

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

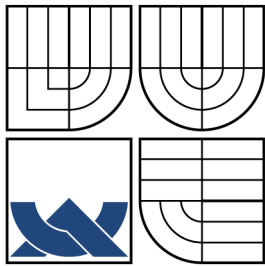
ŘÍDICÍ ELEKTRONIKA MĚNIČE NA BÁZI DSP TEXAS
INSTRUMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

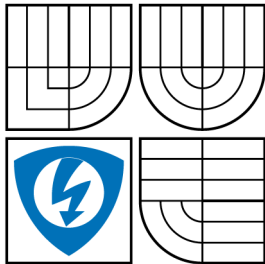
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ADAM VAŠÍČEK

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŘÍDICÍ ELEKTRONIKA MĚNIČE NA BÁZI DSP TEXAS INSTRUMENTS

A FREQUENCY INVERTER BASED ON TEXAS INSTRUMENTS DSP

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

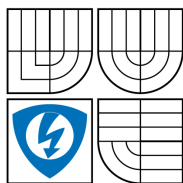
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ADAM VAŠÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. SOBĚSLAV VALACH

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Adam Vašíček
Ročník: 3

ID: 70335
Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Řídící elektronika měniče na bázi DSP Texas Instruments

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte možnosti implementace a optimalizace algoritmů pro řízení výkonového měniče se signálovým procesorem řady 2000 firmy Texas Instruments.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Firemní literatura Texas Instruments.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 1.6.2009

Vedoucí práce: Ing. Soběslav Valach

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem řídicí desky jednofázového střídače. Ten může být následně využit jako zdroj střídavého napětí s nastavitelnou amplitudou i kmitočtem v různých oblastech průmyslu nebo třeba jako laboratorní zdroj. Je zde nastíněn obvodový návrh desky, aspekty návrhu plošného spoje a následně i některé základní algoritmy řídicího programu. Pozornost je věnována také zajištění dostatečné odolnosti řídicí desky proti rušení, a to již ve fázi návrhu. Dále práce rozebírá možná rozšíření funkčnosti desky a případná vylepšení, stejně, jako i nedostatky stávajících řešení jak samotné desky, tak řídicího programu.

KLÍČOVÁ SLOVA

střídač, měnič, digitální signálový kontrolér, Texas Instruments, jednofázový střídač, TMS320F2808, TMS320

ABSTRACT

This bachelor's thesis discusses a one-phase frequency inverter control board design. The inverter is supposed to be used in a various industry branches or as a laboratory supply as well. The thesis covers basics of schematics and printed circuit board design and describes several main parts of the control software. An attention was paid to ensure electromagnetic interference susceptibility. The board extension and refinements possibilities as well as its weaknesses in both hardware and software levels are also discussed.

KEYWORDS

frequency inverter, inverter, digital signal controller, Texas Instruments, TMS320F2808, TMS320

VAŠÍČEK, A. *Řídicí elektronika měniče na bázi DSP Texas Instruments*. Brno: VUT Brno. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav automatizační a měřicí techniky, 2009. 33 s., 4 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucím práce byl Ing. Soběslav Valach.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Řídicí elektronika měniče na bázi DSP Texas Instruments“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Chtěl bych tímto poděkovat panu Ing. Františkovi Petru za metodické vedení při návrhu a cenné znalosti a zkušenosti, které jsem měl díky dlouholeté spolupráci s jeho společností možnost získat.

OBSAH

Úvod	10
1 Princip navrhovaného střídače	11
2 Návrh desky	15
2.1 Požadavky na desku	15
2.2 Obvodové řešení, součástky	17
2.2.1 Blokové schéma	17
2.2.2 Použité součástky	20
2.3 Plošný spoj	21
2.3.1 Použitý návrhový SW	21
2.3.2 Návrh	21
3 Programové vybavení desky	23
3.1 Koncepce programu	23
3.2 Algoritmy řízení spínacích prvků	24
3.3 Uživatelské rozhraní	25
3.3.1 Ovládání displeje	25
3.3.2 Sériová komunikace	27
3.3.3 Tlačítka	27
4 Výsledky, možnosti úprav a vylepšení	28
4.1 Výsledky návrhu desky	28
4.2 Možné budoucí úpravy desky	28
4.3 Výsledky návrhu programu	28
4.4 Další vývoj programu	29
5 Závěr	30
Reference	31
Seznam symbolů, veličin a zkratk	32
Seznam příloh	34
A Fotodokumentace desky	35
A.1 Strana součástek (vrchní), s displejem	35
A.2 Strana součástek (vrchní), bez displeje	36
A.3 Strana spojů (spodní)	37

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Zjednodušené schéma silové části	11
1.2	Časový průběh výstupního napětí střídače	14
2.1	Blokové schéma řídicí desky	18
3.1	Diagram přechodů stavového automatu LCD displeje	26
A.1	Fotografie desky — strana součástek I	35
A.2	Fotografie desky — strana součástek II	36
A.3	Fotografie desky — strana spojů	37

SEZNAM TABULEK

1.1 Srovnání hlavních parametrů spínacích prvků	13
-----------------------------------------------------------	----

ÚVOD

Úkolem střídačů je přeměna stejnosměrného napětí na napětí střídavé. Můžeme je rozdělit podle počtu fází výstupního napětí na jednofázové a třífázové. Tato bakalářská práce se zabývá návrhem prototypu řídicí desky jednofázového střídače. Výsledný střídač, ovládaný navrženou deskou, je primárně určen pro generování napětí pomocné sítě v drážních vozidlech. Je však možné jej využít v řadě jiných aplikací, kde je zapotřebí vytvářet ze stejnosměrného napětí napětí střídavé s nastavitelnou amplitudou i kmitočtem.

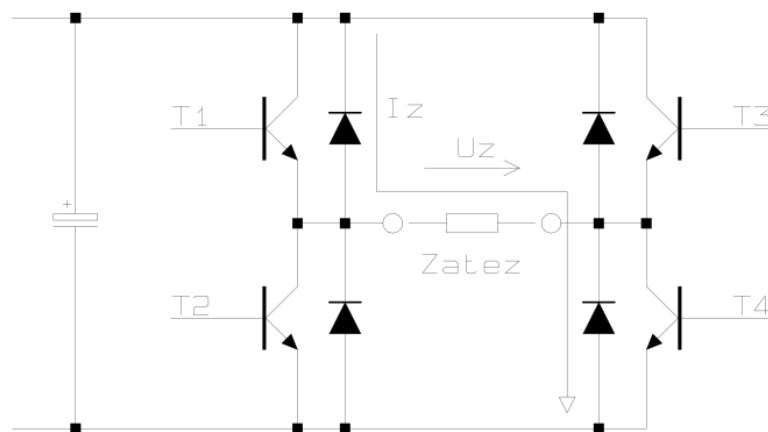
Řídicí deska by měla být navržena s ohledem na co možná nejširší možnosti jejího využití i v jiných aplikacích, jako např. fázové a pulzní usměrňovače nebo i zařízení značně odlišná — regulátory, jednoúčelová měřicí zařízení apod. Na desce budou umístěny i tlačítka a displej pro nastavování a výpis základních parametrů.

Dále práce zhruba popisuje možné řešení řídicího programu a na úryvcích zdrojových kódů jednotlivých částí aplikace dokumentuje základní algoritmy použité na navrženém prototypu řídicí desky. Jsou rozebrány i možnosti případného dalšího rozšíření programu a omezení vyplývající z použitých řešení.

1 PRINCIP NAVRHOVANÉHO STŘÍDAČE

V této kapitole bude ve stručnosti popsán princip fungování jednofázového napětového střídače a rozebrán vztah parametrů silové části, zvláště spínacích prvků, vzhledem k řídicí desce a softwaru.

Jednofázový střídač si můžeme představit jako čtveřici spínačů, zapojených do můstku podle obr. A.3. Na tomto schématu jsou zakresleny na místo spínačů bipolární tranzistory, jejichž funkce, tedy spínání a vypínání, však může být zastoupena (a většinou je, jak bude dále uvedeno) řadou různých výkonových polovodičových spínacích prvků. Funkce bude popsána jen v nezbytně nutné míře na tomto zjednodušeném zapojení, které neobsahuje žádné ochrany, odrušovací prvky, budící ani řídicí obvody. Ve schématu na obr. A.3 je naznačen proud I_z procházející zátěží při



Obrázek 1.1: Zjednodušené schéma silové části

sepnutých tranzistorech T1 a T4 (je-li zátěž odporového charakteru). Napětí U_z na zátěži, je velké jako napájecí napětí snižené o úbytky na sepnutých tranzistorech a jeho smysl je vyznačen šipkou. Jak vyplývá z obrázku 1.2, znázorňujícího princip šířkové modulace, odpovídá tento stav okamžikům, kdy je výstupní napětí kladné a je tedy vytvářena kladná půlvlna výstupního napětí. Při záporné půlvlně jsou spínány T2 a T3 a napětí na zátěži je tím pádem opačné. Je zřejmé, že nesmí dojít k současnému sepnutí obou tranzistorů ve větvi (T1 a T2 nebo T3 a T4). Tím by byl zkratován kondenzátor napětového meziobvodu i napájecí síť a vysokým zkratovým proudem by došlo minimálně ke zničení tranzistorů. Nelze tedy zanedbat spínací a vypínací doby použitých tranzistorů. K zamezení současného (byť jen částečného) sepnutí tranzistorů jsou řídicími obvody generovány tzv. ochranné doby (*deadband*). Ty zaručí, že se jednotlivé tranzistory spínají o definovanou dobu později a vypínají dříve, než by tomu bylo bez ochranných dob.

