



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MODUL ŘÍZENÍ KROKOVÉHO MOTORU PRO POZIČNÍ SYSTÉM PŘES ETHERNET

CONTROL MODULE OF STEPPER MOTOR FOR POSITIONAL SYSTEM WITH ETHERNET

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dan Raszka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Dan Raszka

ID: 159625

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Modul řízení krokového motoru pro poziční systém přes Ethernet

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte typy krokových motorů a principy jejich řízení. Vyberte vhodný řídicí a komunikační obvod s ohledem na řízení přes rozhraní Ethernet a možnost využití více modulů v síti. Navrhněte kompletní elektrické zapojení pro aplikaci ve víceosém pozičním systému. V návrhu dbejte na modulárnost a možnost použití s různými druhy krokových motorů. Uvažujte minimální napájecí napětí 12 V, proud cívkou motoru alespoň 3 A.

Navrhněte kompletní konstrukční podklady – desky plošných spojů a mechanické provedení. Při návrhu dbejte na dostatečné chlazení a životnost. Realizováním prototypu ověřte funkčnost dílčích bloků – jak modul samotného řízení krokového motoru, tak i komunikační modul pro Ethernet. Ve zvoleném vývojovém prostředí napište kód pro ověření funkčnosti implementovaných konfiguračních prvků, nastavení pozice a schopnost komunikovat po síti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ACARNLEY P.P. Stepping Motors: A Guide to Theory and Practice. London: IET, 2007. 172 s.

[2] KABELOVÁ, A., DOSTÁLEK, L. Velký průvodce protokoly TCP/IP a systémem DNS. Brno: Computer Press, 2012. 488 s.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 17.5.2018

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka

Konzultant: Ing. Patrik Predný

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

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

Tato práce se zabývá návrhem modulu řízení krokového motoru pro poziční systém přes Ethernet. Součástí této práce je rozbor zadání, návrh blokového zapojení, výběr použitých součástek a návrh prototypu komunikačního a výkonového modulu. Dále jsou popsány jednotlivé bloky navrhnutého obvodového zapojení s důrazem na modularitu. Zaobírá se taktéž popisem zhotovených prototypů a testovanými parametry.

Klíčová slova

Krokový motor, průmyslový Ethernet, EtherCAT, H můstek, STM32

Abstract

This paper describes the design of Stepper motor controller module controlled over Ethernet for positioning system. Part of this work describes analysis of the assignment, design of modular circuit, choosing right components and prototype design of communication and power module. In another part each module is described with emphasis to modularity. It deals with description of manufactured prototypes and their tested parameters.

Keywords

Stepper motor, Industrial Ethernet, EtherCAT, H bridge, STM32

Bibliografická citace:

RASZKA, D. Modul řízení krokového motoru pro poziční systém přes Ethernet. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 63 s, 16 s. příloh. Vedoucí diplomové práce prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Modul řízení krokového motoru pro poziční systém přes Ethernet jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **17. května 2018**

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji kolektivu firmy ELEDUS s.r.o. za vstřícnost, podporu a rady při řešení této diplomové práce. Dále děkuji prof. Dr. Ing. Zdeňku Kolkovi za nasměrování a rady.

V Brně dne: **17. května 2018**

.....

podpis autora

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

Obsah

1.	Úvod.....	9
2.	Teoretický rozbor.....	10
2.1	Princip činnosti krokových motorů.....	10
2.2	Typy krokových motorů a jejich řízení.....	11
2.2.1	Motor s proměnnou reluktancí.....	11
2.2.2	Motor s permanentním magnetem.....	13
2.2.3	Hybridní motory.....	14
2.2.4	Unipolární a bipolární řízení krokových motorů.....	16
2.2.5	Výkonové řídicí obvody pro hybridní krokové motory.....	19
2.2.6	Mikrokrokování.....	20
2.3	Ethernet a jeho využití v průmyslu.....	21
2.3.1	Ethernet.....	21
2.3.2	Průmyslový Ethernet.....	22
2.3.3	EtherNet/IP.....	23
2.3.4	PROFINet.....	23
2.3.5	Ethernet Powerlink.....	24
2.3.6	EtherCAT.....	25
3.	Výběr komponent.....	27
3.1	Komunikace přes EtherCAT.....	28
3.2	Řízení krokového motoru.....	30
3.3	Výběr řídicího mikroprocesoru.....	34
3.4	Napájecí obvody.....	35
4.	Návrh zapojení.....	37
4.1	Zapojení komunikačního obvodu LAN9252.....	38
4.2	Zapojení výkonového modulu s obvodem L6482.....	40
4.3	Zapojení řídicího mikroprocesoru.....	43
4.4	Zapojení snižujícího měniče s obvodem TPS54360.....	45
5.	Popis programu MIKROprocesoru.....	47
5.1	Konfigurace použitých periférií mikroprocesoru.....	47
5.1.1	SPI sběrnice.....	47
5.1.2	Vstupní a výstupní piny.....	49

