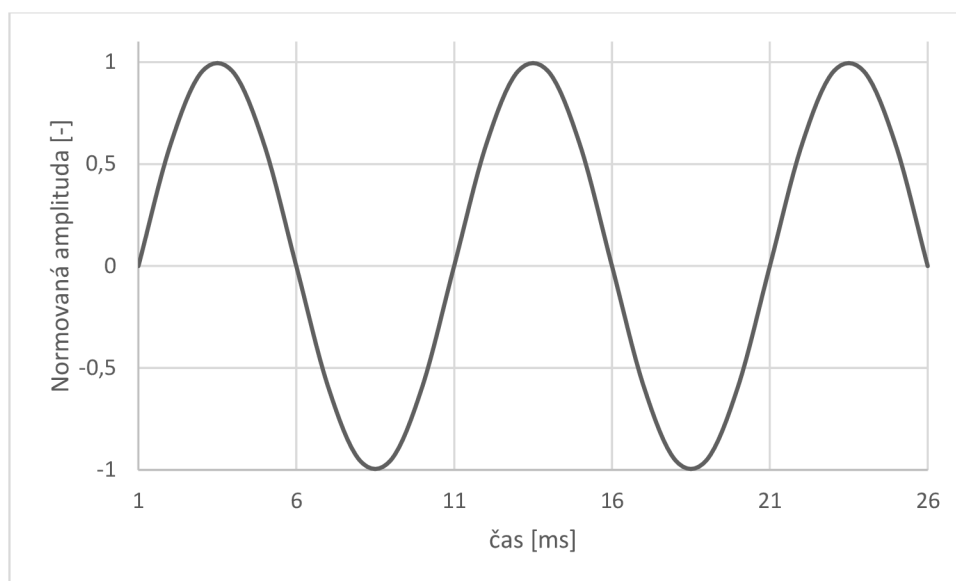
Obr. 3: Schodovitý průběh na výstupu střídače

Střídač s lichoběžníkovým průběhem je již o něco šetrnější, jeho výstupní signál je vhodný i pro měření běžnými elektroměry, nicméně fázové řízení zůstává, a navíc přibývá složitější měření proudu obvodu, které je pro přesné měření nutno integrovat, nikoli pouze vypočítat ze znalosti maxima. U tohoto průběhu navíc nastává i složitější vzorkování, kde pouze poloha zapnuto a vypnuto při kmitočtu 50 Hz již není dostačující, ale je potřeba vyšší vzorkovací kmitočet pro tvorbu hrany lichoběžníkového signálu. Druhá možnost tvorby této hrany je nastavení velkého dead-time na tranzistorech, kde při dlouhém intervalu rozepnutí bude čerpána energie z jádra magnetika (indukčnosti), která postupně klesá a tím generuje sestupnou hranu lichoběžníku.[3] Při opětovném nabíjení působí indukčnost jako záložní zdroj energie, který se postupně dobíjí a tím generuje náběžnou hranu. Velkou roli zde tedy hraje i vlastní impedance v plechovém transformátoru, sloužící jako zmíněný magnetický obvod.



Obr. 4: Lichoběžníkový průběh na výstupu střídače

Střídače s čistým sinusovým výstupem jsou již konstruované na principu DA převodníku, kdy výstupní část vzorkuje výstupní signál sinusového charakteru pomocí vysokých kmitočtů (násobně vyšší než kmitočet sinusového signálu), kde výstupní signál následně prochází přes filtr, který výsledný signál zkusí do podoby sinusoidy. U těchto měničů nastává problém s měřením výstupních proudů i napětí, jelikož je potřeba integrovat celou periodu signálu. Zároveň je nutné zajistit vhodné vzorkování a tím i výstupní prvky, jež se o vzorkování starají (tranzistorový můstek aj.). K řízení takového střídače již nestačí pouze klopné logiky, ale je nutná paměť se sinusovým průběhem a jeho tvorba změnou výstupních parametrů periodicky se signálem. V neposlední řadě nastává komplikace s řízením výstupních parametrů, kdy fázor napětí a proudu je potřeba měřit a řídit tak, aby při různých zátěžích jednotlivé části plně odpovídaly požadovanému průběhu, tedy sinusoidě, proti čemuž stojí výstupní filtr.[4]



Obr. 5: Sinusový průběh na výstupu střídače

1.2 Způsoby generace výstupního střídavého napětí

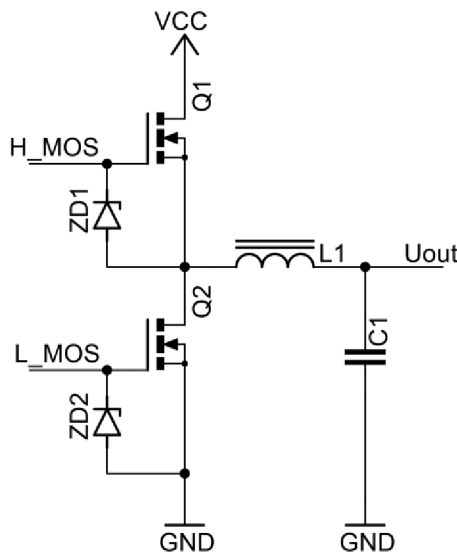
Jelikož vstupním napětím měniče je obvykle napětí akumulátorů, případně přímo solárního panelu, pokud to měnič umožňuje, je nutné zajistit přeměnu DC napětí na výstupní AC napětí. Levnější měniče mívají na výstupu obdélníkový signál, nebo signál tvaru lichoběžníku, což není nejvhodnější varianta pro všechny zařízení, nicméně není potřeba žádného tvarovače na výstupu, díky čemuž je takový střídač velmi levný. Oproti tomu při potřebě čistého sinusového signálu na výstupu je nezbytné zařazení nějakého tvarovače, či DA převodníku s velkým výkonem na výstup.[5] Za tímto účelem lze použít několik variant, jako jsou například tranzistorový můstek spínající primární vinutí transformátoru starající se o generaci vysokého výstupního napětí, nebo tranzistorové polomosty spínající energii do výstupního filtru, kde bude daný sinusový signál tvořen. Při spínání pouze primárního vinutí transformátoru je problém s různými zátěžemi, kdy výstupní signál není možné přesněji regulovat a díky vysoké indukčnosti sekundárního vinutí transformátoru dochází k fázovým posuvům, jejichž velikost závisí na velikosti zátěže a jejím charakteru. Problém je také se zajištěním výkonového spínání primárního napětí, kdy pro zajištění čisté sinusoidy je potřeba vyšší spínací kmitočet pro zajištění dostatku vzorků na periodu signálu, kdy vysoký kmitočet a vysoký proud malého DC napětí je velmi náročné na spínací tranzistory a jejich řízení a chlazení [6].

Vzorkování sinusoidy do výstupního LC filtru s sebou nese několik nevýhod zejména s přesností výstupního signálu. Tlumivka v tomto filtru se chová jako pracovní indukčnost snižujícího měniče, díky čemuž je nutné přivést již zvýšené napětí o velikosti minimálně amplitudy výstupního signálu. Jelikož na pracovní tlumivce musí být určitý napěťový úbytek, aby měla s čím pracovat, je nutné počítat i s tímto napěťovým úbytkem

a zajistit vstupní napětí o tento úbytek vyšší. Při těchto potřebách je patrné, že potřebné napětí pro běžnou síť 230 V je poměrně vysoké, pohybovat se může bez problému u hranice 700 V a více. Díky nutnosti takto vysokého napětí a následným ztrátám na měničích a filtrech je patrné, že účinnost takového měniče poměrně klesá, nicméně jelikož se jedná o spínané měniče, je možné s energií pracovat poměrně opatrně a účinnost je možné udržet ve vyšších procentech.

Výstupní filtr lze zapojit i jako obousměrný měnič s možností práce jako zvyšovač i snižovač, nicméně takové zapojení bude znamenat použití dvou tranzistorů na filtru navíc, což je při třífázovém měničích již poměrně znát hlavně z pohledu řízení. Takové zapojení je ovšem nezbytné v případě, kdy je potřeba operace měniče v obousměrném režimu, tedy v režimu práce nejen s akumulátory, ale také se sítí.

Jinou možností pro snížení nároků na vysoké napětí pracovního obvodu je vzorkování výstupního signálu na dvou stranách vedení, tedy vzorkování pomocí plného můstku do dvou vodičů, kde po prohození jejich polarity je možno vzorkovat druhou půlperiodu signálu se stejným napětím jako půlperiodu předešlou. Tímto způsobem lze dosáhnout výstupní amplitudy běžného 230 V signálu již při napětí pod 400 V a tím značně zvýšit efektivitu. Nevýhodou tohoto zapojení je opět nutnost použití dalších tranzistorů a také vyšší složitost následného propojení fází tak, aby tvořily korektní třífázovou soustavu. Řízení takového měniče bude tedy značně složitější, nicméně se výrazně zvýší efektivita měniče a sníží se nároky na vstupní DC/DC měnič a tím i pracovní proud akumulátorů.[7]



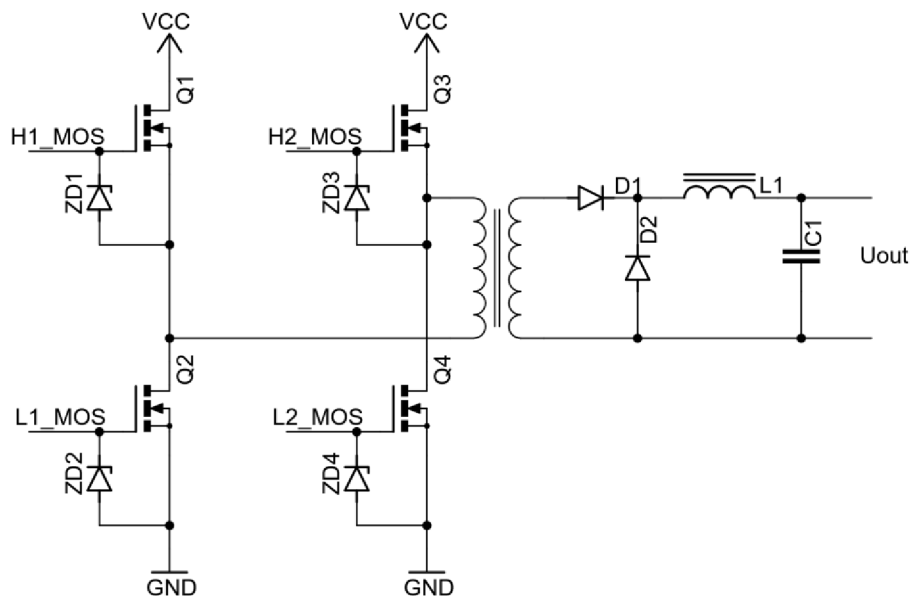
Obr. 6: Zapojení střídače typu PWM-DAC, tedy střídače s výstupním LC filtrem

1.3 DC/DC měnič z akumulátorů na pracovní napětí

Jak již bylo zmíněno, pro správnou funkci střídače s výstupním LC filtrem, je nutné zajistit vysoké vstupní napětí, tedy napětí odpovídající minimálně amplitudě výstupního napětí a pracovnímu napětí na výstupní indukčnosti. K zajištění takového napětí při dostatečně vysokém výkonu výstupního signálu je nutné použití měniče s plným můstkem, tedy můstkem tvořeným čtyřmi tranzistory spínající primární vinutí transformátoru. Tento měnič musí být schopen dodat pracovnímu obvodu (dále meziobvod) dostatečně vysoké napětí o dostatečném výkonu. Meziobvod musí být navíc schopen udržet i jisté přetížení z důvodu nízké efektivity výstupního sinusového signálu, který odpovídá pouze přibližně 63 % výkonu stejnosměrného napětí o velikosti amplitudy daného sinusového signálu. Díky tomuto faktu je nutné, aby daný DC/DC měnič byl schopen pokrýt výkonovou spotřebu zvýšenou i o tuto část.

Pokud by daný měnič měl fungovat obousměrně, bylo by nutné zajistit plný spínací můstek na obou stranách transformátoru a tím zajistit možnost práce s vysokým vstupním napětím ze strany sítě i s nízkým napětím z akumulátorů. Takový měnič by opět vnesl další část problematiky do řízení, jelikož by bylo nutné zautomatizovat rozpoznání výpadku sítě a dostatečně rychlého přepnutí režimu práce měniče, ale stejným způsobem i zpětně určit, kdy je potřeba použít vstupní síťové napětí k provozu spotřebičů a solární panely nechat nabíjet akumulátory nebo je odpojit úplně z důvodu neefektivity (například v noci nebo při jinak zastíněných panelech).

Koncepci takového měniče je možno vzít z více funkčních pohledů. Pro nižší výkony nižších jednotek kW je možné dva ze spínacích tranzistorů v můstku nahradit resetovacími diodami a pracovat pouze se dvěma diagonálně umístěnými tranzistory. Takovou úpravou obvodu měniče je snížena možnost spínání energie do zátěže při výkonových operacích. Ziskem je naopak úbytek dvou tranzistorů z BOM (*Bill Of Materials*), a tedy i náklady na konstrukci. Zároveň je snížena i náročnost řízení měniče, jelikož nyní jsou oba diagonálně umístěné tranzistory spínány najednou a není tedy potřeba řešit dvojí spínání a dead-time. Obě formy těchto měničů, tedy měnič s plným můstkem i s diagonálním polomostem, pracují v topologii propustného měniče a je tedy potřeba jim zajistit pracovní indukčnost, jelikož energie není v jádře transformátoru uchovávána. Tomu se lze vyhnout, pokud bude měnič navržen v topologii DC/DC měniče s pevným převodem. Takový měnič pracuje po většinu doby své práce při střídě blízké 50 % a je nutné zajistit stabilitu vstupního napětí tak, aby nekolísalo příliš. Pro takový měnič je poměrně vhodné použití vstupu právě z akumulátorů. Výstupní napětí akumulátoru je díky nízkému vnitřnímu odporu stabilní při velkém rozsahu velikosti zátěže a zároveň jejich napětí příliš neklesá ani při jejich vybíjení. [8] Značně vhodné pro tyto účely je použití například LiFePo4 akumulátorů, nebo jiných lithiových, případně NiMh či NiCd používaných například pro letecký průmysl.

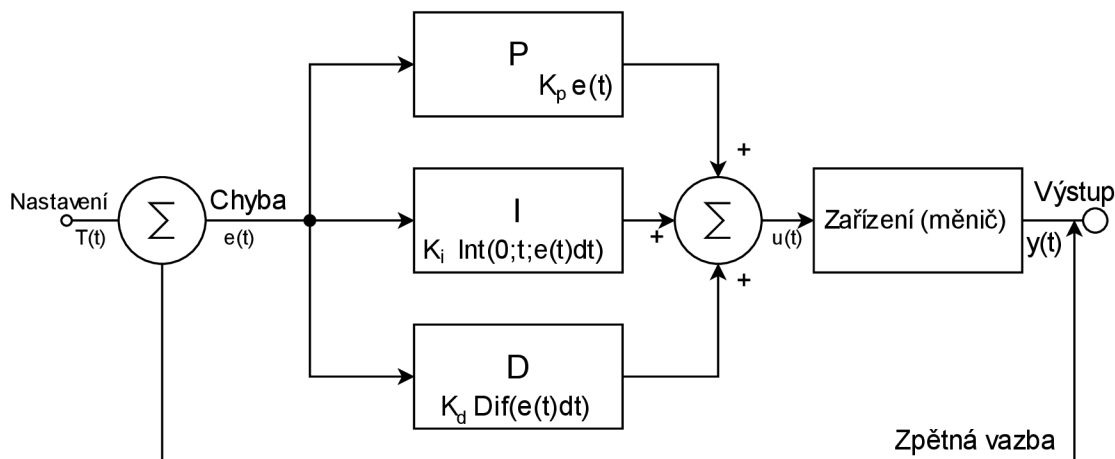


Obr. 7: Zjednodušené schéma zapojení DC/DC měniče s plným můstkem

2. ŘÍZENÍ MĚNIČE A STRÍDAČŮ

Řízení DC/DC měniče lze zajistit analogovými kontroléry, které jsou komerčně dostupné právě pro tyto účely, nicméně pro tvorbu výstupního sinusového signálu s možností změny jeho amplitudy, fáze či kmitočtu prakticky neexistuje komerční varianta kontroléru, který by se o takovou část staral. Řízení lze udělat kompletně samostatně poskládané z analogové logiky se sinusovým oscilátorem s měnitelným zesílením a kmitočtem. Takový generátor by tvořil referenci pro analogový měnič starající se o generaci výstupního napětí. Logika takového měniče je již sama o sobě značně složitá a nutnost zajištění stability a přesnosti je velmi rozsáhlou studií. Jinou variantou je použití mikrokontroléru, FPGA či jiného programovatelného, nebo konfigurovatelného kontroléru, který zajistí tyto funkce poměrně snadno. Dostupné mikrokontroléry jsou dostatečně výkonné pro zajištění obsluhy DC/DC měniče i třífázového střídače spolu s komunikací s okolními částmi, jako například uživatelskou konzolí a je tedy možné je pohodlně použít.[9] Mikrokontroléry mají navíc nemalé množství integrovaných periférií, které lze pro účely měniče velmi vhodně využít, těmito perifériemi jsou například hardwarově akcelerovaná aritmeticko-logická jednotka pro práci s čísly s plovoucí desetinou čárkou (dále FPU), velké množství analogových vstupů do převodníků AD a do analogových komparátorů, nebo také řada časovačů s různě konfigurovatelnými výstupy.

V měniči je potřeba zajistit řízení výstupního signálu tak, aby tvořil korektní výstup pro třífázovou rozvodnou síť. K zajištění této části je nutné stanovit vhodné regulační prvky, jako jsou PID regulátor a vhodné snímání jednotlivých veličin obvodu, jako aktuální vstupní a výstupní napětí a vstupní a výstupní proud. Snímání těchto veličin a reakce na ně je potřeba zajistit dostatečně rychle, aby nedošlo k velkému harmonickému zkreslení na výstupu vlivem čekání na aktualizaci časovače starajícího se o tvarování výstupního signálu. K tomuto účelu je vhodně použitelná periférie DMA, která se stará o přenos dat mezi periférií a pamětí mikrokontroléru, nebo mezi dvěma pamětmi bez toho, aby daný přenos muselo obsluhovat jádro daného mikrokontroléru.



Obr. 8: Blokové schéma PID regulátoru

2.1 Řízení měniče a střídače

Řízení měniče bude zajišťovat mikrokontrolér, který se bude mimo řízení měniče starat také o měření jednotlivých veličin pro uživatelské rozhraní. Mikrokontrolér musí splňovat několik náležitostí, aby byl pro tuto aplikaci použitelný. Jednou z těchto náležitostí je nutnost obsahu periferie časovače pro řízení DC/DC měniče, časovače pro vzorkovač výstupního signálu a časovač pro spouštění interních částí ve správné sekvenci. Uváží-li se obousměrný hybridní měnič rozdělený na část DC/DC měniče a vzorkovače samostatně, poté je potřeba ještě další časovač pro výstupní můstek tranzistorů na sekundární straně transformátoru.

Daný mikrokontrolér musí také obsahovat periferie převodníků AD pro snímání jednotlivých veličin, nebo komunikační periferie jako je I2C či SPI pro komunikaci s externími převodníky AD. Pro DC/DC měnič je nezbytné použít minimálně dva tyto převodníky, aby bylo možné měření vstupního a výstupního napětí, potažmo proudu v jednu chvíli. Další tři převodníky jsou nutné pro měření výstupních parametrů u jednotlivých fází. Tyto části se dají případně spojit dohromady a celkově tedy mikrokontrolér musí obsahovat minimálně tři periferie převodníků AD. Tyto převodníky musí být dostatečně rychlé, přesné, a navíc musí obsahovat dostatek analogových vstupů, tedy dostatečně velký analogový multiplexer s různým vyvedením z mikrokontroléru tak, aby se tyto vstupy nepřekrývaly. Převodníky AD dále musí mít dostatečnou přesnost a dostatečně velké rozlišení, aby bylo možné měření výstupních parametrů měniče i střídače.

Posledním prvkem, který je velmi důležitý, je dostatek paměti mikrokontroléru a jeho rychlost. Mikrokontrolér musí být schopen nejen generovat dostatečně rychlý signál pro buzení měniče a střídače, tedy signály v rozsahu desítek kHz. Mikrokontrolér musí stihnout mezi periodami tohoto signálu provést všechny nezbytné výpočty pro stanovení nových parametrů, jako například střídny pro PWM signál do DC/DC měniče a s nimi spojené také měření parametrů, ze kterých jsou nové hodnoty vypočítávány. Naměřené

parametry je nezbytné ukládat v interní paměti RAM mikrokontroléru, které je navíc nutno vzorkovat po větším množství zejména u výstupních signálů tak, aby bylo možné vypočítat co nejpřesněji efektivní hodnotu napětí a proudu výstupní fáze, tedy všech fází. Při úvaze logování některých dat za účelem sledování například stavu využití akumulátorů v průběhu dne, týdne či dokonce měsíce je nutné zajistit externí paměť, do které budou daná data ukládána.

Jako externí paměť pro (nejen) logovací data je možné použít embedded FLASH paměť s dostatečnou kapacitou a její obsah na dotaz pomocí uživatelské konzole zaslat do PC. Další možností je použití SD karty s podobnou/stejnou funkcí. SD karty jsou poměrně snadno implementovatelné a je s nimi možné pracovat pomocí sběrnice SPI. SD karty zároveň mají značně velkou kapacitu, do které je možné logovat nespočet podobných záznamů, které je následně na PC možno zpracovávat do grafů či harmonogramů. Při požadavku o zaslání těchto dat do PC je ovšem problém s nutností vyčtení těchto dat mikrokontrolérem a posléze jejich zasláním do PC, kde tyto operace zaberou značnou výpočetní dobu. Pro zajištění eliminace této nechtěné části požadavku je vhodné připojit SD kartu na periférii k tomu určenou, tedy SDMMC či SDIO periférii u mikrokontrolérů rodiny STM32 [6], které jsou interně připojeny na DMA periférii a značnou část obsluhy operací s SD kartou zajistí hardwarově. Tato část ovšem zužuje okruh periférií vhodných k připojení PC, jelikož zasílání takového množství dat po UART periférii není příliš vhodné. Zároveň je tím zúžen okruh použitelných mikrokontrolérů, kde je nutno zajistit další periférii navíc a zároveň je nutné zajistit, aby se tato periférie nekryla s jinou potřebnou periférií, jako je například jeden z časovačů nebo převodníků AD.



Obr. 9: Blokový popis mikrokontroléru STM32G474 [10]

2.2 Komunikace s uživatelem

Pro zajištění komunikace s uživatelem je nutné zajistit možnost připojení uživatele k měniči. Nejjednodušším způsobem je použití sběrnice UART, která je jednoduchá a pro většinu potřebných operací je plně dostačující, nicméně není dostačující pro přenos velkého množství dat, která budou v průběhu logována. K takovému účelu je vhodnější použití rychlejší periferie, jako je například SPI nebo CAN, nicméně tyto periferie jsou nedostupné na většině uživatelských zařízeních a jejich připojení je tedy složité a omezující. Z tohoto důvodu je vhodné zvolit komunikační periferie jako je USB nebo ethernet, nicméně takové periferie zaberou značnou část výpočetních operací a mikrokontrolér řídící měnič není vhodné zatěžovat takovou časovou zátěží jako je obsluha komunikace po USB nebo ethernetu. Jednou z možností, jak se takovému problému vyhnout, je přístupnost použité SD karty pro uživatele, aby ji mohl vyjmout,

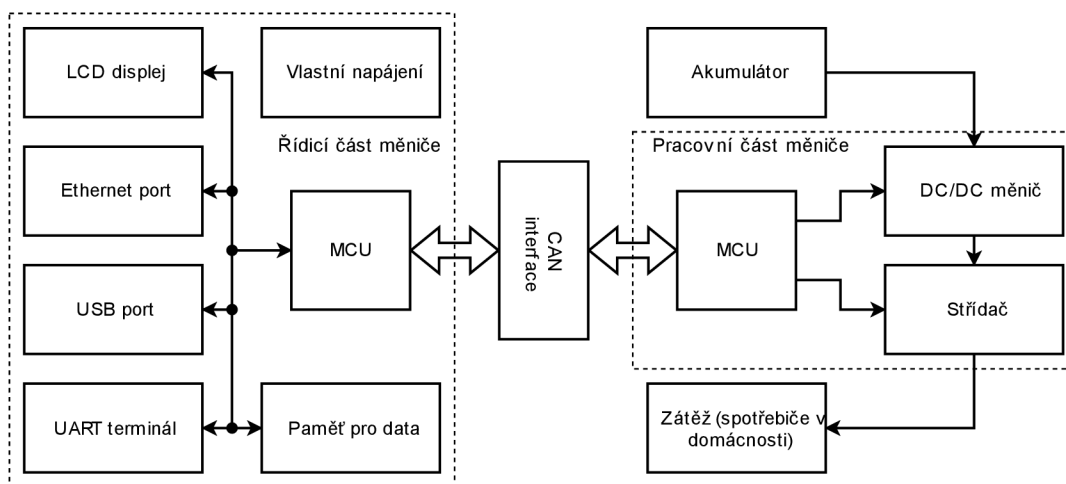
data zpracovat a poté vrátit. Problém nastává při nemožnosti bezpečného odebrání SD karty, resp. oznámení měniči, kdy má s SD kartou přestat komunikovat, aby mohla být vyjmuta, a naopak kdy ji znovu načíst a používat.[11] Zároveň je tato možnost neaplikovatelná pro embedded FLASH paměť přímo na DPS.

Z výše zmíněných důvodů je vhodnější použití nadřazeného mikrokontroléru, který bude s řídicím mikrokontrolérem měniče komunikovat pomocí CAN či FDCAN a bude pravidelně zaznamenávat jím zaslaná data, která bude logovat do jedné z vybraných pamětí. Zároveň odpadne nutnost použití mikrokontroléru s periferií pro SD kartu a její obsluha na pozadí řízení měničů. Tento nadřazený mikrokontrolér může bez problému obsluhovat komunikaci po USB, nebo po ethernetu s uživatelem a zároveň nebude omezovat výpočetní čas pro měření parametrů měniče, ani výpočet nových dat pro jeho řízení. Dále je možno zavedení externí synchronizace pro komunikaci s dalšími měniči, aby bylo možné řídit například vícefázové soustavy, nebo soustavy spínané v daný okamžik či danou situaci.

Uživatelské rozhraní nemusí být nikterak složité, jeho účelem je zobrazení důležitých dat z měniče v reálném čase a jeho vzhled by mohl odpovídat například sériové konzoli s komunikací pomocí USB přes VCP. Pro přenos souborů s logy z jednotlivých dní je možné použití například MSD a přenášet je jako celý soubor. Druhou možností je komunikace přes webové rozhraní ethernetu, kdy by měnič mohl logovat daná data na internetový server např. grafany [12] pomocí jednoduchých http požadavků jako je například InfluxDB nebo obdobné. Tato část by ovšem vyžadovala neustálé připojení k internetu, nicméně odebrala by nutnost velké paměti či SD karty, kde by najednou stačila větší paměť RAM v mikrokontroléru. Jednotlivá data z měniče v reálném čase mohla být zobrazována i na vestavném displeji přímo na měniči. Další možností zobrazení těchto dat je hostování jednoduché webové stránky přímo na nadřazeném mikrokontroléru měniče. Na těchto webových stránkách by bylo možné nalézt data ze všech částí měniče v reálném čase a zároveň si je i stáhnout jako vygenerovaný soubor nebo tabulku na dané stránce. Problém tohoto řešení je náročnost na operační paměť mikrokontroléru a jeho výpočetní rychlost, kdy již pravděpodobně nebude dostačující použití levného mikrokontroléru bez externí paměti RAM nebo dalších pomocných obvodů či periferií.

Hostování webové stránky na lokální IP adrese přidělené z DHCP routeru bude problematické, protože uživatel bude mít těžké se k této adrese dostat, resp. bude muset mít přístup do routeru, nebo možnost mapování sítě a znalost jednotlivých jejích prvků. Tuto IP adresu je možné nechat vypsat pomocí konzole přes USB rozhraní, stejně tak ji stejným způsobem změnit, nicméně pro tuto část je nezbytné připojení přes USB rozhraní. Jinou možností je vypsání této IP adresy na malém displeji přímo na měniči. Základní webová stránka by mohla být uložena v paměti mikrokontroléru, případně složitější, a tedy objemnější webové stránky by mohli být obsaženy na SD kartě, která by byla pevně implementována a v zařízení případně nahraná na embedded FLASH paměti zařízení.

Pro připojení k internetu a hostování webové stránky je potřeba již poměrně výkonný mikrokontrolér, v opačném případě budou webové stránky značně jednoduché, aby bylo možné je stihnout obsluhovat. V případě výkonného mikrokontroléru se nabízí možnost použití displeje s rozhraním paralelního RGB interface, a tedy displeje s většími možnostmi, než možnostmi komerčně dostupných displejů s řadiči a integrovanou VRAM. Pro připojení takového displeje je možné použít periférii mikrokontrolérů STM32 nazvanou LTDC, nicméně tím je prakticky přímo určena nutnost použití externí RAM paměti k mikrokontroléru a zároveň i velký mikrokontrolér z pohledu počtu vývodů, a tedy velikosti pouzdra. Takový mikrokontrolér již bude značně navyšovat cenu zařízení, nicméně zajistí jistou úroveň uživatelského komfortu vlivem připojení k internetu. Uvažované zjednodušené blokové schéma zařízení je vyobrazeno na obrázku 10.



Obr. 10: Blokové schéma měniče a řídicí části

3. TEORIE ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT MĚNIČE

V měniči je nutno postupně získávat aktuální data o jeho chodu, jako jsou například napětí a proudy vstupního obvodu, meziobvodu a samotných výstupů. Jednotlivé parametry je nutné určovat tak, aby bylo možné definovat nejen jejich patřičnou hodnotu sloužící pro stanovení parametrů pro následující krok, ale také pro adekvátní logování pro uživatele. Náročnost měření jednotlivých částí se liší od průběhu jednotlivých signálů v jednotlivých částech měniče.

3.1 Měření parametrů vstupního měniče

Na vstupním tranzistorovém můstku je nutno měřit napětí akumulátoru a proud který jím teče. Z principu funkce spínání zátěže typu daného transformátoru je dostatečné provést měření přes $\frac{1}{2}$ v polovině půlperiody, kdy jsou sepnuty spodní tranzistor a v můstku, jelikož v tomto okamžiku teče můstkem průměrný proud celé doby jeho sepnutí a je tedy vhodná chvíle k jeho změření bez nutnosti složitějšího dlouhodobého aproximování této hodnoty.[13] Takto změřená hodnota je tedy plně dostačující pro použití v regulační smyčce patřičného PID regulátoru, nicméně pro uživatelské zobrazení se jedná o hodnotu nic neříkající. Aby tato hodnota mohla být adekvátní hodnotou i pro uživatele, je nutné provést sérii měření v průběhu celé periody a jejich následný přepočítání na hodnotu efektivní, střední nebo jinou potřebnou pro dané zobrazení. Jelikož se jedná o obdélníkový průběh se známou střídou a známou maximální hodnotou v sepnutém stavu, je možné vypočítat přibližnou efektivní hodnotu proudu z těchto známých hodnot a taková hodnota bude plně dostatečná pro uživatelské zobrazení. Co se napětí týče, změna napětí je zde ideálně nulová, jelikož předpokladem je ideálně nulový odpor vstupního akumulátoru. Z těchto důvodů je možné spustit měření napětí na transformátoru ve chvíli, kdy je dokončeno měření proudu a napětí vyhodnotit poté. U takto změřeného napětí je poté možné považovat tuto hodnotu za finální pro zobrazení pro uživatele i pro použití ve stavovém automatu měniče určujícího, zda je možné měnič dále provozovat, nebo zda se nachází v jiném stavu a případně jakém.

3.2 Měření parametrů meziobvodu

Parametry meziobvodu již takto jednoduše vyhodnotit nelze. Velikost napětí na meziobvodu jsou závislé na velikosti zátěže celého měniče, aktuálně vzorkovaném výstupním signálu, souběhu jednotlivých fází a dalších neznámých parametrů. Značné ovlivnění napětí i proudu meziobvodu je také vyplývající z topologie DC/DC měniče, kdy při použití měniče s tranzistorovým můstkem na vstupu, diodovým usměrňovačem na výstupu a pracovní indukčnosti s vhodnou kapacitou budou hodnoty těchto parametrů značně odlišné od topologie DC/DC měniče s pevným převodem bez indukčnosti.[14] I přes to, že tyto parametry jsou při stavbě měniče pevně určeny a jsou tedy neměnné, je

zde stále řada neznámých jako například výše vyjmenované závislosti na výstupních parametrech střídače a je tedy vhodné provést měření důkladněji. Pro správnou funkci měniče je dostatečné měření maximálního proudu meziobvodu, aby jej bylo možné omezit na zvolenou hodnotu. U napětí je nezbytné znát jeho průměrnou či efektivní hodnotu, jež bude v PID regulátorech brána vůči hodnotě napětí zvolené.[15] Mimo tuto hodnotu je pro uživatele vhodné zobrazení napěťového rozkmitu a minimálního napětí na meziobvodu. K dosažení takových parametrů se použije tzv. sekvenční měření v průběhu celé periody vstupního DC/DC měniče, kdy jsou tyto hodnoty ovlivňovány. Naměřená data jsou dále zpracovávána formou výpočtu efektivní hodnoty a případně průměrné hodnoty pro možnost rychlé reakce měniče v případě, kdy by zvolený mikrokontrolér nestihl vypočítat efektivní hodnoty parametrů před aktualizací střidy časovače pro další periodu.

3.3 Měření parametrů výstupních střídačů

Měření výstupních parametrů je již v každém případě nutné provést sekvenčně v době celé periody, jelikož zde není předem znám typ zátěže, zkreslení výstupním LC filtrem ani tvar signálu, který je uživatelsky volitelný. Z těchto důvodů je potřeba provést sekvenční měření napětí i proudu a oba tyto parametry vyhodnocovat samostatně. Jelikož se jedná o třífázový měnič, měření bude prováděno pro všechny tři fáze. Naměřená data ze všech tří fází se včas zaznamenají do patřičné logovací paměti. Z těchto důvodů je vhodné použít integrované převodníky AD v mikrokontroléru nastavené pro sekvenční operaci pro měření proudu a napětí v přesném pořadí. Data z těchto převodníků AD mohou být zaznamenávána pomocí DMA do zvolených bufferů v paměti mikrokontroléru, a díky možnosti pokračujícího módu převodníku AD, je možno tuto operaci provést plně automaticky po dobu celé periody signálu, kdy na jejím konci budou data vyhodnocena. Převodník AD je možno nechat běžet volně spouštěn DMA periferií v cyklickém provedení, nicméně vhodnější měření by bylo při jeho spouštění přesně v polovině každé aktivní půl-periody vzorkovacího signálu, kdy DMA poté slouží pouze k postupnému ukládání dat. Zvolené mikrokontroléry rodiny STM32 nabízí řadu možností automatického spouštění převodníku AD i DMA periferie, jakožto reakce na různé podněty a jednou z nich je i přerušení od časovače.

3.4 Zpracování dalších dat z měniče, práce s daty

Jelikož se jedná o poměrně výkonný měnič, budou ověřovány i další části mimo napětí a proudů v jednotlivých částech obvodu. Jedním z dalších měřených parametrů je teplota jednotlivých výkonových komponent. Vstupním můstkem tečou velké proudy z akumulátoru, díky čemuž je potřeba vybrat tranzistory, které takový proud zvládnou spínat a zároveň mají v sepnutém stavu dostatečně nízký vlastní odpor kanálu, aby na nich nevznikali velké ztráty. Tranzistory na velké proudy mívají téměř vždy nízký odpor

kanálu v sepnutém stavu, zde není problém najít tranzistory s odporem v jednotkách miliohmů, nicméně tyto hodnoty jsou posléze vykoupeny rychlostí tranzistoru a velkou kapacitou gate hradla. Dlouhé časy spínání a vypínání tranzistoru vedou k velkým dynamickým ztrátám, kterým nepomáhá ani velký náboj hradla, díky kterému je navíc nutné zajistit dostatečně silné budiče. Při výběru rychlejších tranzistorů je naopak zvyšován odpor kanálu v sepnutém stavu a tím jsou navyšovány statické ztráty. Jistou možností je použití tranzistorů typu SiC nebo GAN, nicméně jejich parametry jsou pro takovýto měnič víceméně zbytečné a pouze zvýší cenu měniče. Velkou výhodou těchto tranzistorů by bylo pouze zvýšení účinnosti díky razantnímu snížení ztrát. Dostatečným řešením je tedy použití adekvátního chladiče na těchto tranzistorech. Na tomto chladiči je první kritické místo k hlídání pracovní teploty, jelikož při příliš vysoké teplotě by mohlo dojít k natažení izolačních podložek mezi tělem tranzistoru a šroubem chladiče a mohlo by dojít k přímému zkratu akumulátorů a tím odpálení jističe akumulátoru. Mimo by došlo k poškození měniče a měnič by musel být odstaven.