Na generované střídavé napětí U_z jsou nejčastěji kladeny požadavky jako nastavitelná velikost napětí a kmitočet, proudové omezení a pokud možno minimální harmonické zkreslení. Jejich splnění je závislé především na řídicí elektronice střídače. Ta je dnes již výhradně tvořena mikroprocesorem a k němu náležitými podpůrnými obvody. Mikroprocesor podle naprogramovaného řídicího algoritmu vytváří sled impulzů, který ovládá silovou část střídače a získává ze ní informace jak pro zpětnou vazbu, tak pro ochranné funkce (např. dočasné vypnutí střídače při přehřátí, překročení nastavených limitů výstupního proudu a pod.). Řídicí i silová část tvoří obvykle (kvůli omezení rušení řídicích obvodů, snížení ceny výrobku díky modulární konstrukci atd.) oddělené celky propojené kabelem.

Pro správnou volbu spínacího kmitočtu a algoritmu spínání koncových prvků je třeba znát dynamiku silové části, která je ovlivněna jak výběrem konkrétních spínacích prvků, budícími obvody, ale i charakterem předpokládané zátěže. Je proto nutné si před samotným návrhem položit několik otázek. Zejména pak:

- **Pro jaký jmenovitý výkon střídač navrhujeme?** Tato otázka je rozhodující při výběru koncových spínacích prvků (a tedy i budících obvodů, ochrany a pod.). Prvky samotné sice nejsou součástí řídicí desky, ale jejich parametry s ní úzce souvisí. Obecně lze říci, že čím vyšší je spínaný proud a napětí, tím delší je spínací (t_{ON}) i vypínací (t_{OFF}) doba prvku. Pro nejvyšší výkony (stovky kW až desítky MW — trakční střídače lokomotiv, lodí, HVDC a pod.) jsou na místě těchto spínacích prvků používány vypínatelné tyristory (dříve GTO, dnes spíše IGCT). Díky jejich poměrně dlouhým časům t_{ON} (u GTO však hlavně t_{OFF} - viz [7, str. 17]) lze, za předpokladu rozumných spínacích ztrát, dosáhnout spínacích kmitočtů maximálně jednotky kHz (s tyristory GTO jen stovky Hz). V případě střídačů nižších výkonů (desítky až stovky kW — pohony v průmyslu, tramvaje a pod.) se obvykle používají tranzistory IGBT. Jejich t_{ON} je ještě zhruba řádově kratší, než v případě IGCT. Lze tedy dosáhnout spínacích kmitočtů až desítky kHz. Pro střídače malých výkonů (do jednotek kW — pro servopohony v průmyslu, obráběcí stroje a pod.) se často používají výkonové spínací tranzistory MOS-FET. S těmi lze dosáhnout spínacích kmitočtů až stovky kHz, ale obvykle nejsou takto vysoké kmitočty využívány. Se zvyšujícím se kmitočtem spínání se totiž zvyšují spínací ztráty. Při zvyšování rychlosti spínání se sice spínací ztráty snižují, ale zvyšuje se intenzita vytvářených rušivých polí ($\frac{dU}{dt}$ a $\frac{dI}{dt}$). Snižujeme-li naopak spínací kmitočet, zhoršuje se tvar výstupního napětí (proudu), což má za následek zvětšení amplitudy vyšších harmonických. Ty mohou nepříznivě zatěžovat napájené stroje a zařízení (vnikají rezonance a pod.). Volba spínacího kmitočtu je tedy vždy

prvek	U_R^1 [kV]	I_F^2 [kA]	t_{on} [μ s]	t_{off} [μ s]
SCR ³	do 6	do 5	desítky	desítky
GTO	do 6	do 5	desítky	desítky
IGCT	do 6	do 5	jednotky až desítky	jednotky
IGBT	do 4	do 3	jednotky	jednotky
MOS-FET	do 1	do 0,2	desetiny	desetiny

Tabulka 1.1: Srovnání hlavních parametrů spínacích prvků⁴

určitým kompromisem.

- **Jaký požadujeme průběh výstupních veličin?** Průběh výstupních veličin se většinou snažíme vytvářet podobný sinusovému, výjimkou jsou některé tří-fázové střídače pro napájení asynchronních strojů (s přímým řízením momentu a pod.). Snížením kmitočtu spínání se průběh výstupního napětí střídače (dnes takřka výhradně používaného napěťového), blíží čím dál, tím více, průběhu obdélníkovému. U třífázových střídačů se používají různé, často poměrně složité, způsoby modulace k dosažení co nejlepších průběhů. U střídačů vyšších výkonů bývá také často měněn způsob modulace podle požadovaného kmitočtu základní harmonické generovaného napětí (viz [1, str. 53]). Navrhovaný střídač je však pouze jednofázový a nižšího výkonu, vystačíme tedy s šířkovou modulací (PWM), jejíž princip je zřejmý z obrázku 1.2. Na obrázku je vidět, jak se změnou střídání spínání tranzistorů koncového stupně mění obálka výstupního napětí (vyznačena tlusou čarou). Z výstupního napětí se filtrací odstraní střídavá složka o kmitočtu rovném kmitočtu spínání koncového stupně a jeho vyšších harmonických (3., 5., 7., ...). Můžeme jej potom vyjádřit rovnicí

$$u(t) = U_M \cdot \sin(\omega t) = U_M \cdot \sin(2\pi f t) \quad (1.1)$$

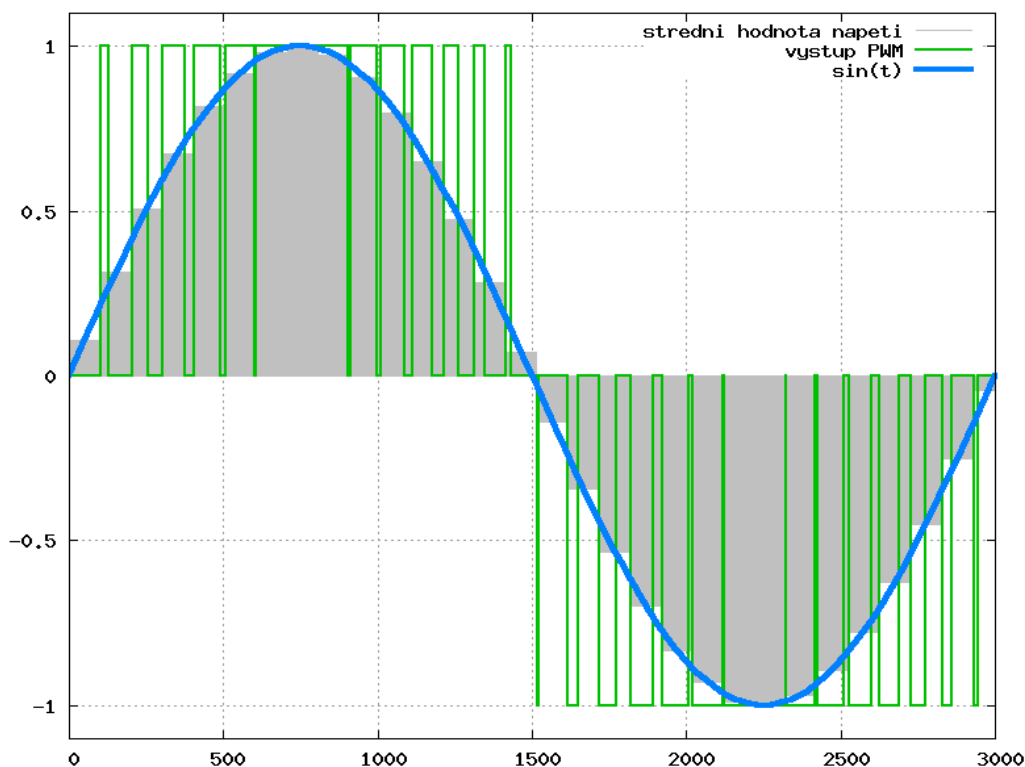
kde U_M je amplituda výstupního napětí, ω jeho úhlový kmitočet, f kmitočet

¹V případě tyristorů maximální opakovatelné napětí v blokujícím stavu (značeno obvykle V_{DRM}), u tranzistorů maximální napětí kolektor–emitor (drain–source u MOS-FET).

²U tyristorů maximální efektivní proud v propustném směru (značeno obvykle I_{TRMS}), u tranzistorů maximální trvalý kolektorový proud.

³Standardní tyristor s komutačními obvody. U střídačů se pro svou nízkou rychlost spínání dnes téměř nepoužívá. Většinou je nahrazen GTO nebo IGCT.

⁴Toto srovnání je pouze informativní, parametry dostupných součástek se mohou lišit. Je třeba vzít v úvahu, že jednotlivé parametry jsou na sobě často vzájemně závislé (čím větší chceme U_R , tím menší bude I_F a pod.).



Obrázek 1.2: Časový průběh výstupního napětí střídače

a t čas. Je-li spínací kmitočet více než o řád vyšší, než generovaný, je skutečný průběh výstupního napětí takřka totožný s požadovaným (ideálním) průběhem.