5.1.3	Sériová linka USART1	50
5.2	Obsluha LAN9252	51
5.2.1	Zápis a čtení dat z uživatelské paměti	51
5.2.2	Konfigurace Slave zařízení	52
5.3	Obsluha L6482	54
5.3.1	Registry obvodu L6482	54
5.3.2	Příkazy ovládání motoru	56
5.4	Ukázkový program	58
6.	Měření	60
6.1	Testování měniče TPS54360	60
6.2	Testování řadiče L6482	62
6.2.1	Nábojová pumpa	62
6.3	Proudové zdroje pro spínání výkonového stupně	63
6.3.1	Ztrátový výkon řadiče L6482	65
6.3.2	Vliv mikrokrokování na běh motoru	67
6.4	Analýza vyslaného EtherCAT rámce	68
7.	Závěr	70

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

AD převodník	Převodník analogového signálu na digitální
Airgap	Vzduchová mezera
ASIC	Application Specific Integrated Circuit – Zákaznický integrovaný obvod
Back-iron	Část magnetického obvodu sloužící zároveň jako kryt motoru
CIP	Common Industrial Protocol – Průmyslový protokol s využitím v automatizaci
CRC	Cyclic Redundancy Check – Cyklický redundantní součet – funkce používaná k detekci chyb během přenosu
DA převodník	Převodník digitálního signálu na analogový
DPRAM	Dual Port Random Access Memory – Přepisovatelná paměť s možností současného zápisu a čtení pomocí dvou portů
DPS	Deska plošného spoje
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory – Elektricky mazatelná nevolatilní paměť
FIFO	First Input First Output – Typ paměti
Forces	Síly
FPGA	Field Programmable Gate Array – Programovatelné hradlové pole
HAL	Hardware Abstraction Layer – knihovna zaručující abstrakci při programování mikroprocesorů firmy STmicroelectronics
HBI	Host Bus Interface – Sběrnice pro komunikaci s nadřazeným obvodem
IEC	International Electrotechnical Commission – Mezinárodní elektrotechnická komise
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers – instituce zaštiťující technologie související s elektrotechnikou
LED	Light-Emitting Diode – svítivá dioda
LSB	Least Significant Bit – bit s nejnižší vahou
MAC	Media Access Control – unikátní identifikátor síťového zařízení
Magnetically permeable material	Materiál s nízkou permeabilitou
MII	Media-independent interface – Standardní rozhraní pro přenos dat
MLT3	Multi Level Transmit 3 – Typ třístavového linkového kódu
MSB	Most Significant Bit – bit s nejvyšší vahou
OSI	Open Systems Interconnection – iniciativa ISO a ITU-T pro standardizaci počítačových komunikačních protokolů
PLC;	Programmable Logic Controller – Průmyslové řídicí zařízení
PLL	Phase Locked Loop – obvod fázového závěsu
ppm	Parts Per Million – vyjádření milióntiny
PWM	Pulzně-šířková modulace

R_{DSon}	Odpor unipolárního tranzistoru v sepnutém stavu mezi elektrodami drain a source
Reluktance	Magnetický odpor
RMII	Reduced MII – Redukované standardní rozhraní pro přenos dat
RS-232	Sériová linka
SPI, I2C, UART	Druhy sériových komunikačních sběrnic
Stator tooth	Pólové nástavce statoru
TCP	Transmission Control Protocol – síťový transportní protokol se zárukou přenesení dat
TQFP, LQFP	Typy pouzder integrovaných obvodů
UDP	User Datagram Protocol – síťový protokol bez záruky doručení
UTP	Unshielded Twisted Pair – typ kabelu tvořeného kroucenými páry vodičů
Winding	Vinutí motoru

Symboly:

Q	...	elektrický náboj	[C]
I	...	proud	[A]
t	...	čas	[s]
P	...	výkon	[W]

Seznam obrázků

Obrázek 2-1: Působení magnetického toku vyvolávající sílu v mezeře mezi státorem a rotorem – převzato z [1].....	10
Obrázek 2-2 Fotografie statoru (vlevo) a rotoru krokového motoru Microcon SX17-0905	11
Obrázek 2-3 Řez motorem s proměnnou reluktancí a jednou sekcí – převzato z [1]12	
Obrázek 2-4 Řez motorem s proměnnou reluktancí a třemi sekcemi – převzato z [1]	13
Obrázek 2-5 Řez motorem s rotorem tvořeným permanentním magnetem – převzato z [2].....	13
Obrázek 2-6 Detail statoru a označení jednotlivých smyslů vinutí a zapojení	14
Obrázek 2-7 Detail polohy rotoru vůči statoru	15
Obrázek 2-8 Použitelné zapojení krokových motorů pro unipolární řízení.....	16
Obrázek 2-9 Použitelné zapojení krokových motorů pro bipolární řízení.....	17
Obrázek 2-10 Srovnání průběhu proudů pro dva motory s rozdílnou časovou konstantou.....	17
Obrázek 2-11 Příklad momentové charakteristiky krokového motoru.....	18
Obrázek 2-12 Příklad momentové charakteristiky krokového motoru.....	18
Obrázek 2-13 Principiální zapojení H můstku s MOSFET tranzistory	19
Obrázek 2-14 Rozdíl mezi krokovým a mikrokrokovým řízením – převzato z [3] .	20
Obrázek 2-15 Kódování MLT-3	21
Obrázek 2-16 Struktura Ethernetového rámce.....	22
Obrázek 2-17 Včasnost a současnost.....	23
Obrázek 2-18 Struktura rámce EtherCATu – převzato z [7].....	25
Obrázek 2-19 Struktura podřízeného zařízení podle standardu EtherCAT – převzato z [7].....	26
Obrázek 3-1 Možnosti zapojení řízení krokového motoru	27
Obrázek 3-2 Možnosti zapojení řízení krokového motoru	32
Obrázek 3-3 Mikroprocesory navržené programem STM32CUBEMX	35
Obrázek 4-1 Blokové schéma zařízení doplněné o vybrané obvody a propojení s komunikačním modulem pro EtherCAT	37
Obrázek 4-2 Blokové schéma zapojení obvodu LAN9252	38