Dalším místem pro měření teploty je střídač výstupního napětí do jednotlivých fází, kdy zde tečou poměrně adekvátní proudy jednotek ampér, nicméně naproti tomu jsou tranzistory v polomostech dimenzované na dostatečně vysoké napětí o velikosti amplitudy výstupního signálu spolu s DC offsety, nutnými kvůli pracovním napětím na výstupních prvcích. Vysokonapěťové tranzistory jsou podobně jako tranzistory na vysoký proud poměrně pomalé a je třeba počítat s velkými dynamickými ztrátami. Na chladiči těchto tranzistorů je tedy vhodné umístění dalšího teplotního čidla. Další teplotní čidlo je poté vhodné umístit na usměrňovači napětí meziobvodu za DC/DC měničem, kde na diodách nejsou předpokládány velké ztráty, nicméně znalost této teploty určitě nebude na škodu.

Mimo teploty je na střídači nutné zaznamenávat vlastnosti výstupního signálu jako je přesný fázový posun mezi jednotlivými fázemi, nebo THD zkreslení výstupního signálu v případě sinusového signálu, nebo obecně zkreslení výstupního signálu v případě neharmonického průběhu. Tyto parametry nejsou přímo potřebné pro řízení měniče, jelikož střídače budou řízeny napěťovou metodou díky čemuž budou fázory napětí pevně dané. Jednotlivé fázory, zpoždění mezi fázemi a další parametry budou tedy stanoveny z FFT vypočtené spolu s dalšími prvky v nadřazeném mikrokontroléru, kde pro tyto výpočetní operace bude rezervováno dostatek výpočetního času.

Většina naměřených dat bude zpracována přímo v řídicím mikrokontroléru, aby mohli být použity pro řízení měniče a nehrozilo poškození dat při dvojitým přenosu spolu s jejich zpožděním. Mezi tato data patří většina staticky určených hodnot, vyjma napětí a proudu meziobvodu, které je vhodné počítat jako efektivní hodnotu. Dle finálního výběru mikrokontroléru a jeho hardwarové akcelerace pro FPU budou tyto hodnoty určeny přímo v daném mikrokontroléru. Pokud vybraný mikrokontrolér nebude obsahovat hardwarovou akceleraci FPU zejména pro odmocňování, je možné odmocninu nahradit aproximovaným výpočtem, nebo měnič řídit pomocí střední hodnoty napětí. Efektivní

hodnoty budou poté vypočteny v nadřazeném mikrokontroléru. Jelikož výpočet efektivní hodnoty lze považovat za vektorový součet všech hodnot jedné periody signálu, budou tyto hodnoty před počítány v řídicím mikrokontroléru a do nadřazeného bude zaslán pouze tento mezivýsledek, čímž dojde k velkému snížení datového toku mezi těmito mikrokontroléry a zamezení chyby v průběhu přenosu dat.[16]

Při přenosu dat mezi mikrokontroléry je nemalá šance vzniku chyby díky okolnímu rušení, či jinému důvodu jako například odrazu na vedení vlivem špatné terminace aj. Z tohoto důvodu bude použita periferie CAN nebo RS485, které používají diferenciální vedení a díky tomu jsou imunní vůči velké části rušení v okolí. RS485 je bohužel pouze upravenou sběrnici UART a neobsahuje tedy příliš mnoho zlepšení, ani automatizace, z tohoto důvodu bude použita modernější sběrnice CAN, i přes to, že RS485 by byla plně dostatečnou sběrnici. Druhá část ochrany dat je přibalený CRC32 součet, který slouží k možnosti detekce chyby v datovém přenosu. Jeho funkce je prostá, jedná se o ověřovací součet dat na straně obou mikrokontrolérů, kdy přijímací mikrokontrolér obdrží vypočtený CRC součet od vysílajícího mikrokontroléru a při sečtení obou CRC musí vyjít předem definovaná hodnota určená dle polynomu daného CRC. Mikrokontroléry STM32 obsahují hardwarově akcelerovanou CRC výpočetní jednotku a je tedy možné tento součet velmi jednoduše a rychle započíst.

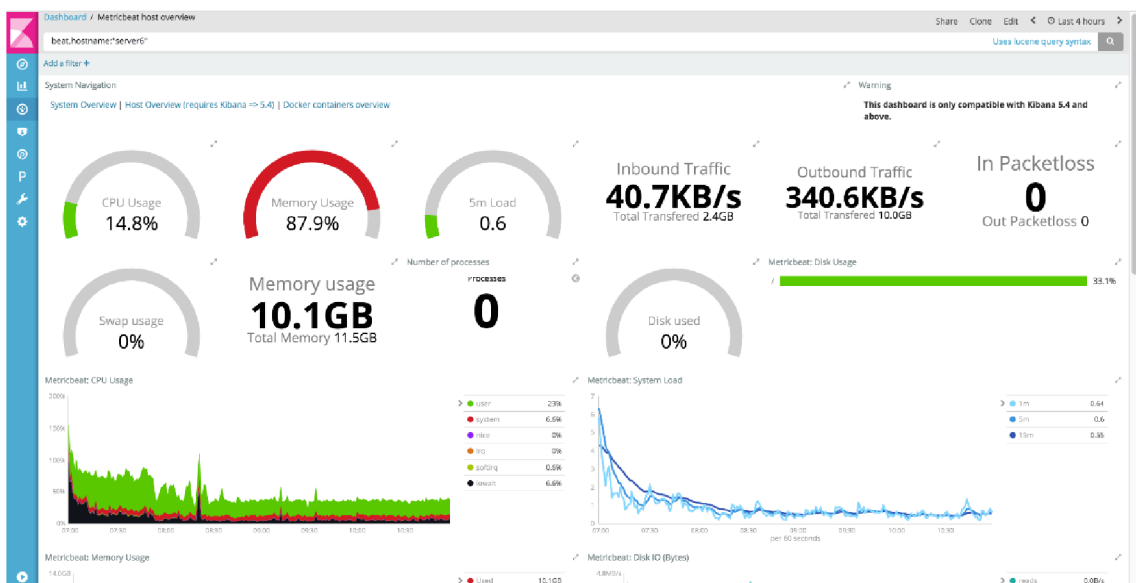
Datový rámeček										
	Arbitační pole		Řídicí signály			Data	Kontrolní součet			
SOF	ID	RTR	IDE	R	Délka zprávy	Data	CRC	DEL	EOF	ITM
1 bit	11 bit	1 bit	1 bit	1 bit	4 bit	0-64 bit	15 bit	1 bit	7 bit	3 bit

Obr. 11: Komunikační rámeček CAN přenosu

3.5 Zobrazení dat na LCD

Nadřazený mikrokontrolér umístěný na samostatné DPS od měniče s příslušnými rozhraními pro komunikaci s uživatelem bude obsahovat LCD displej pro zobrazení důležitých dat pro uživatele v reálném čase bez nutnosti připojení k počítači nebo jinému zařízení přes vybranou periferii. Displej by měl být dostatečně velký, aby bylo možné obsáhnout na něm všechna kýmž data, ale zároveň by neměl zabrat příliš velkou plochu, aby se vešel na jednoduchý malý postranní panel konstrukčního boxu. Displej by mohl obsahovat poměrně velké množství dat jako jsou napětí a proudy jednotlivých částí

obvodu, teploty v těchto částech, napájecí napětí mikrokontroléru a také parametry výstupních signálů nebo IP adresu při připojení k internetu. Jelikož se jedná o poměrně velké množství dat, bude zvolen grafický displej, kde je možné si daná data umístit dle potřeby a přehledně je rozdělit zvolenou mřížkou či jiným způsobem jako je například blokové schéma měniče nebo podobný obrázek. Při volbě grafického displeje bude vzato v ohledu jeho rozlišení, které musí být dostatečné, aby bylo možné daná data na displej vměstnat, ale zároveň by mělo být takové, aby se celý obraz vešel do paměti mikrokontroléru ideálně bez nutnosti externí paměti RAM. Při použití grafického displeje se automaticky nabízí varianta dotykového displeje, kde by bylo možné implementovat některé funkce pro uživatele přímo na panelu zařízení, nebo například implementovat možnost posunu v menu, nebo jiném prostoru zobrazení na displeji a tím si projít více dat, včetně vykresleného grafu výstupního signálu, nebo například data více měničů. Zde je ovšem naráženo na hranici vhodné velikosti displeje a jeho užitečnosti, jelikož měnič bude v převážnou dobu svého používání umístěn mimo dosah uživatele. Displej by mohl zobrazovat i zjednodušené grafy spotřeby, výkonu aj. z logovaných souborů měniče podobně jako je možné je zobrazovat na webu Grafany, jen v jednodušším provedení.



Obr. 12: Náhled možnosti zobrazení dat na webu Grafany [17]

3.6 Stavový automat měniče a regulátory PID

Pro určení nových konstant jako je střída, anebo kmitočet daných částí měniče, jako například DC/DC konvertor nebo střídač, je nutné použít regulační prvek, který zpracuje a vyhodnotí vstupní data a konstanty zadané uživatelem jako požadavky na výstup, kde z těchto dat vytvoří novou hodnotu pro komparační jednotky použitých časovačů. Pro tyto účely bude použit PID regulátor, který mimo aktuálních hodnot vezme v potaz i hodnoty minulé a tím upraví průběh regulace tak, aby byl ve vyváženém poměru rychlosti regulace

a zároveň stability. Jelikož se jedná o digitální zpracování regulace, bude použita regulace typu PSD nebo PS, jelikož integrální složka by znamenala pouze zatížení delším výpočetním časem a výsledek by byl víceméně totožný. Derivační složku regulátoru bude pravděpodobně možné vynechat, jelikož její uplatnění bude mít minimální pozitivní přínos a spíše bude zajišťovat nestabilitu. Výsledný PS regulátor bude díky tomu poměrně jednoduchý a bude možné jej jednoduše řetězit pro více podmínek, jako je například napěťová regulace a proudová regulace pro jeden prvek najednou. Zároveň díky vynechání derivační složky regulátoru bude určeno méně konstant pro regulátor a stanovení bodu stability nebude tedy tolik kritické, resp. měnič bude mít menší tendenci rozkmitání-se.

Jelikož se jedná o výkonný měnič pracující s několika úrovněmi ochran, je potřeba měnič řídit navíc ještě pomocí jednoduchého stavového automatu. Stavový automat bude obsahovat několik základních stavů, které určí, v jakém stavu mají být výstupy měniče a zda má být daná část měniče aktivní či nikoliv. Stavů tohoto automatu budou určovány chybovými prvky, jako je napětí baterie mimo povolené meze, napětí meziobvodu mimo povolené meze, anebo proud výstupu mimo stanovené meze. Tyto stavy budou spouštět chybový stav ve stavovém automatu, které budou časově podmíněné, kdy při překročení časové tolerance bude měnič uveden do chybového stavu a bude čekat na zásah uživatele. V jiném případě se během časování pokusí o restart, kde se detekují jednotlivé chybové stavy a dle těchto stavů se měnič uvede do provozu, do chybového stavu, anebo opět do stavu pokusu o restart sama sebe. Z důvodu obsluhy tohoto stavového automatu s časovači bude vhodné navrhnout tento stavový automat jako Moorův stavový automat.

Pro určení aktuální části operace je implementován stavový automat starající se o rozlišení mezi běžnou operací, uživatelským zásahem nebo nutností komunikace s externími prvky, jako je tomu například při zasílání naměřených dat nebo odpovědi na jakýkoli požadavek z nadřazeného zařízení. Zároveň slouží i k rozhodnutí, zda se jedná o stav chyby, kdy je potřeba o této chybě zařízení informovat zařízení nadřazené, nebo běžnou komunikační rutinu.

4. DĚLENÍ ZAŘÍZENÍ A NÁVRHOVÁ PRAVIDLA

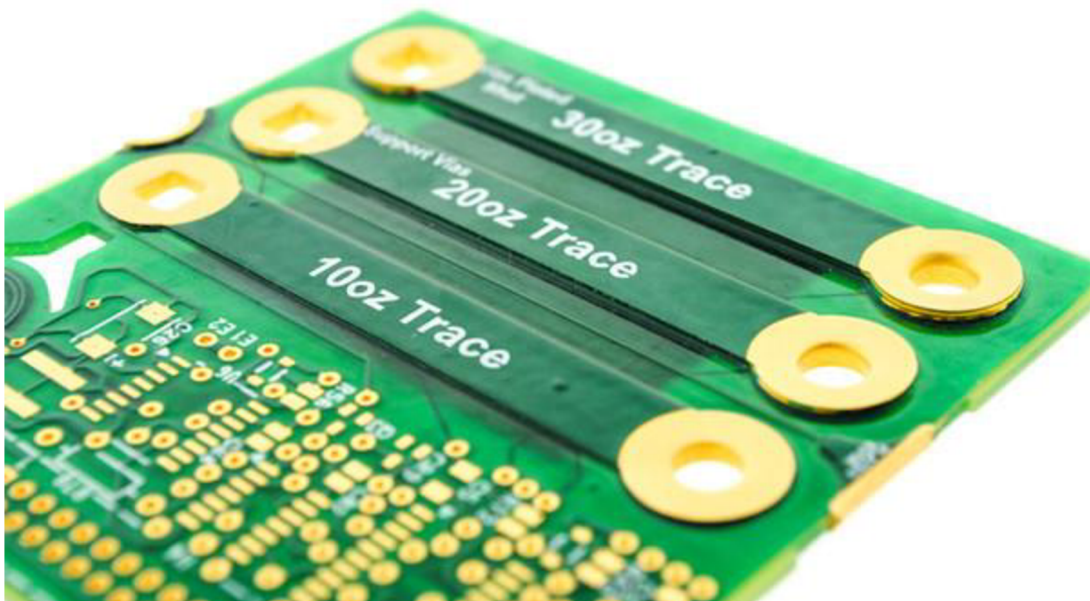
Zařízení se bude skládat celkem ze dvou částí – řídicí DPS a DPS pro silový měnič. Na těchto DPS bude zároveň obsaženo velké množství elektroniky sloužící pro měření napětí, proudu a teploty, vyhodnocení specifických stavů, komunikační části a další. Ke stanovení, které periferie je obecně pro tuto aplikaci nezbytné implementovat, v jakém zapojení budou tyto periferie fungovat a podle těchto informací určit, na které DPS budou navrženy. Základními stavebními bloky obou DPS budou patřičné mikrokontroléry sloužící pro jejich obsluhu. Pro řízení silové DPS byl vybrán mikrokontrolér STM32G474, který je dostatečně rychlý (takt jádra je až 170 MHz) a obsahuje dostatek periférií, které budou pro práci s měničem nutné (zejména převodníky AD a časovače). Oproti tomu na řídicí DPS je vybrán procesor s ohledem na jeho paměť a také multimediální možnosti, zejména z důvodu LCD displeje. Pro tyto účely byl vybrán mikrokontrolér typu STM32F429 ve 144 vývodovém pouzdře. Výběr tohoto MCU byl svázán s LTDC periferií sloužící pro komunikaci s TFT displeji, ale také dostatečně širokou paměťovou sběrnici pro externí paměti nebo komunikační interface. Z pohledu komunikačního interface by byl vhodnější některý z mikroprocesorů rodiny STM32H, nicméně díky aktuální nedostupnosti komponent bylo nutno udělat určité ústupky jako je například použití komunikační sběrnice běžného standardu CAN namísto CAN-FD nebo zvýšení nároků na kvalitu kódu a operační systém zejména kvůli nižším taktům jádra.

4.1 DPS pro silovou část

DPS pro silovou část bude obsahovat zejména silový měnič a střídač. Mimo tyto části je třeba na DPS umístit všechny potřebné části, které jsou u měniče nutné a které nelze zajistit externě, nebo by externí připojení způsobilo zbytečné komplikace. Těmito částmi jsou například obvody pro buzení tranzistorů, obvody pro měření fyzikálních veličin měniče jako je napětí, proud, anebo jeho aktuální teplota. Dále je na DPS potřeba umístit blok starající se o převod 3,3 V úroňové logiky sběrnice CAN na úroveň běžného diferenciálního páru sběrnice CAN. DPS musí samozřejmě obsahovat řídicí mikrokontrolér, který bude celý měnič řídit. Obvody mikrokontroléru, sběrnice CAN a dalších součástí vyžadují již výše zmíněné nízké napětí o velikosti 3,3 V, které je nezbytné zajistit pro správnou funkci těchto obvodů. K takovým účelům bude zajištěn pomocný zdroj (dále AUX zdroj) který zajistí transformaci vysokého akumulátorového napětí na napětí nízké.

Měnič samotný má zajistit převod energie o výkonu několika kW, kde díky nízkému napětí akumulátorů (24 V nebo 48 V) je na DPS veden poměrně vysoký proud, řádově vyšších desítek A. Pro vedení takových proudů je ideální použít vícevrstvý plošný spoj s dobrým rozprostřením rozlité vodivé plochy podél celé výkonové cesty tak, aby na daném vedení nebyl příliš velký úbytek a nedošlo k poškození vodivé vrstvy DPS. Jistou

možností je zajištění co nejširší vodivé cesty tohoto vysokoproudového vedení a zároveň co nejkratší délky takového vedení. Díky takovému návrhu bude poměrně nízký odpor vedení i na menším počtu vrstev DPS. Neposlední možností je zajištění zesílení vodivé cesty například pocínováním nebo dokonce proložením vodivým předmětem, jako například zapájený drátek podél celé cesty nebo potažení cesty například měděným plechem.



Obr. 13: Zesílené cesty na DPS [18]

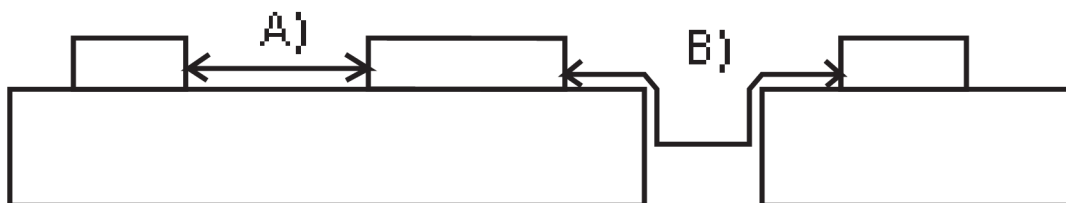
Silové vedení z akumulátoru je přivedeno ke spínacím tranzistorům silového měniče, který jej změní na vysoké napětí meziobvodu. Vstupní měnič bude navrhován v topologii propustného měniče se čtyřmi spínači (plný můstek). Díky variabilitě vstupního napětí i možnosti změny napětí výstupního je celý měnič navržen jako měnič propustný a nebude tedy možno vynechat pracovní indukčnost, jako tomu bylo zmíněno výše. Pracovní tranzistory měniče vyžadují stabilní pracovní napětí, se kterým operují, kde by toto napětí nemělo příliš kolísat. Pro tyto účely je nutné dodat k tranzistorům kondenzátory s co nejnižší impedancí a s co nejnižší impedancí vedení k nim. Účelem těchto kondenzátorů je pokrytí náhlých špiček vzniklých například nabíjením kapacit tvořící velké proudové špičky, které se na delším vedení s větší indukčností projeví jako velký úbytek napětí. Tyto kondenzátory jsou zvoleny tak, aby absorbovaly dostatečně velké proudové namáhání a zároveň i vysoké napětí na vstupu můstku. Používají se fóliové kondenzátory, kterým zároveň příliš nevádí teplota chladiče, u kterého se zpravidla nachází díky nutnosti umístění co nejblíže vývodům tranzistorů.

Vysoké výstupní napětí je voleno tak, aby jím bylo možno pokrýt obě periody požadovaného výstupního signálu (tedy kladnou i zápornou periodu sinusového signálu

sítě, celkem tedy 2x 325 V) spolu s rezervou pro úbytky na vedení, tranzistorech a diodách. Dalším omezením tohoto napětí jsou komerčně dostupné tranzistory, diody ale i elektrolytické kondenzátory, kde dobře dostupné usměrňovací diody pracují do napětí 1200 V, kdežto elektrolytické kondenzátory jsou převážně do napětí 400-450 V. Z tohoto důvodu byla vybrána sériová kombinace dvou elektrolytických kondenzátorů tvořících napěťový limit meziobvodu na 900 V maximálně. Usměrňovací diody na sekundární straně transformátoru jsou namáhány navíc ještě napětím v opačné půlperiodě a “vidí” tedy dvojnásobné napětí. S tak vysokým napětím je poté nutné počítat při finálním výběru komponent a návrhu indukčností.

Vzhledem k náročnosti a velikosti DPS je kladen důraz na cenu DPS, a proto je DPS navržena jako dvouvrstvá. Dvouvrstvá DPS ovšem nese komplikace nejen ze strany silového vedení vysokého proudu, ale i vysokého napětí, kde je nutno počítat s patřičnými izolačními vzdálenostmi mezi vedením a vrstvami samotnými. Dvouvrstvá DPS navíc komplikuje vedení například analogového měření napříč celým měničem, kde takové vedení nebude možno vést mezi referenční vrstvou tak, aby bylo zajištěno lepší odrušení.

V poslední řadě je nutno počítat s izolačními mezerami mezi galvanicky oddělenými částmi tak, aby nedošlo k proražení této izolační mezery, a tedy ke galvanickému spojení. Problematiku izolace mezi jednotlivými částmi je potřeba neopomenout ani při návrhu systému chlazení, kdy chladič spojuje například primární i sekundární stranu zařízení. U návrhu chlazení je dále uvažováno zvýšení nežádoucí kapacity mezi primárními a sekundárními obvody zařízení. Příliš vysoká kapacita může způsobit značné hromadění náboje a posléze snazší proražení izolace nebo vysoké zahřívání obvodů.



Obr. 14: Rozdíl délky izolační DPS mezi DPS samotnou (A) a DPS s frézováním (B)

Obvody pro měření fyzikálních veličin na DPS jsou navrženy s důrazem na dodržení izolačních vzdáleností jednotlivých částí a také společného napájení. Dále je také zajištěna izolace mezi měřicími sondami na stranách s galvanickým oddělením a na stranách s vysokým napětím, které se nesmí dostat na vývody mikroprocesoru nebo dokonce na uživatelský terminál. Měření teploty je navíc nutné rozvrhnout tak, aby samotné senzory nepodléhaly zarušení od spínaného měniče, aby dodržely izolaci mezi vysokým napětím například meziobvodu a nízkým napětím mikroprocesorové strany, na které jsou i čidla teploty. V poslední řadě je do úvahy rozvržení započteno také umístění těchto čidel, aby měřená teplota odpovídala části zařízení, jež má být snímáno.

4.2 DPS pro řídicí část

Jelikož se většina funkčních bloků pro měnič nachází přímo na silové desce měniče, pro řídicí DPS již nezbyvá příliš mnoho kritických částí návrhu. Jednotlivé bloky řídicí DPS jsou tedy zejména paměti pro data a také operační paměť pro LCD, LCD samotný a poté rozvedení digitálních komunikací pro propojení uživatele s měničem. Mezi tyto části je započteno vhodné napájení jednotlivých součástí, kdy je opět zajištěno 3,3 V napájení pro mikrokontrolér, LCD i paměti. Navíc je zajištěno napájení podsvícení LCD, které je navrženo jako proudový zdroj dodávající proud 10 mA pro LED, které jsou stanoveny výrobcem.

Napájení paměti je navrženo tak, aby bylo velmi stabilní s funkcí včasného varování před jeho výpadkem. Tomu je zejména z důvodu, kdy některé paměti jako jsou například paměti typu NAND, je možno velmi vážně poškodit při započetí zápisu nebo mazání bloku a výpadku napájení ve stejnou chvíli. Zároveň je nutné implementovat co nejlepší možný způsob pro průběžné ukládání dat tak, aby uživatel o žádná data v případě výpadku nepřišel. K tomuto účelu opět musí sloužit jistý systém varování nestabilního napájení a detekce výpadku a zároveň systém zápisu do paměti, který nebude spoléhat na mazání velkých bloků, ale namísto jejich mazání je mezi sebou promísí, aby mazané bloky dat byly vždy již s neaktuálními a nepotřebnými daty. Tímto způsobem ukládání dat se zajistí zároveň tzv wear-leveling paměti, tedy její rovnoměrné opotřebovávání, kdy nedojde k tomu, aby prvních pár bloků s nejčastějšími přepisy bylo vadných a poslední bloky byly nedotčené.

Z pohledu připojení digitálních komunikací je vzat v potaz faktor určité úrovně galvanické izolace jednotlivých částí nebo zajištění kompatibility tak, aby nedocházelo k poškození zařízení vlivem společných datových spojení, ale různým posunem napětí mezi sebou. U ethernetové sběrnice je takové řešení zajištěné pomocí vazebního transformátoru připojeného na komunikační linky ethernetového vedení, u CAN sběrnice je potřeba zajistit digitální oddělení jinak a stejně tak u USB. V neposlední řadě je zajištěna bezpečnost zařízení z pohledu ESD, kde je zvýšené riziko poškození díky uživatelské interakci s některými sběrnici, jako je například zmiňovaný ethernet nebo USB. Stejným způsobem je rizikovým faktorem samotné LCD, zejména s dotykovou plochou a také SD karta, která může být sama poškozena při nesprávné ochraně.

4.3 Rozložení DPS dle důležitých částí

Na DPS se bude nacházet hned několik částí (bloků), které je dobré mít řazené odděleně od některých jiných bloků. Tyto části jsou například nízkonapěťové komunikace, analogové měření, pomocný zdroj nebo i oddělení střídače od hlavního měniče. V rámci návrhu DPS je vytvořen fiktivní blokový návrh sloužící k rozdělení jednotlivých součástí tak, aby se vzájemně neovlivňovali (například rušením nebo

teplotně). Tyto jednotlivé bloky jsou poté umístěny na vhodná místa na DPS tak, aby nedocházelo ke zmíněnému rušení mezi bloky, ale například i v jednom bloku samotném, jako tomu může být například u rychlé datové sběrnice k operační paměti. Zároveň jsou jednotlivé bloky umístěny s ohledem na vzájemné propojení, aby nevznikaly žádné komplikace typu křížících se datových sběrnic, které by se vzájemně rušily.

4.3.1 Silové vedení na DPS

Nedílnou součástí galvanického oddělení je silové vedení na primární straně zapojení, tedy vedení z akumulátoru. Na tomto vedení může docházet k velkým ztrátám a tedy i nechtěnému zahřívání okolí. Mimo to je potřeba zajistit již dříve zmíněné dostatečně široké vedení za účelem snížení impedance vedení, čemuž by přítomnost komponent z jiného bloku mohla bránit.

Silové vedení navíc při spínání proudu do hlavního transformátoru způsobuje vysokofrekvenční rušení, které je nutno držet co nejdále nejen od analogového vedení, jehož měření by bylo znehodnoceno, ale také od digitálních komunikačních sběrnic, kde může tvořit falešné informace v datových paketech.

Takto oddělené silové vedení většinou obsahuje různé menší prvky sloužící například pro měření fyzikálních parametrů, které musí být patřičně připojeny ve vhodné části obvodu. Těmito prvky může být například bočník, který je připojen k silovému vedení co nejlépe je to možné z pohledu impedance a co nejbližší prvku, u kterého je zamýšleno měřit proud. Analogové vývody pro měření napětí bočníku je dobré připojit v místě nejlépe odděleném od silového vedení. Oddělením vedení je eliminována chyba měřeného napětí způsobená úbytkem na pájeném spoji bočníku. Vzhledem k vedení silové části narušené menšími prvky, jako jsou například prokovy, nebo vývody zespol bočníku, je dobré silové vedení vést výhradně polygony, díky kterým je možno využít maximum místa i v prostoru mezi několika prokovy nebo složitými zákrutami kolem terminálů součástek. Takto rozlité polygony navíc zajistí určitou míru chlazení menších ztrát na komponentech, nebo třeba bočnicích a podobných prvcích. Vlivem rozlité lze také uvažovat signálové vztažení vůči této ploše a tím lépe odrušit například zmiňované analogové vedení od bočníku.

4.3.2 Vysoké napětí na DPS

Vysokonapět'ové vedení na DPS nese podobné nároky jako vysokoproudé vedení na DPS. Základním parametrem je dodržení dostatečné izolační vzdálenosti, kterou stanovuje hned několik norem podle místa uplatnění, nebo dle místa užití. Pro účely tohoto zdroje bude použita norma IPC-2221B. Podle této normy je stanovena minimální izolační vzdálenost 4,5 mm na vnější neizolované vrstvě DPS při napětí 900 V. Tato vzdálenost je trochu zkrácena faktem, kdy na DPS je povrchová izolace ve formě nepřájivé masky, nebo také třeba frézování mezi vedením, aby byla eliminována možnost přeskoků

po například znečištěném povrchu DPS, jelikož odpor povrchu DPS je nižší než odpor vzduchu.

U vysokého napětí se dále musí počítat s izolační pevností nepájivé masky při pokládání součástek na DPS, což se může projevit například při potřebě umístění chladiče na DPS, nebo při vedení pod prvky jako feritové transformátory, které jsou situovány s feritem přímo na DPS (například planární transformátory).

4.3.3 Datové sběrnice na DPS

Datové sběrnice na DPS jsou dalším prvkem, u kterého je při návrhu nezbytné řídit se určitými zvláštními pravidly. Datové sběrnice, resp. Víceméně jakékoli vedení na DPS jsou závislé na protékajícím proudu, který se musí někudy vrátit zpět do zdroje. Tyto zpětné proudy musí téct ve své vodivé cestě, která je v případě datových cest obvykle brána zároveň jako referenční pro danou sběrnici a tvoří tedy její pevnou impedanci. V takové vrstvě tečou poté tzv. zpětné proudy tekoucí v rozlitém polygonu přímo pod danou cestou. Tyto proudy jsou nezbytné a při změně referenční plochy, například při přechodu mezi vrstvami, musí být svedeny například pomocí tzv. stitching kondenzátorů. Bez těchto kondenzátorů by zpětné proudy mohly způsobit nepříjemnosti jako například nestálou impedanci vedení, nechtěné odrazy na vedení anebo přeslechy. Z pohledu přeslechů je stanovena a vypočtena vzdálenost vodičů od sebe v závislosti na pracovním kmitočtu daného vedení, jeho impedanci a strmosti náběžné a sestupné hrany signálu na daném vedení. U paralelních datových sběrnic je navíc dodržována stejná délka vedení signálů tak, aby všechny signály byly zpožděny stejně a netvořily se kritické chyby při přenosu dat, například mezi mikrokontrolérem a externí operační pamětí. Délky vedení je navíc potřeba dorovnávat u míst, kde došlo k prodloužení délky vedení jiného signálu, aby nedocházelo k nesoudobým logickým přechodům na vedení, které by mohli způsobit poškození datového paketu vlivem tvorby falešné náběžné, nebo sestupné hrany vlivem přeslechu.[19]

4.3.4 Blokové schéma silového měniče

Z předurčených parametrů vyplývajících ze zadání a z posouzení potřeb měniče je již možná tvorba základního zapojení měniče. Měnič se skládá celkem ze tří hlavních prvků, jimiž jsou samostatné měniče, konkrétně se jedná o silový měnič pro změnu nízkého akumulátorového napětí na napětí meziobvodu, poté výstupní střídače, které tvoří požadované výstupní napětí s požadovaným výstupním průběhem z meziobvodového napětí, a nakonec pomocný zdroj který zajistí napájení všech nízkonapěťových částí. Pro správnou funkci měniče jsou snímány všechny nutné veličiny na jeho vstupní straně i na straně výstupní. Těmito veličinami jsou zejména vstupní proud a výstupní napětí, kdy díky těmto veličinám je možné zdroj řídit, nicméně pro plnou funkci je vhodné znát i zbývající důležité parametry, jako jsou vstupní napětí, výstupní proud a teplota měniče, aby bylo možné zabránit poškození měniče vlivem překročení určitých limitů. Z tohoto

důvodu je do obvodu přidán obvod pro měření vstupního vysokého proudu a obvod pro měření vysokého výstupního napětí. Vstupní proud je měřen v poměrně širokém rozsahu a jeho maximální hodnota je při plánovaném výstupním výkonu více než 2 kW už při úvaze stoprocentní účinnosti na úrovni na 42 A při 48 V vstupním napětí. Takto vysoké proudy je poměrně komplikované měřit na bočniku, kde v rámci dobré uchlazenosti bude použit bočník o velikosti řádově ve stovkách mikro-ohmů. Takový bočník bude mít výstupní napětí v milivoltovém rozsahu, a to může být u spínaného měniče poměrně problematické pro měření i návrh samotný. Namísto řešení měření proudu s bočníkem byl tedy vybrán HAL senzor sloužící pro měření proudu, který je přímo úměrný tvořenému magnetickému poli kolem měniče, jež HAL sonda dokáže měřit. Vybraný HAL senzor typu LA55 obsahuje obvod zajišťující lineární výstupní charakteristiku v proudovém režimu s převodem 1:1000 vstupního ku výstupnímu proudu. Daný HAL senzor bohužel vyžaduje další samostatné napájení, které musí být symetrické, tedy další dvojici napětí, které bude pomocný zdroj zajišťovat. Díky použití HAL sondy je navíc zajištěna izolace mezi měřicím obvodem a obvodem vstupním z akumulátoru a je tedy možné zajistit jeho galvanickou izolaci tak, jak je požadováno z důvodu možnosti práce s více měniči. Proud tímto senzorem je měřen na vodiči, jež je potřeba provléct skrze měřicí otvor v čidle, díky čemuž je možné ulehčit vedení na DPS touto nucenou drátovou propojkou mezi dvěma místy.

Měření vstupního napětí bude zajištěno pomocí běžného odporového děliče, jež bude snímán převodníkem AD. Při připojení tohoto napětí na mikroprocesor dojde ke galvanickému spojení. Takové propojení je z pohledu požadavků nežádoucí a je dobré uvažovat oddělené měření. Pro tyto účely byla vybrána kombinace AD převodníku s SPI výstupem, který bude následně oddělen pomocí digitálního izolátoru sběrnice, který je oproti přímo oddělenému převodníku AD snadněji k zakoupení. Pro napájení AD převodníku bude zajištěno separátní analogové napájení o velikosti 5 V, které bude také použito z pomocného zdroje.

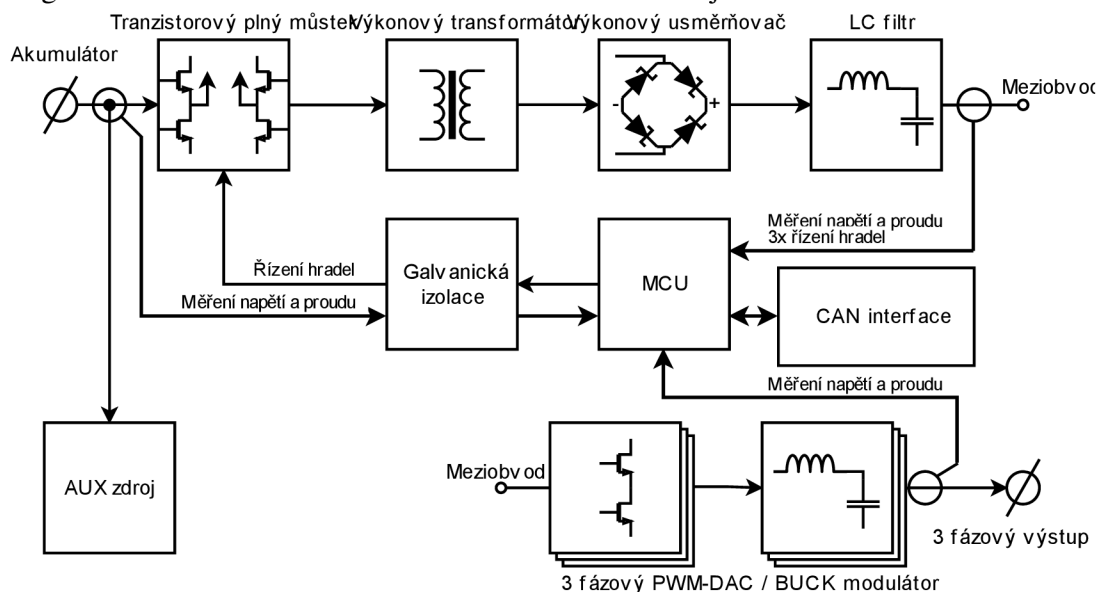
Pro měření proudu v meziobvodu je nevhodné měřit jej v záporné větvi, která bude zatížena SS nesymetrií a VF šumem z důvodu práce s dalšími zdroji, které jsou jím napájené. Z tohoto důvodu bude i na meziobvodu použita HAL sonda pro měření proudu na straně vysokého napětí, která zajistí možnost měření proudu na vysokém napětí bez nutnosti přesného napěťového děliče nebo galvanicky odděleného převodníku AD na tomto vedení zavěšeného. Stejný způsob měření proudu bude použit na výstupních fázích, kde by bylo použití klasického bočníku komplikované, zejména díky velkému rozkmitu napětí a možnosti měření napětí (resp. proudu) záporné polaritě. Vybrané HAL sondy pro tyto účely jsou typu LTS15-NP, které jsou napájeny pouze jedním napětím o velikosti 5 V a mají napěťový výstup. Jejich maximální proud, který je jimi možno měřit odpovídá 15 A a v rámci svého pouzdra mají přímo implementované tři měřicí vodiče, jež lze zapojit podle vlastního uvážení pro účely stavěného zařízení. Mimo tyto implementované

vodiče lze provléct vlastní vedení skrze otvor ve středu magnetika k tomu určený, stejně jako je tomu u LA55.