Pulzně-šířková modulace může být synchronní nebo asynchronní. Při synchronní PWM je kmitočet spínání celistvým násobkem výstupního kmitočtu střídače a není tedy konstantní. Asynchronní nazýváme modulaci v případě, že je spínací kmitočet konstantní na celém rozsahu kmitočtu generované základní harmonické. Výhodou je jednodušší řízení (nemusíme kmitočet spínání měnit). Pro střídač nízkého výkonu (do jednotek kW) je naprosto postačující. Synchronní modulace jsou využívány spíše u střídačů vyšších výkonů, kde mohou při nižším výstupním kmitočtu snížit spínací ztráty silové části, avšak na úkor tvaru výstupních průběhů.

- **Jaké použijeme spínací prvky?** Výběr konkrétního typu spínacích prvků, jak již bylo výše rozebráno, ovlivní horní hranici použitelného kmitočtu spínání.

Navrhovaný střídač je malého výkonu (jednotky kW) a bude tedy použita asynchronní pulzně-šířková modulace. Její realizace je s dnes dostupnými součástkami poměrně jednoduchá, stejně jako řídicí algoritmus.

2 NÁVRH DESKY

V úvodu této kapitoly budou rozebrány základní požadavky kladené na desku v předpokládané oblasti jejího použití — drážním vozidle — a stručně nastíněny specifika okolního prostředí a vlivů. Poté bude zhruba popsáno použité obvodové řešení a součástky. V jejím závěru bude přiblížen návrh desky plošného spoje a rozmístění ovládacích prvků a konektorů s ohledem na jednoduché a přehledné ovládání a snadnou montáž.

2.1 Požadavky na desku

Deska je primárně navrhována pro použití v drážních vozidlech. Tato vozidla se pohybují v různých podmínkách, které nejsou vždy právě příznivé. **Provozní teploty** se pohybují od teplot hluboko pod bodem mrazu až do teplot nad 50°C v parných letních dnech za plného provozu, kdy je okolní vzduch značně ohříván ostatními prvky elektrické výzbroje vozidla nebo i dieslovým motorem a pod.. Je tedy naprosto nezbytné volit použité součástky jedině z řad vyráběných pro průmyslový (*industrial*, $-40 - 80^{\circ}\text{C}^1$) rozsah provozních teplot. Je možné použít i součástky označované jako *automotive* (pro automobilový průmysl, $-40 - 125^{\circ}\text{C}$) nebo *military* (vojenské, $-55 - 125^{\circ}\text{C}$), které mají širší rozsah pracovních teplot, ne však *commercial* (pro komerční elektroniku, pouze $0 - 70^{\circ}\text{C}$).

Relativní **vzdušná vlhlost** může prakticky být $0 - 100\%$ a nemůžeme vyloučit, že nebude kondenzovat. Hotovou desku proto bude třeba proti vlhku chránit ochranným lakem a součástky, které chránit nelze (konektory, tlačítka, displej) volit v odolnějších provedeních (uzavřené, s minimem netěsností). Tímto omezíme i problémy spojené s prašností a svodovými proudy, vznikajícími ve vrstvě časem nahromaděného vlhnocího prachu.

Největším problémem průmyslových zařízení obecně bývá elektromagnetické **rušení**. A to jak rušení vytvářené okolím (přenášené do zařízení po signálových a silových vodičích, napájecí sítí, kapacitními i indukčními vazbami), tak rušení vznikající v samotném zařízení. U drážních vozidel (zvláště lokomotiv) bývá intenzita rušení značně vysoká. Je tedy opět třeba věnovat velkou pozornost obvodovému návrhu, ale zejména plošnému spoji desky, aby tato byla co nejméně citlivá na působení rušení, a také aby jej sama co nejméně vytvářela. Výkonové spínací tranzistory silové desky střídače rychle spínají poměrně vysoké napětí a není problém dosáhnout strmosti i přes $5\text{kV}\mu\text{s}^{-1}$. I minimální kapacitní vazby poměrně vzdálených vodičů tedy mohou

¹Teplotní rozsahy a názvy provedení součástek se u různých výrobců a druhů součástek (polovodiče, pasivní prvky, elektrolytické kondenzátory) liší. Uvedené hodnoty jsou pouze orientační, skutečné jsou vždy uvedeny v katalogových listech výrobce k dané součástce.

přenášet poměrně velké rušivé proudy. Uvažujeme-li například strmost vzestupné i sestupné hrany $1\text{kV}\mu\text{s}^{-1}$ a parazitní kapacitu mezi silovým vodičem a signálovým vodičem 1pF , budou tedy do signálového vodiče parazitní kapacitní vazbu procházet rušivé impulzy s amplitudou proudu

$$I_{\max} = C_{\text{par}} \frac{\Delta U}{\Delta t} = 1 \cdot 10^{-12} \frac{1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^{-6}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{A} = 1\text{mA}. \quad (2.1)$$

Pokud se takovéto rušení přenáší do analogových signálových vodičů, vznikají značné chyby. U číslicových spojů může v extrémních případech dojít ke vzniku hazardních stavů nebo změně logické úrovně signálu. Signálové vodiče je tedy zapotřebí vést co možná nejdál od silových a silovou část, je-li to možné, odstínit od řídicí desky.

Velkou pozornost je také zapotřebí věnovat kvalitnímu a správnému zemění jednotlivých obvodových celků. Zem silové části bývá obvykle galvanicky oddělena od země řídicí elektroniky, a to především kvůli omezení rušivých signálů vstupujících do řídicí části a také pro zvýšení bezpečnosti obsluhy. Řídicí signály spínacích prvků bývají tedy odděleny optočleny nebo impulzními transformátory, u střídačů vysokého výkonu bývají stále častěji přenášeny prostřednictvím optických vláken. Optočleny nebo impulzní transformátory jsou obvykle součástí budících obvodů umístěných v blízkosti výkonových spínacích prvků (bipolárních, unipolárních (MOS-FET) či IGBT tranzistorů nebo vypínatelných GTO tyristorů. Dnes jsou budící obvody stále častěji neoddelitelnou součástí spínacího prvku a tvoří tak tzv. výkonový modul (u IGCT samozřejmostí). Na řídicí desce se většinou vytváří oddělená zem pro analogové a číslicové obvody. To je nutné pro zamezení pronikání rušení z číslicové části do měřených analogových signálů. Má-li totiž řídicí mikroprocesor (nebo DSC) A/D převodník s rozlišením ADC_{res} 12 bitů a rozsah vstupních napětí U_{maxADC} 0 – 3,3 V, pak je rozlišení převodníku (kvantovací úroveň)

$$\Delta U_{\text{minADC}} = \frac{U_{\text{maxADC}}}{2^{\text{ADC}_{\text{res}}}} = \frac{3,3}{2^{12}} \doteq 0,0008 = 0,8\text{mV}. \quad (2.2)$$

Při takovémto rozlišení A/D převodníku je zřejmé, že je potřeba omezit možná rušení na minimum. Pro co nejkvalitnější vedení zemních, napájecích i signálových spojů řídicích obvodů je většinou nutno použít alespoň čtyřvrstvou desku plošného spoje. Jedna vrstva slouží jen pro rozvedení zemních spojů (rozlitá měď), dvě vrstvy jsou vyhrazeny pro vedení signálových spojů a na zbývající vrstvě jsou rozvedeny spoje napájecích napětí. Měřené analogové signály je třeba filtrovat, a to buď přímo ve vstupních zesilovačích (integračními RC články) nebo číslicově (filtry s nekonečnou nebo konečnou odezvou na skokový vstupní signál — IIR nebo FIR). Nejlépe je ale využít kombinaci obou metod, protože vždy je třeba filtrovat kmitočty, které nevyhovují vzorkovacímu teorému. Ten říká, že kmitočet vzorkování f_s musí být vždy alespoň dvakrát vyšší, než nejvyšší harmonická měřeného signálu. To však nebývá v

případě výkonové elektroniky problém, protože perioda vzorkování moderních A/D převodníků bývá značně krátká (stovky ns až jednotky μs) a kmitočet měřených signálů naopak poměrně nízký (do desítek kHz). Přesto ale je lépe měřené signály filtrovat ještě před jejich vstupem do A/D převodníku, protože šum superponovaný na užitečný signál nemusí podmínku vzorkovacího teorému splňovat.

Další činitel mající velký vliv hlavně na spolehlivost zařízení jsou vibrace a mechanické rázy. Jejich destruktivním projevům se dá velmi dobře předcházet vhodnou konstrukcí zařízení. Dnes již téměř výhradně používané součástky pro povrchovou montáž (SMT) mají malou hmotnost a velice krátké (nebo žádné) přírady, což je činí značně odolnými vůči těmto vlivům. Dalšího zlepšení dosáhneme lakováním, případně zaléváním speciálními hmotami, již hotové a oživené desky. Vždy je však třeba používat konektory, patice a jiné mechanické prvky, které jsou dostatečně odolné působení rázů a vibrací.