Obrázek 4-3 Principiální zapojení Ethernetových portů s MagJack konektorem	39
Obrázek 4-4 Zapojení obvodu nábojové pumpy	40
Obrázek 4-5 Zapojení H můstku s výkonovými tranzistory a ochranami	42
Obrázek 4-6 Využití pinů mikroprocesoru STM32F107RC na komunikačním modulu s EtherCAT rozhraním.....	43
Obrázek 4-7 Využití pinů mikroprocesoru STM32F107RC na komunikačním modulu s Ethernet rozhraním	44
Obrázek 4-8 Zapojení snižujícího měniče z programu WEBENCH	45
Obrázek 4-9 Zapojení snižujícího měniče s reálnými součástkami	46
Obrázek 5-1 Nastavení periferie SPI1 v programu STM32CUBEMX	47
Obrázek 5-2 Nastavení vstupních a výstupních pinů v programu STM32CUBEMX	49
Obrázek 5-3 Nastavení vstupních a výstupních pinů v programu STM32CUBEMX	50
Obrázek 5-4 Nalezené zařízení s testovací konfigurací	52
Obrázek 5-5 Záložka Process Data	53
Obrázek 5-6 Nastavení synchronizace testovací konfigurace	53
Obrázek 5-7 Mapa registrů obvodu L6482 – převzato z [3].....	55
Obrázek 5-8 Význam bitů v registru STATUS obvodu L6482 – převzato z [3].....	56
Obrázek 5-9 Příklad struktury příkazů obvodu L6482	57
Obrázek 5-10 Vývojový diagram programu mikroprocesoru.....	59
Obrázek 6-1 Závislost vstupního proudu a účinnosti na požadovaném výstupním proudu měniče TPS54360.....	61
Obrázek 6-2 Závislost úrovně výstupního rušivého napětí na požadovaném výstupním proudu měniče TPS54360.....	61
Obrázek 6-3 Průběhy napětí na bloku nábojové pumpy bez zatížení	62
Obrázek 6-4 Nastavení deadtime pro 500 ns	63
Obrázek 6-5 Nastavení deadtime pro 1000 ns	63
Obrázek 6-6 Průběh napětí na elektrodě gate tranzistoru při nastaveném proudu 64 mA	64
Obrázek 6-7 Průběh napětí na elektrodě gate tranzistoru při nastaveném proudu 96 mA	64

Obrázek 6-8 Závislosti teploty řadiče na spínací frekvenci a napájecím napětí.....	66
Obrázek 6-9 Napětí na cívkách motoru při běhu s mikrokrokováním.....	67
Obrázek 6-10 Napětí na cívkách motoru při běhu s celými kroky	67
Obrázek 6-11 Zachycený rámeček EtherCAT protokolu	68
Obrázek 6-12 Detail čtecího příkazu EtherCAT protokolu	69
Obrázek 6-13 Detail zapisovacího příkazu EtherCAT protokolu.....	69
Obrázek 7-1 Profil zařízení zabudovaného do krabičky na DIN lištu	70
Obrázek 7-2 Fotografie zařízení bez krabičky	71

Seznam tabulek

Tabulka 3-1 Srovnání možností implementace podřízeného zařízení standardu EtherCAT.....	28
Tabulka 3-2 Srovnání vybraných obvodů pro komunikaci pomocí EtherCATu.....	29
Tabulka 3-3 Parametry použitých krokových motorů	31
Tabulka 3-4 Srovnání vybraných obvodů pro řízení výkonového stupně	33
Tabulka 3-5 Předpokládané maximální proudové odběry součástek	35
Tabulka 4-1 Základní parametry tranzistoru IPD048N06L3	41
Tabulka 6-1 Závislost účinnosti, úrovně rušení a teploty pouzdra měniče TPS54360	60
Tabulka 6-2 Závislost teploty a odebíraného proudu na spínací frekvenci	65
Tabulka 6-3 Závislost teploty vybraných součástek na budícím proudu výkonových tranzistorů	66

1. ÚVOD

Tato práce se zabývá návrhem modulu pro řízení krokového motoru s ovládním přes rozhraní Ethernet. Zadání bylo vytvořeno na základě požadavku firmy Eledus s.r.o. na vývoj modulu pro řízení krokových motorů, využívaných ve víceosých pozičních systémech. Rozhraní Ethernet bylo vybráno pro jednodušší připojení modulu k ovládacímu počítači bez nutnosti dalšího specializovaného zařízení.