Měření vysokého napětí na meziobvodu i na výstupních fázích je již proveditelné přes běžné děliče napětí, kde navíc díky oddělení mikrokontroléru od vstupního napětí je možné tento mikrokontrolér spojit se společnou zemí těchto vedení a není potřeba zajišťovat galvanické oddělení těchto napěťových linek.

Spojením mikrokontroléru s výstupní zemí a zemí meziobvodu, značí nutnost použití galvanicky odděleného buzení tranzistorů vstupního můstku, který se stará o spínání vstupního silového měniče. Zároveň je nutno provést galvanické oddělení digitální cesty mezi řídicí DPS a touto DPS měniče, aby se zamezilo průniku vysokého napětí do řídicí DPS po digitální lince. Dané oddělení bude umístěno na DPS měniče z důvodu předpokladu použití více měničů, kde v opačném případě by řídicí DPS potřebovala vstupní HUB omezující maximální počet připojených zařízení svým počtem galvanicky oddělených vstupů.

Celkové blokové schéma musí navíc obsahovat potřebné prvky pro jednotlivé části, jako jsou pracovní indukčnosti jednotlivých měničů, nebo kapacitory sloužící ke strádání energie z těchto měničů. Celé navržené blokové schéma je možno vidět na obrázku 15.



Obr. 15: Blokové schéma silové části měniče

4.3.5 Blokové schéma řídicí části

Řídicí část musí pro splnění předešlých úvah obsahovat externí paměť pro data, která bude sbírat. Externí paměť je možno použít dvojího typu, buď paměť typu NOR FLASH, ze které je možno spouštět kód, ale je náročnější na HW zařízení, jelikož je potřeba ji připojit na adresní sběrnici mikrokontroléru. Druhá možnost je použití paměti typu NAND FLASH, která pracuje s adresováním bloků zasláním adresy po datové sběrnici a může tedy snáze dosahovat daleko vyšších kapacit. Vzhledem k úvaze o použití většího displeje pro vykreslování a práci s ethernetovým rozhraním, bude použita externí paměť

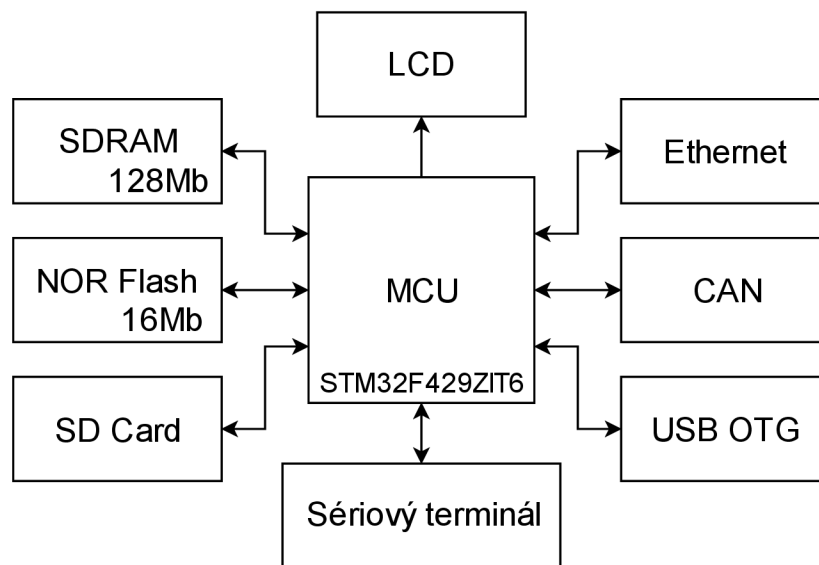
RAM a díky vysoké náročnosti na velikost kódu (obsah webové stránky, uživatelská data a grafické prvky pro LCD) bude navíc použita paměť typu NOR FLASH, která zajistí možnost rozšíření interní paměti s kódem. V případě nutnosti zálohy většího množství naměřených dat bude na DPS navržena navíc SD karta, která může sloužit jako rozšiřující úložiště namísto NAND FLASH paměti.

LCD displej bude vzhledem k náročnosti připojen přes paralelní RGB sběrnici. Jeho rozlišení bylo vybráno s důrazem na zobrazení požadovaných ovládaní o velikosti 480x272 px. LCD displej navíc potřebuje napájení pro podsvícení, k čemuž bude sloužit malý měnič starající se o převod nízkého napětí (3.3 V nebo 5 V) na napětí vyšší (2030 V) s proudovou regulací nastavenou podle parametrů LCD.

Připojení k internetu bude zajištěno pomocí ethernetové periferie s LAN přípojkou. Pro patřičnou komunikaci bude použita příslušná fyzická vrstva (dále ethernet PHY) sloužící pro převod diferenciálních párů full-duplexního připojení ethernetu na RMI komunikaci připojenou k mikrokontroléru tak, aby se s ní dalo pracovat s HW akcelerací mikrokontroléru STM32. DPS bude napájena pomocí akumulátoru solární elektrárny a není tedy nutné zajišťovat napájení pomocí PoE rozhraní a vzhledem k úvaze použití jako komunikace lokální sítě s PC, kde není ani PoE výstup do dalších prvků zamýšlen, jako je tomu například pro napájení switche. Z tohoto důvodu byl na vstup ethernetové periferie zařazen vazební transformátor, který se stará o oddělení digitálního signálu od případného PoE vstupu, čímž je zajištěna kompatibilita i s PoE sítí, která pouze nebude využita.

V poslední řadě bude na DPS navržena patřičná komunikační sběrnice CAN pro možnost propojení s měniči a případně dalšími zařízeními. Pro ladící účely bude na DPS obsažen navíc UART výstup pro jednoduchý výpis do konzole a také USB rozhraní pro možnost budoucího rozšíření. Jelikož v tuto chvíli není USB nijak uvažováno, bude zapojeno jako USB OTG s možností spínání napájení do USB, čímž bude zajištěna kompatibilita se zařízeními jako flash disk nebo klávesnice a stejně tak i s připojením k osobnímu počítači nebo například mobilnímu telefonu s možností OTG připojení.

Celé blokové schéma ve zjednodušené formě je možno vidět na obrázku 16. Dané blokové schéma neobsahuje jednotlivé prvky jako vazební transformátor nebo USB spínač, protože pro vyobrazení topologie a funkce není nutné je zakreslovat.



Obr. 16: Blokové schéma řídicí části měniče

4.4 Oddělení digitální komunikace

Při úvaze připojení několika měničů na jednu řídicí DPS, kde každý měnič má své napájení a svůj silový výstup je jasné, že digitální komunikace musí být na sobě nezávislé, resp. Nezávislé zejména na napětí měniče samotného. Kvůli potřebě této nezávislosti je zavedena galvanická izolace k těmto digitálním interface. Z předešlého návrhu blokového zapojení vyplývá, že izolace musí být na straně měniče, nikoli na straně řídicího terminálu. Měnič samotný bude obsahovat celkem dvě digitální sběrnice, USB chovající se jako virtuální sériová linka a poté sběrnici CAN pro komunikaci s řídicím panelem. Z pohledu digitálních oddělovačů lze tuto část řešit více způsoby, jako například použití samostatného mikrokontroléru, který bude komunikovat pomocí oddělené komunikace s hlavním mikrokontrolérem. Oddělený mikrokontrolér by měl zajištěné samostatné napájení a digitální vedení by byla oddělena mezi těmito mikrokontroléry. Sběrnice by navíc sloužila k přenosu dat jakéhokoli charakteru se zachováním šířky této sběrnice. Druhou možností je oddělení sběrnic samotných. Digitální oddělovače jsou bohužel kvůli součástkové krizi poměrně nedostupné, nicméně mikrokontroléry na tom nejsou o moc lépe a při průzkumu trhu vzešlo jako nejlepší řešení použít digitální oddělovače na sběrnice samotné. Digitální oddělovače navíc potřebují dvojí napájení – napájení mikroprocesorové strany a napájení strany za oddělením. Pro tyto účely lze použít již uvažovaný AUX zdroj.

4.4.1 Rozhraní CAN

Oddělení pro sběrnici CAN je možné provést také více způsoby, kde způsob izolace přímo sběrnice CAN je poměrně nákladný, nicméně při úvaze maximální rychlosti sběrnice CAN a možnosti převodu na TTL úroveň převodníkem, který je implementován tak jako tak pro připojení k mikroprocesoru, není příliš mnoho důvodů k výběru jiného

řešení. Jedinou nevýhodou oproti oddělení přímo sběrnice CAN je nutnost zavedení izolovaného napájení pro tento převodník, nicméně díky již alokovanému AUX zdroji bude tato část nejmenší komplikací.

4.4.2 Rozhraní USB – VCP

Jelikož se USB chová jako virtuální sériová linka (dále VCP), není nezbytné oddělovat USB sběrnici samotnou, kde digitální sběrnice pro USB jsou poměrně drahé a nedostupné. Zajištění převodu z USB na VCP je možné pomocí jednoduchých integrovaných obvodů, které jsou napájeny napětím 5 V nebo 3.3 V. Jelikož zařízení bude vždy obsluhováno jako USB-Device, nikoli USB-Host, je možné předpokládat 5 V napájení z USB a není tedy potřeba zajišťovat galvanicky oddělené napájení pro tuto část. Za interface pro převod USB na VCP bude již vyvedena prostá sériová linka, na níž je možno sehnat poměrně širokou škálu izolačních oddělovačů v různých konfiguracích a rychlostech.

4.5 Rychlé sběrnice na DPS, návrhová pravidla

Z výše uvedeného návrhu vyplývá, že jsou na jednotlivých DPS vedeny také rychlé sběrnice, se kterými je nutné počítat z hlediska návrhových pravidel DPS. Různé sběrnice mají různá pravidla pro návrh na DPS a tyto pravidla se dále mění s parametry jako je rychlost a délka sběrnice, přizpůsobení externími obvody nebo vstupem slave obvodu na sběrnici a také jejím charakterem. Těmito pravidly jsou například tolerance rozdílu délky vedení jednotlivých vývodů sběrnice, nebo impedance vedení vůči sobě, nebo vůči referenční ploše. Dále je také doporučeno počítat s vyrovnávací pamětí pro dané sběrnice při příliš dlouhém vedení. Zajištěním vyrovnávací paměti na sběrnici je zároveň zajištěna stabilizace síly signálu a ten se nedostane do oblasti, jež je špatně vyhodnotitelná z hlediska digitálního šumu.

4.5.1 Připojení LCD panelu

LCD panel bude připojen pomocí paralelní RGB sběrnice skládající se z 6-bitových barev a řídicích signálů, jako je VSYNC a HSYNC pulz a taktovací signál pro přepínání pixelů. Dále signál pro výběr dat a uspání LCD panelu. Tato sběrnice se tedy skládá celkem z 23 signálů, které jsou pro displeje o rozlišení 480x272 px v rozsahu 5-15 MHz, typicky pak 9 MHz. Takto pomalý signál nezpůsobí příliš komplikací, nicméně díky náročnosti panelu a nutnosti přesné synchronizace je nutné dodržet délky vedení s maximálním rozdílem doporučeným výrobcem panelu do 100 mil (2,5 mm). Daný signál by měl být vztažen vůči referenční vrstvě, aby byla eliminována možnost vzniku přeslechů, nebo nechtěných odrazů na vedení. Nicméně při dodržení vhodné izolační mezery mezi vedením a použitím dostatečně silných datových cest není tato podmínka referenční vrstvy v tomto případě kritická. Z pohledu EMC je potřeba zařadit nízko-impedanční filtry na vedení jako jsou například běžné rezistory v nízkých desítkách ohmů, aby byly

omezeny proudové špičky. Těmito rezistory, resp. snížením proudových špiček, je navíc omezena možnost vzniku přeslechu a signál je tím stabilnější.

4.5.2 Propojení paměti na DPS

Paměťová sběrnice (dále označována jako FMC sběrnice podle označení periferie mikrokontroléru STM32) je paralelní sběrnici skládající se ze tří částí – datové signály, adresní signály a řídicí signály. Tyto signály nesou různé nároky na návrh DPS pro korektní funkčnost paměti jako jsou již zmiňované délky vedení, a tedy zajištění minimální časové nesrovnalosti. U řídicích signálů je vhodné zajistit defaultní stav po resetu napájení, kdy může být mikroprocesor v chybovém stavu s výstupy nastavenými jako vstupy nebo vysokoimpedanční vstupy. Zajištění defaultní úrovně je možné pomocí vhodně zvoleného pull-up nebo pull-down rezistoru, který nepřetíží výstupní řadič mikrokontroléru / paměti a zároveň bude dostatečně silným zdrojem v případě výpadku. FMC sběrnice pracuje na poloviční frekvenci jádra mikrokontroléru. Tato frekvence je u jádra mikrokontroléru STM32F429 až 180 MHz a tedy 90 MHz pro dané vedení. Při této vysoké frekvenci je nutné zajistit vhodnou referenční vrstvu pro dané vedení spolu s vhodným poměrem síly vedení a izolační mezery. Při úvaze použití dvou pamětí (operační paměť a NOR FLASH paměť) na jedné sběrnici je patrná nutnost zajistit vyrovnané délky vedení mezi adresami, daty i řídicími signály obou pamětí. Impedance tohoto vedení není příliš kritická, nicméně výrobcem je doporučeno počítat s 50 Ω .

4.5.3 Vedení diferenciálních párů na DPS – ethernet, USB

Diferenciální páry na DPS mají oproti FMC nebo RGB poměrně jasná pravidla. Jejich délka a poměr síly vedení a izolační mezery je pevně daný závislostí na přesné impedanci vůči referenční vrstvě. Díky této vlastnosti je možné vypočítat přesné parametry vedení a při použití vhodného návrhového prostředí je jejich dodržení víceméně vynuceno automaticky. Různé periferie a různá vedení mají různé impedance a také jejich tolerance, což lze u některých periférií, jako je např. USB částečně využít a tato pravidla téměř opomenout. Zjednodušení těchto pravidel je možné zejména díky nižším rychlostem komunikace s mikrokontrolérem, kde při vysokých rychlostech například USB – HS (480 Mbps) je dodržení těchto parametrů nevyhnutelné.

4.5.4 Rychlé sériové sběrnice – SD karta

Rychlé sériové sběrnice například pro SD interface mají podobná pravidla jako FMC sběrnice. Největším rozdílem mezi těmito pravidly je vedení hodinového signálu pro SD kartu, kde by tento signál měl mít zajištěné stínění spojitou zemí v okolí tohoto vedení se zvýšenou izolační mezerou od daného signálu z důvodu snížení kapacity vedení a tím i impedance. Při příliš dlouhém vedení (> 800 mil, > 20 mm)[20] je nezbytné implementovat buffer na tato vedení, aby nedošlo ke ztrátě signálu. Na sběrnici jsou dále doplněny sériové rezistory a pull-up rezistory pro zajištění klidové úrovně signálu. Rozdíl délky vedení je řešen samostatně u datových signálů, hodinový signál ani signál pro

přenos příkazu nemusí být striktně délkově vázány a jejich tolerance vůči datovým vývodům je větší než maximální délka vedení.

4.5.5 Rozdělení periférií na MCU dle místa vývodu

Mikrokontroléry STM32 v základu neobsahují kompletní GPIO mapu pro možnost přemapování jakékoli funkcionality na kterýkoli vývod, nicméně základní možnosti přemapování periférií mezi několika vývody zde implementována je. Díky této možnosti je možné lépe uspořádat periferie na pouzdře mikrokontroléru tak, aby bylo možné dodržet veškerá návrhová pravidla a zároveň požadované rozdělení součástí na DPS například podle očekávané funkce nebo ovládání. Při vedení signálů například k paměti nebo jinému zařízení s širší datovou sběrnici je vhodné zajistit si možnost výměny signálů, které dané zapojení nijak neovlivní. Těmito signály mohou být například adresy pro paměti nebo datové vývody pro paměť RAM. Je možné přeskládat banky paměti nebo horní a spodní byte více bytové sběrnice. Při těchto výměnách je zajištěno dodržování párovaných signálů, jako výběr banky s přidruženou datovou sběrnici pomocí předem nastavených návrhových pravidel. U řídicích signálů je dále dodržováno pořadí datových a případně i adresních bitů v základním rozvržení pro možnost ovládání příkazové tabulky ve formátu pro dané paměti, jelikož například NOR FLASH používá adresní a datovou sběrnici k zadávání příkazů pro její ovládání. Při přehození těchto signálů je nutné příkazovou tabulku přepočítat a softwarově upravit. Přeskládání vývodů může pomoci zejména u těch signálů, kde je dané dodržování délký vedení a zároveň když dochází k jejich křížení.

4.6 Napájení řídicí DPS a LCD

Řídicí DPS je napájena ze společného akumulátoru jako výkonový měnič. Vstupní napětí této DPS je tedy počítáno v rozsahu od 18 V (verze pro 24 V akumulátor) do 60 V (verze pro 48 V akumulátor). Díky velkému napěťovému rozsahu je použit spínaný měnič, jelikož na lineárním měniči by docházelo k velkým ztrátám. Pro napájení DPS je vytvořeno několik napájecích větví, jako je napětí až 30 V s konstantním proudem pro napájení podsvícení LCD, 5 V pro USB a poté 3,3 V pro paměti a mikrokontrolér. Díky nízkému odběru jednotlivých částí je napájecí kaskáda poskládána ze snižujícího měniče z akumulátorového napětí na napětí 5 V. Z 5 V sběrnice je napájené USB i měnič pro podsvícení LCD. Na stejné sběrnici je zároveň zařazen LDO lineární stabilizátor pro napájení paměti a mikrokontroléru. Díky použití této kaskády je celý měnič poměrně malým zapojením a nevyžaduje drahé prvky ani složitý návrh zapojení. USB napájení je spínáno pomocí speciálního obvodu sloužícího pro spínání napájení na napěťové straně vedení, který omezuje výstupní proud na 0,5 A. Podsvícení LCD má téměř konstantní odběr energie a zbylé prvky jako jsou paměti, ethernet PHY a mikrokontrolér lze pevně stanovit podle nejhoršího případu.

4.7 Napájení silové DPS – AUX zdroj

Z předešlého rozboru návrhu zapojení silové DPS měniče je patrné, že měnič bude navržen s více nezávislými výstupy. Jelikož se jedná o pomocný zdroj s uvažovaným nízkým výstupním výkonem je možné použít kaskádu několika samostatných snižujících měničů. Pro izolované napětí lze použít izolační měniče s přímou integrací do jedné komponenty. Tyto DC/DC měniče ovšem z předešlých zkušeností nejsou příliš vhodné pro danou aplikaci, kde většina napájení je pro převodníky AD, jelikož dané DC/DC převodníky produkují značné nežádoucí rušení. Samostatné DC/DC měniče jsou poměrně složitě sestavitelné a zabírají velkou plochu na DPS. Jako nejvhodnější řešení byl vybrán a navržen klasický měnič v blokující topologii s několika výstupy.

Jednotlivé výstupy měniče budou navrženy pro napětí vyšší, než je napětí potřebné a na každý důležitý výstup je zavěšen lineární LDO stabilizátor pro snížení rušení a zajištění stabilnějšího napájení patřičné části DPS.

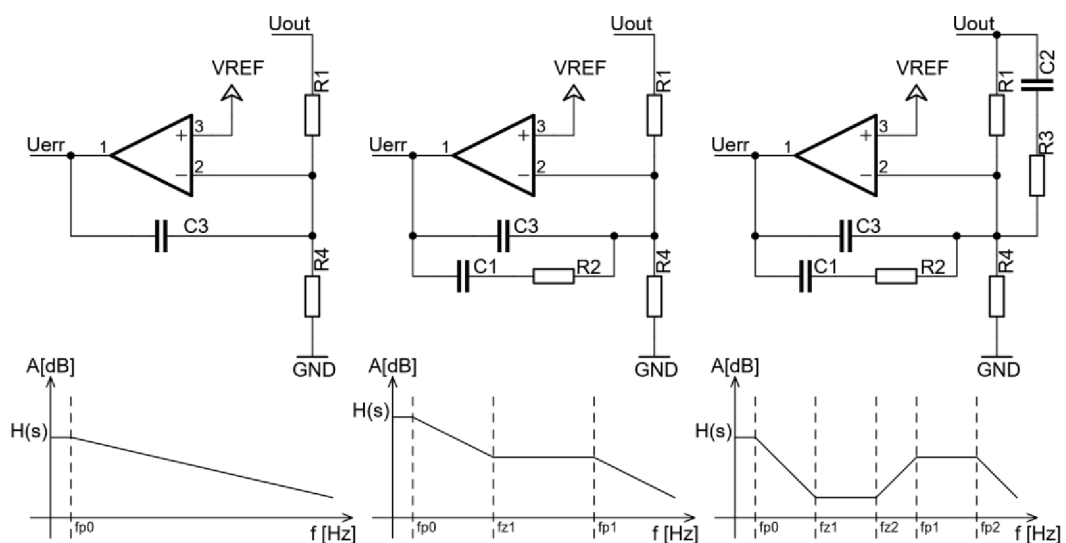
Díky několikanásobným výstupům s galvanickou izolací mezi sebou je potřeba zařadit na výstupy zdroje tlumivky pro potlačení symetrického rušení spolu s RC filtrem, aby nedocházelo k velkému výstupnímu rozkmitu vlivem kapacitní vazby.

5. NÁVRH ZDROJOVÝCH ČÁSTÍ DPS

Návrh zdrojové části DPS je víceméně návrhem několika samostatných zdrojů, které se starají o změnu vstupního napětí na napětí jiné velikosti. V rámci předešlého návrhu bylo vybráno několik topologií zdrojů potřebných pro správnou funkci tohoto zařízení a ty jsou tedy samostatně navrhovány. Jednotlivé zdroje jsou založené na různé problematice a různé složitosti, jako je způsob přenosu energie přes magnetický obvod jádra, nebo její akumulace a čerpání z tohoto jádra. Při návrhu takového zdroje je dbáno mimo jiné i na vhodný výběr řídicího obvodu, který musí být schopen pracovat s danou topologií zdroje. Mimo řídicí obvod je zařazen do obvodu pro korektní filtraci napájení na vstupní části i na části výstupní. K filtraci a řízení zdroje je navíc do obvodu zařazen kompenzační obvod ve zpětné vazbě, který zajistí, že se zdroj nebude rozkmitávat a výstupní napětí bude podle požadavku. Díky eliminaci kmitání správným nastavením kompenzačního obvodu je také zajištěno nízké EMC rušení na vstupní straně obvodu a tím je zdroj považován za bez problému použitelný v běžném užití.

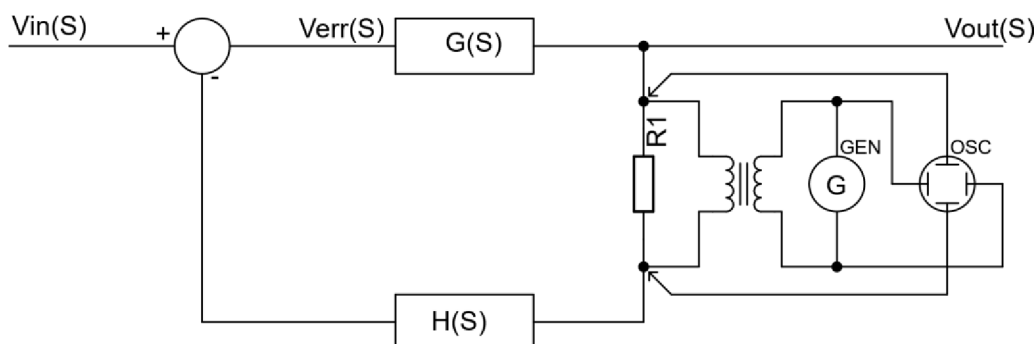
5.1 Kompenzační obvody

Kompenzační obvody jsou rozděleny do několika typů, resp. do několika tříd. Jejich účelem je vyrovnání zisku a fáze přenosové funkce, bez níž by byla ohrožena stabilita fáze. Toho je dosaženo splněním kritéria stability dodržením fázové rezervy ideálně v rozsahu $45\text{--}60^\circ$. Jednotlivé typy kompenzačních obvodů se skládají z kombinací RC článků ve zpětné vazbě chybového zesilovače, kde přidáním dalšího RC článku je dosaženo přidání dalšího zlomu křivky zesílení. Jednotlivé typy kompenzačních obvodů a jejich ovlivnění přenosové funkce je možné vidět na obrázku 17.[21]



Obr. 17: Kompenzační obvody a náhled přenosové funkce

K plnému stanovení parametrů kompenzačního obvodu z přenosové funkce, a tedy i ověření korektního nastavení kompenzačního obvodu, je přenosovou funkcí nejprve potřeba zjistit. V tom lze postupovat dvěma způsoby. Prvním je kompletní simulace obvodu, který by sloužil jako simulační blok v celém zařízení a poté stanovení těchto obvodů pomocí simulačního programu. Problémem této metody je nepřímá znalost některých komponent a jejich nepředvídatelné chování, jako je například pracovní transformátor, kde lze předpokládat určité odlišnosti u každého kusu, zejména pokud jsou vyráběny v domácích podmínkách. Pro přesné měření přenosové funkce je do obvodu zanesen chybový signál z generátoru, který ovlivní zpětnou vazbu obvodu. Při zavádění tohoto signálu je zkoumáno chování obvodu na osciloskopu a podle toho se postupně vykresluje frekvenčně závislá přenosová funkce. Chybový signál lze přivést například na vhodně navržený rezistor se zanedbatelnou hodnotou ve zpětné vazbě, který je v obvodu umístěn zejména za tímto účelem.[22]



Obr. 18: Obvod pro stanovení přenosové funkce

5.2 Návrh AUX zdroje

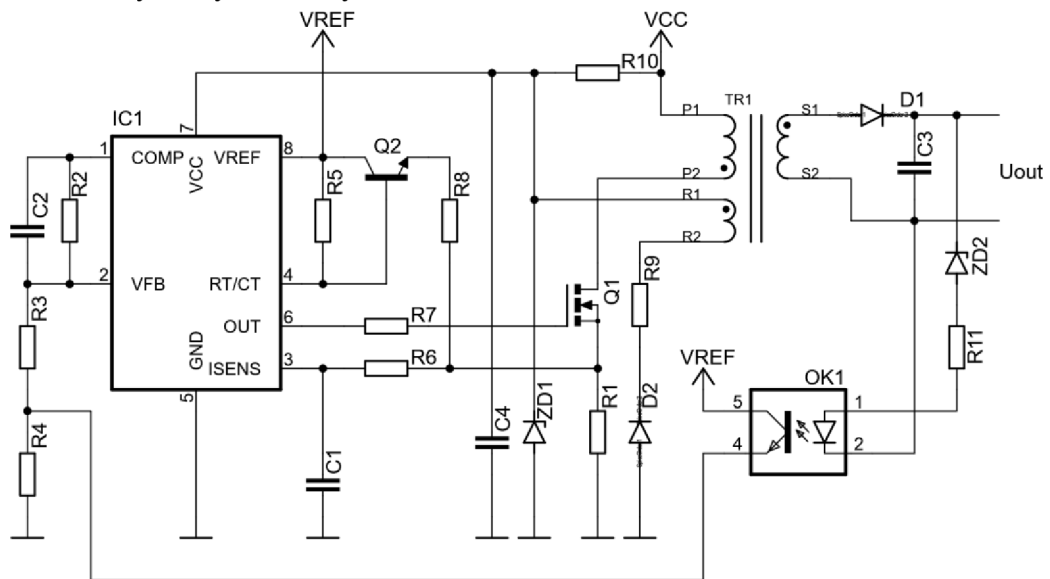
Pomocný zdroj je podle předešlé úvahy navržen v topologii blokujícího měniče s více nezávislými výstupy. Základem měniče je samostatný PMIC obvod starající se o řízení měniče samotného tak, aby měnič mohl pracovat offline, tedy bez řízení hlavním mikrokontrolérem. Řídicí obvod by měl zajistit kompletní správu spínání měniče včetně regulace podle zpětné vazby a zajištění napájení sama sebe. Měnič pracuje se širokým rozsahem vstupního napětí (18-60 V) a musí být schopen napájet celé zařízení. Z tohoto důvodu je vybíráno mezi měniči, které jsou schopny spínat dostatečně velké proudy, které v nejhorším případě měničem mohou téci a zároveň takové měniče, které mají možnost pracovat i s takto nízkým vstupním napětím.

Z dostupných komponent byl vybrán měnič od firmy Texas Instruments s označením UCC2813-DTR0[23]. Jedná se o jednoduchý a rychlý obvod pro správu spínaného zdroje s velkou univerzálností použití. Jeho předností je malá vlastní spotřeba (0,5 mA), díky které je možné jej napájet za pomoci vstupního napětí s pomocí rezistoru a Zenerovy diody. Zapojení měniče vychází víceméně z obecného zapojení blokujícího měniče v kombinaci s výrobcem stanoveným zapojením kompenzace měniče samotného a

dalších prvků tohoto integrovaného obvodu, jako jsou například obvody pro určení pracovního kmitočtu nebo zpětné vazby.

5.2.1 Topologie a základy zapojení

Zapojení vychází z dokumentace od firmy Texas Instruments pro použitý obvod. Jelikož je vstupní v poměru ku výstupnímu poměrně nízké a obvod tedy pracuje s vysokou střídou signálu, byl do zapojení měniče zařazen obvod pro kompenzaci chyby náběžné hrany (viz tranzistor Q2 a rezistor R8 na obrázku 19), kde vznikají velké napěťové špičky a docházelo by k chybnému vyhodnocení.



Obr. 19: Zjednodušené obecné zapojení blokujícího měniče s UCC2813

Výstup zapojení měniče je kompenzován pomocí dříve popsaného filtru pro odstranění symetrického rušení. Ve zpětné vazbě daného měniče je navržen kompenzační obvod druhé třídy s použitím napěťové reference TL431. Zpětná vazba je zařazena na nejvytíženější větev celého zdroje, tedy větev, která slouží k napájení budičů pro hradla tranzistorů a zároveň mikrokontroléru. Vzhledem k velkému počtu výstupů tohoto zdroje, je pro napájení některých obvodů použita větev s vyšším napětím s přidáním sekundárním měničem, nebo stabilizátorem pro snížení tohoto napětí. Výstupních napětí tohoto pomocného měniče je celkem pět, kde dva tvoří symetrické napájení pro snímač proudu LA55. Těmito výstupy je tedy symetrické napětí 15 V pro obvod LA55, oddělené napětí 5 V pro analogový převodník pro snímání vstupního napětí a napětí 5 V pro galvanické oddělení komunikačního rozhraní. Posledním výstupem je 15 V sběrnice sloužící k napájení zbylé části měniče. Na tuto sběrnici je připojen sekundární spínaný zdroj, sloužící pro snížení 15 V na napětí 5 V sloužící k napájení proudových senzorů LTS15 a budičů tranzistorů. Nakonec je použit lineární LDO stabilizátor typu XC6220B331PR pro snížení 5 V napájení na 3,3 V napájecí sběrnici pro napájení zbylé části logiky a mikrokontroléru.

5.2.2 Návrh transformátoru

Pro návrh transformátoru blokujícího měniče jsou nejprve zjištěny parametry jádra, jež je použito. Vzhledem k malému výkonu měniče lze použít jádro poměrně malé, nicméně malá jádra nemívají příliš mnoho vývodů, a to může být v tomto konkrétním případě problém. Z důvodu rezervy a počtu vývodů bylo vybráno jádro s označením ETD29, které má průřez středního sloupku 71 mm^2 a dodává se se vzduchovou mezerou $0,5 \text{ mm}$. U vybraného jádra výrobce doporučuje použití sycení dosahující až $0,25 \text{ T}$, kdy v jádře nebudou vznikat příliš velké ztráty. Aby bylo možné stanovit kompletní navíjecí předpis, jsou dále určeny některé další parametry, jako jsou pracovní kmitočet měniče a velikost odraženého napětí primárního vinutí, případně pracovní střída. Vzhledem k parametrům obvodu a vyšším proudům primárním vinutím, byla určena střída 40% . Pracovní kmitočet byl stanoven podle vybraného tranzistoru v rámci určité kompenzace mezi statickými a dynamickými ztrátami na 40 kHz . Z těchto parametrů byl následně vypočítán počet závitů primárního vinutí pomocí rovnice 1:

$$N_p = \frac{U_p * \delta}{B * A_e} = \frac{48V * \frac{40\%}{40kHz}}{0,25T * 71mm^2} = 27z \quad (1)$$

Vzhledem k pravidlům vinutí transformátoru je primární vinutí rozděleno na dvě poloviny. První polovina je vinuta pod sekundárními vinutími a druhá polovina nad nimi. Z toho důvodu byl stanoven počet závitů primárního vinutí na $28z$, aby bylo možné jej rozdělit na dvě stejné poloviny.

Ze znalosti primárního vinutí lze podle rovnice 2 dopočítat jednotlivé počty závitů pro vinutí sekundární, které jsou uvedeny v tabulce 1. Jednotlivá napětí sekundárních vinutí byla navýšena o $2,5 \text{ V}$, z důvodu úbytku na usměrňovací diodě (1 V) a uvažovaném LDO včetně určité tolerance pro lepší regulaci ($1,5 \text{ V}$).

$$N_s = \frac{N_p * U_s}{U_p * (1 - \delta)} = \frac{28z * 17,5V}{48V * (100\% - 40\%)} = 17z \quad (2)$$

Tabulka 1: Návrh sekundárního vinutí transformátoru AUX měniče

Výstupní napětí	Počet závitů sekundárního vinutí
+15 V (Napájení LA55) -> 17,5 V	17 z
-15 V (Napájení LA55) -> 17,5 V	17 z
5 V (Napájení ADC) -> 7,5 V	8 z
5 V (Napájení CAN) -> 7,5 V	8 z
15 V (napájení DPS logiky) -> 17,5 V	17 z
Napájení UCC2813 -> 17,5 V	17 z

Všechna vinutí transformátoru budou zatěžována poměrně malým proudem, a tak byl pro vinutí zvolen vodič o průměru 0,4 mm, který je vinut pro každé vinutí vyjma vinutí primárního, kde je vodič zdvojen z důvodu možnosti vyšších proudů. Pro výpočet vzduchové mezery a tím ověření maximálního proudu primárním vinutím byla použita rovnice 3.

$$l_V = \frac{N_P * I_{MAX} * \mu_0}{B} \Rightarrow I_{MAX} = \frac{B * l_V}{N_P * \mu_0} \Rightarrow \frac{0,25T * 0,5mm}{28z * \mu_0} = 3,55A \quad (3)$$

Ze stanoveného proudu a již známého napětí primárního vinutí a napětí odraženého na primárním vinutí je možné vybrat vhodný tranzistor. Z nabídky dostupných tranzistorů byl vybrán tranzistor PHB45NQ15T, který je dostatečně rychlý, má poměrně nízký odpor v sepnutém stavu a je dimenzován na dostatečně vysoké napětí U_{DS} , vypočteného jako suma napětí odraženého a napětí primárního, celkem tedy 100 V.

Z vypočteného špičkového proudu primárním vinutím byla stanovena hodnota bočnicku pro měření proudu pro proudovou regulaci obvodu UCC2813, také vstupní pojistka a další pod-obvody. Hodnota bočnicku byla stanovena podle rovnice 4.

$$R_S = \frac{U_{err}}{I_{MAX}} = \frac{1V}{3,55A} = 0,28\Omega \quad (4)$$

V závislosti na zajištění určité tolerance a případného přetížení z různých důvodů byla zvolena hodnota bočnicku nejbližší nižší, konkrétně 0,27 Ω .