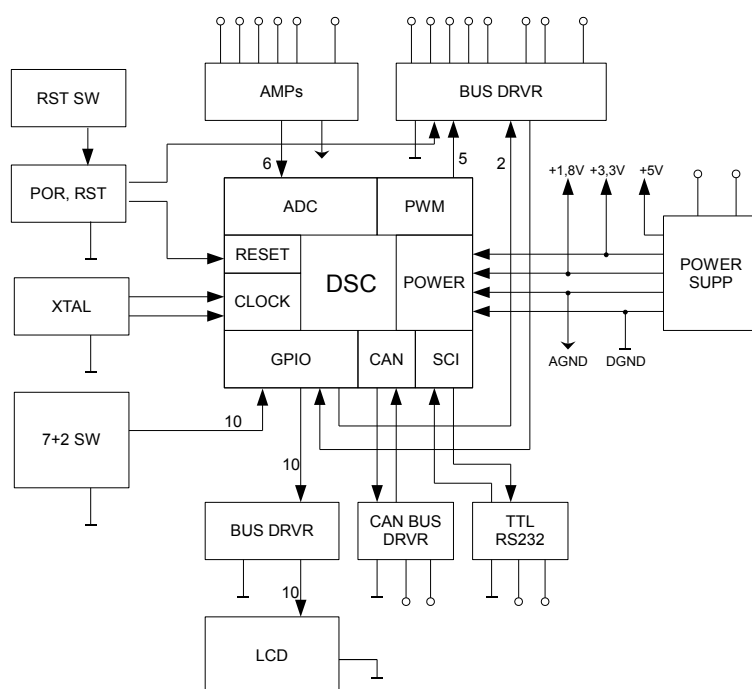
Poslední ve výčtu nepříznivých jevů zmíním nad- a podlimitní stavy napětí a proudů (nebo i jiných veličin — kmitočet, teplota a pod.) na vstupech a výstupech nejen celého zařízení, ale i řídicí desky jako takové. Vstupy i výstupy zařízení (střídače) je třeba chránit dostatečně rychlými ochranami v podobě varistorů, transilů, pojistek, ... Pro spolehlivou a dlouhodobou činnost je dobré zvážit, zda není lépe, aby byly všechny výstupy zkratuvzdorné a všechny vstupy odolné proti přepětí i přepólování. V případě řídicí desky je pak velice vhodné oddělit všechny vstupy a výstupy řídicího procesoru od okolí pomocí výstupních budičů, vstupních zesilovačů a podobně. Použité řídicí mikrokontroléry (DSP, DSC, ...) nebývají příliš drahé, ale jejich výměna může být značně nákladná, ne-li nemožná.

2.2 Obvodové řešení, součástky

2.2.1 Blokové schéma

Jádrem řídicí desky je DSC Texas Instruments TMS320F2808. K němu jsou připojeny jednotlivé periferie podle blokového schématu. Z něj je i zřejmé rozvedení zemí k jednotlivým blokům a počet signálových vodičů propojujících DSC s daným blokem (není-li číslo uvedeno, jedná se o jeden vodič). Význam jednotlivých periferií DSC je následující ([3]):

- **ADC** — A/D převodník. Na použitém DSC jsou dva 12bitové, každý multiplexován na 8 vstupů, celkem tedy 16 analogových vstupů, z toho šest je na desce použito. Pro měření vstupního napětí (napětí stejnosměrného meziobvodu), výstupního proudu, teploty chladiče silové desky a další.



Obrázek 2.1: Blokové schéma řídicí desky

- **PWM** — pulzně–šířkový modulátor. Použitý DSC disponuje 8 PWM výstupy. Na řídicí desce jsou využity čtyři z nich ke generování řídicích impulsů pro čtveřici spínacích tranzistorů na silové desce a jeden k řízení otáček ventilátoru pro chlazení silové části podle změřené teploty chladiče.
- **POWER** — napájecí vstupy. Pro napájení jádra (+1,8V) a periferií (3,3V). Odděleně napájecí napětí má A/D převodník (také 3,3V).
- **SCI** — asynchronní sériové rozhraní. Použito pro komunikaci desky s osobním počítačem při ladění a pro programování flash paměti DSC.
- **CAN** — sběrnice CAN 2.0B. Jako jedno z možných rozšíření desky bude možné využít komunikaci po sběrnici CAN.
- **GPIO** — vstupy/výstupy. Pomocí 10 číslicových výstupů je přiznán inteligentní LCD displej 16 znaků, 4 řádky. Pomocí vstupů jsou zjišťovány stisky ovládacích tlačítek.
- **CLOCK** — oscilátor s fázovým závěsem (PLL) pro vytváření hodinových signálů jednotlivých periferií.

- **RESET** — blok zajišťující reset DSC.

A význam jednotlivých bloků na desce je tento:

- **AMPs** — blok operačních zesilovačů pro oddělení měřených analogových signálů, jejich filtraci a úpravu amplitudy na rozsah 0 – 3,3V pro A/D převodník. Jsou použity OZ firmy Texas Instruments typu OPA374, které jsou určeny pro nesymetrické napájení již od 2,3V (zde napájeny 3,3V). Jak vstupy, tak výstupy jsou typu *rail-to-rail*, což znamená, že mohou pracovat s úrovněmi blízkými napájecímu napětí a zemi. Jsou zapojeny jako neinvertující, s RC dolními propustmi na vstupech i výstupech (ty jsou těsně u vývodů DSC). Jeden OZ je zapojen jako diferenční a porovnává referenční napětí s napětím odporového děliče s polovodičovým snímačem teploty typu KTY11.
- **BUS DRVR** — budiče sběrnice použité pro oddělení DSC od okolí a pro úpravu logických úrovní 3,3V (na straně DSC) na 5V v případě signálů pro silovou desku a displej.
- **POWER SUPP** — stabilizátory a filtry napájecích napětí. Jsou použity lineární stabilizátory z napájecího napětí desky (5V) na 3,3V a 1,8V. Pro 3,3V je použit obvod LF33, pro 1,8V obvod LM117 doplněný o dělič pro nastavení výstupního napětí. Jednotlivá napájecí napětí pro různé bloky jsou oddělena LC filtry. Analogová zem a číslicová zem jsou vedeny odděleně.
- **TTL RS232** — převodník úrovní TTL na RS-232. Slouží pro přímé připojení desky k počítači PC. Upravuje napětí vstupů/výstupů DSC na úroveň podle RS-232 ($\pm 12V$). Na desce je standardní konektor DB-9F (samice) pro připojení sériového kabelu. Převod je realizován standardním obvodem MAX232, který obsahuje i nábojové pumpy pro vytvoření vyšších napájecích napětí budičů linky RS-232.
- **CAN BUS DRVR** — budič sběrnice CAN. Převádí napěťové úrovně vstupů/výstupů DSC na úrovně pro diferenční sběrnici standardu CAN. Zde je použit obvod SN65HVD230 firmy Texas Instruments.
- **LCD** — inteligentní LCD displej 16 znaků, 4 řádky. Řízen paralelně (10 vodičů, z toho 8 datových).
- **7+2 SW** — ovládací tlačítka a spínače. Sedm ovládacích tlačítek pro ovládní střídače na předním panelu a dva miniaturní spínače pro volbu módu bootování DSC (programování nebo běh programu).

- **XTAL** — oscilátor s krystalem 20MHz. Od jeho kmitočtu je odvozen hodinový kmitočet jádra DSC (100MHz) a periférií.
- **POR, RST** — obvody pro reset DSC při zapnutí napájení a zajištění definovaného stavu na výstupech budičů sběrnic.
- **RST SW** — tlačítko pro restart DSC. Používané při ladění programu a programování DSC. V konečné verzi desky nebude osazeno, pouze totiž zjednodušuje programování a ladění aplikace.

Všechny vstupní a výstupní signály jsou vyvedeny na 34pinový konektor pro spojení se silovou deskou, odkud je také přivedeno napájecí napětí +5V.

2.2.2 Použité součástky

S ohledem na pracovní prostředí střídače (viz kapitolu Požadavky na desku na str. 15) je byly zvoleny součástky dostupné v průmyslovém provedení a typu SMD. Rezistory a keramické kondenzátory jsou velikosti 1206 (o rozměrech 3,2 x 1,6 mm) kvůli pohodlnějšímu ručnímu osazování, vyššímu povolenému ztrátovému výkonu (u rezistorů) a dobré dostupnosti. Rozměry desky jsou navíc určeny rozměry skříně střídače a ta je dostatečně velká. Není tedy třeba přílišná miniaturizace. Integrované obvody jsou v pouzrech SO-8, SO-16 a podobných. Diody v pouzdře MELF, stabilizátory napájecích napětí v pouzrech DPAK. DSC je v pouzdře TQFP-100 (100 vývodů, rozteč 0,5 mm).