Cílem této práce je tedy navrhnout zapojení obsluhující jak samostatnou výkonovou část (samotné řízení použitého typu krokového motoru) tak i možnost zapojení více výkonových modulů k jednomu komunikačnímu modulu, který bude zajišťovat spojení přes Ethernet s nadřazeným systémem. Celý koncept je řešen jako modulární z důvodu použití ve více nezávislých projektech zadávající firmy a také z důvodu využití jiných komunikačních sběrnic (Ethernet, RS232 atp.). Stávající řešení spočívající v řídicím modulu s pozicemi pro osazení výkonových modulů se ukázalo jako příliš drahé a nedostatečné. Použité výkonové moduly navíc nedostávaly deklarovaným parametrům, a tak často docházelo k jejich přetížení a zničení. Přestože je v zadání specifikováno napájecí napětí od 12 V a proud cívkou motoru alespoň 3 A, bylo zařízení navrhováno na větší výkony a širší rozsah napájecího napětí pro zaručení možnosti použití v širokém spektru aplikací.

V této práci je zahrnuto základní přiblížení k problematice krokových motorů a jejich typů konstrukce, zapojení a způsobu řízení. Zmíněny je také výkonové řídicí obvody podle typu zapojení. V dalších kapitolách je uveden výčet nejpoužívanějších průmyslových řídicích síťových protokolů a jeho základní popis, s důrazem na výběr nejvhodnějšího řešení pro použití v této práci. Dále jsou diskutovány možnosti návrhu blokového zapojení spojené s výběrem a srovnáním použitelných obvodů pro výkonovou a komunikační část. Následuje rozbor obvodového zapojení s podrobným popisem funkce jednotlivých funkčních bloků.

Další kapitoly jsou věnovány konfiguraci využitých periférií řídicího mikroprocesoru a popisu nastavení, které bylo aplikováno na komunikační obvod. Funkčnost jednotlivých bloků je demonstrována testovacím programem pro řídicí mikroprocesor s ovládním přes zvolený komunikační protokol pomocí počítače. Zprovozněné zařízení je podrobeno měřením, které jsou představeny v další kapitole s úvahami na možné úpravy nebo vylepšení. Celá práce je uzavřena zhodnocením výsledků s příloženými konstrukčními podklady.

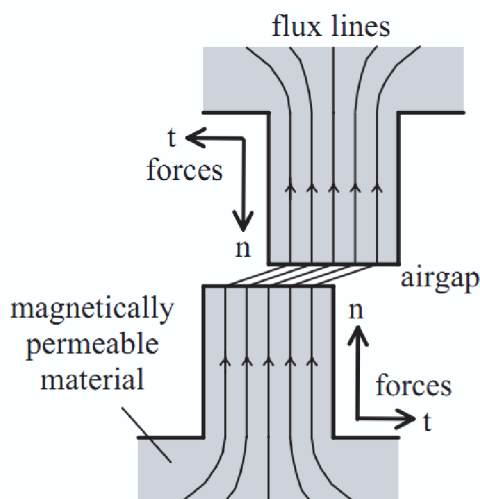
2. TEORETICKÝ ROZBOR

Následující kapitola se věnuje základnímu popisu principu krokových motorů, možnostem zapojení výkonových stupňů a jejich řízení. Dále je popsána komunikace přes rozhraní Ethernet se zaměřením na průmyslové aplikace. Jsou zde představeny nejběžněji používané protokoly s jejich srovnáním a výběrem vhodného protokolu pro využití v této práci [1].

2.1 Princip činnosti krokových motorů

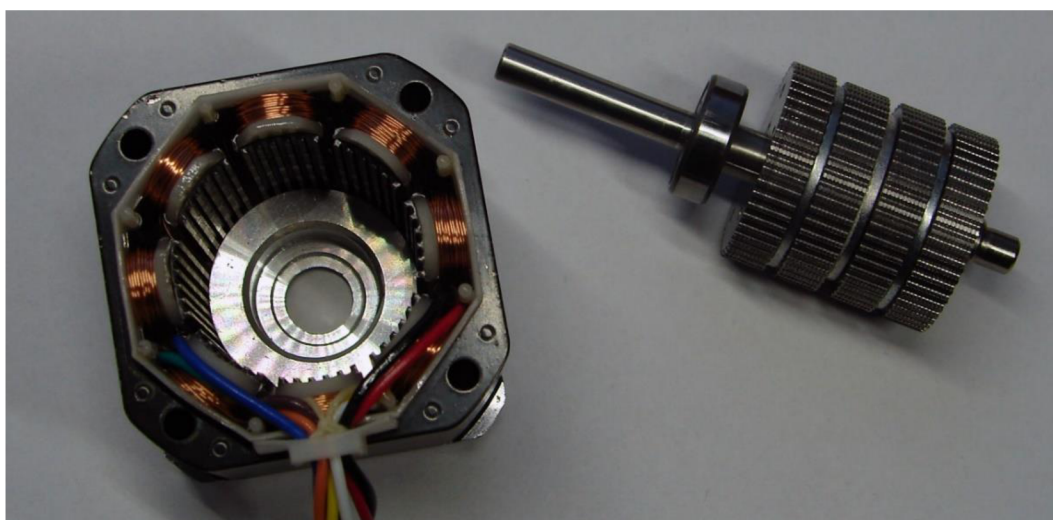
Krokový motor je točivý stroj, jehož charakteristickým rysem je pohyb po krocích. Tento pohyb může být v pomalých rychlostech nespojitý, ale se zvyšující se rychlostí buzení jednotlivých vinutí přejde do plynulého pohybu mezi jednotlivými kroky. Další výhodou je, že neobsahuje třecí plochy jako například komutátorový motor, a tak je redukováno opotřebení pouze na uložení rotoru (ložiska). Tím je značně zvýšena životnost celého motoru a mechanická životnost je tedy omezena pouze životností samotných ložisek. Mezi nevýhody tohoto typu motoru patří zejména náchylnost k rezonancím, malá dosažitelná rychlost otáčení a možnost ztráty kroku při překročení mezního zatížení.