5.2.3 Návrh chlazení měniče

Jelikož se jedná pouze o pomocný zdroj, nejsou ztráty tohoto zdroje příliš vysoké. Hlavní ztráty, které jsou u tohoto měniče počítány jsou ztráty na bočnicku kvůli jeho dimenzování a ztráty na tranzistoru, aby bylo možné navrhnout vhodný chladič. Ztráty na bočnicku jsou stanoveny podle rovnice vycházející z Ohmova zákona v podobě $R * I^2$ a jejich velikost je tedy 3,4 W. Tyto ztráty jsou dále podmíněny pracovní frekvencí, jež určuje dobu kdy rezistorem teče proud. Výsledná hodnota tohoto ztrátového výkonu je tedy 1,36 W. Vhodným bočnickem pro tuto výkonovou ztrátu je SMD rezistor v pouzdře s označením 2512, který je výrobcem popisovaný jako 2 W rezistor za podmínky, že je mu zajištěn vhodně velký polygon pro jeho chlazení.

Ztráty na tranzistoru jsou následně vypočteny jako suma ztrát dynamických a statických ztrát. Statické ztráty jsou vypočteny stejně jako ztráty na rezistoru, kde hodnota odporu je určena z dokumentace, jako odpor v sepnutém stavu tranzistoru. Dynamické ztráty jsou stanoveny pomocí rovnice 5[24].

$$P_d = \frac{1}{2} * U_{DS} * I_0 * (t_r + t_f) * f = \frac{1}{2} * 60V * 3,55A * (22ns + 31ns) * 40kHz \quad (5)$$

$$P_d = 0,22W$$

$$P_S = R * I^2 * \delta = 42m\Omega * 3,55^2 * 40\% = 0,21W \quad (6)$$

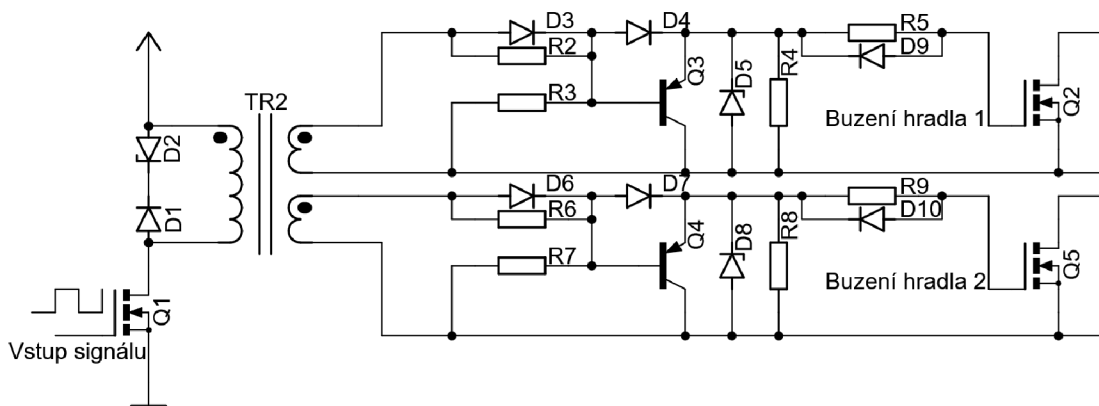
$$P_{celk} = P_S + P_d = 0,21W + 0,22W = 0,43W \quad (7)$$

Podle vypočtených maximálních ztrát byl následně vybrán SMD chladič vhodný pro pouzdro tranzistoru TO263-3. Konkrétní typ vybraného chladiče je FK24413DPAK.

Daný chladič má tepelný odpor 25 K/W, což ve výsledku znamená, že při maximálních ztrátách na tranzistoru je na chladiči teplota o 10,75 K neboli o 10,75 °C vyšší, než je teplota okolí. Uvažovaná pracovní teplota měniče je 50 °C. Při této okolní teplotě je tranzistor zahřátý na teplotu 60,75 °C. Tato výsledná teplota je stále v rámci doporučení výrobce, který doporučuje nepřekračovat teplotu 175 °C.

5.3 Návrh silového měniče

Silový měnič je díky potřebnému výkonu a jeho vlastnostem nutno stavět v propustné topologii. Pro dosažení vysokého výkonu při co nejnižších ztrátách je nejlepší volbou topologie propustného měniče se čtyřmi spínači, tedy s plným můstkem. Tato topologie má nevýhodu ve složitém řízení tranzistorů, jelikož obsahuje dva tranzistory s plovoucím buzením. Mimo plovoucího buzení je u tranzistorů potřeba ošetřit tzv. dead-time, resp. zpoždění před otevřením druhého tranzistoru v době, než se první tranzistor plně uzavře. Jelikož je tranzistorový můstek umístěn na primární straně obvodu, tedy v přímém spojení s akumulátorem, je podle předešlých návrhů spínání těchto tranzistorů nezbytné oddělit. K oddělení spínání je možno použít izolované budiče, které ovšem potřebují další oddělené napájení. Druhým problémem je, že integrované měniče mají určitou specifikaci maximálního špičkového proudu, který mohou dodat, což může být omezující ve věci výběru vhodných spínacích prvků. Z těchto důvodů a z důvodu vyšší bezpečnosti s oddělením těchto dvou obvodů, byl vybrán způsob oddělení pomocí oddělovacího transformátoru (dále GDT). GDT transformátor je buzen jako samostatný malý měnič, jehož výstup je usměrněn a vytvarován tak, aby jím bylo vhodné spínat tranzistory. Pro tyto účely je možné použít komerčně dostupné transformátory v různých konfiguracích, zde byl vybrán GDT od firmy VacuumSchmelze, konkrétně typ VAC 4021x086[25]. Jedná se o transformátor se třemi vinutími v poměru 1:1,125:1,125, které jsou mezi sebou izolované na napětí až 4,1 kV mezi primárním a sekundárním obvodem. Celý obvod GDT s budičem a tvarovači je vyobrazen na obrázku 20.



Obr. 20: Zapojení tvarovačů a budiče GDT

Pro buzení plného můstku je potřeba spínat celkem 4 tranzistory. Tímto způsobem je zavedeno jisté omezení v podobě spínání dvou tranzistorů jedním spínačem, nicméně to není u měniče problémem. Díky tomuto zapojení jsou tedy buzeny celkem dvě hradla, která jsou zrcadlena na hradla druhé poloviny můstku. Mezi buzení obou hradel je započítána pracovní střída a také zmiňovaný dead-time. Jelikož se jedná o výkonové spínače, je v jejich blízkosti zapojen tzv snubber kondenzátor, sloužící pro odstranění nežádoucích jevů, jako jsou velmi strmé napěťové přechody na vedení a tím i velké proudové impulzy.

5.3.1 Návrh silového transformátoru

Návrh silového transformátoru je velmi podobný návrhu transformátoru u pomocného zdroje. Obvod silového měniče je kompletně řízen mikrokontrolérem, který určuje pracovní frekvenci. Pracovní frekvence je zvolena podle možností mikrokontroléru, kdy maximální pracovní frekvence časovače je 170 MHz, minimální dělička pro PWM výstup je $\div 2$ a v rámci vhodně nastavitelné střídy je zvoleno 1000 kroků na periodu. Díky tomuto režimu je minimální dělička rovna $\div 4$. Z těchto hodnot lze vypočítat maximální výstupní frekvenci podle rovnice 8.

$$f_{out} = \frac{f_{časovač}}{dělička * počet\ kroků} = \frac{170MHz}{2 * 1000} = 85kHz \quad (8)$$

Transformátor je navržen na jádře s označením ETD44, s průřezem středního sloupku $A_e = 172 \text{ mm}^2$ a jádro nemá žádnou vzduchovou mezeru. Počet závitů primárního vinutí lze určit pomocí upravené rovnice 1. Úprava rovnice spočívá v podstatě zvolené topologie, kde je dodávána energie v obou polovinách periody. Z tohoto faktu plyne také omezení maximální střídy na 50 %. V rámci bezpečnosti je z důvodu zachování dostatečného dead-time zvolena maximální střída 49 %. Maximální sycení je zvoleno 0,15 T z důvodu snahy o udržení co nejnižších ztrát. Vstupní napětí je pro tento případ uvažováno jako 48 V nominálních (48 V akumulátor). Pro použití měniče s 24 V akumulátorem, je lepší navrhnout primární vinutí transformátoru jinak, nicméně omezený provoz je zajištěn i s tímto vinutím.

$$N_p = \frac{U_p * \frac{\delta}{f}}{2 * B * A_e} = \frac{48V * \frac{49\%}{85kHz}}{2 * 0,15T * 172mm^2} = 6z$$

Jelikož je primární vinutí se značně nižším napětím oproti napětí sekundárního obvodu, je i počet závitů značně nižší a rozdělení na poloviny je tedy aplikováno na vinutí sekundární. Primární vinutí bude v rámci zachování nízkých ztrát a zároveň zajištění dobré vodivosti s ohledem na tzn skin-efekt, vinuto pomocí měděného pásku s rozměry 29 mm \times 0,2 mm v řezu. Díky velké šířce měděného pásku zasahující téměř k oběma okrajům kostry, je nutné zajistit dobrou izolaci na okrajích kostry při vinutí sekundárního vinutí, aby nemohlo dojít k proražení izolace v tomto místě vlivem například propadnutého vinutí do spodní vrstvy.

Sekundární vinutí transformátoru je rozděleno na dvě samostatná vinutí, která budou zapojena sériově. To je stanoveno z důvodu vysokého výstupního napětí pro meziobvod, které může být nastaveno až na 850 V. Takto vysoké napětí je pro dimenzování každé z usměrňovacích diod sekundárního obvodu poměrně problematické samo o sobě, nicméně k němu je dále připočteno i napětí opačného průběhu transformátoru. Na diodách je měřitelný téměř dvojnásobek tohoto napětí, přičemž diody pro napětí více než 1,2 kV, jsou špatně dostupné. Z toho důvodu je tedy napětí na sekundární straně obvodu 425 V pro každou polovinu sekundárního vinutí. Z této informace lze vypočítat počet závitů sekundárního vinutí pomocí rovnice 9.

$$N_S = \frac{U_S * N_P}{U_{vstup_min}} = \frac{425V * 6z}{18V} = 142z \quad (9)$$

Sekundární vinutí je vinuto pomocí vodiče s průměrem 0,4 mm. Vypočtený počet závitů sekundárního vinutí je rozdělen na dvě poloviny a vinutí transformátoru jsou dodržována pravidla pro vinutí transformátoru, tedy nejprve polovina první části sekundárního vinutí, poté polovina druhé části sekundárního vinutí, následuje celé primární vinutí. Následuje druhá polovina druhé části sekundárního vinutí, a nakonec druhá polovina první části sekundárního vinutí. Mezi vinutími je vkládána silná izolační vrstva, jelikož suma napětí na sekundárních vinutích je až 2,4 kV a sekundární vinutí mezi sebou jsou namáhány napětím přibližně 600 V.

5.3.2 Návrh pracovní indukčnosti

Za měnič je nutné zařadit pracovní indukčnost, která je rozdělena na dvě části pro obě sekundární vinutí, nicméně obě sekundární vinutí budou v rámci nucené vazby využívat stejný magnetický obvod. Indukčnost této cívky je stanovena podle rovnice č. 10, ze které je následně pomocí rovnice č. 11 vypočten počet závitů obou polovin dvojité indukčnosti.

$$L = \frac{|U_{vstup_max} - U_{výstup}| * U_{výstup}}{2 * f * U_{vstup_max} * 0,4 * I_{výstup}} = \frac{|60 - 425| * 425V}{2 * 85kHz * 60V * 0,4 * 3A} = 12,6mH \quad (10)$$

$$N_L = \frac{L * I_{MAX}}{B * A_e} = \frac{12,6mH * 3A}{0,3T * 172mm^2} = 733z \cong 734z \quad (11)$$

Vzhledem k velkému počtu závitů indukčnosti a jejím vlastnostem je pro navíjení použit vodič o průměru 0,4 mm a izolace je vložena pouze mezi jednotlivé sekce obou sekundárních vedení.

5.3.3 Stanovení ztrát pro návrh chlazení

Ztráty tohoto měniče se budou projevovat na dvou významných místech. Prvním místem jsou spínací tranzistory plného můstku, které budou zatíženy vysokým vstupním proudem. Druhá významná část ztrát je situována v usměrňovací sekundárního vedení. Mimo tyto ztráty je obvod zatížen statickými ztrátami ve vinutí transformátoru a indukčnosti a dynamickými ztrátami v magnetickém obvodu těchto dvou prvků. Ztráty

v GDT budou minimální a lze je zanedbat, jelikož obvodem neprotéká žádný významný proud a ani není spínáno nikterak vysoké napětí.

Spínací frekvence tranzistorů byla stanovena v rámci výpočtu vinutí transformátoru na 85 kHz. Požadovaný výkon měniče je 2,5 kW výstupního výkonu, čemuž odpovídá vstupní proud o velikosti 52 A při napětí 48 V. Pro výběr tranzistoru a výpočet jejich ztrát je použita hodnota proudu o přibližně polovinu vyšší, která zahrne vliv účinnosti i rezervy obvodu, počítaný proud je tedy 75 A. Za pomoci těchto parametrů byly vybrány tranzistory typu IRFP4568PBF [26]. Maximální ztráty těchto spínacích tranzistorů jsou vypočteny pomocí rovnic 5-7. Celkové ztráty daného můstku jsou spočteny pro dva tranzistory, jelikož v jednu chvíli je v provozu vždy jen jedna dvojice tranzistorů.

$$P_d = \frac{1}{2} * U_{DS} * I_0 * (t_r + t_f) * f = \frac{1}{2} * 60V * 75A * (119ns + 84ns) * 85kHz$$

$$P_d = 38,8W$$

$$P_s = R * I^2 * \delta = 5,9m\Omega * 75^2 * 49\% = 16,3W$$

$$P_{celk} = P_s + P_d = 2 * (38,8W + 16,3W) = 110,2W$$

Diody usměrňovače sekundárního vedení jsou vybrány podle parametrů měniče určených dříve. Z katalogu dostupných diod byly vybrány diody DSEP12-12A [27]. Ztráty na usměrňovači sekundárního vedení s těmito diodami jsou stanoveny pomocí rovnic 12-14 [28].

$$P_d = \frac{1}{2} * C_R * U_R^2 * f + \frac{1}{6} * I_{RR} * U_R * t_b * f \quad (12)$$

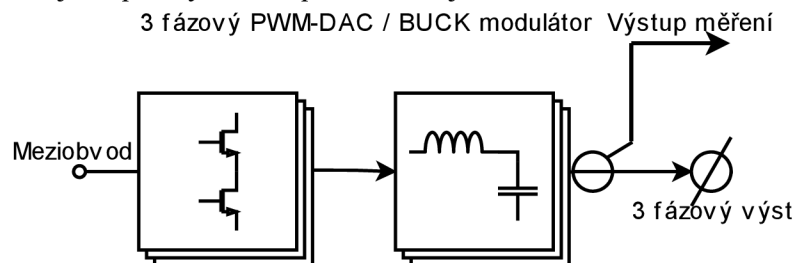
$$P_d = \frac{1}{2} * 12pF * 1200V^2 * 85kHz + \frac{1}{6} * 0,5mA * 1200V * 40ns * 85kHz = 0,73W$$

$$P_s = U_f * I_{MAX} * \delta = 2,75V * 3A * 49\% = 4,0W \quad (13)$$

$$P_{celk} = 4 * (P_s + P_d) = 4 * (0,73W + 4W) = 18,9W \quad (14)$$

5.4 Návrh výstupního bloku střídače

Blok výstupního střídače se skládá ze tří samostatných snižujících měničů spínaných pomocí vysokonapěťových tranzistorů. Klasické MOSFET tranzistory na takto vysoká napětí jsou špatně dostupné a jejich parametry jsou spíše horší než dostupnější IGBT tranzistory, které jsou pro vysoké napětí vhodnější.



Obr. 21: zjednodušený blokový diagram výstupního střídače

Snižující měniče slouží ke generování výstupního signálu tvořeného z napětí meziobvodu pomocí uživatelem určené vzorkovací tabulky, která zajišťuje možnost generace širokého spektra výstupních signálů. Obvody snižujících měničů jsou zapojeny s velmi malým výstupním kondenzátorem, díky čemuž je zajištěna rychlá reakce na změnu výstupní amplitudy podle vzorkovací tabulky. Nízká kapacita také znamená vyšší napěťový rozkmit, který je třeba dorovnat dostatečně rychlým spínacím kmitočtem měniče. Ten je stanoven jako polovina kmitočtu silového měniče z důvodu využití módu časovače „houpačka“, kdy časovač čítá nejprve celou periodu k maximu, kde otočí směr čítání a následně celou periodu dekrementuje. Díky této funkci je možné generovat symetrické signály s vyšší přesností, avšak výstupní kmitočet je tímto krokem dělen dvěma.

Z důvodu přesného sledování výstupního signálu je zavedeno měření výstupních parametrů napětí i proudu v každé periodě časovače, díky čemuž je možno nastavit softwarovou regulaci měniče s napěťovou regulací a stejně tak i s regulací proudovou. Vzhledem k požadavku generace co nejpřesnějšího harmonického signálu je zvolena regulace napěťová, kdy proud může volně klouzat s fází a charakterem zátěže.

Spínací tranzistory pro tento měnič je potřeba zvolit dostatečně rychlé, nicméně vzhledem k maximálnímu výstupnímu proudu pouze 3 A, v nejhorsím případě není potřeba vybírat tranzistory podle jejich proudové zatížitelnosti, ani napětí U_{CE} při otevření tranzistoru. Hlavním parametrem pro výběr těchto tranzistorů je jejich rychlost, a tedy i kapacita hradla. Rychlost IGBT tranzistorů je problematickým faktorem, jelikož IGBT jsou zpravidla tranzistory s většími dynamickými ztrátami, nicméně 42 kHz není kritický kmitočet. Z dostupných komponent byly vybrány tranzistory od firmy IXYS s označením IXA20IF1200HB [29].

5.4.1 Návrh výstupních indukčností

Pracovní indukčnosti snižujícího měniče jsou navrhovány obdobně jako pracovní indukčnost propustného měniče. Důležitými parametry pro správný návrh, jsou pracovní frekvence a rozsah vstupního a výstupního napětí. Dalším potřebným parametrem je volba jádra s možností vzduchové mezery, která slouží k akumulaci energie a je důležitou součástí takového měniče. Velikost vzduchové mezery je stanovena na 1 mm výběrem z dostupných jader. Potřebná indukčnost těchto cívek je vypočtena pomocí rovnice č. 15 vycházející z rovnice č. 10 s odebráním násobku frekvence, jelikož zde není použito buzení v obou půlperiodách. Výpočet probíhá pro dvě mezní hodnoty, tedy změnu z maximálního napětí meziobvodu 850 V na nejnižší hodnotu záporné půlperiody 5 V a pro změnu na nejvyšší výstupní hodnotu napětí 840 V.

$$L_{min} \geq \frac{|U_{vstup_max} - U_{výstup}| * U_{výstup}}{f * U_{vstup_max} * 0,4 * I_{výstup}} = \frac{|850V - 5V| * 5V}{42,5kHz * 850V * 0,4 * 3A} = 97,5\mu H \quad (15)$$

$$L_{max} \geq \frac{|U_{vstup_max} - U_{výstup}| * U_{výstup}}{f * U_{vstup_max} * 0,4 * I_{výstup}} = \frac{|850V - 840V| * 840V}{42,5kHz * 850V * 0,4 * 3A} = 193,8\mu H$$

Jako výsledná hodnota je zvolena nejvyšší hodnota z vypočtených, tedy minimálně 193,8 μH . Pro tuto hodnotu je pak vypočten počet závitů pro jádro ETD44 podle rovnice 11.

$$N_L = \frac{L * I_{MAX}}{B * A_e} = \frac{193,8\mu\text{H} * 3\text{A}}{0,1\text{T} * 172\text{mm}^2} = 34\text{z}$$

Počet závitů na jednu vrstvu vinutí vodičem 0,4 mm je 72 závitů. Vinutí je realizováno zdvojeným drátem průměru 0,4 mm, jedna vrstva vinutí je tedy 36 závitů. Výsledná indukčnost je tedy navinuta tímto způsobem. Jelikož je na kostře jádra dostatek místa a vinutí má pouze jednu vrstvu, není třeba se příliš obávat o ztráty v magnetickém obvodu, jelikož přenos tepla do okolí je dostatečný.

5.4.2 Stanovení ztrát pro návrh chlazení

Výpočet ztrát ve spínacím bloku snižujícího měniče je zatížen ztrátami na IGBT tranzistorech. Ztráty na indukčnosti nebudou v této části zahrnuty do výpočtu, jelikož je nelze přesně určit bez přesného modelu indukčnosti, který není příliš reálné stanovit, jelikož indukčnost vyráběna v domácích podmínkách. Ztráty na IGBT tranzistorech se skládají ze ztrát vodivostních a ze ztrát dynamických. Tyto ztráty je možno stanovit rovnicemi 5, 7 a 16.

$$P_d = \frac{1}{2} * U_{DS} * I_0 * (t_r + t_f) * f = \frac{1}{2} * 850\text{V} * 3\text{A} * (40\text{ns} + 100\text{ns}) * 42,2\text{kHz}$$

$$P_d = 7,6\text{W}$$

$$P_S = U_{CE} * I = 2,1\text{V} * 3\text{A} = 6,3\text{W} \quad (16)$$

$$P_{celk} = P_S + P_d = 6,3 + 7,6 = 13,9\text{W}$$

Pro stanovení celkových ztrát je potřeba vypočítat také ztráty na diodách jednotlivých IGBT, ty lze stanovit pro nejhorší případ pomocí rovnic 12 a 13.

$$P_d = \frac{1}{2} * E * f + \frac{1}{6} * I_{RR} * U_R * t_b * f$$

$$P_d = \frac{1}{2} * 0,7\text{mJ} * 42,5\text{kHz} + \frac{1}{6} * 0,1\text{mA} * 850\text{V} * 350\text{ns} * 42,5\text{kHz} = 14,9\text{W}$$

$$P_S = U_f * I_{MAX} = 2,2\text{V} * 3\text{A} = 6,6\text{W}$$

$$P_{celk} = P_S + P_d = 6,6\text{W} + 14,9\text{W} = 21,5\text{W}$$

Celkové ztráty výstupního bloku jsou sumou trojice ztrát IGBT a diody, jelikož jsou v obvodu zařazeny celkem 3 funkční bloky. Celkové ztráty výstupního střídače jsou tedy v nejhorším případě $3 * (21\text{ W} + 13,9\text{ W}) = 104,7\text{ W}$.

5.4.3 Shrnutí ztrát v obvodu, volba chladiče

Po stanovení všech ztrát je možné vybrat chladič, který zabezpečí udržení vhodné teploty na polovodičových prvcích. Celkové ztráty všech prvků jsou sumou ztrát střídače, vstupního měniče a usměrňovače. Celkovou hodnotou je tedy 110,2 W za silový měnič, 18,9 W za výkonový usměrňovač a 104,7 W za střídač. V součtu je ztrátová hodnota rovna 233,8 W ztrátového výkonu. K uchlazení takového výkonu je zvolen dostatečně

velký pasivní chladič a vhodný prvek pro rozvod tepla. K tomuto účelu byla zvolena hliníková pásovina s čelem o velikosti 10 mm × 60 mm, která slouží jako tepelný vodič mezi tranzistory a chladičem samotným. Pro chlazení bude použit profil chladiče s čelem o rozměrech 100 mm × 51 mm o délce 300 mm, který bude umístěn na vrchní straně pásoviny. Tepelný odpor tohoto chladiče je 1,4 °C/W při délce 100 mm, při délce 300 mm je tepelný odpor stanoven na 0,8 °C/W. Z jednoduchého výpočtu vyplývá, že při použití tohoto chladiče bude při maximálních ztrátách teplota chladiče o 187 °C vyšší, než je teplota okolí. Taková teplota je nepřijatelná pro použití tohoto chladiče. S takovou teplotou je tedy nutné použít aktivní chlazení, nebo kvalitnější tranzistory.

Dané zařízení bude obsahovat právě tento chladič jako kompenzaci za svou velikost a váhu zařízení, která je omezena. Z důvodu možného přehřátí při provozu, bude nutné navrhnout sofistikovaný systém ochrany proti přehřátí a případně ovládání aktivního chlazení. Vzhledem k nepravděpodobnosti výskytu takto vysokých ztrát v obvodu (při každém výpočtu jsou přidávány rezervy a výstupní střídač pravděpodobně nebude produkovat SS signál na všech fázích, aby se maximální ztrátový výkon projevil), je možné dané chlazení využít.

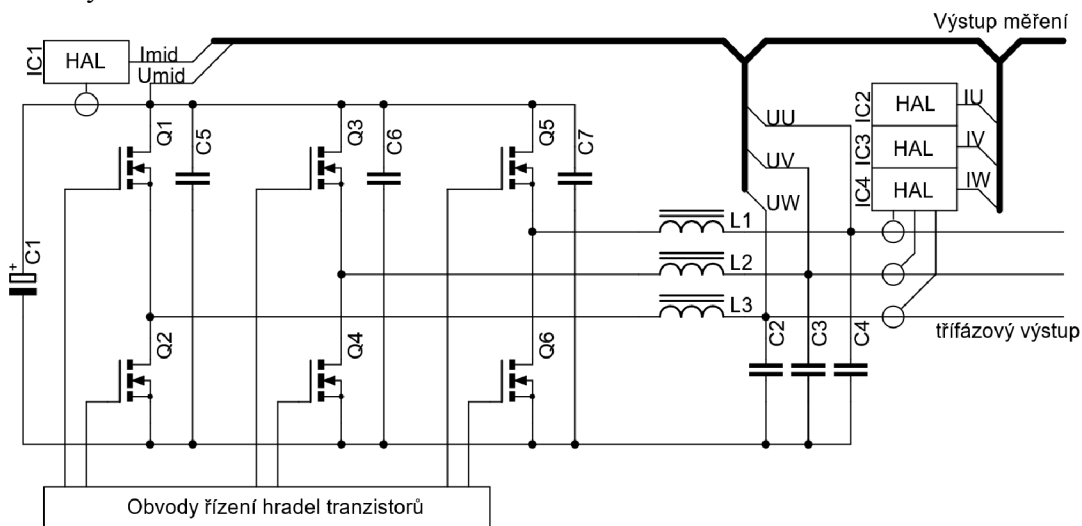
6. NÁVRH MĚŘICÍCH ČÁSTÍ DPS

V rámci řízení měniče je třeba získávat velké množství informací o jeho aktuálním stavu. Většina těchto informací je tvořena aktuálními napětími, nebo proudy v měniči, anebo na jeho vstupu či výstupu. Mimo tyto hlavní části, jako je měření napětí a proudu, je zde několik dalších parametrů, které jsou pro řízení nezbytné. Těmito parametry jsou teplota, frekvence a případně časové zpoždění.

Měření proudu v měniči je realizováno pomocí HALových sond, které měří magnetické pole v okolí vodiče, jež je generováno procházejícím proudem vodiče. Výstupním parametrem z těchto sond je napětí nebo proud v určitém poměru vůči proudu měřenému. Výstup těchto sond je navíc galvanicky oddělen.

Pro měření napětí je v měniči použito několik běžných napěťových děličů umístěných v jednotlivých částech zapojení, sloužící ke zmenšení měřeného napětí v přesném poměru do takové míry, aby bylo dané napětí měřitelné v rozsahu mikrokontroléru. V rámci softwarového zpracování dat je naměřené napětí zpětně přepočítáno na hodnotu reálnou pomocí několika konstant, které mohou být před programovány přímo v paměti programu v mikrokontroléru, nebo mohou být získány určitou formou kalibrace zařízení.

Měření časových parametrů v měniči je realizováno softwarovou metodou, kdy jsou porovnány jednotlivé vzorky z daného úseku měniče a pomocí Fourierovy transformace jsou určeny jednotlivé složky daného signálu. Ze znalosti požadovaných hodnot lze určit pracovní kmitočet měniče a za pomoci dalších parametrů lze při porovnání s ideálním průběhem určit například přibližnou hodnotu THD, nebo procentuální velikost chyby z rozdílu, mezi požadovaným tvarem generovaného signálu a signálem reálně naměřeným.



Obr. 22: Zjednodušené schéma měřicí aparatury na vysokonapěťovém bloku

6.1 Měření proudu na VN straně

Pro měření proudu na vysokonapěťovém vedení je možno použít různé metody, jako jsou přesné děliče napětí na obou stranách bočníku, integrované obvody stavěné k měření proudu na vysoké straně napájení, anebo měření proudu na zemní straně vedení. Měření proudu na zemní straně vedení je v případě tohoto měniče nevhodné z důvodu SS nesymetrie a rušení na tomto vedení vlivem spínání, a tak bylo vybráno měření pomocí HALových sond. Jelikož se jedná o aktivní sondy, je nutné pro ně zajistit vhodné napájecí napětí s nízkou úrovní šumu. Jelikož HAL sonda již v principu slouží k měření magnetického pole, není třeba řešit žádné přídavné galvanické oddělení měřicí části od VN části a zároveň není třeba ani řešit možný přenos rušení mezi oddělenými zeměmi.

Měření výstupních proudů a proudu meziobvodu je realizováno pomocí HAL sond typu LTS15-15, jejichž výstup je tvořen napěťovým signálem v rozsahu 0-5 V, kde díky schopnosti měření záporných proudů je nominální napětí na výstupu na polovině tohoto napětí, tedy 2,5 V. V rámci uvažovaného rozsahu je 0,5 V pracovní oblast do rozsahu 3,0 V pro ADC bez problému použitelná a mimo filtrační RC obvod není na výstupy těchto převodníků nic připojeno. Z důvodu vyšší kompatibility s jiným zapojením, je pro tento obvod zařazen do obvodu rezistor, který může vytvořit napěťový dělič, který ovšem není osazen.

6.2 Měření proudu akumulátoru

Měření proudu akumulátorem je realizováno pomocí dříve vybrané HAL sondy typu LA55-50. Tato HAL sonda zajišťuje výstupní proud v poměru 1:1000 oproti proudu vstupnímu. Při napětí 48 V na akumulátoru a zamýšleném výstupním výkonu 2,5 kW, prochází akumulátorem proud přibližně 50 A. Ze znalosti převodového poměru a maximálního napětí na mikrokontroléru 3,3 V s rezervou tedy 3,0 V, byl pomocí rovnice 17 vypočítán rezistor sloužící jako bočník pro měření tohoto měřicího proudu.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_{ADCmax}}{I_{in}/(I_{in}:I_{out})} = \frac{3V}{50A/1000} = 60\Omega \quad (17)$$

Vypočítaný rezistor velikosti 60 Ω , je složen ze dvou rezistorů 120 Ω v paralelní kombinaci a jejich výstup je přes jednoduchý RC člen naveden přímo na analogový vstup mikrokontroléru.

6.3 Měření vysokého výstupního napětí a napětí meziobvodu

Pro měření vysokého napětí je použit běžný napěťový dělič, jež je zatížen RC filtrem a svodem do AD převodníků v mikrokontroléru. Tato zátěž je z hlediska chyby měření zanedbatelná, jelikož proud touto zátěží je maximálně na úrovni nízkých jednotek μA . Pro návrh tohoto odporového děliče, pro tato vysoká napětí, jsou stanoveny požadované parametry, jako je proud děličem a výstupní napětí. Z hlediska nízkých ztrát na

rezistorech je vhodné volit co nejnižší proudy, ale s ohledem na fakt, kdy velmi nízký proud je snadno zarušitelný. Zvolený proud je tedy přibližně 1 mA, což při uvažovaném výstupním napětí 3.3 V maximálně (3,0 V ideálně) a z hlediska normované řady rezistorů byl stanoven měřicí rezistor na hodnotu 3,3 k Ω . Při úvaze maximálního výstupního napětí 900 V, je patrná volba dělicího poměru 1:300, aby bylo dosaženo požadovaného napětí 3,0 V na výstupu. Z tohoto poměru lze vyvodit použití rezistoru 990 k Ω . Z opětovného pohledu na tabulku normovaných rezistorů a z pohledu na velikost ztrát a také maximálního napětí na SMD rezistoru, byly vybrány rezistory 330 k Ω . Výsledný proud těmito prvky je tedy přibližně 900 μ A a výkonové ztráty celého děliče jsou pouze 0,8 W při 900 V na výstupu.

Výstupy těchto děličů jsou vedeny přes jednoduchý RC filtr do převodníku AD použitého mikrokontroléru. Pro lepší nasazení by bylo vhodné přidat do obvodu jednoduchý operační zesilovač zapojený jako sledovač napětí, který by zajistil nižší zátěž děliče, a tedy vyšší přesnost a zároveň možnost zatížení výstupu tak, aby byl méně náchylný vůči okolnímu rušení.

6.4 Měření vstupního napětí akumulátoru

Měření napětí na akumulátoru je možné realizovat podobným způsobem jako měření vysokého napětí. Problémem u tohoto měření je nutnost jeho galvanického oddělení, které podle předešlého výběru znamená použití samostatného převodníku AD s oddělenou SPI sběrnici. Tento převodník je dimenzován na napětí 5 V a jeho vstup je tedy i v tomto rozsahu rozšířen na úroveň 0-5 V. Zdroj je stavěn pro akumulátory 24 V nebo 48 V, kde 48 V akumulátor je při plném nabití na hranici 55 V. V rámci tolerance je tedy počítán dělič ze 60 V a při volbě opět 1 mA proudu s podobným dimenzováním komponent, jako u VN části je určen poměr rezistorů 56 k Ω vůči 4,7 k Ω . Celkové ztráty při této konfiguraci odpovídají 60 mW, díky čemuž není potřeba tyto ztráty prakticky nijak speciálně řešit.

6.5 Rozdělení převodníků AD z hlediska procesu MCU

Vybraný mikrokontrolér má ve své hardwarové výbavě celkem 5 převodníků AD, které jsou svými vývody různě rozmístěné po celém obvodu mikrokontroléru a různě se překrývají s dalšími funkcemi. Z hlediska řízení měniče je tato část velmi důležitá, jelikož v měniči se nachází hned několik časově závislých signálů, které je potřeba měřit v přesné intervaly, jako je například moment sepnutí tranzistorů. Pro tyto účely je žádoucí mít možnost spustit několik měření paralelně, což je zajištěno několika převodníky AD.

Rozdělení těchto převodníků je nutné zajistit tak, aby bylo možné měřit v jednu chvíli napětí a proudy v potřebných kombinacích, které jsou popsány v následujícím diagramu. Zároveň je potřeba uvážit možnost měření výstupních parametrů ve stejnou chvíli na všech fázích, aby bylo možné stanovit přesný výstupní výkon v každý okamžik generace.

Měření zpravidla probíhá v polovině pulzu sepnutí patřičného tranzistoru, kde u měření proudu akumulátoru je to polovina pulzu sepnutí spodního tranzistoru, stejně tak i proud meziobvodu je měřen ve stejnou chvíli, protože právě v tu chvíli je dodávána energie do filtračního elektrolytického kondenzátoru. Měření charakteristik výstupních signálů probíhá ve stejném nastavení pouze se změnou spodního tranzistoru za tranzistor horní.

	Převodník AD	První převod	Druhý převod	Třetí převod
Skupina 1	ADC1	Napětí fáze U	Proud fáze U	Proud meziobvodem
		Kanál 14	Kanál 2	Kanál 5
	ADC2	Napětí fáze V	Proud fáze V	Proud akumulátorem
		Kanál 1	Kanál 5	Kanál 4
	ADC3	Napětí fáze W	Proud fáze W	Napětí středu (nulový výstup)
		Kanál 12	Kanál 1	Kanál 5
Skupina 2	ADC4	Napětí meziobvodu	Proud meziobvodem	
		Kanál 3	Kanál 4	
	ADC5		Proud akumulátorem	
			Kanál 1	
API ADC	Napětí akumulátoru			

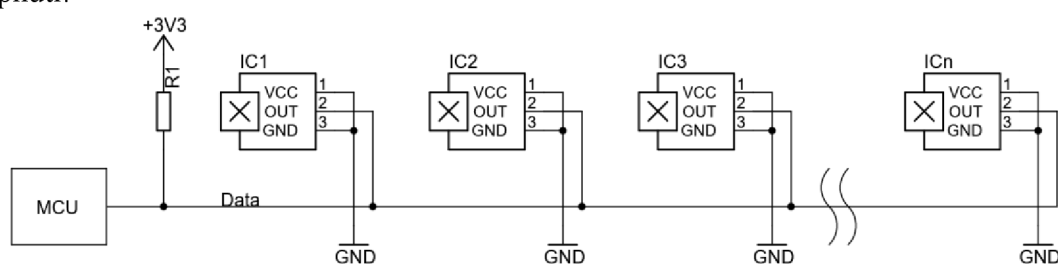
Obr. 23: Obrázek posloupnosti měření převodníků AD

Měření jednotlivých kanálů je rozděleno do dvou skupin, kde první skupina je určena k periodickému vzorkování signálu konstantní frekvencí 10 kHz. Tyto převody jsou následně přepočítávány a jsou použity jako hlavní podklad pro výpočty RMS hodnot daných parametrů. Druhá skupina převodů čítající převodník ADC4 a ADC5, je vyhrazena pro pracovní měření řízení měniče. Tyto převody jsou spouštěny pomocí přerušení volaného časovačem, který řídí vstupní DC/DC měnič. Tento časovač zahájí přerušení vždy v polovině své periody, tedy přesně uprostřed doby sepnutí spodního tranzistoru v tranzistorovém můstku. Tím je zajištěno měření průměrné hodnoty proudu tímto můstkem a zároveň i napětí, dle kterého je možné měnič regulovat.