TMS320F2808

Hlavní rysy použitého DSC firmy Texas Instruments typu TMS320F2808 jsou:

- napájecí napětí 1,8 V (jádro) a 3,3V (vstupy/výstupy, flash paměť, A/D převodník)
- hodinový kmitočet až 100MHz (instrukční cyklus 10ns)
- programová sběrnice — šířka 32 bitů, adresa 22 bitů
- datová sběrnice — dvojnásobná (zvlášť pro čtení a zápis), šířka 32 bitů pro data i adresu
- modifikovaná harvardská architektura
- 128kB flash paměti na čipu (64k 16bitových slov)
- 36kB RAM pro program a data (18k 16bitových slov)

- 8kB boot ROM pro programování v aplikaci (ISP)
- 128bitový klíč k ochraně paměti proti neoprávněnému čtení
- 16 PWM výstupů + 4 PWM výstupy s „vysokým rozlišením“ (150ps!)
- až 6 32bitových nebo 16bitových časovačů
- 2 asynchronní sériové porty (UART) s 16 byte FIFO
- 4 porty SPI, 1 I²C, 2 CAN
- 2 12bitové A/D převodníky, multiplexovány na 16 vstupů, čas převodu 160ns
- až 35 číslicových vstupů/výstupů s filtrováním záskmitů hran vstupních signálů (nastavitelný počet hodinových cyklů kdy se nesmí změnit logická úroveň vstupu aby byla změna hodnoty procesorem vyhodnocena)
- JTAG emulační rozhraní
- 3 nízkopříkonové módy
- dodáván pouzdrech TQFP-100 nebo PBGA-100
- rozsah pracovních teplot -40 – 85°C nebo -40 – 125°C

2.3 Plošný spoj

2.3.1 Použitý návrhový SW

K návrhu obrazce desky plošného spoje a výrobních podkladů byl použit volně šiřitelný balíček programů **KiCad**. Ten umožňuje pohodlně navrhnout schéma, vytvořit netlist, popisující propojení jednotlivých součástek a ten poté použít jako základ pro kreslení plošného spoje. KiCad podporuje hierarchická schémata s více listy, návrh až 16vrstvého plošného spoje a samozřejmostí je výstup standardních souborů pro výrobce plošného spoje, jako GERBER soubory pro fotoplotter, soubor pro NC vrtačku, seznam součástek a pod. Zajímavostí je možnost vytváření i prohlížení 3D vizualizace hotové desky.

2.3.2 Návrh

Součástky byly rozmístěny s ohledem a pokud možno krátké signálové a zemní spoje. DSC je přibližně ve středu desky, protože u něj je logicky nejvyšší hustota a počet spojů. Konentor pro připojení silové části je umístěn u horní hrany desky, konektory

RS-232 a CAN jsou u spodní hrany desky (při čelním pohledu na desku). Displej je umístěn v horní polovině desky, pod ním jsou rozmístěna tlačítka. Ty tvoří „směrovou růžici“ — nahoru, dolů, doleva a doprava. V jejím středu je umístěno potvrzovací tlačítko „OK“ a v pravém a levém horním rohu růžice jsou tlačítka, jejichž význam bude zřejmě „menu“ a „zrušit“. V levém spodním rohu desky je umístěno tlačítko pro reset DSC a přepínač pro volbu bootování mezi programováním flash paměti (z počítače PC přes sériový port) a normálním během programu.

Plošný spoj (PCB) byl navržen jako čtyřvrstvý. Na straně spojů (spodní strana PCB) je rozlita digitální a odděleně analogová zem (ta je pouze pod vstupními zesilovači a vstupy A/D převodníku). Obě země jsou spojeny v jediném místě a to pod DSC v těsné blízkosti vstupů A/D převodníků. Nejtenší spoje (jen od vývodů DSC) jsou široké 0,15 mm. Zbytek signálových spojů má šířku 0,3 mm a napájecí spoje jsou široké 1mm, často více. Lineární stabilizátory napájecích napětí jsou v SMT pouzdrech DPAK, určených k upevnění na PCB připájením chladičí plochy. Proto jsou pod stabilizátory rozlité na všech čtyřech vrstvách desky asi 2 x 2 cm velké měděné plochy k jejich chlazení. Chladičí plochy jsou propojeny sítí prokovů pro lepší vedení tepla mezi vrstvami a zároveň mírné zvětšení aktivní chladičí plochy. Pro spolehlivé chlazení je lépe na ně nenanášet nepájivou masku, která zhoršuje předávání tepla z chladiče do okolního vzduchu.

3 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ DESKY

Celý řídicí program je napsán v jazyce C ve vývojovém prostředí Code Composer Studio. Toto komerční vývojové prostředí je od společností Texas Instruments a je určeno k návrhu aplikací pro všechny řady digitálních signálových procesorů (DSP, řady TMS320C5xxx, 6xxx a další), signálových kontrolérů (DSC, řady TMS320F28xx, 28xxx, ...) i mikrokontrolérů (řady MSP470Fxxx, ...) vyráběných toutéž firmou.

3.1 Koncepce programu

Vzhledem ke každoročně vzrůstající výpočetní rychlosti mikroprocesorů, je dnes stále výraznější trend realizovat co nejvíce funkcí programově a naopak omezit obvodová řešení (hardware). Tím se stále zvyšuje složitost software, což často vede k použití nějakého operačního systému reálného času (RTOS) i v oblasti řídicí elektroniky. Toto řešení nabízí pro své mikroprocesory a DSP i firma Texas Instruments. Jeho nasazení je však vhodné spíše v případech, kdy požadujeme určitou variabilitu programu a program zpracovává více úloh najednou. V našem případě je řídicí program poměrně jednoduchý, avšak zcela závislý na přesném časování a spolehlivém chodu. Je také naprosto pevně svázán s navrženou deskou a použití RTOS by zřejmě nepřineslo žádné výhody oproti použitému řešení bez operačního systému.

Vzhledem k velikosti flash paměti procesoru (128kB), omezující maximální velikost programu, a potřebě generovat co nejrychlejší kód, se obvykle upouští od zvyklostí „čistého“ programování v prostředí stolních počítačů. Bývají tedy například často využívány globální proměnné. To urychlí výsledný kód a často i ušetří místo na zásobníku při volání podprogramu oproti předávání parametrů (ať hodnotou nebo odkazem), ale na druhou stranu zapříčiňuje zhoršení přenositelnosti a údržby aplikace. Tyto nevýhody jsou ale u *embedded* aplikací podružné, jelikož program je obvykle zcela vázán na konkrétní hardware. Další nespornou výhodou při použití globálních proměnných je zlepšení přehledu o náročnosti aplikace na paměť dat, jelikož je podstatně méně využíván zásobník.

Program je koncipován tak, že po jeho spuštění (připojení napájecích napětí DSC) se nejdříve provedou inicializace jednotlivých periférií DSC (a jim příslušných přerušení) v pořadí CLOCK¹, PWM, GPIO, ADC, SCI. Poté se inicializuje LCD displej. Po skončení inicializací se zavolá hlavní smyčka. V té se cyklicky počítají modulační konstanty pro šířkové modulátory, tedy požadované doby sepnutí jednotlivých koncových tranzistorů. Do výpočtu vstupují jednotlivé zadané proměnné,

¹V této fázi se nastavují parametry fázového závěsu (PLL) generátoru hodinového signálu CLK.

tedy požadovaný kmitočet, amplituda a offset výstupního napětí a čas. Výstupní napětí je počítáno jako

$$U_{OUT} = U_{OFS} + U_M(1 + \sin \frac{2\pi t}{T}) = U_{OFS} + U_M(1 + \sin(2\pi ft)) \quad (3.1)$$

kde t je čas od začátku periody, T je perioda výstupního napětí, f jeho kmitočet, U_{OFS} je offset výstupního napětí, tedy jeho stejnošměrná složka a U_M je jeho amplituda. V případě potřeby (při velkých změnách zatížení střídače), je možné využít měření výstupního napětí nebo proudu a zpětnovazebně regulovat jeho velikost. V praxi se však ukázalo, že výstupní napětí se mění se zatížením jen minimálně a pro dané použití střídače není tato regulace zapotřebí.

3.2 Algoritmy řízení spínacích prvků

S ohledem na aspekty uvedené v první kapitole (str. 11) použijeme asynchronní pulzně-šířkovou modulaci. Je třeba generovat čtyři signály, každý pro jeden spínací tranzistor v plně řízeném jednofázovém můstku (zjednodušené schéma viz obr. A.3). Vzhledem k nízkému výkonu střídače a poměrně vysoké rychlosti spínání použité silové části byl (s ohledem na, pokud možno, nízké spínací ztráty a tedy dobrou účinnost střídače) zvolen spínací kmitočet 40 kHz. To odpovídá periodě spínání 25 μs – tedy 2500 strojových cyklů po 10 ns. Rozsahu periody spínání 0–100% tím pádem odpovídá zadávaná hodnota 0–2499. Výpočet zadávané hodnoty — hlavní smyčka — podle rovnice 3.1 je v programu zapsán následovně:

```
void main_loop(void)
{
    for(;;)
        PWM_Input = (Uint16) _IQ19int(_IQ19(ampl+offset) + \
            + _IQ19mpy(_IQ19(ampl),_IQ19sinPU( \
                _IQ19div(_IQ12(phi),_IQ12(period))))));
}
```

Ve výpočtu je použito matematických operací z knihovny IQ-math, která je součástí vývojového prostředí Code Composer Studio. Tato knihovna provádí matematické operace s čísly, u kterých je dán počet bitů před a za desetinou čárkou, převádí mezi těmito tvary a jinými formáty (s plovoucí desetinnou čárkou (*floating-point*) a celočíselné (*fixed-point*)). Knihovna poskytuje poměrně bohatý výběr matematických operací. Kromě základních jsou to například sinus, kosinus, tangens a k nim inverzní funkce, odmocnina a další.