Základním principem využívaným ve všech krokových ale i jiných typech motorů je přeměna posuvného pohybu na rotační. Působení magnetického toku na vzájemnou pozici statoru a rotoru ilustruje obrázek 2-1. Vybuzený magnetický tok prochází vzduchovou mezerou mezi rotorem a statorem a vlivem pootočení na sebe tyto plochy nenavazují. Tímto je tedy vyvolána síla snažící se srovnat pólové nastavce statoru a rotoru, aby byla vzduchová mezera minimální.



Obrázek 2-1: Působení magnetického toku vyvolávající sílu v mezeře mezi statorem a rotorem – převzato z [1]

Motor je tvořen dvěma hlavními částmi – rotorem (část vykonávající rotační pohyb spojená s hřídelí pro přenos pohybu na další mechanické části) a státorem, což je část, vůči které koná rotor svůj pohyb. Ta zároveň slouží k mechanickému upevnění motoru na šasi stroje, ve kterém je využita. Celá konstrukce statoru je vyrobena z magneticky měkké oceli, zaručující uzavření magnetického toku bez nadbytečných ztrát. Na této konstrukci jsou pólové nástavce, na kterých jsou navinuty cívky, vybuzující po připojení elektrického proudu magnetický tok. Konstrukce rotoru je závislá na typu krokového motoru a může být tvořena buď permanentním magnetem nebo magneticky měkkým materiálem.



Obrázek 2-2 Fotografie statoru (vlevo) a rotoru krokového motoru Microcon SX17-0905

2.2 Typy krokových motorů a jejich řízení

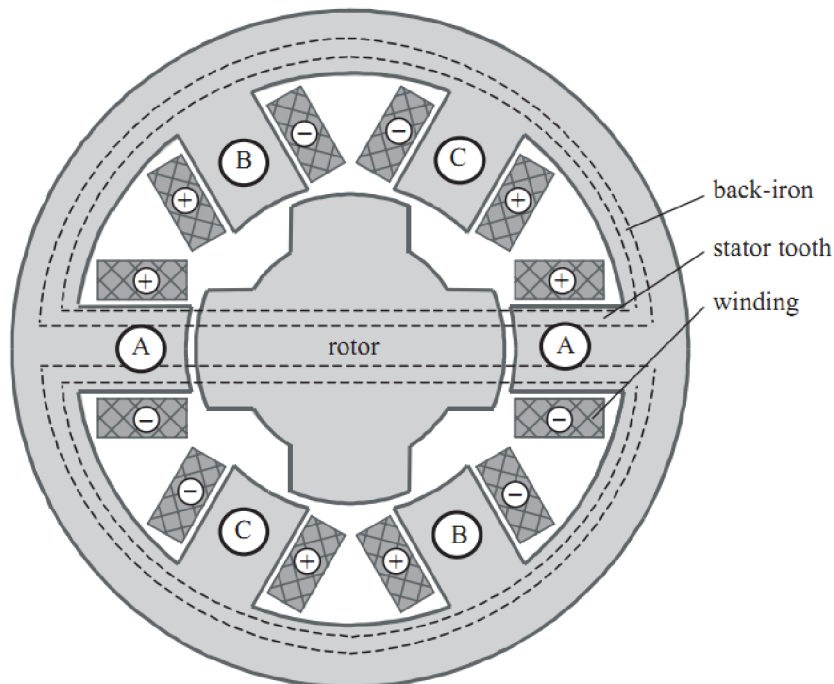
Krokové motory můžeme rozdělovat podle mnoha kritérií, v této kapitole se však zaměříme na rozdělení podle principu funkce, popis výkonového obvodu a základy řízení.

2.2.1 Motor s proměnnou reluktancí

Hlavní charakteristickou vlastností pro tohoto typu krokových motorů je rotor z magneticky měkkého materiálu. Často je vyroben ze slisovaného svazku magneticky měkkých plechů, které jsou nalisované na hřídeli rotoru a ze kterých jsou vytvářeny pólové nástavce.