6.6 Měření teploty měniče

V celém měniči je hned několik míst, které jsou zatíženy velkou výkonovou ztrátou. Těmito místy jsou dříve vypočtené součásti jako spínací tranzistory hlavního měniče, jeho usměrňovač a také výstupní střídače. U pomocného zdroje je vhodné sledovat teplotu lineárních stabilizátorů na jeho výstupech, zejména z důvodu možnosti napájení externích částí mimo měnič ze stejného zdroje. V základním zapojení měniče nicméně tato teplota není důležitá. Poslední částí, jež je vhodná měřit, je referenční teplota na DPS umístěná ideálně v místě mimo zbylé části elektroniky, aby nedocházelo k jejímu ovlivňování. Vybraný mikroprocesor má sice hned několik převodníků AD, nicméně všechny byly již rozděleny pro měření důležitějších parametrů měniče a měření teploty by tento proces pouze zpomalilo. Navíc analogové vedení od pěti samostatných měničů k MCU znamená vyšší nároky na vedení cest na DPS, kde je velké riziko zarušení tohoto vedení díky

nutnosti průchodu pod výkonovými měniči. Z těchto důvodů byla zvolena cesta s digitálními čidly se sériovou sběrnicí, kde je možné mít zapojených čidel více na společném vedení. Jednotlivá čidla jsou oddělitelná 0 Ω rezistorem, pro možnost jejich odpojení v případě nepoužívání daného čidla, aby daný vývod netvořil zbytečný odraz na vedení, a tedy i riziko zarušení komunikace. Vybraná čidla jsou typu DS18B20 zapojena na jednovodičové sběrnici s označením DALASS OneWire. Čidla jsou zapojena v tzv. parazitním režimu, který je vyobrazen na obrázku 24. V tomto režimu potřebuje každé čidlo pouze signálovou zem a datové vedení, ze kterého je v okamžiku logické 1 zároveň i napájeno. Jednotlivá čidla jsou po prvním zapojení identifikována a jejich adresy jsou pevně vepsané do paměti MCU, aby nebylo nutné provádět jejich kalibraci po každém zapnutí.



Obr. 24: DS18B20 zapojená k MCU v parazitním režimu operace

Tohle řešení není nejvhodnější z hlediska produkce více měničů, anebo výměně čidla, nicméně pro aktuální provoz je dané řešení dostačující. Výjimkou je čidlo referenční teploty, které je připojeno na sběrnici I²C a je typu LM75. Jiný typ teplotního čidla pro referenční teplotu, vychází zejména z dříve uváděného blokového rozložení DPS, kde vedení signálové cesty OneWire, mezi jinými sběrnicemi digitálních komunikací s pamětmi, jako jsou SPI a I2C, by bylo neefektivní a potenciálně problematické. Z toho důvodu bylo zvoleno čidlo pro jednu z těchto sběrnic, konkrétně pro I2C kvůli jednoduchosti adresace bez nutnosti vedení dalšího vodiče.

7. SPRÁVA DAT MĚNIČE A FIRMWAROVÁ OBSLUHA

Nedílnou součástí navrhovaného měniče je digitální komunikace mezi deskou měniče a deskou řídicí. Tato komunikace slouží k nastavování parametrů měniče podle uživatelské volby, ale také k přenosu reálných změřených parametrů zpět do desky řídicí, kde jsou tato data dále zpracována. Z pohledu zpracování dat je nutno zajistit několik operací s daty. Tyto operace jsou například korektní příjem a rozřídění dat podle patřičné adresy a popisného bloku, přepočítání dat na požadované rozsahy a veličiny a také jejich uložení do paměti. Ukládání dat musí být tzv. fail-safe, tedy aby při ukládání dat a elektrickém výpadku ve stejnou chvíli, došlo ke ztrátě pouze minima dat, v ideálním případě pouze aktuálně ukládaného vzorku. Přenesená a zpracovaná data jsou poté v paměti k dispozici pro LCD aplikaci a pro webovou stránku. Rozložení dat pro více aplikací je samostatná část problematiky, jelikož je nezbytné správně řídit přístupy k danému souboru a zamezit možnosti, kdy by dvě a více vláken systému přistupovaly ke stejnému souboru a soubor upravovala. Mohlo by dojít ke kolizi, kdy budou některá data poškozena, anebo dokonce celý soubor nebude čitelný. Jelikož jsou zobrazovaná data ve většině případů pouze pro zobrazování, daný soubor má pro většinu aplikací značku oznamující, že daný soubor je pouze pro čtení. Aplikace s právem zápisu, je pouze aplikace sloužící ke komunikaci po rozhraní CAN. Při uživatelském požadavku na smazání souboru dojde k přesunu oprávnění a rozhraní CAN ukládá do souboru nového. Uživatelské aplikaci bude změněno oprávnění a daný soubor bude vymazán.

K přenosu dat mezi deskami je využito rozhraní CAN, které v základním rozložení implementuje speciální komunikační packet sloužící ke spojení mezi dvěma prvky. Datový záznam ovšem definovaný není a je nutné implementovat určitý datový protokol, se kterým budou veškeré aplikace na rozhraní CAN počítat a budou s ním umět pracovat. Jedním z vhodných komunikačních protokolů je tzv. CAN-Open. CAN-Open je aplikační vrstva sloužící k řízení zařízení a zajištění přístupů k časově podmíněným procesním datům. Pro vyšší univerzálnost je CAN-Open rozdělen na několik submodulů sloužících k snazšímu rozdělení ovládání a datové komunikace, nebo i správy zařízení. Pro třídění datové komunikace v CAN-Open protokolu je využit speciální typ slovníku, kde jsou pro celou aplikaci definované datové typy i data, jež jsou přenášena.

Pro aplikaci měniče je CAN-Open výrazně složitějším protokolem, než je využitelné, a naopak díky jeho složitosti by mohlo docházet ke zpoždění přístupů vlivem čekání na proces a zpracovávání komunikace. Z těchto důvodů byla zvolena možnost tvorby proprietární aplikační vrstvy protokolu, která je přímo stavěna pro účely měniče a jeho řízení.

7.1 Proprietární protokol CAN

Při definování vlastního protokolu bylo uvažováno několik faktorů, jako je co nejvyšší možnost využití hardwarové akcelerace mikrokontroléru, rychlý a jednoduchý přenos informací a možnost rozdělení několika typů zpráv, jako jsou data, řízení a zprávy o chybě či výpadku. Díky malému množství plánovaných připojených zařízení byla pro identifikaci zprávy, zařízení i základního typu dat ve zprávě použita část adresního prostoru zařízení komunikujícího po rozhraní CAN. Tento adresní prostor je u standardu „CAN Standard“ definován jako 11bitový dlouhý řetězec, který je hardwarově tříděn a rozdělován podle priority. Této funkcionality bylo využito pro rozdělení zprávy na její typ (nejvyšší prioritní dělení), na adresu zařízení a v poslední části priority na ID zprávy samotné. Konkrétní rozdělení je v poměru 2:4:5 bitů. Rozdělení je možno vidět v tabulce 2.

Tabulka 2: Rozdělení adresy CAN standard protokolu

Bity adresy CAN (CAN standard, 11bit)											
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	CAN IDE bit
MT1	MT0	ID3	ID2	ID1	ID0	MI4	MI3	MI2	MI1	MI0	Vlastní označení
0	0										Chybová zpráva
0	1										Nevyužito
1	0										Příkaz
1	1										Data
		ID3	ID2	ID1	ID0						4bitové ID zařízení
						MI4	MI3	MI2	MI1	MI0	5bitové ID zprávy

ID zařízení o délce 4 bitů je uživatelsky nastavitelné BCD přepínačem na patřičném zařízení (měnič, řídicí jednotka i další zařízení). Díky tomuto rozdělení je poté celá datová část, která je tvořena celkem až 8 byty u CAN standard, zálohovaná pouze pro zprávu samotnou. Při vhodné konfiguraci zařízení a jeho slovníku tak, aby všechna komunikace byla identifikovaná pouze 5-bitovými ID zprávami, není třeba posílat navíc žádný další údaj, který by zprávu identifikoval nebo blíže určil. Toho je využito zejména za účelem přenosu celé look-up tabulky, značící nový průběh výstupního signálu měniče, který je poměrně dlouhý a jeho přenos by zabral zbytečně dlouhou dobu mezi zasláním vzorků.

7.2 Datová propustnost sběrnice CAN

Sběrnice CAN může být nastavena na různou rychlost komunikace v rozsahu od několika bitů až po jeden megabit za sekundu. Tato komunikační rychlost se poté rozprostírá do celého protokolu a konfigurace periferie CAN mikrokontroléru, kde je nutné dále stanovit

další parametry, jako například úroveň doby bitu, kdy je provedeno snímání dat nebo synchronizace. Celková délka jednoho bitu v komunikaci je tedy rozdělena na tzv. Time Quanta, jež se nastavují pro dosažení optimální konfigurace pro danou komunikaci. Pro účely měniče byla vybrána komunikační rychlost 250 kbps a rozdělení Time Quanta v poměru 12:2.

Při zvolené konfiguraci je možné teoreticky přenést až 18 kB dat za jednu sekundu. Taková rychlost není dosažitelná ve chvíli, kdy bude komunikováno s více zařízeními a bude mezi přenosy probíhat jistá část synchronizace, nicméně pro účely měniče i s možností komunikace s více zařízeními, je tato rychlost vyhovující a v případě komplikací například s příliš dlouhým vedením mezi zařízeními je možné snížit komunikační rychlost až na polovinu, tedy 125 kbps, a stále bude komunikace udržena bez nuceného čekání i s uvažovanými vícero zařízeními. Druhá možnost je zajištění komprese dat pro přenos, která by zajistila snížení datového toku, a tedy i množství přenášených dat za cenu delší doby výpočtu na straně řídicí DPS i na straně měniče.

7.3 Použití systému RTOS

Řídicí část musí obsloužit komunikační periferie s hned několika sofistikovanými komunikačními protokoly a zároveň musí být připravena včas reagovat na externí podněty, jako je práce s grafickým rozhraním pomocí dotekového panelu nebo příchozí zpráva po jedné z komunikačních sběrnic. Z tohoto důvodu byl pro práci na tomto zařízení použit operační systém typu RTOS, který zajišťuje jednoduché vytváření procesů označených jako vlákna systému, která je možné obsluhovat. Jednotlivá vlákna mají přidělenou vlastní operační paměť a dobu, po kterou mohou pracovat. Ve chvíli, kdy tato doba vyprší, nebo vlákno oznámí dokončení daného cyklu pomocí speciální funkce, dojde k přepnutí ukazatele na funkci jiného vlákna včetně přepisu ukazatele mikrokontroléru, čímž dojde ke kompletní změně operační části kódu mikrokontroléru bez ztráty jakýchkoli informací.

Pro účely zařízení bylo využito vydání RTOS systému označené jako FreeRTOS od společnosti Amazon, které je pro toto zařízení plně vyhovující a univerzální. Operační systém se stará o funkci komunikace periferie ethernet, USB, práci s displejem i komunikaci po rozhraní CAN. Operační systém se dále stará o přidělování operační paměti jednotlivým vláknům a o správu této paměti, díky implementaci vlastní knihovny pro dynamickou alokaci paměti. Mimo operační systém je využita část externí operační paměti pro video-buffer grafické knihovny, která je následně také obsluhovaná pomocí systému FreeRTOS v jednom ze založených vláken. Systém je nastaven jako reentrantivní (každé vlákno má přidělený svůj výpočetní čas, který je pevný). Díky této funkčnosti systému je možné spoléhat na maximální zpoždění mezi návštěvami jednoho vlákna a tím i zajištění minimální rychlosti čtení například ze sběrnice CAN nebo z ethernetového rozhraní.

7.4 Terminál na sériové lince

Terminál po sériové lince je k dispozici na obou deskách zařízení, jak na desce řídicí, kde je galvanicky spojen s DPS, tak na desce měniče, kde je terminál vyveden pomocí galvanicky odděleného USB s funkcí VCP. Terminál na řídicí desce je určen výhradně pro účely ladění, jeho pravidelné použití není uvažováno. Z tohoto důvodu jsou na tento terminál vypisovány zprávy o využití operační paměti systému, alokaci grafické paměti, snímkové frekvenci, stavu systému a další informace vhodné pro ladění programu. V terminálu jsou dále vypsané informace o přijetí zprávy po sběrnici CAN včetně výpisu dané zprávy s omezenou délkou, díky čemuž je potencionálně možné pracovat i pouze s tímto terminálem pro čtení daných dat.

Použití terminálu na desce měniče je značně rozsáhlejší. Na této desce není implementován operační systém a výpisy paměti tedy nemají příliš smysl, naopak je na tento terminál pravidelně vypisován kompletní stav měniče, jeho napětí, proudy i teploty a další informace. Tyto informace je možné bez problému použít pro kompletní práci s měničem včetně sledování jeho stavu. Aby bylo možné s měničem plně pracovat i bez řídicí desky, například v případě testování speciální zátěže, nebo v režimu použití jako zdroj třífázového střídavého signálu, je možné tento měnič přes sériovou linku plně ovládat. V měniči je implementováno několik jednoduchých příkazů pro správu měniče a nastavení většiny jeho parametrů, které jsou pro terminál využitelné.

7.5 Souborový systém a ukládání dat

Souborový systém je na řídicí desce implementován v paměti typu NOR. Jedná se o paměť s kapacitou pouze 16 Mb, kde je potřeba zvolit vhodný souborový systém, aby nebylo plýtváno pamětí. Zároveň je nutné vybrat souborový systém, který zajistí možnost zapisování souborů bez nutnosti přepisu celých bloků, při každé změně některého z nich a také bez nutnosti přepisu alokační tabulky, při změně velikosti souboru. Poslední podmínkou výběru souborového systému je zajištění tzv. WearLevelingu, který zajistí rovnoměrné opotřebení paměti. Podle těchto kritérií byl vybrán souborový systém s označením LittleFs, který zajišťuje všechny potřebné funkcionality. Díky své jednoduchosti a možnosti zajištění všech potřebných parametrů je pro každý soubor vyhrazen celý jeden blok paměti, díky čemuž je maximální počet souborů a jejich velikost značně omezena.

Měnič má možnost práce s více zařízeními najednou, nicméně maximální uvažovaný počet zařízení, vyplývající mimo jiné i z vytvořeného komunikačního protokolu sběrnice CAN, je 16 zařízení. Při úvaze jednoho souboru pro každé zařízení a binárním záznamu informací je paměť dostatečně velká pro celý týdenní záznam. Pro záznam celého roku, nebo ještě delších úseků je nutno použití jiné paměti než paměti interní, jako je například externí paměťová SD karta. Při použití externí SD karty je možné ji naformátovat na souborový systém LittleFS, který zajistí bezpečnost souborů při náhlém výpadku

napájení. Souborový systém LittleFS je poté třeba zprovoznit pomocí vhodného software i na osobním počítači, aby bylo možné data z karty přečíst. Druhou množností je použití běžného souborového systému, jako je například FAT32, kde je bohužel riziko ztráty dat při náhlém výpadku napájení. Možná je i kombinace těchto vlastností, kdy by se data ukládala do interní paměti a v případě obsazení dostatečné kapacity k naplnění celého bloku paměťové karty můžou být data překopírována. Nevýhodou tohoto řešení je nutnost čekání na dokončení kopírování před započítím další operace se soubory a také opotřebovávání povrchu obou pamětí a tím snižování jejich životnosti.

7.6 Ethernet a webová stránka

Primární ovládání celého zařízení je směřováno na webovou stránku, která je tvořena lokálním serverem na daném zařízení. Účelem této webové stránky je propojení mezi uživatelem a měničem, kdy pro uživatele jsou na webové stránce zobrazeny všechny potřebné údaje měniče. Navíc jsou na webové stránce navrženy pole, do kterých je možné zapisovat a tím udávat nové hodnoty pro měnič. Webová stránka je navržena ve velmi prostém designu, díky čemuž je možné ji provozovat z malého html souboru uloženého v paměti procesoru a není třeba jej načítat z externí paměti jako by tomu bylo s většími soubory podporující například stylizování a speciální funkčnosti se skripty, nebo různými webovými doplňky.

K provozu webové stránky a práce s internetem obecně je na zařízení implementována knihovna LWIP, která obsahuje potřebné součásti jako jsou protokoly TCP a UDP, stack pro TCPIP, anebo například službu DHCP pro automatické přidělení IP adresy nadřazeným routerem. Z pohledu ovládání je u zařízení možné přepínat mezi staticky nastavenou IP adresou a adresou přidělenou routerem. K tomuto přepínání je určen hardwarový přepínač umístěný na řídicí DPS. Tento přepínač je programem zpracován pouze při zapínání a není předpokládáno, že by se jím hýbalo v rámci běhu programu. Pro konfiguraci statické IP adresy je na displeji možno zobrazit menu s jednotlivými řádky pro vstup IP adresy, masky sítě a výchozí brány. Při nastavení zařízení do režimu práce s DHCP, jsou tato pole využita pro zobrazení automaticky přidělené adresy a dalších parametrů pro uživatele, aby bylo možné se na server připojit. Webová stránka je na zařízení provozována pomocí LWIP modulu s názvem HTTPD. Jedná se o modul sloužící pro účely jednoduchého webového serveru tvořeného embedded zařízením, které neobsahuje komplexní operační systém. Webový server používá prostý http protokol a pro komunikaci se zařízením jsou použity vrstvy SSI a CGI. Vrstva SSI je využita pro předávání nových informací webové stránce, tedy informací jako jsou aktuální parametry měniče, nebo jiné hodnoty, které jsou proměnné a nejsou pevně zapsány v HTML souboru webové stránky. Tyto hodnoty jsou v HTML souboru uvedeny pod speciální syntaxí udanou LWIP knihovnou, která je následně nahradí za korektní hodnoty. Pro opětovné přečtení hodnot z webové stránky, které uživatel zadal, je využita funkce tzv. GET pracující za pomoci tzv. CGI tagů adrese

stránky. Jedná se o parametry webové stránky, které jsou vypsány přímo v adrese webu za speciálními oddělovacími symboly, jako je například symbol „?““. Po tomto speciálním symbolu následuje jméno parametru a jeho hodnota. Kvůli omezení prohlížečů a také webu samotného je pro danou adresu vymezeno pouze 1024 znaků, které lze takto předat. Tohle omezení je poměrně kritické pro nastavení měniče. Při požadavku na změnu několika nastavení, nebo pro přenos celé look-up tabulky s novým signálem, který se má generovat, je tato délka plně vyčerpána. Aby byl daný přenos reálný, je na stránce implementován velmi jednoduchý skript pomocí skriptovacího jazyka java-script. Tento skript má za úkol přepočítat vstupní údaje uživatele a ve zkrácené formě je zaslat jako jednu informaci, tedy jeden tag. Náhled této webové stránky bez vyplněných hodnot zařízení (pro demonstraci bylo dočasně zakázáno SSI i CGI) je možné vidět na obrázku 25.

Fáze	Fázový posun napětí	Fázový posun proudu	Napětí	Proud
U	<input type="text" value="<!--#u_fpn-->"/>	<input type="text" value="<!--#u_fpp-->"/>	<input type="text" value="<!--#u_n-->"/>	<input type="text" value="<!--#u_p-->"/>
V	<input type="text" value="<!--#v_fpn-->"/>	<input type="text" value="<!--#v_fpp-->"/>	<input type="text" value="<!--#v_n-->"/>	<input type="text" value="<!--#v_p-->"/>
W	<input type="text" value="<!--#w_fpn-->"/>	<input type="text" value="<!--#w_fpp-->"/>	<input type="text" value="<!--#w_n-->"/>	<input type="text" value="<!--#w_p-->"/>

Dodávaný výkon	
Činný	<input type="text" value="<!--#p_c-->"/> W
Jalový	<input type="text" value="<!--#p_j-->"/> VA
Sdružený	<input type="text" value="<!--#p_s-->"/> VAr

Dodávaná energie	<input type="text" value="<!--#de-->"/> kWh
Výstupní frekvence	<input type="text" value="<!--#vff-->"/> Hz

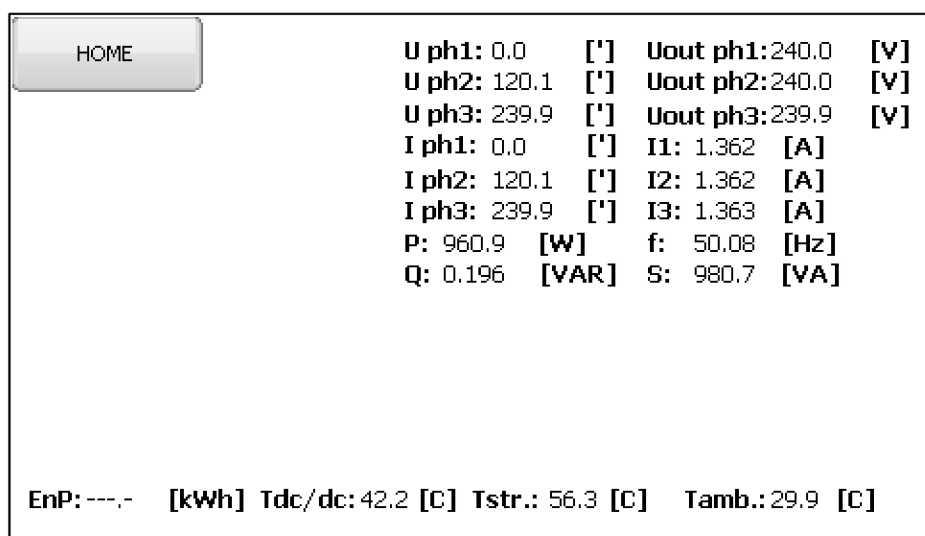
Teplota vstupního měniče	<input type="text" value="<!--#t_vm-->"/> °C
Teplota střídače	<input type="text" value="<!--#t_s-->"/> °C
Teplota pomocného zdroje	<input type="text" value="<!--#t_pz-->"/> °C
Teplota usměrňovače	<input type="text" value="<!--#t_u-->"/> °C
Referenční teplotní bod	<input type="text" value="<!--#rtb-->"/> °C

Obr. 25: Náhled webové stránky se surovými poli připravenými pro data

7.7 LCD a ovládací obrazovky

Řídící DPS měniče, která obsahuje LCD panel, je určena pro rychlý přístup k informacím o měniči a v budoucnu k informacím o celé sestavě. Účelem LCD samotného je zejména zobrazení aktuálního stavu a většiny parametrů z měniče, které jsou důležité pro zajištění kompletního přehledu nad aktuálním stavem měniče a jeho výstupech.

Zobrazení dat na displeji je pevně dané v programu mikrokontroléru a není uživatelsky měnitelné. Data jsou čerpána z databáze, která je pravidelně aktualizována pokaždé, když jsou nová data k dispozici, a právě tato data jsou na displeji zobrazována. Data jsou zobrazována jako číselné údaje vedle patřičných popisků, nicméně v displejovém rozhraní je implementována i příprava pro vykreslování fázorového diagramu, nebo dlouhodobé charakteristiky vybíjení akumulátoru. Tyto grafy ovšem nejsou součástí této práce. Náhled obrazovky s daty z měniče je možné vidět na obrázku 26, jež je snímkem z VNC serveru řídicí DPS měniče. Data z obrázku pochází z testovacího měniče zatíženého třífázovou topnou spirálou s odporem 470 Ω za studena. Vypočtená hodnota odporu při provozní teplotě se pohybuje mezi 500-550 Ω . Výkon spirály je výrobcem stanoven na 1 kW.



Obr. 26: Snímek z VNC serveru aktuální obrazovky měniče s odporovou zátěží

Z pohledu práce se software je pro účely grafické nastavy implementována knihovna od fy. SEGGER s názvem emWin v distribučním balíčku firmy STMicroelectronic. Tato knihovna zajišťuje přímou implementaci základních prvků označované jako widgety, jimiž jsou například tlačítka, textová pole, editovatelná pole nebo třeba obrázky, které je možné umístit do svého grafického designu. Implementaci této knihovny zajišťuje samostatné vlákno RTOS systému, vyjma kterého je pomocí přerušení implementována navíc obsluha dotekového panelu. Grafická knihovna zajišťuje pouze vykreslování jednotlivých widgetů. Samotný proces vykreslování a práci s LCD je nutno implementovat v patřičném souboru knihovny. Díky této samostatné implementaci bylo možné značnou část práce s grafikou optimalizovat tak, aby využívala hardwarovou akceleraci mikrokontroléru STM32F429 a tím urychlila vykreslování samotné. Mezi prvky této hardwarové akcelerace patří zejména Chrom-ART akcelerátor, který se stará o rychlé a efektivní kopírování dvourozměrných polí, zajištění jejich prolínání na úrovni průhledností a také konverzi formátu obrazce. Díky tomuto akcelerátoru bylo možné implementovat veškeré obrázky v grafickém rozhraní ve formátu JPEG. Tento formát

obrázků přináší možnost velmi malé spotřeby paměti kódu, kde jsou obrázky uloženy, nicméně obvykle je jeho vykreslování velmi složité, díky nutnosti dekomprese komprimovaných obrazových dat. Jelikož použitý mikrokontrolér umí práci s touto kompresí hardwarově akcelarovat za pomoci grafického jádra, je jeho vykreslování pouze minimálním zpožděním.

8. MĚŘENÍ VÝSTUPŮ MĚNIČE

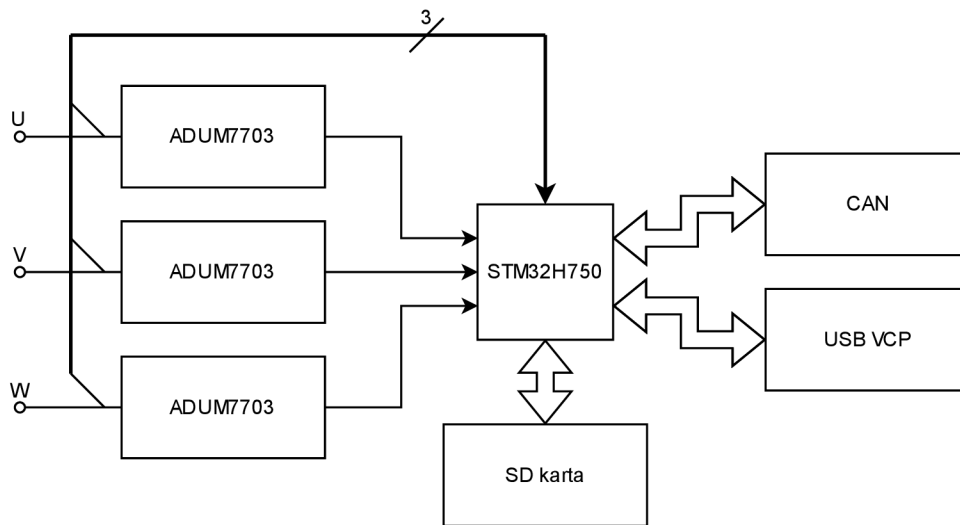
Účelem tohoto měniče je generace zejména střídavých průběhů vysokého napětí zajišťující možnost tvorby umělé sítě pro testování a provoz zařízení. Z těchto důvodů je potřeba provést na měniči hned několik měření. Tato měření vypovídají o možnostech tohoto měniče, jeho hraničních parametrech a také schopnosti dlouhodobého provozu z pohledu vlastního ohřevu a tím i nepřímo účinnosti měniče. Měření měniče bylo nezbytně nutné použít i pro ladění měniče samotného, kdy bylo třeba stanovit přenosovou funkci zpětné vazby a pomocí patřičných kompenzačních obvodů ji nastavit tak, aby nemohlo dojít k rozkmitání měniče.

8.1 Měření parametrů měničů a jejich ladění

Pro měření přenosové funkce pomocného zdroje bylo použito zapojení s vloženým zanedbatelně velkým rezistorem do zpětné vazby, kam byl přiváděn samostatný plovoucí signál. Pomocí osciloskopu byl vyhodnocován průběh generovaný generátorem na rezistoru a reakce měniče na tyto podněty. Z osciloskopického průběhu byla vyčítána amplituda signálu, která byla mezi oběma kanály komparována. Mimo amplitudy byl odečítán fázový posun mezi signály. Tyto parametry byly vyneseny do grafu, který vykresloval kompletní přenosovou funkci. Z naměřené přenosové funkce bylo určeno, že obvod nesplňuje kritéria fázové bezpečnosti a obvod může mít tendenci kmitat. Aby tomu bylo zamezeno, byl v obvodu implementován kompletní kompenzační obvod třídy II, který zajistil dostatečnou fázovou bezpečnost.

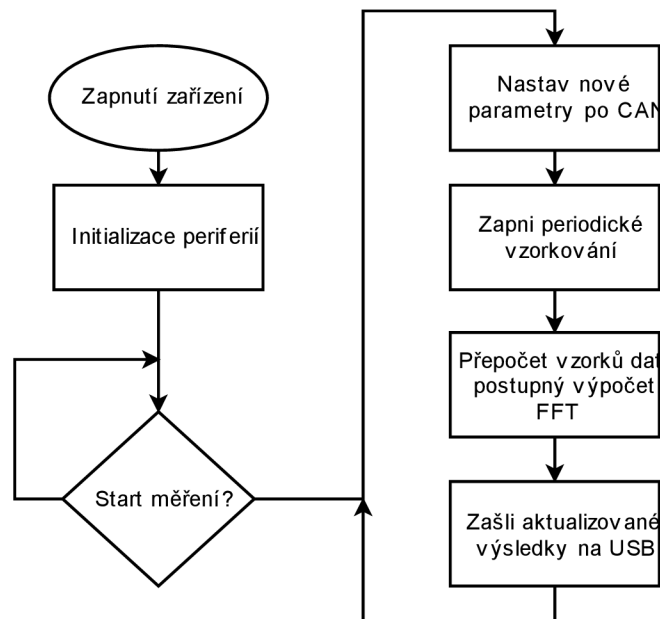
Pomocí přesně stanovené přenosové funkce hlavního měniče byly získány také parametry použitého PI regulátoru, který slouží k digitálnímu řízení měniče. Pro korektní konfiguraci tohoto regulátoru byla opět použita stejná technika získání přenosové funkce a zajištění její stability udržením kritéria stability. Tohle kritérium stanovuje, že je nutné udržet zesílení menší než jedna při fázi -180° [30].

Pro stanovení THD výstupního signálu, ale také pro stanovení přesnosti generovaného ne-harmonického signálu, jeho maximálního a minimálního napětí a proudu je nutné navzorkovat generovaný střídavý signál do paměti a poté jednotlivé parametry vypočítat. Jelikož se jedná o třífázový signál, je nutné měřit ideálně všechny tři fáze v jednu chvíli a data ukládat s dostatečnou rychlostí. Samotné amplitudy maximálního napětí a proudu byly ověřeny pomocí kalibrovaného stolního multimetru typu MIT380. Třífázové parametry a parametry závislé na časové základně, jako jsou například přesnost generace fázového posunu, generované frekvence, anebo střídání signálu, byly změřeny pomocí samostatného zařízení navrženého pro účely měření tohoto měniče. Jedná se o jednoduché zapojení s možností měření tří plovoucích proudových bočniců a tří fázových napětí v jednu chvíli. Blokové schéma tohoto zařízení je vyobrazeno na obrázku 27.



Obr. 27: Blokové schéma zapojení pomocného měřicího zařízení

Jádrum pomocného měřicího zařízení je výkonný mikrokontrolér STM32H750 taktovaný na kmitočet 480 MHz. Díky jeho velké interní operační paměti až 1 MB bylo možné implementovat kompletní algoritmus pro měření. Tento algoritmus si sám ovládá desku měniče pomocí integrované periferie CAN, a je tedy schopen nastavovat výstupní parametry měniče podle potřeby k měření bez nutnosti uživatelského vstupu. Výstupem tohoto zařízení je sled dat zasílaný přes sériovou linku implementovanou pomocí USB rozhraní s integrovaným obvodem FT230Q, sloužící jako převodník z UART sběrnice na USB s VCP protokolem. Zasílaná data do konzolové aplikace jsou ve formátu přímých výsledků použitých k vyhodnocení. Tato data jsou pomocí mikrokontroléru STM32H750 měřena dvěma sadami převodníků AD, kde první sada je implementována přímo v mikrokontroléru a je použita k vyhodnocení výstupního napětí. Druhá sada je k mikrokontroléru připojena pomocí DFSDM sériové sběrnice mikrokontroléru STM32. Data jsou po přijetí zkontrolována a zpracována před tím, než jsou zaslána po sériovém terminálu. Díky vysoké frekvenci jádra mikrokontroléru a hardwarové akceleraci přesunu bloků dat za pomoci DMA je možné data zpracovat, vypočítat FFT a uložit do tabulky pro výpočet RMS hodnoty v mezičase měření, které je stanoveno vzorkovacím kmitočtem převodníků nastaveném na přibližně 40 ksps. Na desce tohoto měřáku není navržena žádná externí napěťová reference a AD převodník v mikrokontroléru tedy spoléhá na svou vnitřní referenci. Tento krok byl zvolen zejména z důvodu potřeby měření časově závislých veličin oproti přesnému měření napětí a proudu, které může být provedeno externím měřákem. Naopak se na DPS nachází slot pro paměťovou kartu, kam je možné data logovat po delší dobu měření, nicméně této funkcionality nakonec nebylo využito. Zjednodušený vývojový diagram programu této DPS je možné vidět na obrázku 28.