Ve výpočtu hodnoty PWM_Input byla knihovna IQ-math použita pro zjednodušení zápisu výpočtu a práce s desetinnými čísly. Při požadavku na maximální rychlost

a efektivitu výpočtu je možné celý výpočet provádět se 32bitovými *fixed-point* čísly bez použití knihovny IQ-math a výpočet tak podstatně urychlit. Funkce sinus by pak byla počítána pomocí tabulky uložené v ROM paměti procesoru již od výrobce (podobně, jako to dělá funkce `_IQ19sinPU`).

3.3 Uživatelské rozhraní

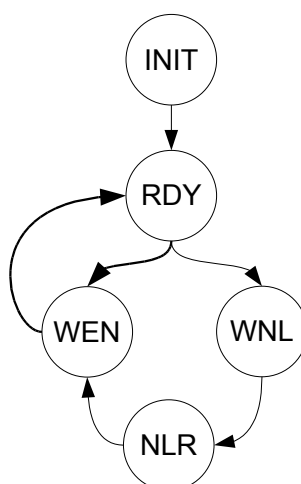
3.3.1 Ovládání displeje

Použitý LCD displej s integrovaným řadičem je řízen dvěma řídicími signály (RS, EN) a osmi datovými vstupy (D0 – D7). Displej má čtyři řádky po šestnácti znacích. Jednotlivé znaky mohou být na displej posílány po minimálně $40\mu\text{s}$. U řídicího programu by ale byla jakákoli prodleva nepřijatelná, proto se s displejem pracuje vždy v okamžiku přerušení PWM1, které nastává každých $50\mu\text{s}$ a je od něj odvozeno časování programu. Protože data zaslaná na displej (znak) musí být po určitou dobu na pinech displeje spolu s pinem EN v logické „1“, ale zápis proběhne až po změně úrovně pinu EN, je zápis jednoho znaku rozdělen do dvou fází, kdy v první fázi je na datových pinech displeje kód požadovaného znaku a pin EN je v log. „1“. V dalším cyklu přejde úroveň pinu EN zpět do „0“. Toto se cyklicky opakuje pro každý znak i instrukci (přechod na další řádek, uložení uživatelsky definovaných znaků atd. — více viz následující popis funkce s diagramem přechodů a [6]). Doba přepisu celého displeje je tedy rovna minimálně

$$T_{LCD} = (X \cdot Y + Y) \cdot T_{CH} = (16 \cdot 4 + 4) \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 6,8\text{ms}. \quad (3.2)$$

T_{CH} je doba trvání zápisu jednoho znaku na displej (dvě volání procedury `void lcd_write(void);` po $50\mu\text{s}$), X je počet znaků displeje na řádek a Y počet řádků. Rychlost přepisování displeje je tedy naprosto dostatečná a v případě, že by bylo zapotřebí šetřit výpočetní výkon DSC, lze rychlost výpisu minimálně o řád snížit bez jakéhokoli viditelného zpomalení výpisu. Znaky vypisované na displej jsou uloženy v poli `char[] buf;` o rozmeru odpovídajícím displeji (16 x 4). Pole je součástí struktury `lcd`, ve které je i proměnná `enum {RDY, WEN, WNL, NLR}state;` určující stav výpisu na displej (čekání na nový řádek, zápis znaku, čekání na zapsání znaku, ...) a ukazatel na zapisovaný znak (`char* ptr;`). Program obsluhující displej funguje tedy na principu stavového automatu, jehož diagram přechodů je na obr. 3.1. Význam jednotlivých stavů a podmínky přechodu:

- INIT (*INITialize*) — inicializace displeje (`void lcd_init(void);`) je volána jednou na začátku programu, poté se přechází do stavu RDY



Obrázek 3.1: Diagram přechodů stavového automatu LCD displeje

- **RDY** (*ReaDY*) — displej je připraven k zápisu znaků. Podle hodnoty ukazatele na znak k zápisu `lcd.ptr` se rozhodne, zda je potřeba přejít na nový řádek (pak se pošle na displej instrukce k přechodu na další řádek a pokračuje se na stav **WNL**), nebo není a tedy se zapíše daný znak, inkrementuje se ukazatel `lcd.ptr` a pokračuje se na stav **WEN**
- **WEN** (*Wait for ENable*) — čekání na přijetí dat displejem. Z tohoto stavu se pokračuje po změně úrovně na pinu **EN** opět do stavu **RDY**
- **WNL** (*Wait for New Line*) — čekání na přijetí instrukce posunu kurzoru displejem. Protože ukazatel `lcd.ptr` zůstává nezměněn, ale jeho hodnota rozhoduje o přechodu ze stavu **RDY**, je třeba následující znak zapsat bez tohoto rozhodování (přechod na nový řádek nemůže nyní nastat). Přejde se proto do stavu **NLR**
- **NLR** (*New Line Ready*) — displej je připraven k zápisu znaků. Zapiše se znak, na který ukazuje `lcd.ptr` a zároveň se inkrementuje. Pokračuje se na stav **WEN**

Z toho vyplývá, že stavový automat přechází cyklicky ve smyčce **RDY**->**WEN**->**RDY** (nakreslena tučně), pouze při potřebě přechodu na další řádek jednou vykoná smyčku **RDY**->**WNL**->**NLR**->**WEN**->**RDY**. Během vykonání jedné smyčky (kterékoli) dojde k výpisu jednoho znaku na displej.

Pro vypísání textu na displej tedy stačí pouze zkopírovat text do `lcd.buf` na místo, které odpovídá pořadí znaku na displeji (počítáno od levého horního rohu displeje zleva doprava, odshora dolů).

3.3.2 Sériová komunikace

Sériová komunikace s osobním počítačem po lince RS-232 je řešena zatím jako pouze jednosměrná pro ladění programu při vývoji. Režije procesoru při komunikaci je naprosto minimální, protože sériové rozhraní má integrován „hardwareový“ buffer pro příjem i odesílání dat na čipu a k odeslání/příjmu 16bajtových bloků dat. Komunikace probíhá rychlostí 9600 Baud, s jedním startbitem i stopbitem, bez paritního bitu, po třech vodičích (TxD, RxD a zem GND).

Ladění programu prostřednictvím sériového je poměrně snadné a nevyžaduje žádný speciální hardware pro PC (jako např. při použití rozhraní JTAG). Jeho značnou nevýhodou je však pasivita řešení — programátor nemůže (nebo jen velmi omezeně a těžkopádně) měnit hodnoty proměnných či jinak zasahovat do běhu programu (krokování a pod.). Může pouze sledovat hodnoty různých proměnných, i to však po nutných úpravách programu.

Zpracování dat přijmaných od nadřazeného systému (obvykle počítač PC) bude realizováno, jako ovládání LCD displeje, stavovým automatem.

Konečná verze komunikace by měla podávat kompletní informace o chodu střídače, včetně chybových hlášení a podobně, stejně jako umožnit nastavení všech parametrů. To přinese výhodu snadného a rychlého nastavení střídače při servisních pracech a možnost zálohování kompletního nastavení.

3.3.3 Tlačítka

Obvod je na desce řešen tak, že k DSC je připojen i signál KB_INT, který aktivuje při stisku libovolného tlačítka přerušování programu. V obsluze přerušování se nejprve zjistí, které tlačítko bylo stisknuto a provede se příslušná akce. Zatím se jedná o pouhou změnu kmitočtu a amplitudy generovaného napětí pomocí čtyř směrových tlačítek. Později bude implementováno menu, ve kterém budou jednotlivé položky pro nastavování a výpis parametrů. Menu bude, podobně jako ovládání LCD displeje, založeno na stavovém automatu, kde přechody mezi jednotlivými stavy budou řešeny tlačítky.

4 VÝSLEDKY, MOŽNOSTI ÚPRAV A VYLEPŠENÍ

4.1 Výsledky návrhu desky

Navržená deska je plně funkční tak, jak bylo požadováno. Zatím nebylo vyzkoušeno komunikační rozhraní pro sběrnici CAN, ale vzhledem k jeho jednoduchosti (pouze budič v pouzdře SO-8, dva kondenzátory a konektor) lze předpokládat bezproblémovou funkci. Měření analogových veličin je dostatečně přesné a není téměř ovlivněné rušivými signály. Chladicí plochy stabilizátorů napájecích napětí se v trovozu při teplotě okolí 20°C ohřejí na teplotu cca. 35°C.

4.2 Možné budoucí úpravy desky

Deska má rozměry 12 x 14 cm, je na ní tedy dostatek místa pro případné rozšiřování. V nejbližší době to bude zřejmě rozšíření PWM výstupů pro řízení třífázového střídače k napájení a řízení pohonů s asynchronními motory. K tomuto účelu bude též zvýšen počet analogových vstupů. Dále bude deska doplněna o sériovou EEPROM ke zjednodušení ukládání uživatelem nastavených parametrů, která bude sdílet komunikační rozhraní (SPI nebo I²C) s obvodem hodin reálného času RTC. Ten je nezbytný, pokud chceme, aby měl procesor pojem o skutečném čase (i datu) a ne pouze o čase od připojení napájecího napětí, jak je tomu nyní. K tomuto obvodu bude tím pádem připojena ještě záložní baterie nebo malý akumulátor pro napájení oscilátoru a čítače RTC i v době, kdy střídač nebude napájen. Další možnou úpravou je využití druhého kanálu asynchronního sériového rozhraní pro komunikaci po sběrnici RS-485. Bude zapotřebí pouze přidat obvod interface sběrnice a druhý konektor D-SUB9. Střídač pak bude moci komunikovat např. po rozhraní standardu Profibus DP.