Na obrázku 2-3 je zobrazen řez motorem s proměnnou reluktancí a jedinou sekcí. Tento motor je tvořen třemi nezávislými vinutími A, B a C a rotorem s čtyřmi pólovými nástavci. Motor je zobrazen při vybuzení vinutí A, kdy dojde k natočení rotoru tak, aby kladl minimální magnetický odpor (relutanci) magnetickému toku. Při vybuzení vinutí B dojde k přitáhnutí pólových nástavců rotoru k pólovým nástavcům vinutí B, a tedy

k pootočení rotoru proti směru hodinových ručiček. Abychom dosáhli plynulého otáčení, budíme jednotlivá vinutí postupně a tedy A, B, C, A ... Pokud je požadovaný opačný směr otáčení tak se pouze změní pořadí buzení vinutí na A, C, B, A atp. Za povšimnutí stojí hlavně fakt, že pro změnu smyslu otáčení stačí změnit pouze sekvenci buzení jednotlivých vinutí.

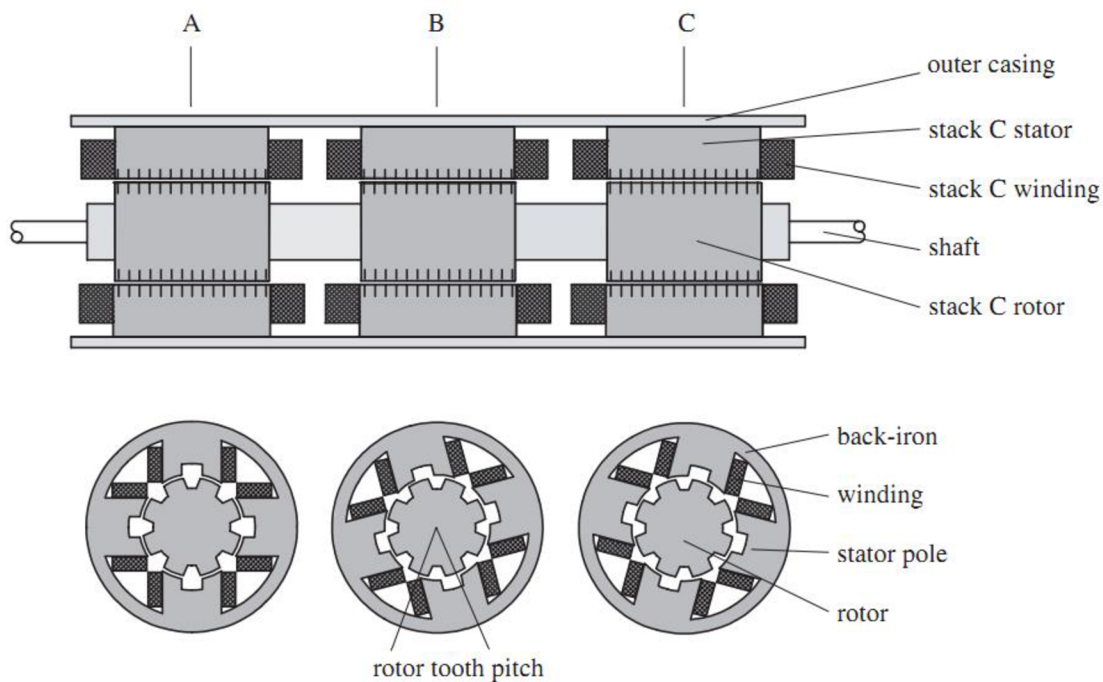


Obrázek 2-3 Řez motorem s proměnnou reluktancí a jednou sekcí – převzato z [1]

Z principu konstrukce tohoto motoru je patrné, že velikost kroku námi uvažovaného motoru bude veliká. Lze ji vyjádřit jako úhel otočení φ ve stupních:

$$\varphi = \frac{360}{(N \cdot p)} \quad [^\circ], \quad (1.1)$$

kde N je počet nezávislých vinutí a p je počet pólových nástavců rotoru. V našem případě tedy jeden krok odpovídá otočení rotoru o 30° . Pro zjemnění kroku byl vyvinut vylepšený typ tohoto motoru, a to motor s proměnnou reluktancí a více sekcemi. Tento typ využívá stejně tvarovaný rotor s jedinou změnou, a to více sekcemi úhlově pootočených statorů. Právě ono nepatrné pootočení jednotlivých částí (sekce A, B a C) umožňuje jemnější krok.

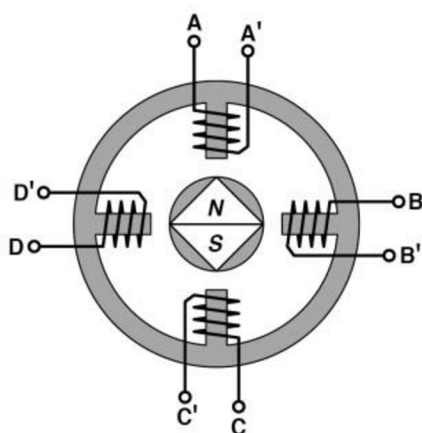


Obrázek 2-4 Řez motorem s proměnnou reluktancí a třemi sekcemi – převzato z [1]

Tyto typy krokových motorů se vyznačují malým točivým momentem a celkem malou přesností. Proto se využívaly spíše do aplikací nevyžadující velikou přesnost polohování.