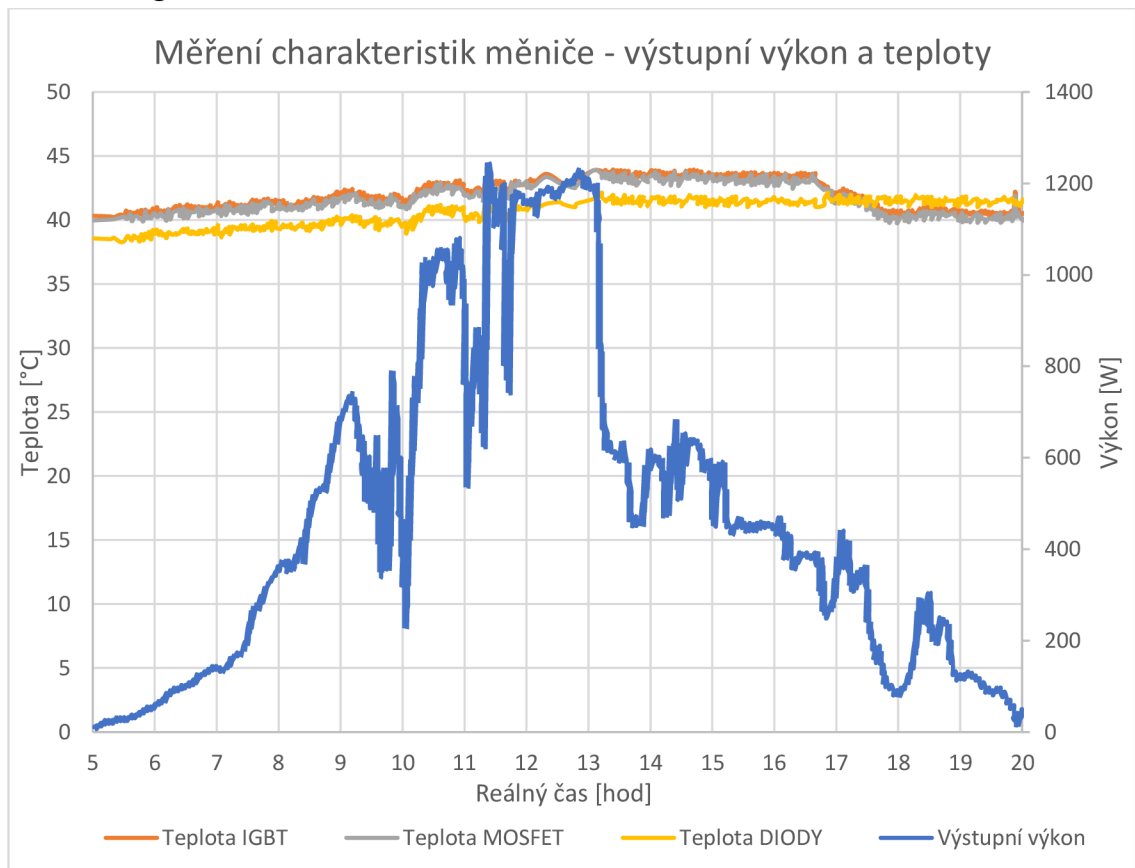
Obr. 28: Zjednodušený vývojový diagram měření

8.2 Testovací provoz a zátěžové testy

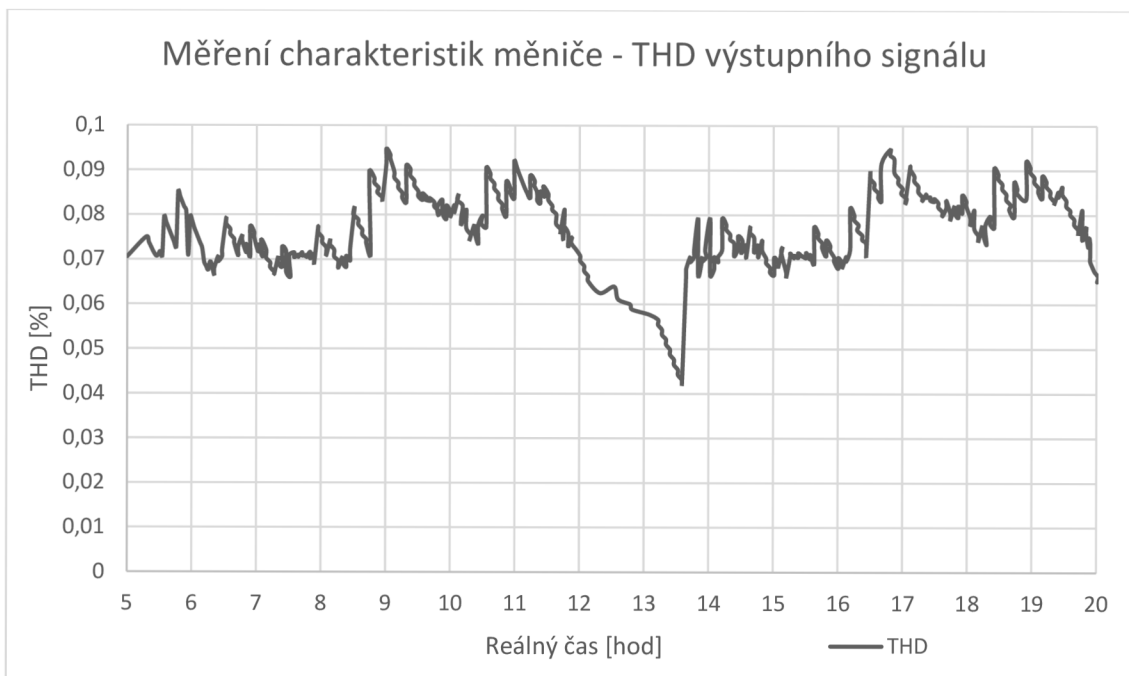
Z pohledu testování zařízení a jeho limitů bylo potřeba provést zátěžové testy zahrnující ideálně podmínky, ve kterých by mělo být zařízení následně provozováno. Pro prvotní testování a měření byl měnič zatěžován třemi rezistory o hodnotě $100\ \Omega$ pro nižší napětí a poté rezistory o hodnotě $470\ \Omega$ pro napětí vyšší. Měnič je stavěn na maximální proud kolem $2\ \text{A}$ na každém výstupu, což bylo hlavním omezením pro $100\ \Omega$ zátěž. Rezistorová zátěž z výkonných odporů byla použita z důvodu jejich známého odporu. Toho bylo využito zejména při programování měřicích obvodů měniče, kdy bylo nutné určit, zda je měření v rámci mezí na správném místě a je potřeba jej jen zkalibrovat, nebo zda je měření nekorektní. Tato odporová zátěž, zejména zátěž s $470\ \Omega$ rezistory, bohužel není stavěná na trvalý provoz s takto vysokými ztrátovými výkony, a tak byla pro dlouhodobější testy využita třífázová topná spirála. S těmito odporovými zátěžemi byl na měniči odladěn algoritmus výstupní regulace a díky měření převodové funkce byly nastaveny a posléze doladěny nastavovací parametry použitého PID (PS) regulátoru.

Z hlediska jiného typu zátěže a kontroly korektnosti algoritmu výpočtu dalších parametrů, jako je posun fáze, účinníku a jednotlivých výkonů, byla použita induktivní zátěž tvořená velkou indukčností s posuvným jádrem. Jako kapacitní zátěž byla použita kombinace rozběhových kondenzátorů ze starých motorů a fóliového kondenzátoru z mikrovlnné trouby. Tyto kondenzátory jsou schopny přenést poměrně velký proud s vysokým napětím a zároveň mají dostatečnou kapacitu k zajištění dobře patrného rozdílu fázoru napětí a proudu zatížené fáze, a tedy i jednoduchému ověření funkčnosti. Pro čistě induktivní zátěž byl do obvodu zařazen třífázový elektromotor, který byl zatěžován třetí brzdou na své hřídeli.

Zátěžový test zahrnující kombinované zátěže byl zajištěn až experimentálním zařízením měniče do provozu podobného reálnému nasazení. Měnič v tomto případě napájel dvě zářivková tělesa po dvou zářivkových trubiciích s běžným startérem a tlumivkou (tedy bez elektronického předřadníku), nabíječku pro notebook, na kterém byl sledován jeho provoz, a kompresor z lednice zajišťující vysoké nárazové proudy a nestálý běh. Účelem tohoto měření bylo ověření funkčnosti měniče v reálných podmínkách jeho nasazení a ověření jeho možností chlazení. Při tomto měření byly tedy sledovány zejména teploty na chladiči a výstupní parametry měniče jako THD, jednotlivá fázová napětí a proud jednotlivých fází. Během tohoto měření bohužel nebyly zaznamenávány jednotlivé časové okamžiky při spínání zátěže a jejího odpínání. Reakci na tyto jevy je tedy možné sledovat pouze jako výchylku z hodnoty THD dané fáze. Jelikož je měnič nastaven pro operaci v napěťovém režimu výstupního střídače, tyto změny jsou velmi malé a výstupní napětí se nikdy nedostane nad povolenou toleranci. Zaznamenané parametry lze vidět na zkráceném grafu záznamu na obrázku 29 a 30.



Obr. 29: Zaznamenaná data z měření měniče v provozu



Obr. 30: Graf naměřeného výstupního THD na první fázi

9. ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá průzkumem možných řešení návrhu DC/DC a DC/AC měničů a jejich následným návrhem. Cílem práce byl návrh a realizace měniče s možností nasazení do provozu malé solární elektrárny, kde měniče slouží k přeměně stejnosměrného napětí akumulátorů na napětí střídavé, které je možno použít v rozvodné soustavě oddělené chaty. Měnič je od počátku navrhován pro třífázový provoz spotřebičů, tedy se třemi střídavými výstupy. Pro zajištění větší univerzálnosti použití měniče byly původní návrhy měniče směřovány k co nejširší možné konfigurovatelnosti z pohledu výstupního napětí, posunu fáze i tvaru signálu. A měnič je plně použitelný pro domácí dílnu, jako zdroj atypického napětí pro různá testování, například řídicích členů kontrolních jednotek sítě, nebo nastavení hraničních napětí pro testování různých konstrukcí spínaných měničů.

V práci je dále popsána problematika pro měření parametrů měniče a jeho aktuálních hodnot včetně popisu problematiky zpracování těchto dat pro výpočet uživatelsky použitelných dat a dat nutných pro korektní softwarové řízení měniče. Mimo základní pojednání o jednotlivých možnostech a prozkoumání všech možností je práce postupně zaměřována směrem vyplývajícím, jako nejvýhodnější možnost zpracování měniče. Tento postup je dále popisován v rámci návrhu plošných spojů s podrobným popisem problematiky zabývající se návrhem plošného spoje s částmi pod vysokým napětím, vysoko proudým vedením i citlivé digitální a analogové interface pro připojení jednotlivých prvků k mikroprocesoru. Mimo popis problematiky návrhu hardwarové stránky měniče je popsána i problematika řízení měniče a zpracování dat mezi více mikroprocesory. Ke zpracování dat je využit výkonný systém s operačním systémem RTOS, jež se stará o dostupnost dat na zařízením hostované webové stránce nebo přehledném grafickém LCD panelu.

Výstupem práce je nakonec plně funkční systém dvou zařízení jako je měnič a jeho řídicí interface. Řídicí interface byl navržen s úvahami pro možnost připojení více zařízení, které budou vzájemně propojeny a ovládány z jednoho bodu řídicí desky. Deska měniče byla navržena s možnostmi párování mezi sebou a možnostmi řízení s i bez řídicího interface. Zpracované komunikační interface pro uživatele z pohledu ovládání i jednoduché kontroly stavu měniče nebo jeho aktuálních parametrů. Tyto informace jsou k na zmiňovaném LCD panelu v omezeném množství, nebo v plném rozsahu na webovém interface. V případě využití měniče bez řídicí desky jsou tyto informace spolu s ovládáním měniče implementovány na terminálu sériové linky, nebo pomocí přímého napojení na CAN interface měniče.

Sestavený měnič, jež je výstupem této práce, byl následně testován pomocí umělé zátěže odporového, induktivního i kapacitního charakteru a také pomocí zátěže v reálném provozu s různou charakteristikou zátěže i různými časy připnutí a odepnutí jednotlivých prvků této zátěže. Výsledkem tohoto měření je ověření parametrů měniče, zjištění a

softwarové nastavení jeho limitních mezí výstupních parametrů a poznatky pro budoucí práci na měniči. Změřené limitní parametry měniče vyplývající z těchto měření odpovídají vstupním požadavkům a představám a v některých případech, zejména z pohledu harmonického zkreslení, je vysoce převyšují. Maximální výstupní napětí generovaného signálu sinusového tvaru o frekvenci 50 Hz odpovídá efektivní hodnotě fázového napětí až 300 V AC. Při nastavení generace výstupního napětí stejnosměrného charakteru lze dosáhnout maximálně 880 V DC mezi dvěma fázemi. Výstupní proud je limitován hardwarovými možnostmi na proud 2,5 A pro každou fázi s omezením stanoveným maximálním výkonem měniče meziobvodu na necelé 3 kW. Maximální dodaný výstupní výkon tohoto měniče je velmi závislý, mimo výkonu vstupního měniče, i na charakteristice výstupního signálu. Při požadavku na generaci běžného třífázového napětí 400 V AC mezifázově o frekvenci 50 Hz je dosažitelný výstupní výkon až 2,1 kW. Při generaci stejnosměrného výstupního napětí je poté výkon omezen na maximálně 2,5 kW. Při zvyšování výstupní frekvence střídavého třífázového signálu, nebo různém posunu jeho fází je maximální výstupní výkon dále snižován. Při nejhorší kombinaci těchto parametrů jako je stejný fázový posuv na všech třech fázích a zároveň nejvyšší dovolená generovaná frekvence, je nejvyšší dodávaný výkon v rozsahu pouze 1,8 kW. Frekvence generovaného výstupního signálu je plně nastavitelná v rozsahu 4-800 Hz, nicméně nejvyšší stability signálu je dosaženo pouze v rozsahu frekvencí 15-500 Hz, kde mimo tohle pásmo dochází ke zplošťování vrcholů sinusoidy při velkém odebíraném proudu. Vypočtené THD pomocí diskrétní Fourierovy transformace generovaného sinusového signálu při různých typech zátěže a jejich náhodným spínání a odpínání bylo v průběhu celého měření zaznamenáváno a po jeho vyhodnocení bylo stanoveno na rozsah 0,04-0,1 % v nejhorších případech. Při ustálené zátěži, která nemění svůj charakter ani velikost protékajícího proudu je THD drženo v rozsahu 0,04-0,08 %. THD bylo stanovováno z naměřených hodnot vzorkovaných nezávislým zařízením vytvořeným zejména pro dlouhodobé logování parametrů třífázové sítě generované měničem. Měření bylo testováno s přesným generátorem signálu a síťovým analyzátozem. Přesnost zařízení byla posouzena jako dostatečná pro frekvence do 500 Hz.

9.1 Plány do budoucna

Měnič je plánován k implementaci v solární elektrárně rodinného domu stávající v tuto chvíli z MPPT měniče vlastní výroby a jednofázového střádače, jež by měl být nahrazen právě tímto měničem. Z hlediska budoucích rozšíření je v plánu implementovat novou revizi MPPT měniče, který by měl mít možnost připojení ke společnému řídicímu panelu pomocí CAN sběrnice. Zároveň je plánován návrh jednodušší verze měniče podobné kategorie jako je měnič v této diplomové práci, jež by měl sloužit k ohřevu vody v bojleru a zároveň regulovat směr průtoku vody mezi bojlerem a plánovanou akumulací nádrží. Mimo tyto dva měniče je plánováno zařízení starající se o sledování životnosti jednotlivých akumulátorů, tedy monitorování SoC a SoH jednotlivých baterií a nastavení

nabíjení pro optimalizaci jejich životnosti. Zařízení bude taktéž připojeno společnou CAN sběrnici k řídicímu panelu a bude mít možnost zasahovat do regulačního algoritmu měničů v případě příliš vysokého odběru při malé kapacitě akumulátoru nebo jakémkoli nebezpečném stavu akumulátoru (vysoká teplota, malá hladina energie nebo například velký vnitřní odpor vlivem stáří nebo kontaminace elektrolytu).

V plánu je také implementace pokročilejší webové stránky s modernějším řízením a snazším vykreslováním grafů spotřeby a energie dodané sluncem. Z důvodu složitosti takové webové aplikace bude nasazena alternativní knihovna k LWIP jako je například ORYX, nebo bude implementována vlastní vrstva správy HTTP serveru prostřednictvím RAW API nabízeného LWIP knihovnou. Z hlediska grafických obrazovek LCD panelu bude potřeba implementovat jednotlivé řídicí obrazovky daných zařízení a také rozšířit databázi dat ukládaných do paměti zařízení, včetně konfigurace nově přidaných zařízení.

LITERATURA

- [1] GOMATHY, S, S SARAVANAN a S THANGAVEL. *Design and Implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Algorithm for a Standalone PV System: International Journal of Scientific & Engineering Research* 2012.
- [2] ZHILEI, Yao, Lan XIAO a dan Yangguang YAN. *Seamless Transfer of Single-Phase Grid-Interactive Inverters between Grid-Connected and Stand-Alone Modes: IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010.
- [3] *Triangle/Trapezoid Wave Generation Using PWM With Hercules™ N2HET* Texas Instruments [online]. 2015 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/spna220/spna220.pdf>
- [4] *Sine Wave Generation Using PWM With Hercules N2HET and HTU* Texas Instruments [online]. 2015 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/spna217/spna217.pdf>
- [5] MAREK, Josef. *Základní funkční principy A-D a D-A převodníků*. [online]. [cit. 2021 25.12.]. Dostupné z: fei-learn.upceucebny.cz
- [6] *MOSFET power losses and how they affect power-supply efficiency: Analog Applications Journal*. Texas Instruments [online]. 2016 [cit. 2022-01-02]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slyt664/slyt664.pdf>
- [7] Keith H. Billings. *Switchmode Power Supply Handbook*. McGraw-Hill, 1989. ISBN 0-07-005330-8.
- [8] Pop-Calimanu, Ioana & Lica, Septimiu & Popescu, Sorin & Lasca, Dan & Lie, Ioan & Mirsu, Radu. *A New Hybrid Inductor-Based Boost DC-DC Converter Suitable for Applications in Photovoltaic Systems: Energies*. 2019.
- [9] *A Practical Introduction to Digital Power Supply Control* Texas Instruments [online]. 2005 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ml/slup232/slup232.pdf>
- [10] STMicroelectronics. STMicroelectronics [online]. [cit. 2022-01-02]. Dostupné z: https://www.st.com/content/st_com/en.html
- [11] *SD Memory Card Interface Using SPI*. Renesas [online]. [cit. 2022-01-02]. Dostupné z: <https://www.renesas.com/us/en/document/apn/sd-memory-card-interface-using-spi>
- [12] Grafana. <https://grafana.com/oss/grafana/> [online]. [cit. 2022-05-19].
- [13] LEE, Wilson. Performing Key Switch-Mode Power Supply Measurements on an Oscilloscope. : *TEST & MEASUREMENT* [online]. 2020 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/technologies/test-measurement/article/21145331/tektronix-performing-key-switchmode-power-supply-measurements-on-an-oscilloscope>
- [14] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče*. BEN - technická literatura, 2002. ISBN ISBN 978-80-7300-299-2.

- [15] MADAPPA, Eshwari A. a A. SREEDEVI. *Auto Tuning Of Analog Circuit Using PI Controller In SMPS* [online]. college of Engineering: Dept. of Electrical and Electronics RV, 2013 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.ijert.org/research/auto-tuning-of-analog-circuit-using-pi-controller-in-smps-IJERTV2IS80189.pdf>
- [16] BIRD, John. *Engineering Mathematics*. Fifth Edition. Elsevier, 2007.
- [17] JARDIN, Loïc. *Bye Grafana* [online]. 2018 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://punchplatform.com/2018/02/25/bye-grafana/>
- [18] USING HEAVY COPPER AND EXTREME COPPER IN PCB DESIGN AND FABRICATION FOR MAXIMUM RELIABILITY. In: *EPEC* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.epectec.com/articles/heavy-copper-pcb-design.html>
- [19] CHANG, Fei Yee. *Stitching Capacitors: Technique of Crosstalk Mitigation for imperfect reference plane* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.ednasia.com/stitching-capacitors-technique-of-crosstalk-mitigation-for-imperfect-reference-plane/>
- [20] *Design Guidelines for USB22XX/USB260X High-Speed SD* [online]. 2006 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/en562805.pdf>
- [21] *Demystifying Type II and Type III Compensators Using OpAmp and OTA for DC/DC Converters* [online]. 2014 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slva662/slva662.pdf>
- [22] *How to Measure the Loop Transfer Function of Power Supplies* [online]. 2013 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/snva364a/snva364a.pdf>
- [23] *UCC2813-0: Economy low power BICMOS 1MHz current mode PWM with 7.2V/6.9V UVLO and 100% duty cycle, -40C to 85C* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/UCC2813-0>
- [24] *Calculation of Power Loss (Synchronous): Switching Regulator IC Series* [online]. 2013 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/applnote/ic/power/switching_regulator/power_loss_appli-e.pdf
- [25] *DATASHEET: T60403-A4021-X086-80* [online]. 1996 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.mouser.com/catalog/specsheets/4021-X086.pdf>
- [26] *IRFP4568PbF: HEXFET Power MOSFET* [online]. 2008 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.infineon.com/dgdl/irfp4568pbf.pdf?fileId=5546d462533600a40153562c7c32201b>
- [27] *DSEP 12-12A: HiPerFREDTM Epitaxial Diode* [online]. 2000 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.mouser.com/datasheet/2/240/ixys_dsep12-12a_5b1_5d-1547602.pdf

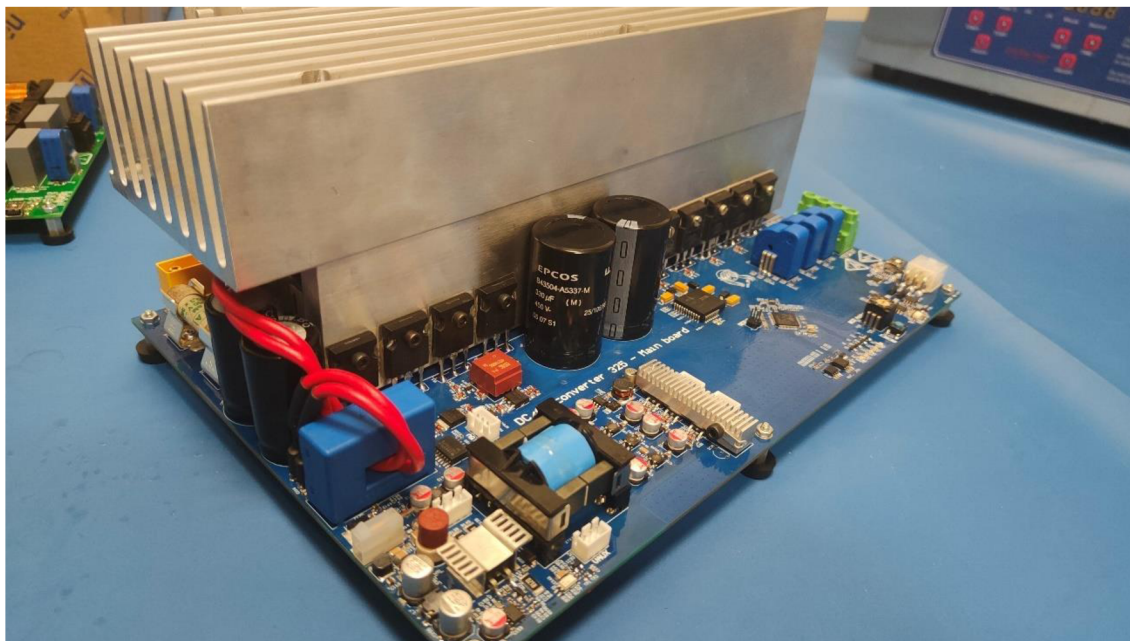
- [28] GARCIA, J. *Losses in power diodes* [online]. Spain: University of Oviedo, 2000 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://lemuruniovi.com/wp-content/uploads/2021/03/Losses-in-Power-Diodes.pdf>
- [29] *IXA20IF1200HB: XPT IGBT* [online]. 2010 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.tme.com/Document/bab3caf07cb676f5ef02ebb743a1d34b/IXA20IF1200HB.pdf>
- [30] WOOLF, Peter et al. *PID tuning via Frequency Responses with Bode Plots* [online]. University of Michigan, 2021 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book:_Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_\(Woolf\)/09:_Proportional-Integral-Derivative_\(PID\)_Control/9.04:_PID_tuning_via_Frequency_Responses_with_Bode_Plots](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book:_Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf)/09:_Proportional-Integral-Derivative_(PID)_Control/9.04:_PID_tuning_via_Frequency_Responses_with_Bode_Plots)

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

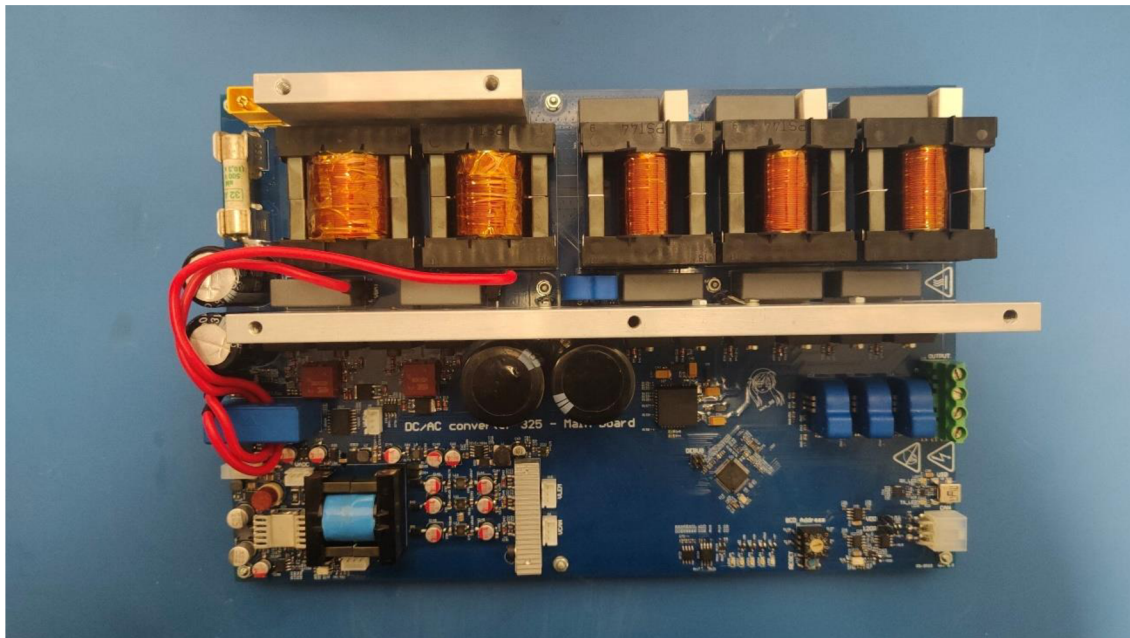
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> – sledování bodu maximálního výkonu
AD	<i>Analog to Digital</i> – (převodník) analogového signálu na digitální
DA	<i>Digital to Analog</i> – (převodník) digitálního signálu na analogový
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i> – programovatelné hradlové pole
DC	<i>Direct Current</i> – stejnosměrný proud
AC	<i>Alternating Current</i> – střídavý proud
DC/DC	Měnič napětí/proudu se stejnosměrným vstupem i výstupem
PID	Spojité regulátor s proporcionální, integrační a derivační složkou
PS	Spojité regulátor s proporcionální a sumační složkou
DMA	<i>Direct Memory Access</i> – periférie sloužící k přímému přístupu do paměti
DFSDM	<i>Digital Filter for SD Modulators interface</i> – Interface pro SDADC
SDADC	<i>Sigma Delta ADC</i> – Převodník AD typu Sigma-Delta
RAM	<i>Random Access Memory</i> – paměť s náhodným přístupem
ROM	<i>Read Only Memory</i> – neměnná paměť s daty
SD	<i>Secure Digital</i> – označení paměťové karty
UART	<i>Universal asynchronous receiver-transmitter</i> – sériová sběrnice
CAN	<i>Controller Area Network</i> – sériová komunikační sběrnice
FDCAN	<i>Flexible Data-Rate CAN</i> – sériová vylepšená komunikační sběrnice CAN
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> – sériová komunikační sběrnice
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i> – sériová komunikační sběrnice
USB	<i>Universal Serial Bus</i> – univerzální sériová sběrnice
DPS	Deska Plošných Spojů
VCP	<i>Virtual COM Port</i> – virtuální UART periférie na USB sběrnici
MSD	<i>Mass Storage Device</i> – komunikační protokol USB pro úložná zařízení
HTTP	<i>HyperText Transfer Protocol</i> – aplikační vrstva internetové komunikace
SiC	<i>Silicon Carbide CoolSiC</i> – označení technologie mosfet tranzistoru
GaN	<i>Gallium Nitride</i> – označení technologie mosfet tranzistoru
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> – veličina definující zkreslení sinusoidy
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> – výpočetní algoritmus Fourierovy transformace
FPU	<i>Floating Point Unit</i> – matematický koprocessor pro výpočetní operace
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> – datový součet pro detekci chyb v datech
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> – Displej z tekutých krystalů
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i> – Protokol transportní vrstvy
UDP	<i>User Datagram Protocol</i> – Doručovací protokol mezi hostiteli
VNC	<i>Virtual Network Computing</i> – Grafický klient pro vzdálenou grafiku
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i> – Internetový protokol WWW serveru
RTOS	<i>Real Time Operating System</i> – Operační systém reálného času

Příloha A - Fotografie hotového zařízení

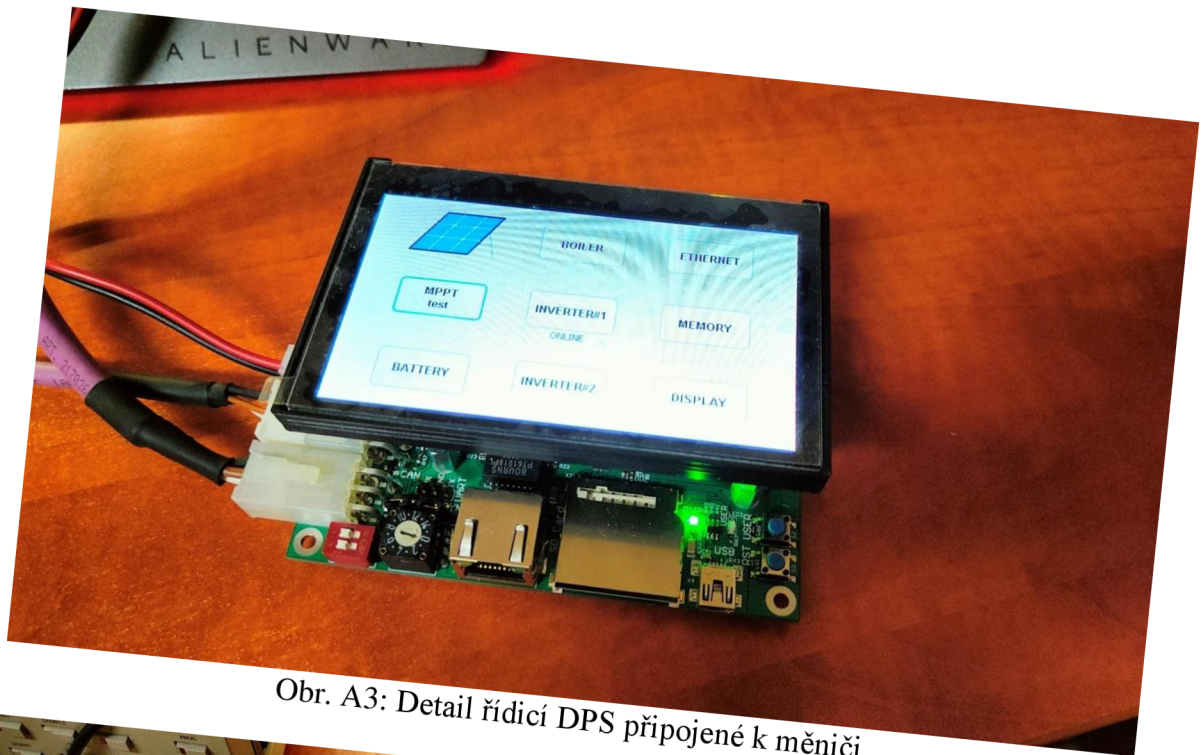
Tato příloha obsahuje fotografie finálního zařízení



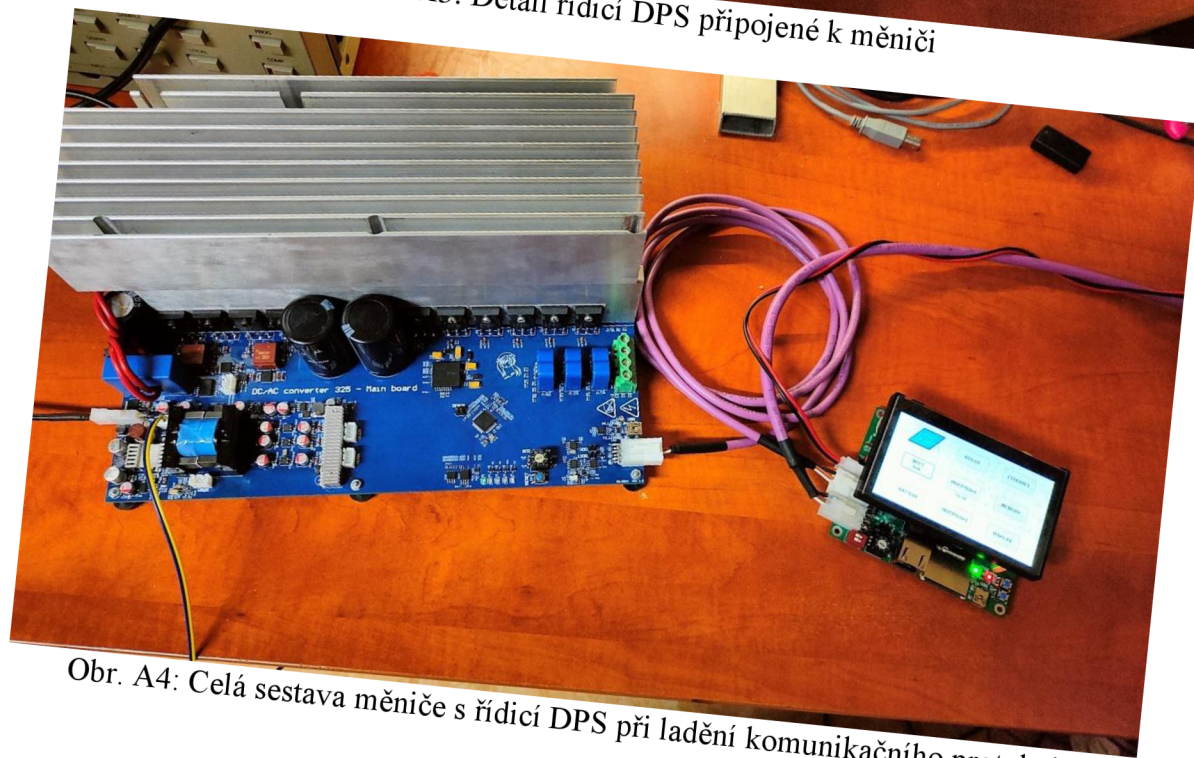
Obr. A1: Silová DPS měniče v kompletním provedení



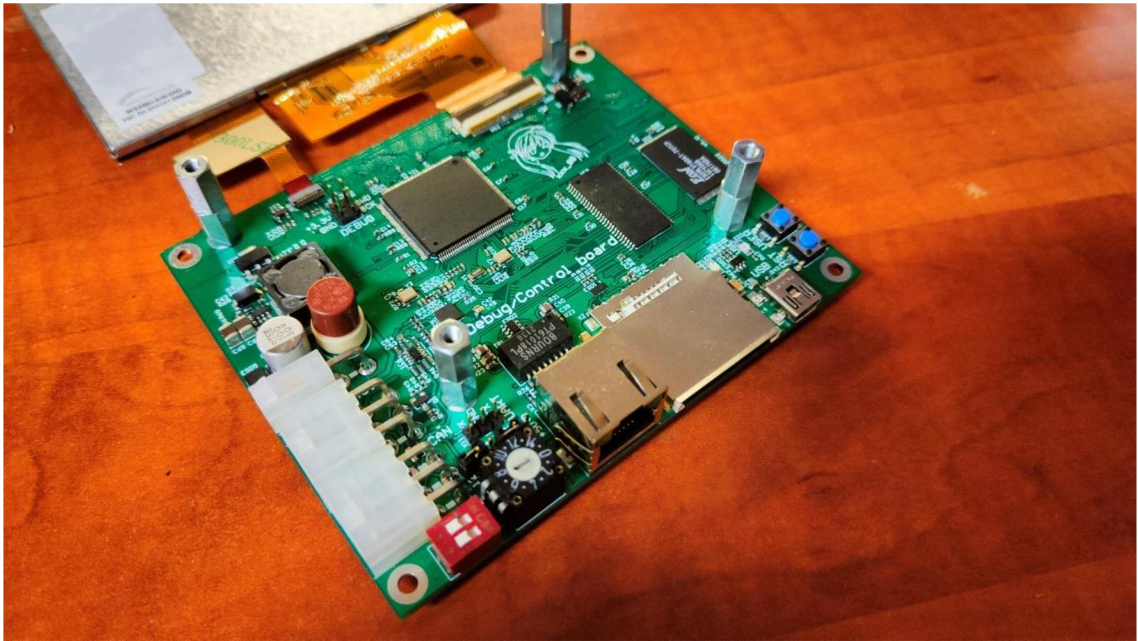
Obr. A2: Silová DPS, pohled shora s odejmutým pasivním chladičem



Obr. A3: Detail řídicí DPS připojené k měniči



Obr. A4: Celá sestava měniče s řídicí DPS při ladění komunikačního protokolu



Obr. A5: Detail osazené řídicí DPS s odejmutým LCD panelem



Obr. A6: Kompletní sestava řídicí DPS

Příloha B - Schéma zapojení desky měniče

Tato příloha obsahuje schéma zapojení silové DPS měniče.