4.3 Výsledky návrhu programu

Navržený program je plně funkční, stále však nevyužívá veškeré možnosti desky ani DSC. Výpočetní výkon DSC vysoce převyšuje nároky programu, přestože ten zatím není zcela doladěn a jeho optimalizací by bylo zřejmě bez větších problémů možné snížit jak paměťové, tak časové nároky programu alespoň o třetinu (podle údajů v [5]).

4.4 Další vývoj programu

Protože zatím není kompletně vytvořeno uživatelské rozhraní střídače (zatím jsou pouze vypisovány nastavené hodnoty na displeji a je možné základní nastavení pomocí tlačítek), má jeho implementace nejvyšší prioritu. Dále bude zřejmě naprogramována komunikace s nadřazeným systémem (nastavení parametrů, sběr dat, chybová hlášení a pod.) po sběrnici CAN.

Po úpravě řídicího programu a zapojení silové části by bylo možné využít stávající řídicí desku i pro jiná zařízení, jako třeba pulzní usměrňovače (též zvané „kompatibilní“ pro svou schopnost zatěžovat napájecí síť proudem harmonického průběhu a nastavení účinníku), regulátory stejnosměrných pohonů, DC/DC měniče a podobně.

5 ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout a zprovoznit řídicí desku pro jednofázový střídač. Tento cíl byl splněn, bylo navrženo schéma řídicích obvodů, obrazec čtyřvrstvého plošného spoje desky, deska byla realizována, osazena a oživena. Po počátečních problémech s programováním osazeného DSC, byl odladěn i program ovládající připojenou silovou část pro dosažení požadovaných parametrů.

Navržená řídicí deska spolehlivě funguje, zatím v počtu několika kusů, ve střídačích pro drážní vozidla. Tyto střídače mají buď pevně nastavené parametry a displej ani tlačítka v nich nejsou osazeny nebo jsou osazeny jak displejem, tak tlačítky a je možné nastavit amplitudu a kmitočet výstupního napětí.

REFERENCE

- [1] JAVŮREK, J. *Regulace moderních elektrických pohonů*. 1. vyd. Praha: GRADA, 2003. 264 s., ISBN 80-247-0507-9
- [2] VRBA, J. *Výkonová elektronika 1*. Brno: VUT Brno. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2008. Elektronická skripta
- [3] *TMS320F280x Data Manual* [online]. Texas Instruments Inc., 2007. Poslední aktualizace 21. 10. 2007 [cit. 18. 12. 2008]. Dostupné z URL: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f2808.pdf>>. ID: SPRS230J
- [4] *TMS320x280x, 2801x, 2804x Enhanced Pulse Width Modulator (ePWM) Module Reference Guide* [online]. Texas Instruments Inc., 2008. Poslední aktualizace 29. 10. 2008 [cit. 18. 12. 2008]. Dostupné z URL: <<http://focus.ti.com/lit/ug/spru791e/spru791e.pdf>>. ID: SPRU791E
- [5] *Optimizing Digital Motor Control (DMC) Libraries* [online]. Texas Instruments Inc., 2007. Poslední aktualizace 15. 3. 2007 [cit. 18. 12. 2008]. Dostupné z URL: <<http://focus.ti.com/lit/an/spraak2/spraak2.pdf>>. ID: SPRAAK2
- [6] OUWEHAND, P. *How to control a HD44780-based Character-LCD* [online]. 2006. Poslední aktualizace 15. 6. 2006 [cit. 18. 12. 2008]. Dostupné z URL: <<http://home.iae.nl/users/pouweha/lcd/lcd0.shtml>>
- [7] *Výkonové spínací prvky: Učební texty* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská — Technická univerzita Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky. Katedra elektroniky, 2003. Elektronická skripta. Poslední aktualizace 2003 [cit. 10. 5. 2009]. Dostupné z URL: <<http://fei1.vsb.cz/kat448/data/vsp/vsp-predn.pdf>>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

A/D	analogově/číslicový – <i>Analog/Digital</i>
CAN	sběrnice CAN – <i>Controller Area Network</i> – je sériová komunikační sběrnice používaná především v automobilovém průmyslu, ale i v jiných odvětvích.
DSC	digitální signálový kontrolér – <i>Digital Signal Controller</i> – je moderní řídicí obvod vycházející aritmeticko-logickou jednotkou z DSP, ale integrující v na jednom čipu i flash paměť programu a řadu periférií určených speciálně pro řídicí aplikace (např. A/D převodníky, PWM výstupy, komunikační rozhraní a pod.). Viz str. 20 a [3]
DSP	digitální signálový procesor – <i>Digital Signal Processor</i>
EEPROM	elektricky mazatelná a programovatelná paměť – <i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
GTO	vypínatelný tyristor – <i>Gate Turn Off thyristor</i>
HVDC	stejnoseměrné vysoké napětí – <i>High Voltage Direct Current</i> – je využíváno v energetice tam, kde nevyhovuje střídavé vysoké napětí. Příkladem je propojení rozvodných sítí, které nepracují synchronně, tedy se stejným kmitočtem i fází
IGBT	bipolární tranzistor s izolovanou bází – <i>Insulated gate bipolar transistor</i>
IGCT	vypínatelný tyristor – <i>Integrated Gate Commutated Thyristor</i>
MOS-FET	unipolární výkonový tranzistor – <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
OZ	operační zesilovač – <i>OPA, op-amp, operational amplifier</i>
PCB	plošný spoj – <i>Printed Circuit Board</i>
PLL	fázový závěs – <i>Phase-Locked Loop</i>
RS-232	sériové asynchronní komunikační rozhraní
RTC	hodiny reálného času – <i>Real-Time Clock</i> – obvod zajišťující čítání času i bez hlavního napájecího napětí, často integrován v mikrokontrolérech (např. Atmel AVR)
RTOS	operační systém reálného času – <i>Real-Time Operating System</i>

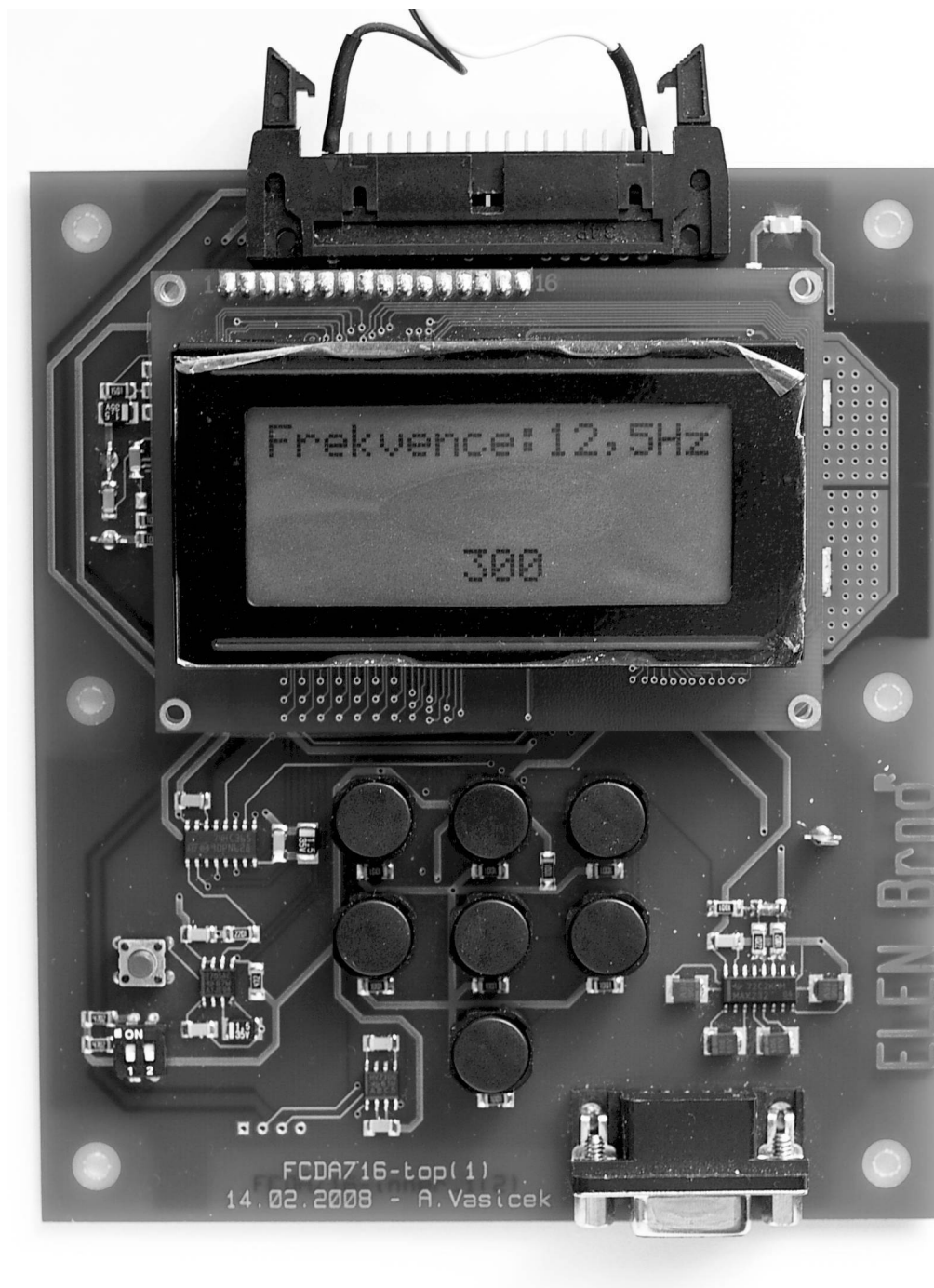
SCR	tyristor – <i>Silicon-Controlled Rectifier</i>
SMD	součástky pro povrchovou montáž – <i>Surface-Mount Devices</i>
SMT	technologie povrchové montáže – <i>Surface-Mount Technology</i>
TQFP	100vývodové čtvercové pouzdro pro SMT integrované obvody – <i>Thin Quad Flat Pack</i>