2.2.2 Motor s permanentním magnetem

Tento motor se od předchozího typu liší materiálem, který tvoří rotor. Na ose rotoru je připevněn permanentní magnet (nejčastěji neodymový). Jak lze vidět na obrázku 2-5, na statoru jsou čtyři pólové nástavce, na nichž je navinuto vinutí. Při vybuzení jednotlivých vinutí dojde k rotaci rotoru podle smyslu buzení vinutí.



Obrázek 2-5 Řez motorem s rotorem tvořeným permanentním magnetem – převzato z [2]

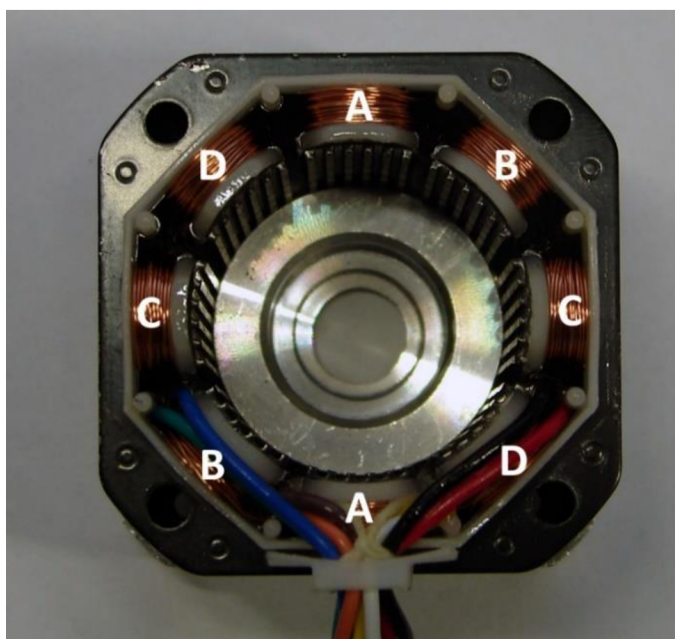
Zobrazení výše na obrázku 2-5 je pouze principiální a značně zjednodušené [2]. Prakticky tyto motory mají na rotoru více magnetických pólů (střídající se severní a jižní) a více spřažených vinutí na statoru, čímž je dosaženo vyšší přesnosti (jemnějšího kroku). Jejich hlavní přednost tkví v jednoduché výrobě a jsou využity především v aplikacích, kde není třeba vysoké přesnosti (mezi $7,5^\circ$ až 15°).

2.2.3 Hybridní motory

V praxi se jedná o jeden s nejvíce používaných typů krokových motorů v průmyslu. Jeho výhodou je velmi malý krok (běžně $1,8^\circ$ tzn. 200 kroků na otáčku) a tedy i vysoké rozlišení, vysoký točivý moment a takzvaný zádržný moment, který zachovává rotor ve stabilní poloze. V popisu funkčnosti se tedy zaměříme na nejběžněji používaný typ s krokem $1,8^\circ$.

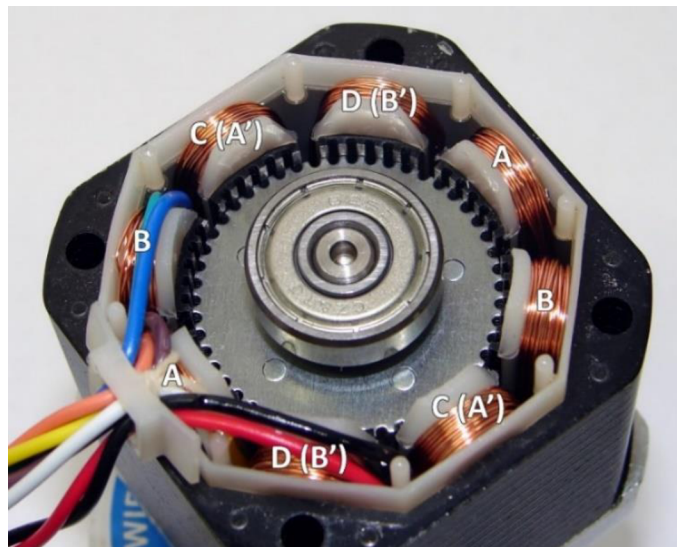
Hlavní odlišností rotoru od předchozích typů je podélné umístění permanentního magnetu na osu rotoru. Současně má jak severní, tak jižní pól rotoru svůj pólový nástavec, který je tvořen 50 zoubky. Jak si již bylo možné všimnout na obrázku 2-1, pólové nástavce pro severní a jižní pól jsou vůči sobě otočeny o úhel $3,6^\circ$.

Samotná konstrukce statoru je tvořena nejčastěji osmi vinutími. Ty jsou vinuty podle obrázku 2-6 níže. Písmena A, B, C a D označují dvojice vinutí, které jsou zapojeny sériově, a které jsou pomocí vodičů vyvedeny mimo šasi motoru. Pro zjednodušení řízení se vinutí A (B) zapojí antiparalelně s vinutím C (D). Pro zjednodušení si tedy vinutí C a D označíme jako A' respektive B'. Za povšimnutí stojí také, že každé vinutí má 6 pólových nástavců – celkem tedy 48.