1

2

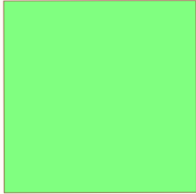
3

4

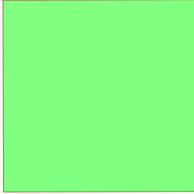
A

A

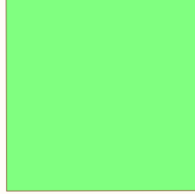
Designator
MCU.SchDoc



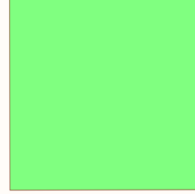
Designator
CAN.SchDoc



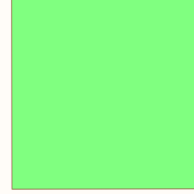
Designator
MEM.SchDoc



Designator
USB.SchDoc



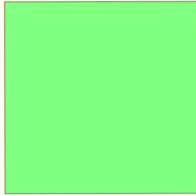
Designator
PWM.SchDoc



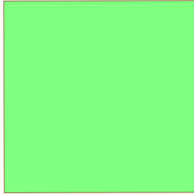
B

B

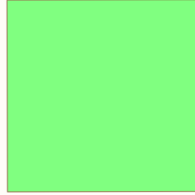
Designator
DCDC.SchDoc



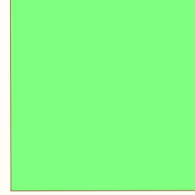
Designator
PLUG.SchDoc



Designator
SMPS.SchDoc



Designator
PSU.SchDoc




C

C

D

D

MH15 MH16 MH3 MH4 MH5 MH6 MH7 MH8

BRD1

 DPS
 Menic 3x325V

SYM1
 LOGO
 Symbol
 Girl

Title: Menic 3x325V		
Page content: TOP.SchDoc		
Size:	DWG NO:	Revision: 2.0
Date: 16.05.2022	Sheet: 1	of 10



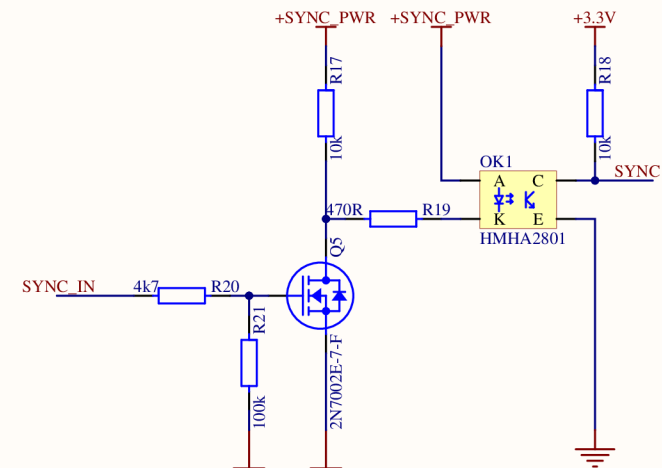
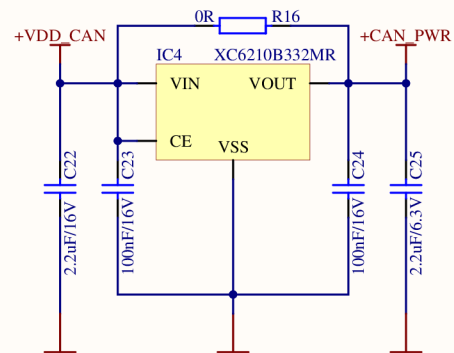
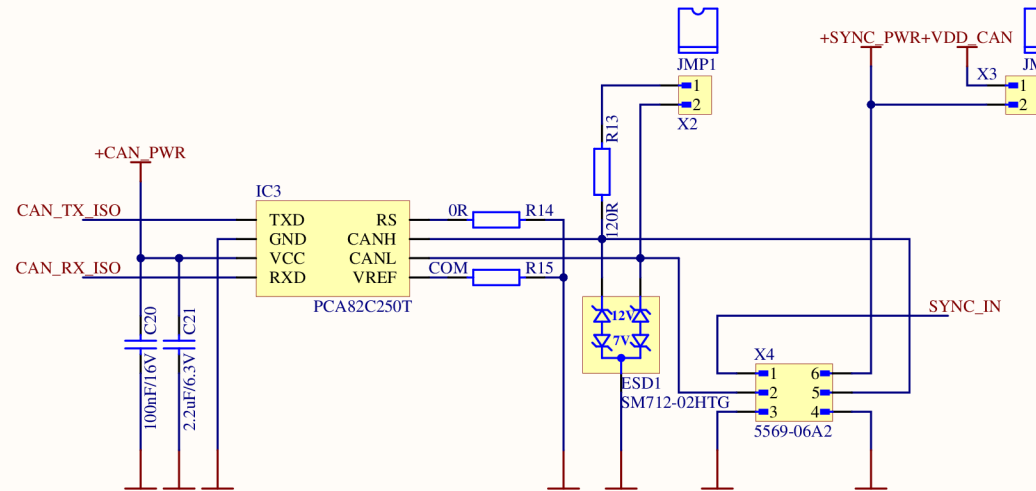
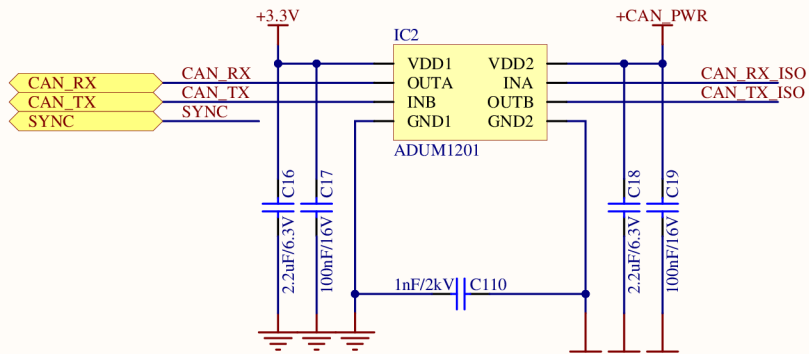
xxx_88


1

2

3

4



Title: Menic 3x325V			
Page content: CAN.SchDoc			
Size:	DWG NO:		Revision: 2.0
Date: 16.05.2022	Sheet: 3		of 10

1

2

3

4

A

B

C

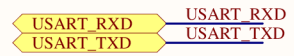
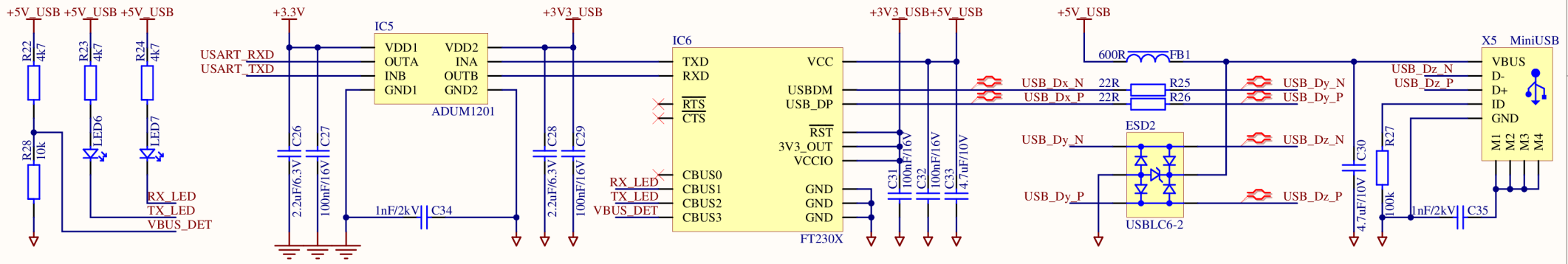
D


A

B

C

D



Title: Menic 3x325V			
Page content: USB.SchDoc			
Size: _____	DWG NO: _____		Revision: 2.0
Date: 16.05.2022	Sheet: 4		of 10

xxx_88

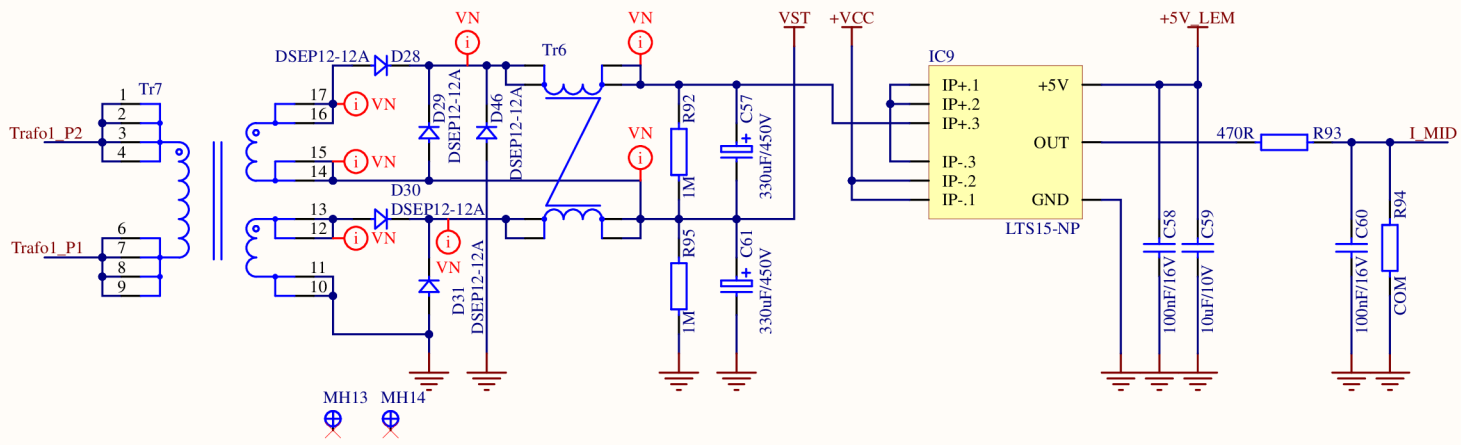
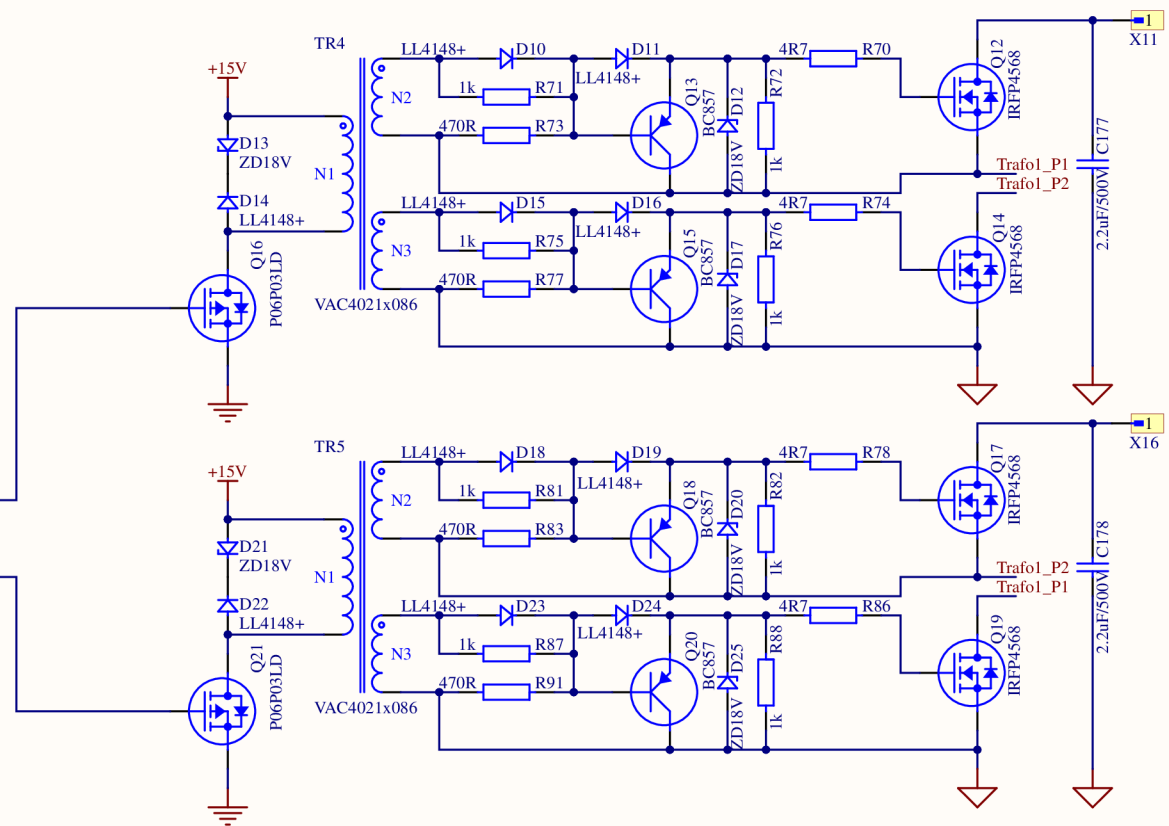
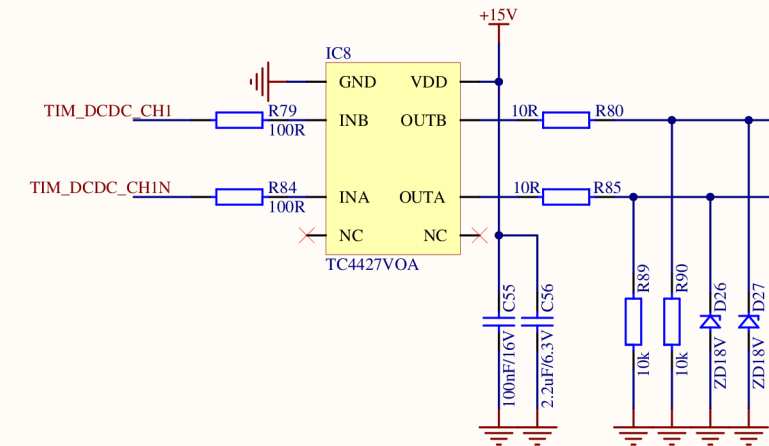
1


2

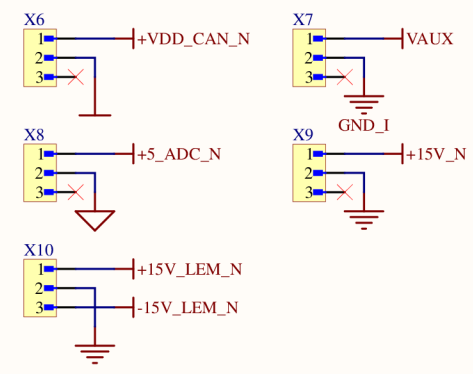
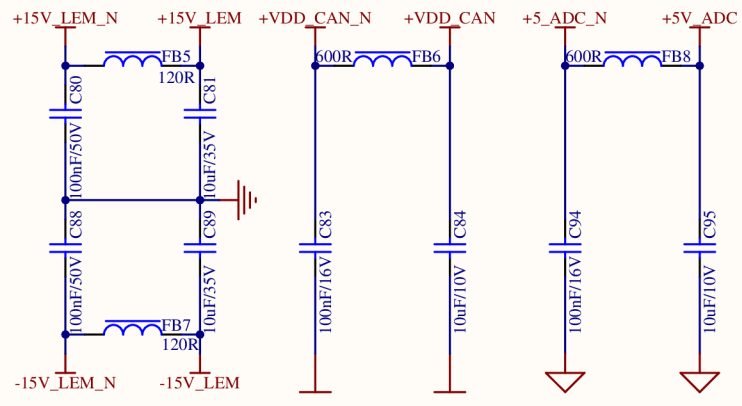
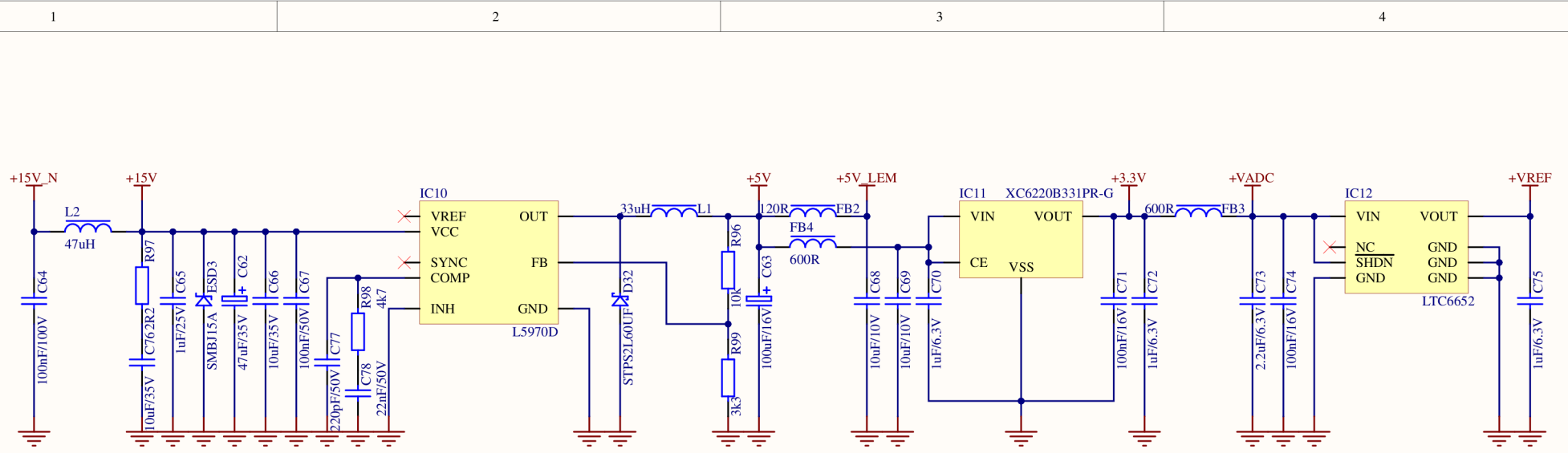
3


4

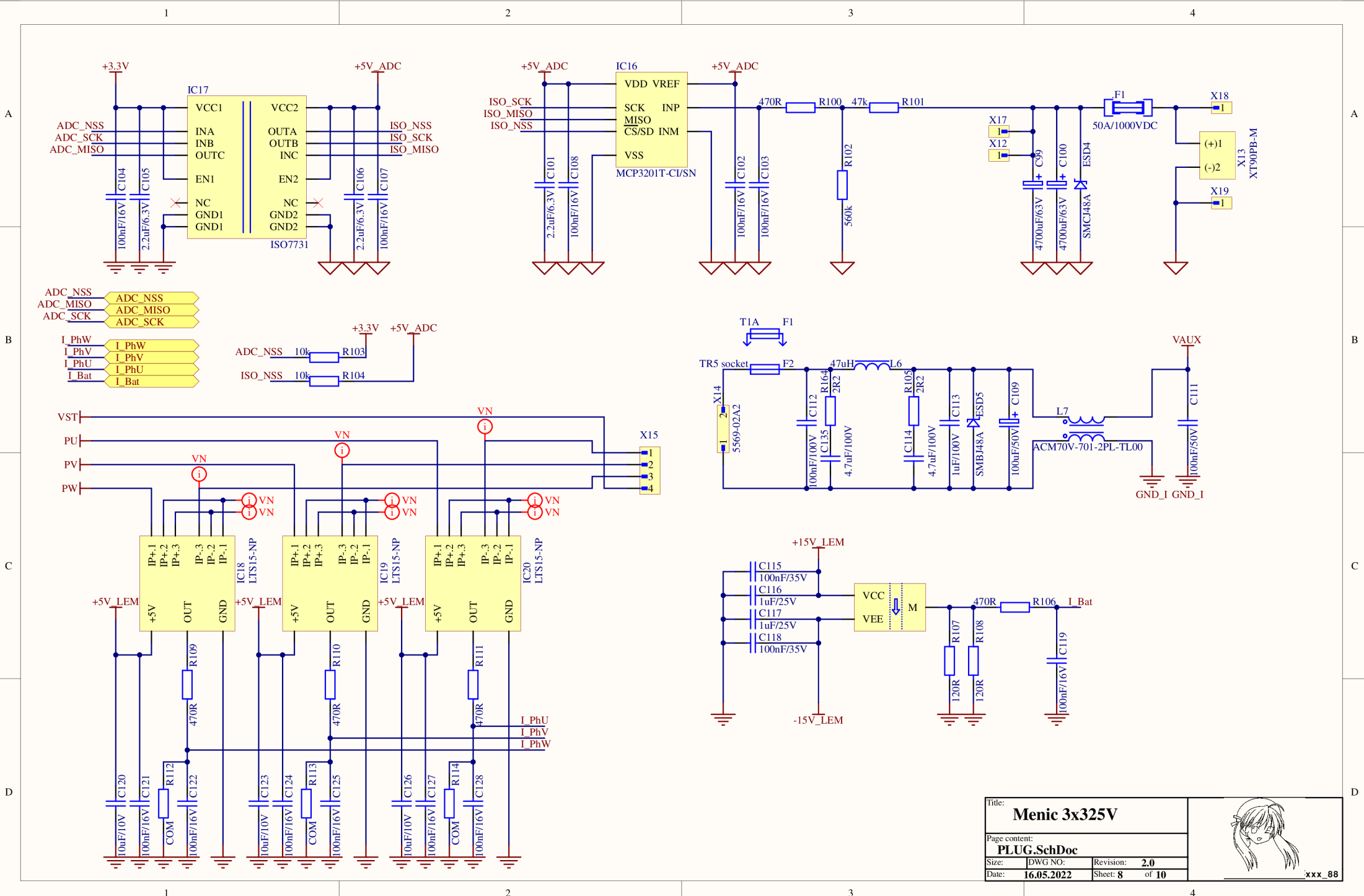
TIM_DCDC_CH1
TIM_DCDC_CH1N
I_MID




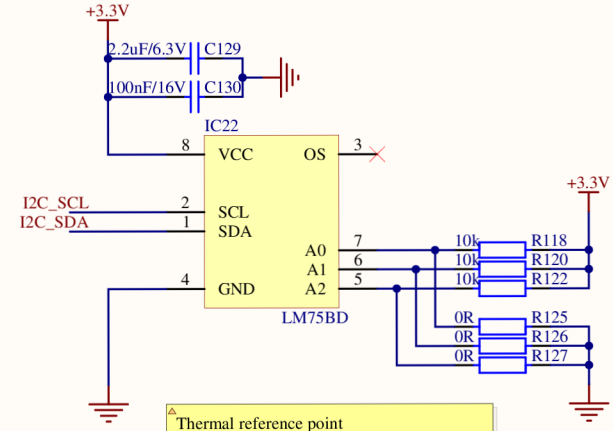
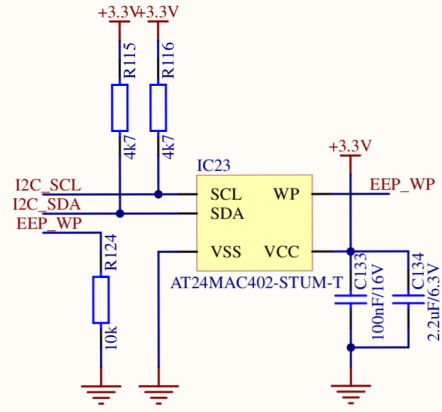
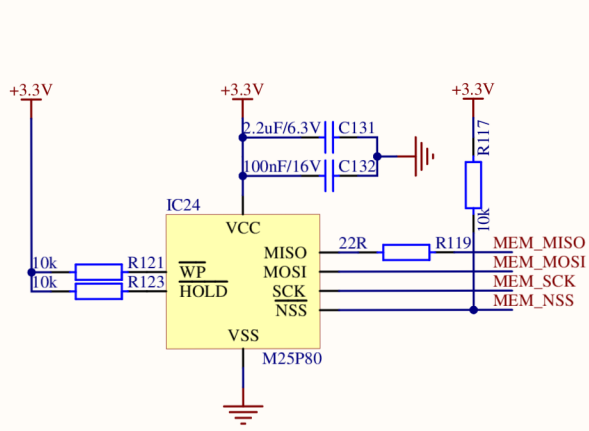
Title: Menic 3x325V		
Page content: DCDC.SchDoc		
Size: DWG NO:	Revision: 2.0	
Date: 16.05.2022	Sheet: 6 of 10	



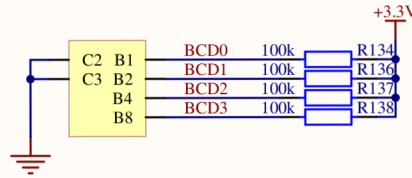
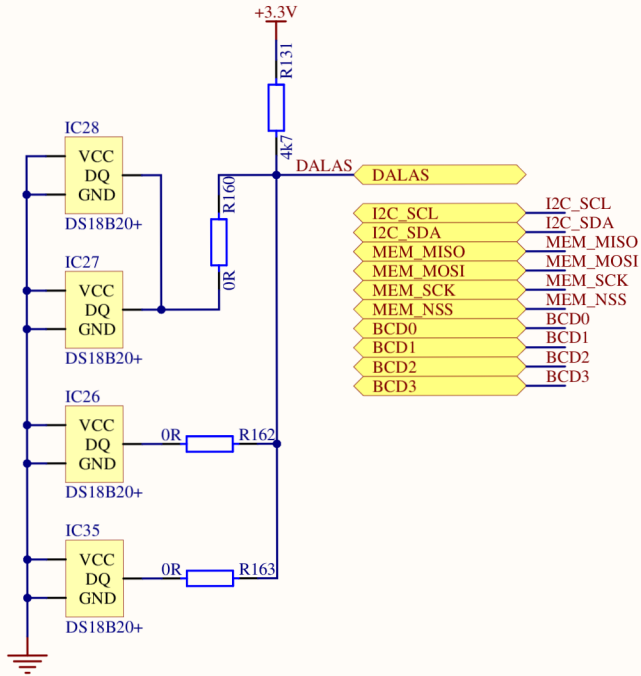
Title: Menic 3x325V		
Page content: PSU.SchDoc		
Size: DWG NO:	Revision: 2.0	
Date: 16.05.2022	Sheet: 7 of 10	




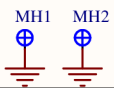
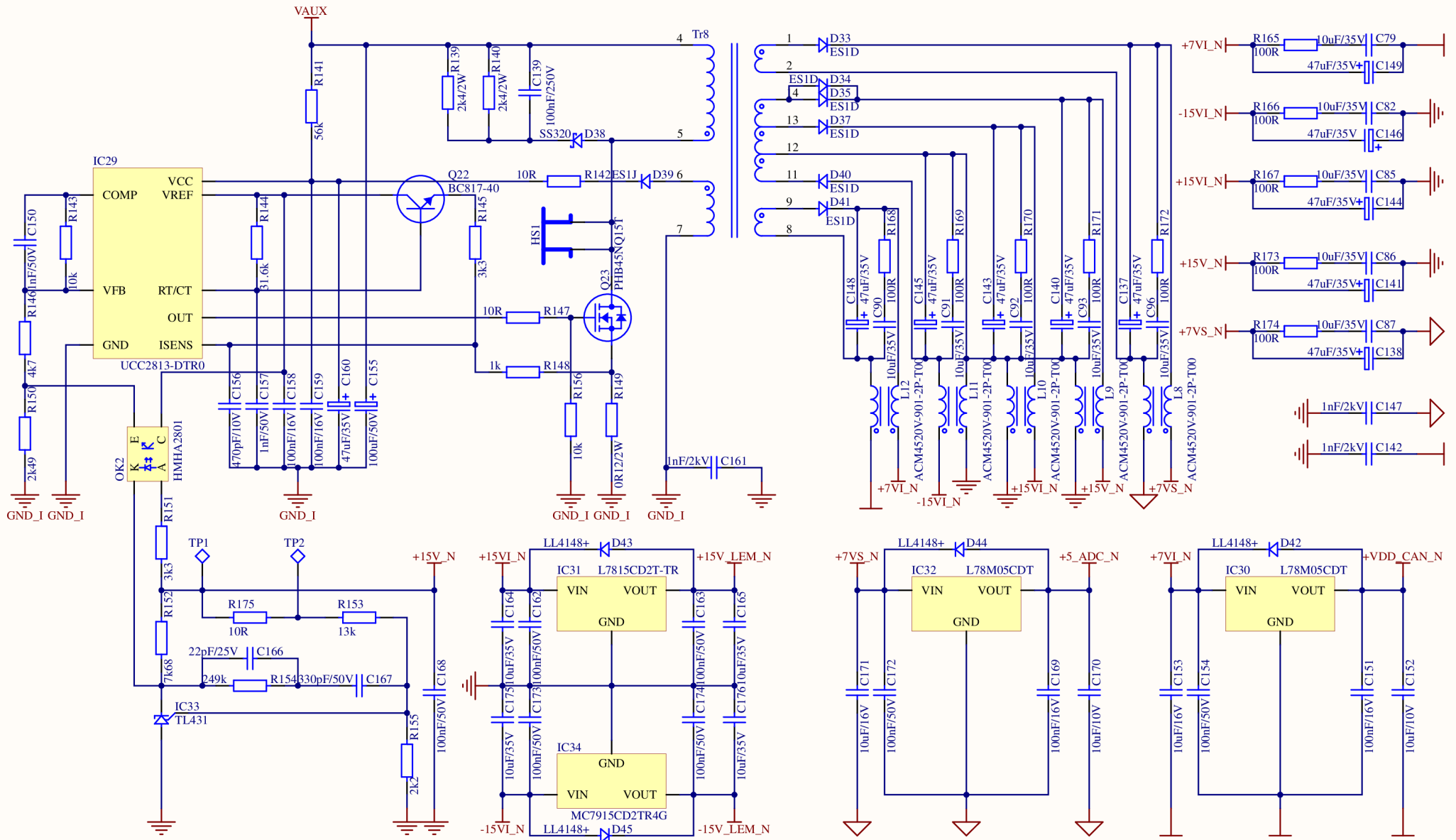
Title: Menic 3x325V		
Page content: PLUG.SchDoc		
Size: DWG NO:	Revision: 2.0	
Date: 16.05.2022	Sheet: 8 of 10	




Thermal reference point



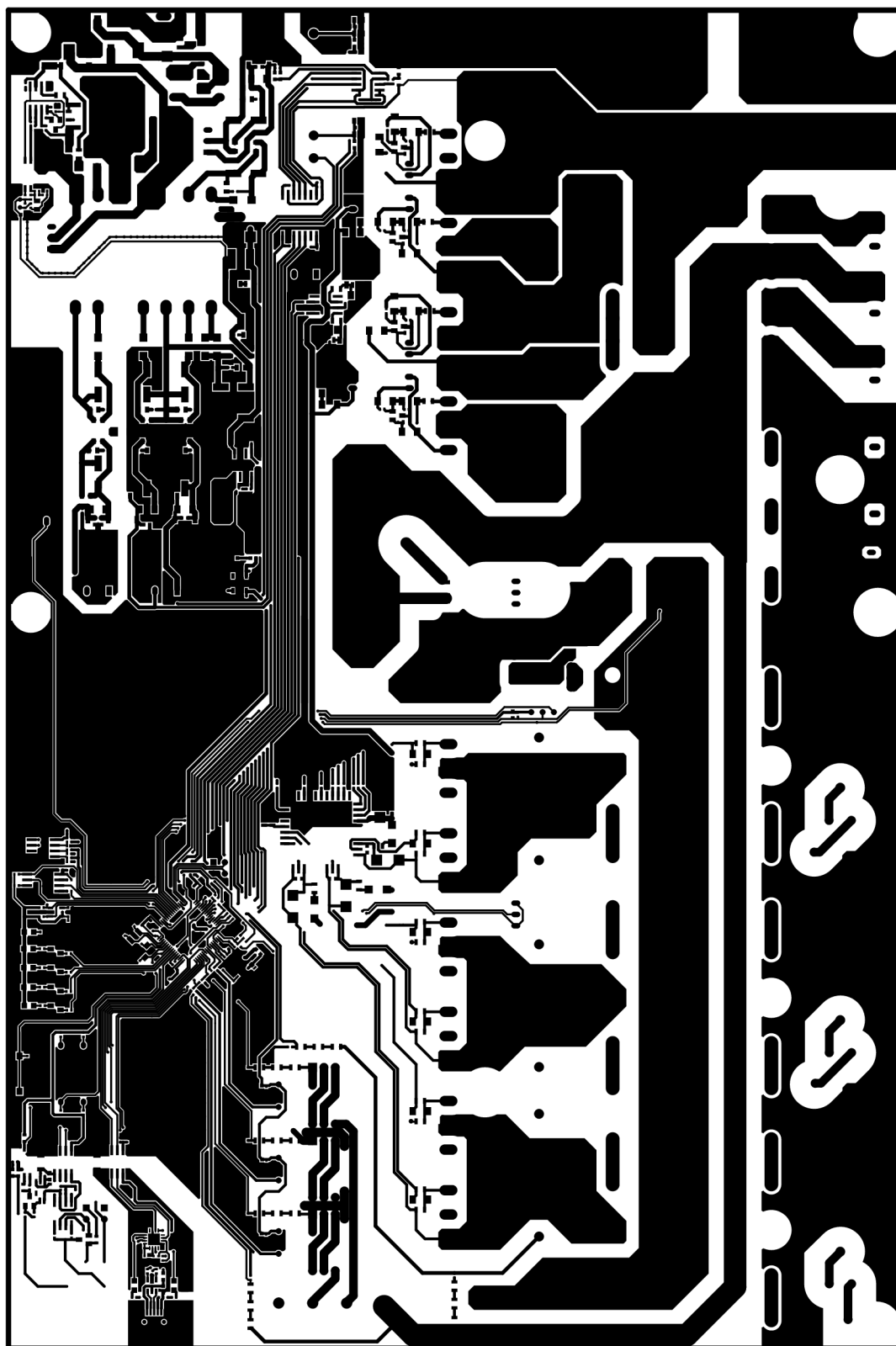
Title: Menic 3x325V		
Page content: MEM.SchDoc		
Size:	DWG NO: Revision: 2.0	
Date: 16.05.2022	Sheet: 9 of 10	



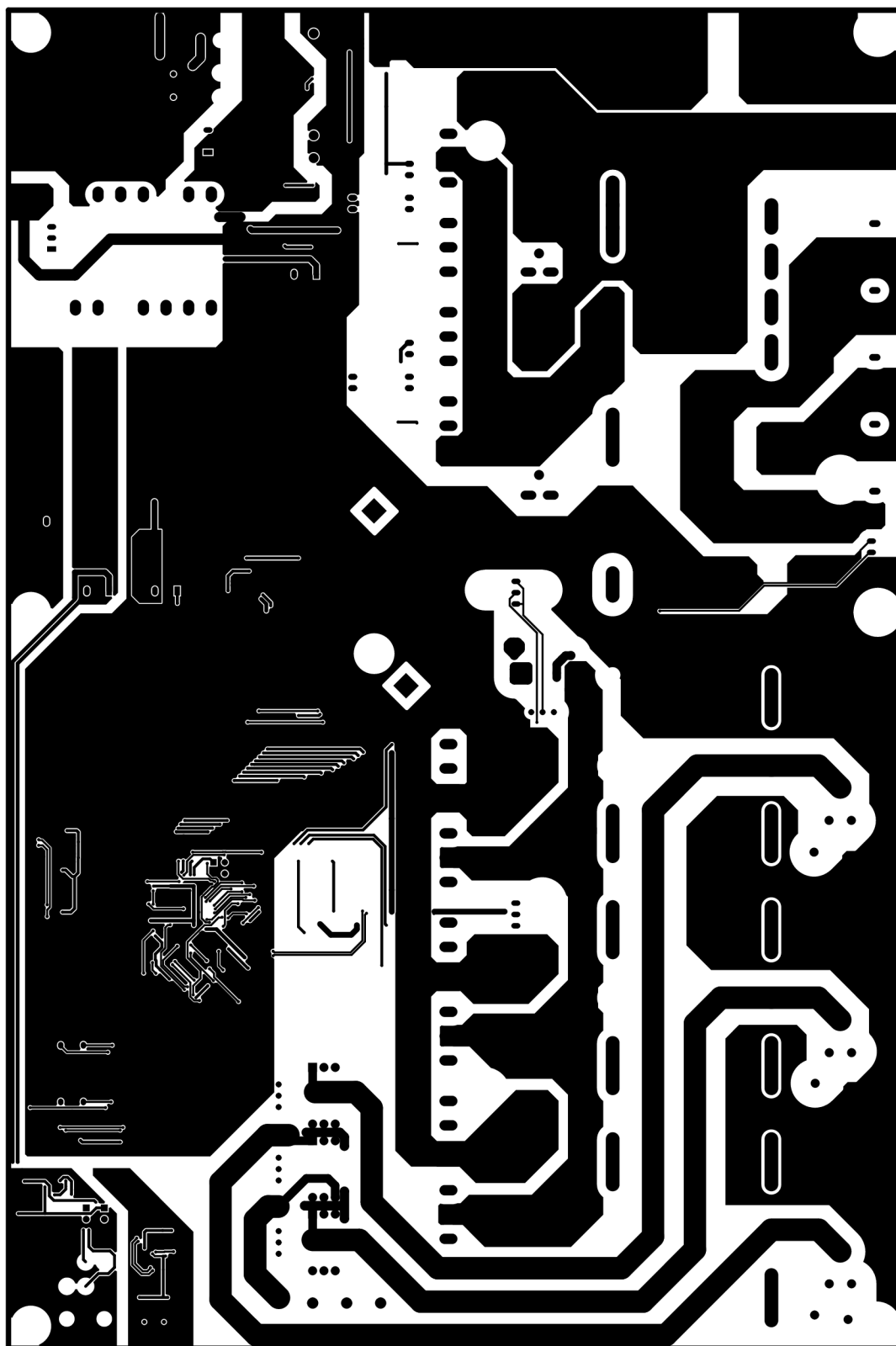
Title: Menic 3x325V			
Page content: SMPs.SchDoc			
Size:	DWG NO:		Revision: 2.0
Date: 16.05.2022	Sheet: 10		of 10

Příloha C - Motiv a osazovací plán desky měniče

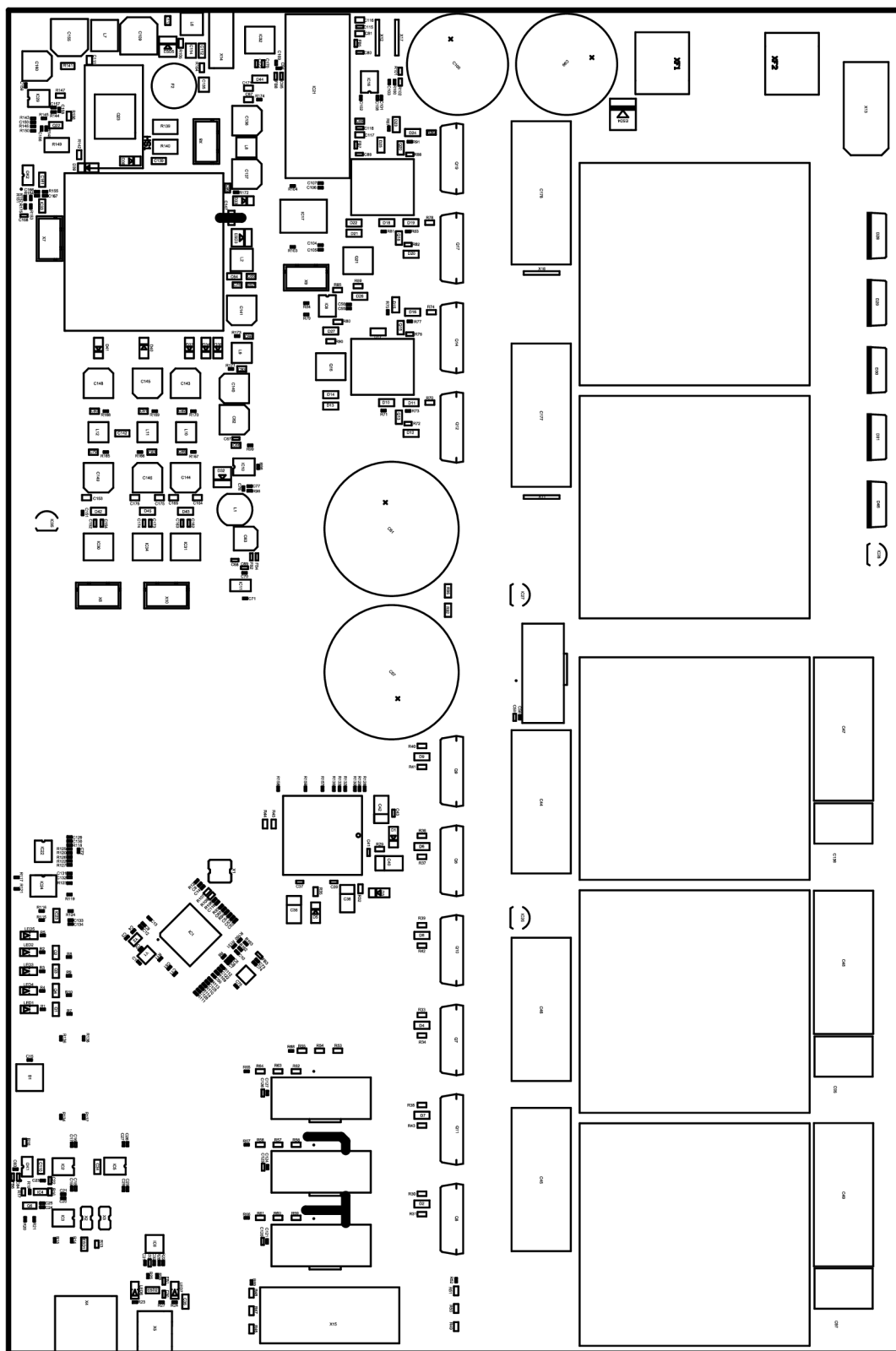
Tato příloha obsahuje výrobní podklady k DPS silové části měniče.