SEZNAM PŘÍLOH

A Fotodokumentace desky	35
A.1 Strana součástí (vrchní), s displejem	35
A.2 Strana součástí (vrchní), bez displeje	36
A.3 Strana spojů (spodní)	37

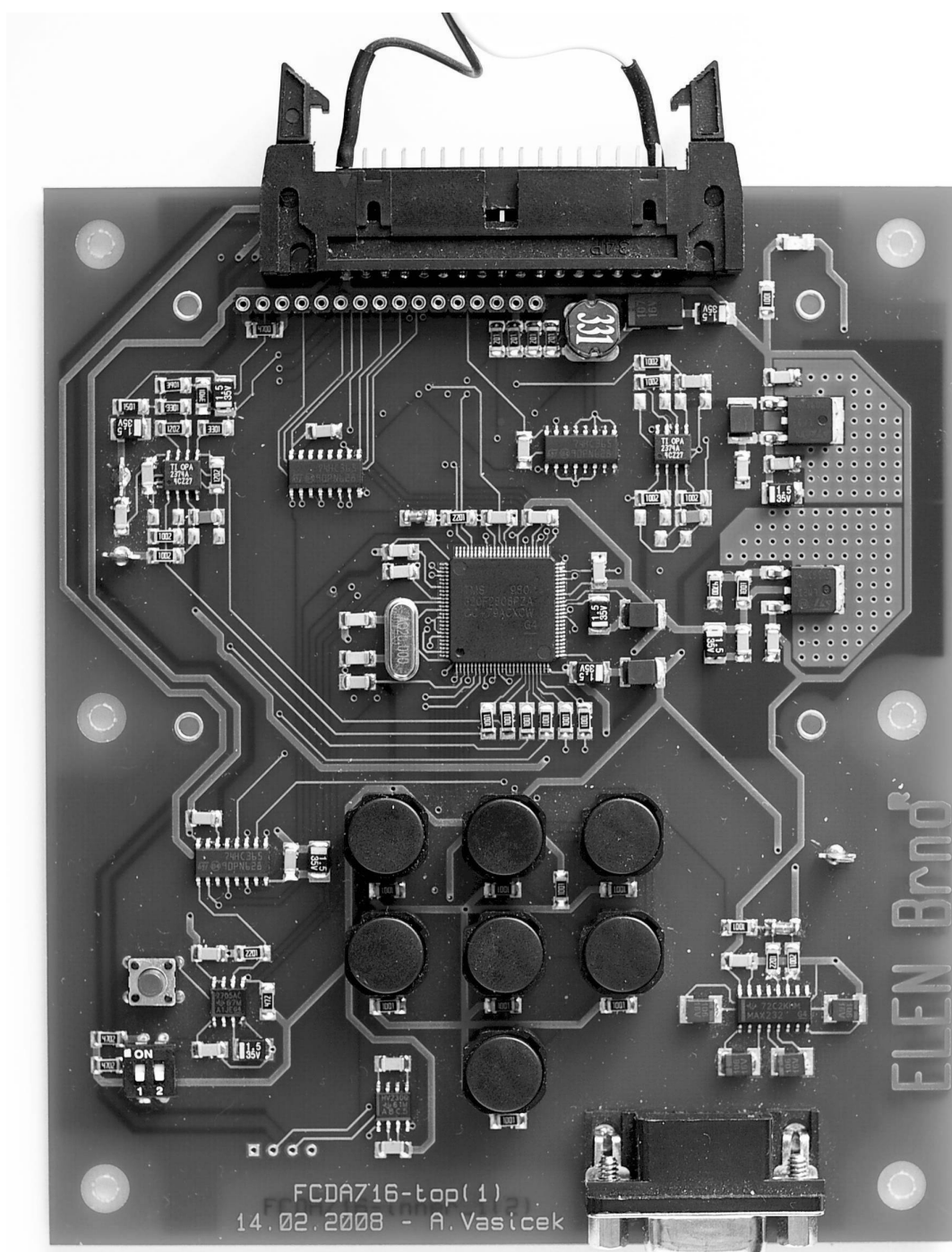
A FOTODOKUMENTACE DESKY

A.1 Strana součástek (vrchní), s displejem



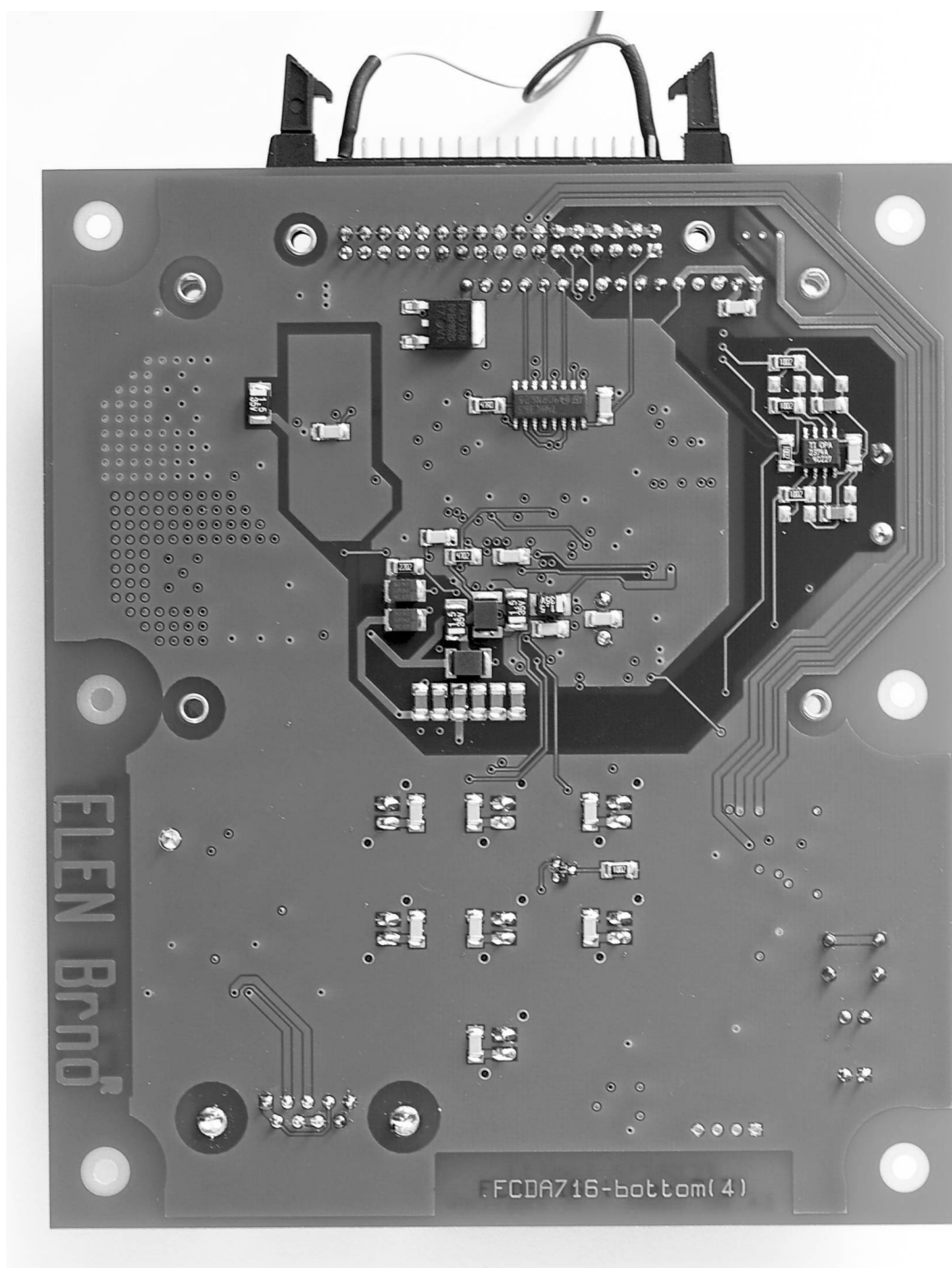
Obrázek A.1: Fotografie osazené desky — strana součástek, s displejem. Na displeji je vypsán pouze kmitočet výstupního napětí a hodnota vnitřní proměnné programu.

A.2 Strana součástek (vrchní), bez displeje



Obrázek A.2: Fotografie osazené desky — strana součástek, bez displeje.

A.3 Strana spojů (spodní)



Obrázek A.3: Fotografie osazené desky — strana spojů.