Obr. C1: Maska plošného spoje, vrstva TOP, veľikost 1:1



Obr. C2: Maska plošného spoje, vrstva BOT, veľikost 1:1



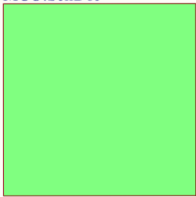
Obr. C3: Osazovací plán plošného spoje, strana TOP, velikost 1:1

Příloha D - Schéma zapojení řídicí desky

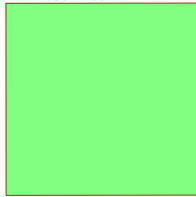
Tato příloha obsahuje schéma zapojení řídicí DPS měniče.

Menic325 control board

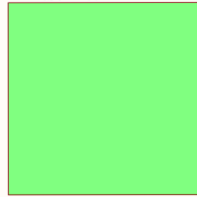
MCU connection, Clock and reset logic
MCU.SchDoc



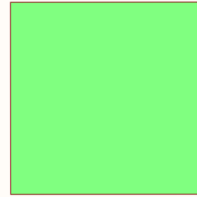
On board memory
MEM.SchDoc



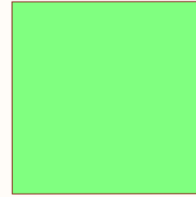
Ethernet PHY
ETH.SchDoc



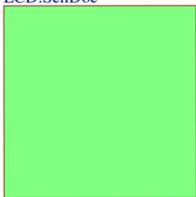
USB connection
USB.SchDoc



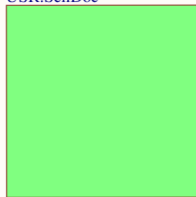
CAN connection
CAN.SchDoc



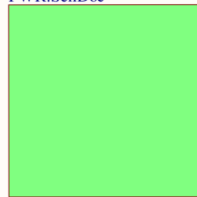
LCD connector and backlight PSU
LCD.SchDoc



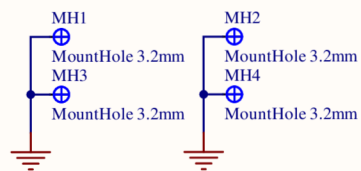
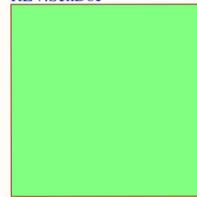
User handling elements
USR.SchDoc



Main board power supply unit
PWR.SchDoc



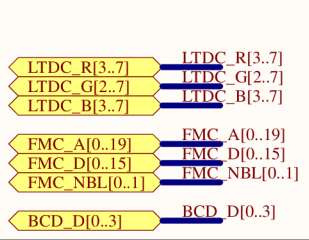
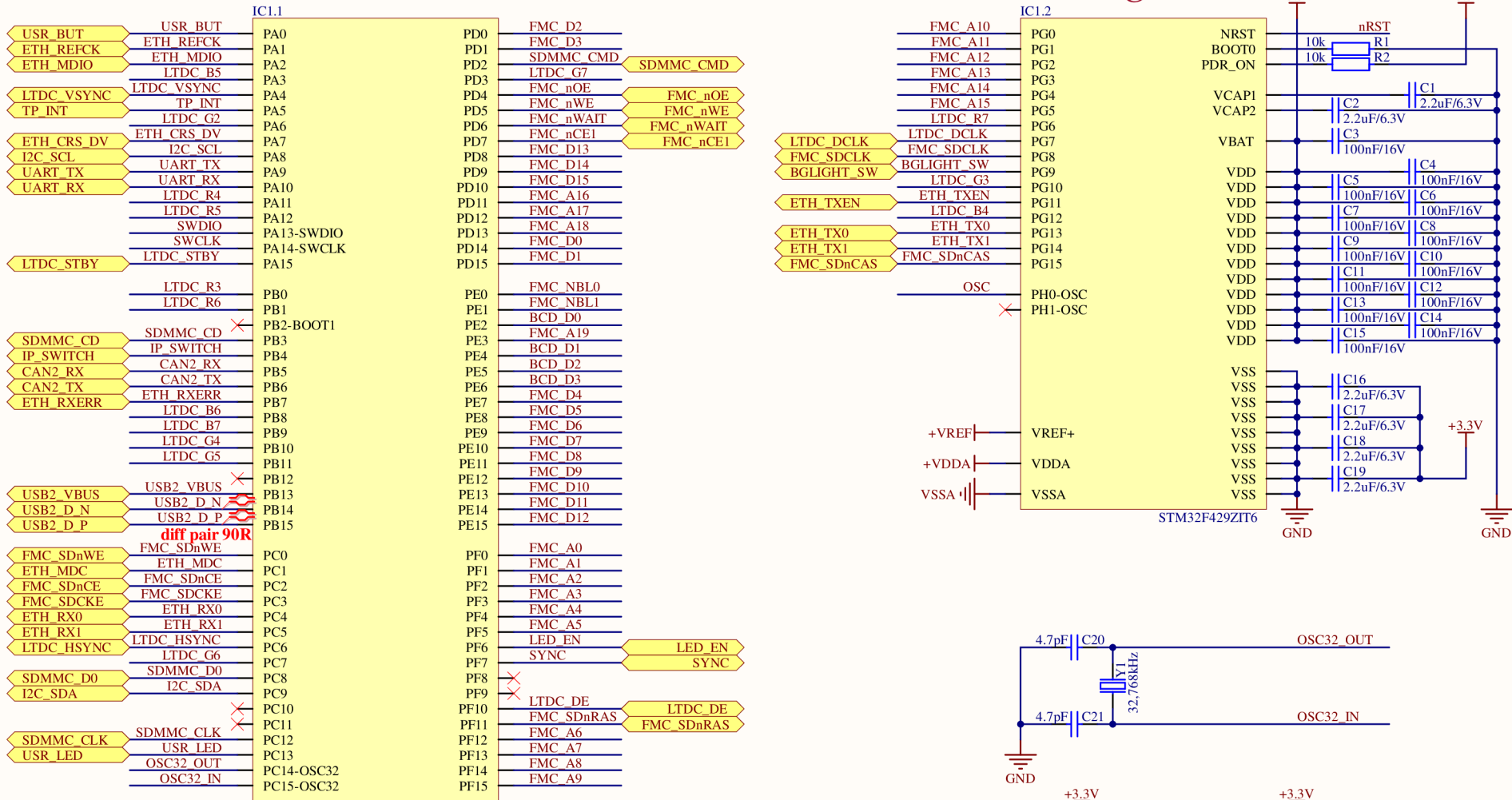
Revision history document
REV.SchDoc



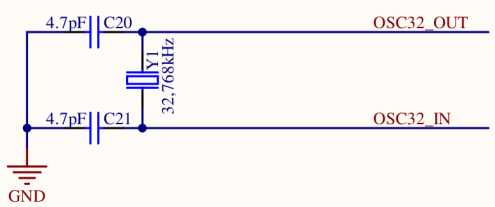
Title:		Menic325 control board	
Page content:			
TOP.SchDoc			
Size:	DWG NO:	Revision:	1.0
Date:	19.05.2022	Sheet:	1 of 10




MCU connection, Clock and reset logic



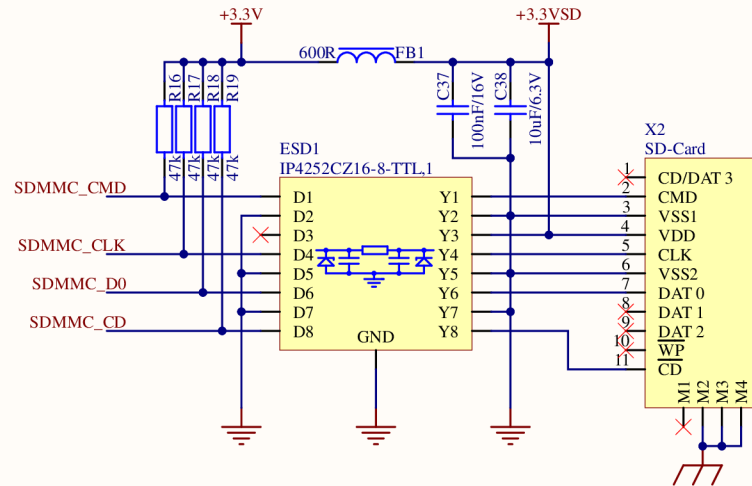
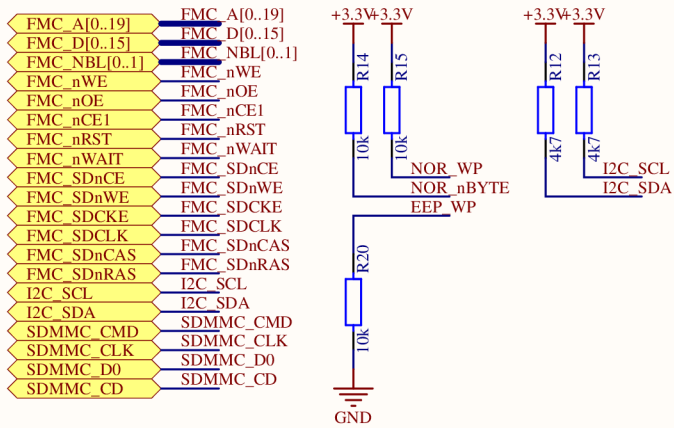
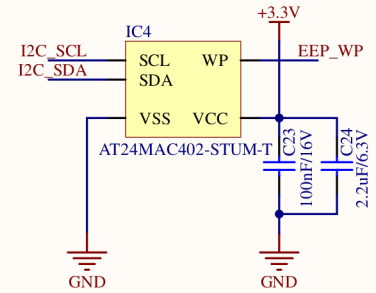
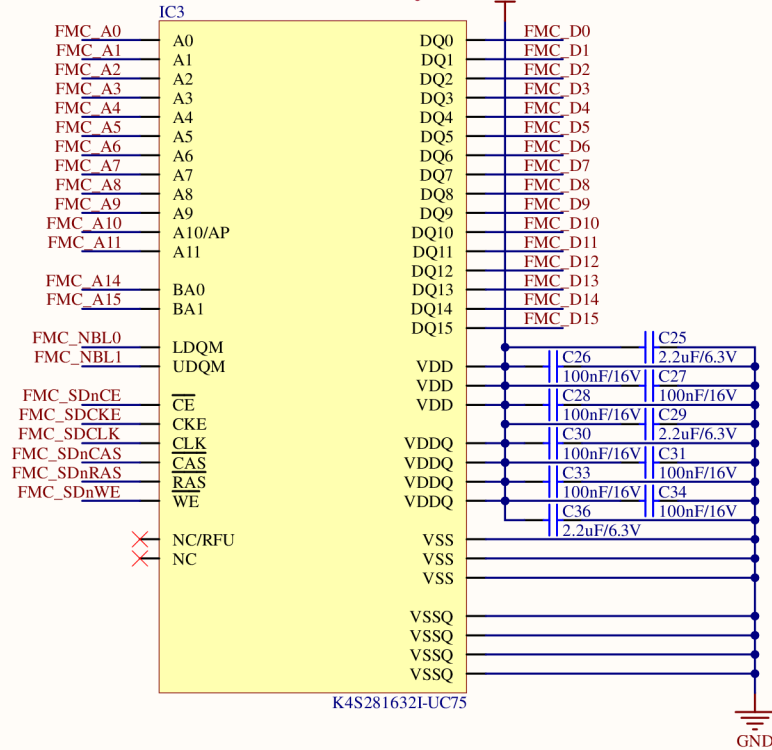
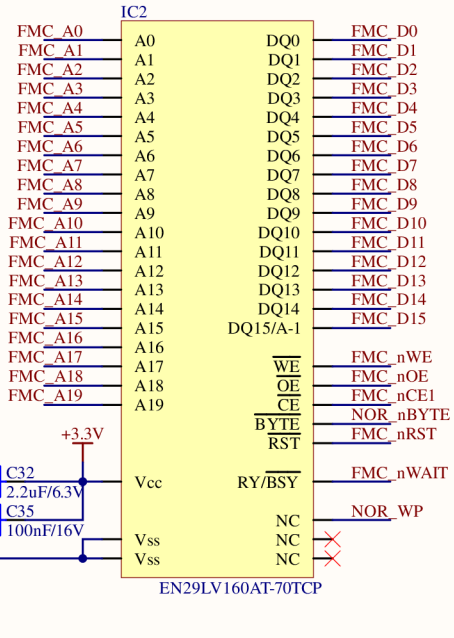
△ PB3 conflict DMC_D15 and LTDC_B3. Keep FMC_D15, LTDC_B3 is hard routed to GND or LTDC_B4




Title: Menic325 control board			
Page content: MCU.SchDoc			
Size: _____	DWG NO: _____		Revision: 1.0
Date: 19.05.2022	Sheet: 2		of 10

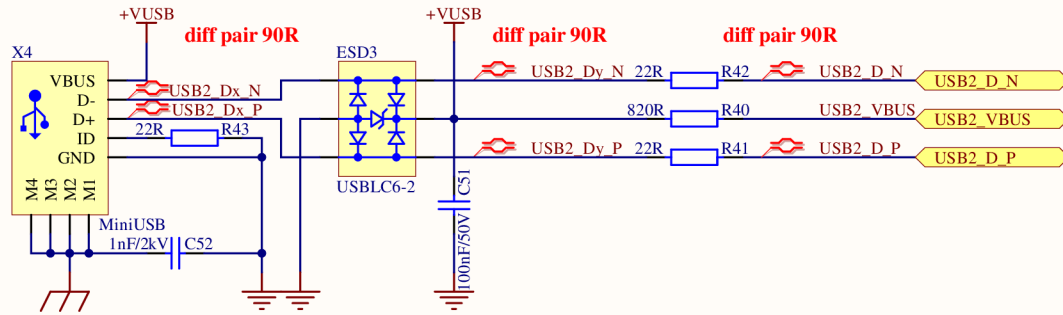
xxx_88


On board memory



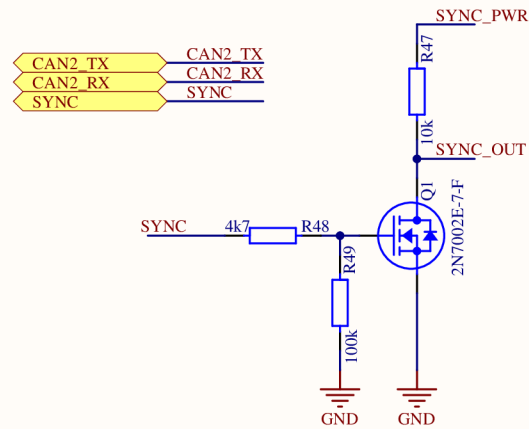
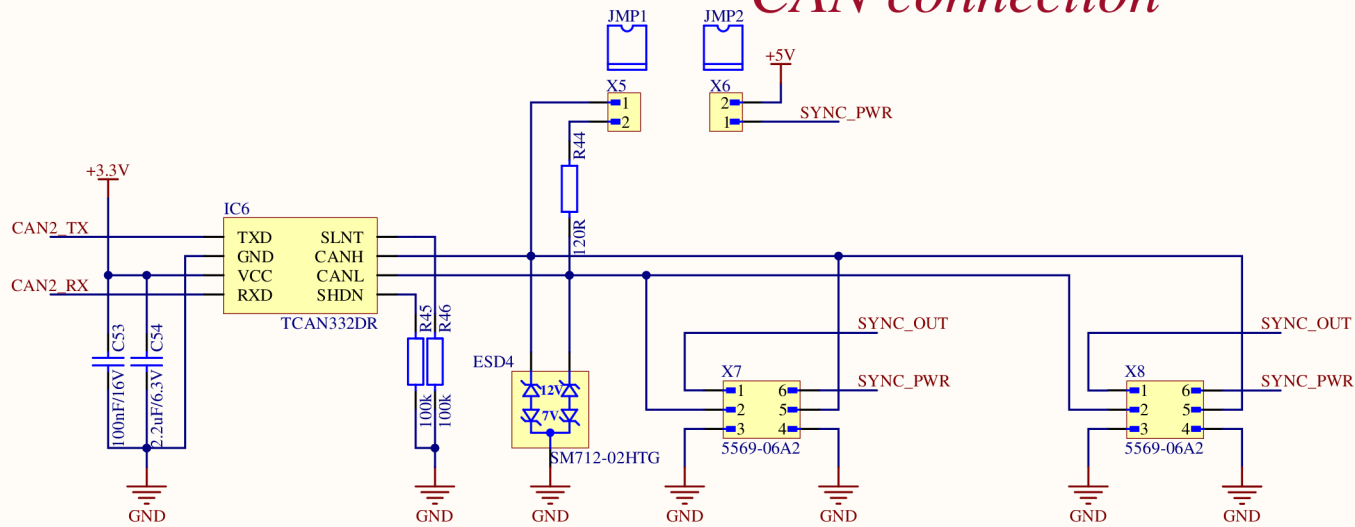
Title: Memc325 control board			
Page content: MEM.SchDoc			
Size:	DWG NO:		Revision: 1.0
Date: 19.05.2022	Sheet: 3		of 10


USB connection



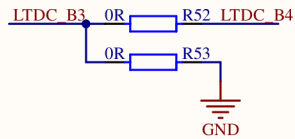
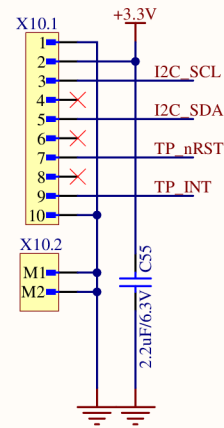
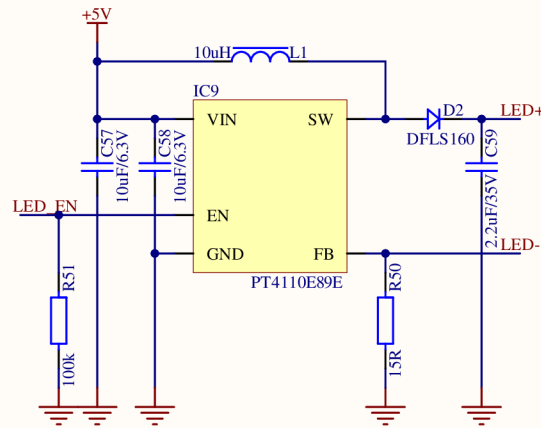
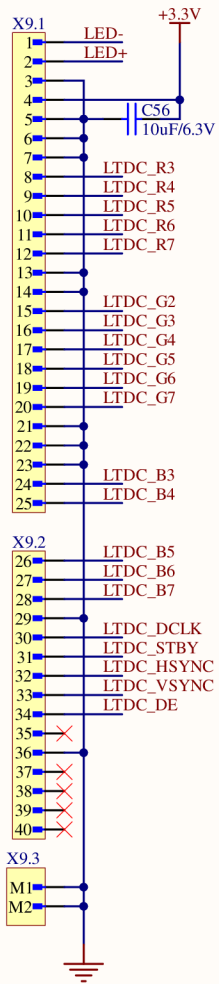
Title:		Menic325 control board		
Page content:				
USB.SchDoc				
Size:	DWG NO:	Revision:	1.0	
Date:	19.05.2022	Sheet:	5 of 10	.xxx_88

CAN connection

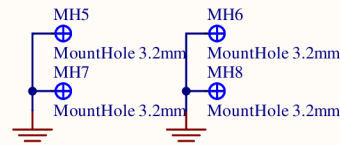



Title:		Menic325 control board		
Page content:		CAN_SchDoc		
Size:	DWG NO:	Revision:	1.0	
Date:	19.05.2022	Sheet:	6 of 10	

LCD connector and backlight PSU

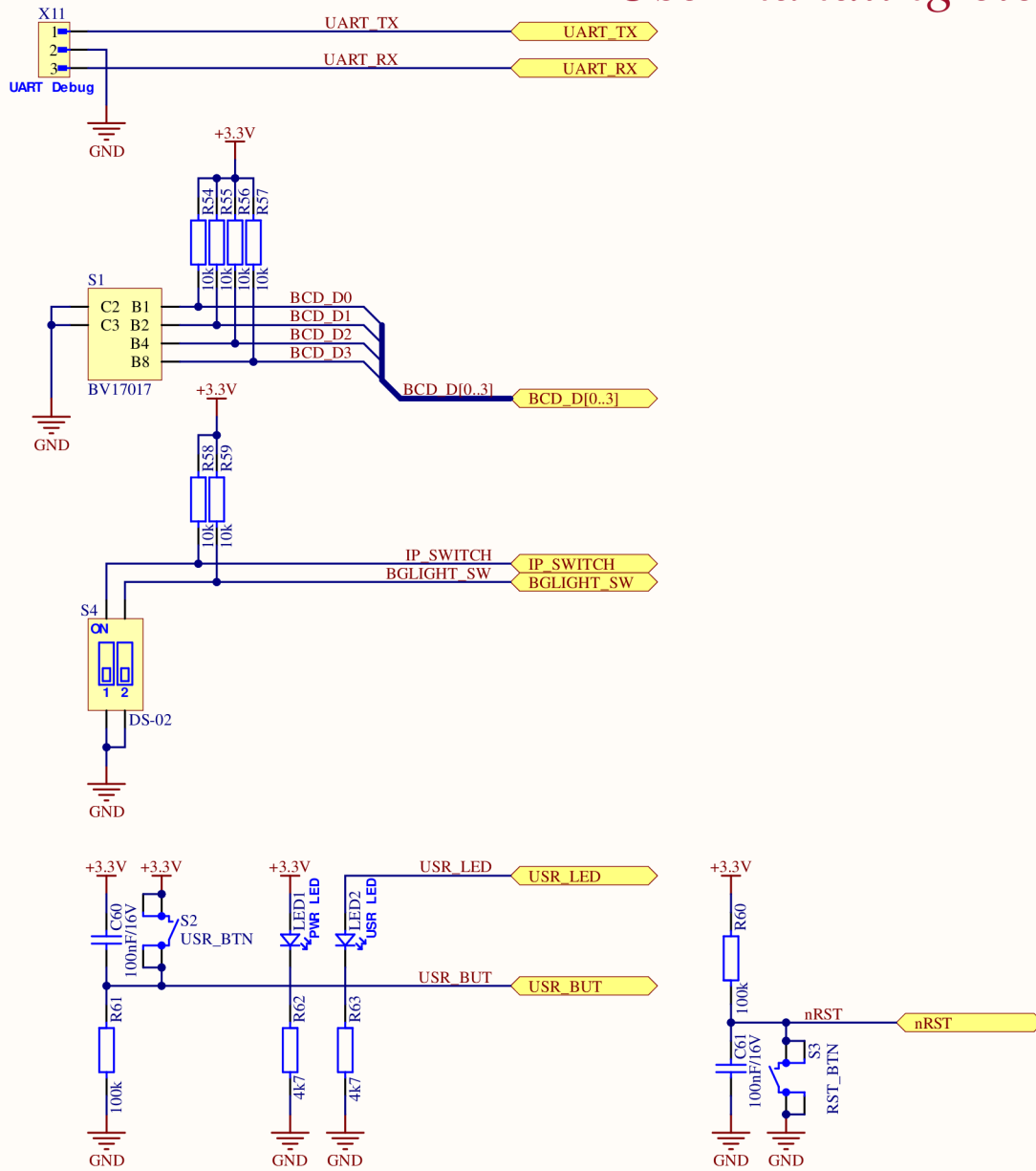



LTDC_R[3..7]	LTDC_R[3..7]
LTDC_G[2..7]	LTDC_G[2..7]
LTDC_B[3..7]	LTDC_B[3..7]
LTDC_VSYNC	LTDC_VSYNC
LTDC_HSYNC	LTDC_HSYNC
LTDC_DE	LTDC_DE
LTDC_DCLK	LTDC_DCLK
LTDC_STBY	LTDC_STBY
TP_INT	TP_INT
TP_nRST	TP_nRST
LED_EN	LED_EN
I2C_SCL	I2C_SCL
I2C_SDA	I2C_SDA



Title: Menic325 control board		
Page content: LCD.SchDoc		
Size: DWG NO:	Revision: 1.0	
Date: 19.05.2022	Sheet: 7 of 10	

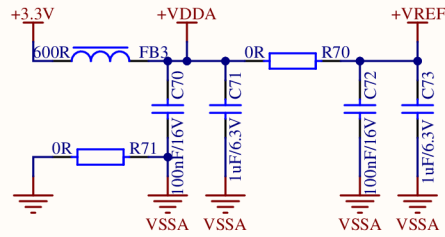
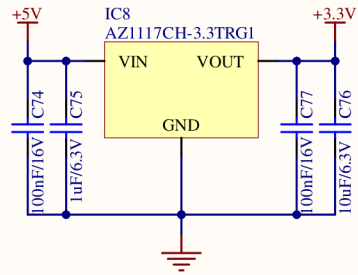
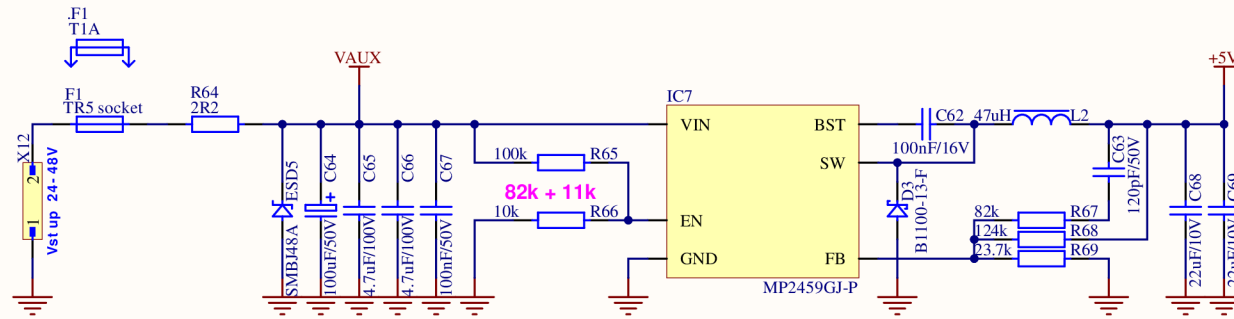
User handling elements




Title:		Menic325 control board		
Page content:		USR.SchDoc		
Size:	DWG NO:	Revision:	1.0	
Date:	19.05.2022	Sheet:	8 of 10	

xxx_88

Main board power supply unit



Title:		Menic325 control board		
Page content:		PWR.SchDoc		
Size:	DWG NO:	Revision:	1.0	
Date:	19.05.2022	Sheet:	9 of 10	

1

2

3

4

Revision history document

29.11. 2021 - M.Mikulka - Project creation
 07.01. 2022 - M.Mikulka - Completed schematic, created PCB document
 09.01. 2022 - M.Mikulka - Completed PCB design, export manufacture data and documentation

A

A

B


B

C

C

D

D

Title:		Menic325 control board		
Page content:				
REV.SchDoc				
Size: A4	DWG NO: 1	Revision: 1.0		
Date: 19.05.2022	Sheet: 10	of 10		xxx_88

1

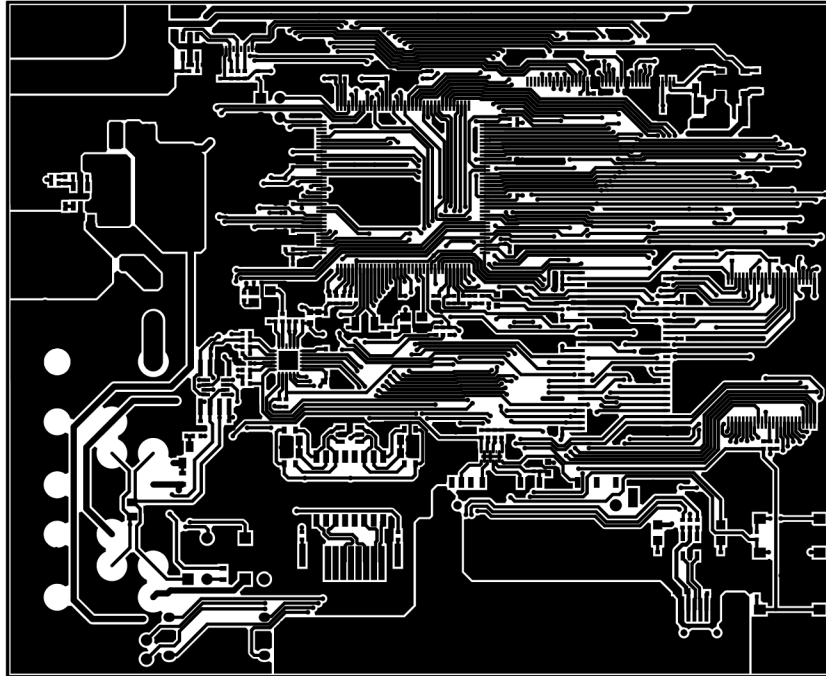
2

3

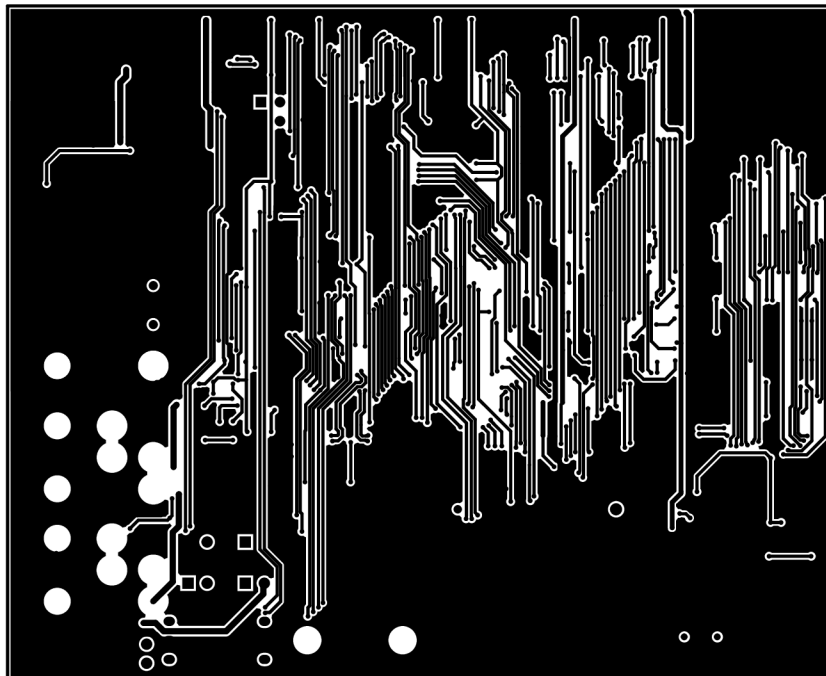
4

Příloha E - Motiv a osazovací plán řídicí desky

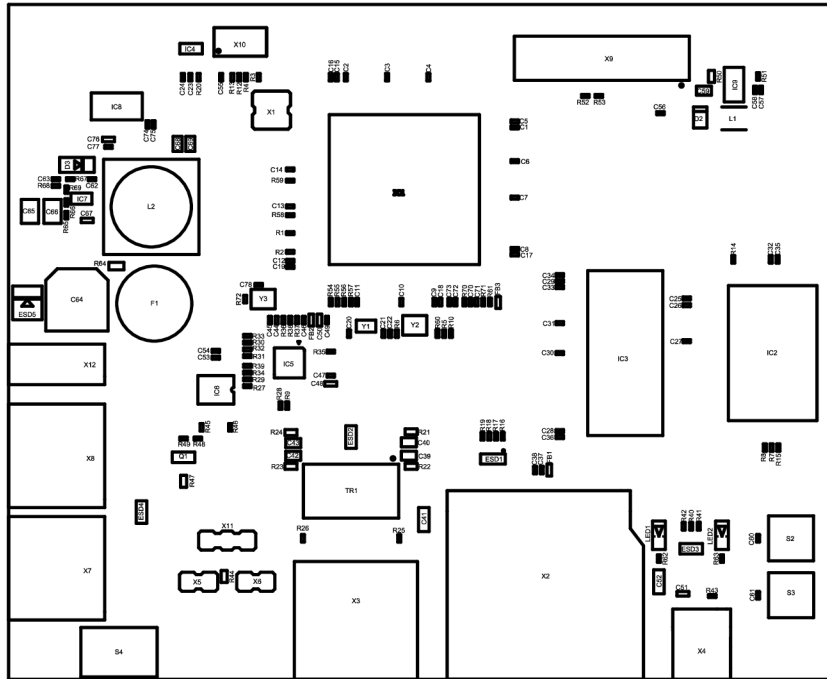
Tato příloha obsahuje výrobní podklady k DPS řídicí části měniče.



Obr. E1: Maska plošného spoje, vrstva TOP, velikost 1:1



Obr. E2: Maska plošného spoje, vrstva BOT, velikost 1:1



Obr. E3: Osazovací plán plošného spoje, strana TOP, velikost 1:1

Příloha F - Výkresy chladičů pro desku měniče

Tato příloha obsahuje dokumentaci k výrobě chladičů pro silovou DPS měniče.