Obrázek 2-6 Detail statoru a označení jednotlivých smyslů vinutí a zapojení

Na obrázku 2-7 je motor v pozici, kdy bylo kladně vybuzeno vinutí D (vinutí B tedy pulzem s opačnou polaritou) a tedy zuby pólové nastavce rotoru doléhají na zuby pólového nastavce statoru. Při následném vybuzení vinutí A kladným pulzem dojde k přitáhnutí zubů pólových nastavců rotoru k zubům na pólových nastavcích tohoto vinutí. Současně vlivem záporného pulzu do vinutí C dojde k odpuzení rotoru, a tedy k vykonání jednoho kroku ve směru hodinových ručiček. Pro trvalé otáčení ve směru hodinových ručiček tedy musíme jednotlivá budit podle sekvence A+, B+, A-, B-, A+, B+ atd [1].

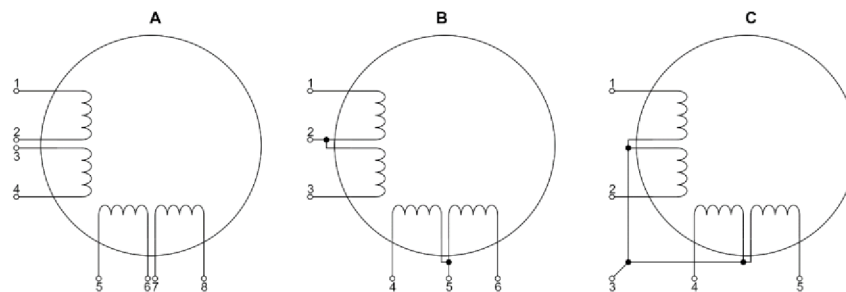


Obrázek 2-7 Detail polohy rotoru vůči statoru

2.2.4 Unipolární a bipolární řízení krokových motorů

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, existuje více způsobů zapojení vinutí krokových motorů. Základním rozdělením je ovšem podle způsobu napájení – na unipolární a bipolární. Ovšem nemůžeme jakémukoliv krokovému motoru přiřadit libovolný způsob řízení. Je třeba dbát na vnitřní zapojení krokového motoru.

Unipolární řízení krokového motoru se vyznačuje menším kroutícím momentem a menší spotřebou. Řízení výkonového stupně takového motoru je velice jednoduché. Stačí pouze postupně budit jednotlivá vinutí. Navíc není potřeba složitějších řídicích polovodičových výkonových stupňů (H můstku). Pro unipolární řízení jsou vhodné krokové motory se zapojením podle obrázku 2-8.



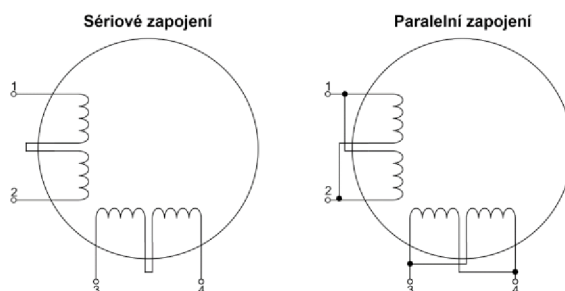
Obrázek 2-8 Použitelné zapojení krokových motorů pro unipolární řízení

Jak lze vidět na obrázku výše, jedná se o mechanicky totožné motory, s jedinou odlišností, a to vnitřním zapojením vinutí, tedy počtem vyvedených vodičů. Motor na obrázku 1.8 A je nám již známý s osmi vyvedenými vodiči z předchozí kapitoly. Toto zapojení má výhodu, že je pouze na uživateli, jak se rozhodne motor zapojit a řídit.

Zapojení B se liší pouze tím, že má již vnitřně spojené středy vinutí a je vyvedeno pouze 6 vodičů. Obvykle se ještě spojí svorky 2 a 5, které se následně připojí na napájecí napětí a pomocí tranzistorů NPN nebo unipolárních tranzistorů s N kanálem se řídí proud vinutími. Principiálně tedy dostaneme zapojení C, šetřící jeden vodič vedoucí k motoru.

U bipolárního řízení se řídicí obvody komplikují. Je zapotřebí využít více spínacích prvků abychom zajistili průchod proudu vinutími v obou směrech. Nestačí už tedy jeden spínací prvek na jedno vinutí motoru, jak tomu bylo u unipolárního řízení, kde proud procházel vinutím vždy pouze v jenom směru. Výhodou tohoto řízení je však vyšší kroutící moment vykoupěný vyšší spotřebou [1].

Při bipolárním řízení a použití motoru s osmi vyvedenými vodiči se nám naskytá možnost využití dvou zapojení vinutí. Na obrázku 2-9 vlevo je naznačeno, že se jedná o sériové zapojení dvojice cívek. Celková indukčnost a odpor mezi svorkami 1 a 2 je oproti paralelnímu zapojení čtyřnásobně větší, což má za následek zvýšení kroutícího momentu při nižších otáčkách. Nevýhodou jsou nižší dosažitelné maximální otáčky a nižší kroutící moment ve vyšších otáčkách.



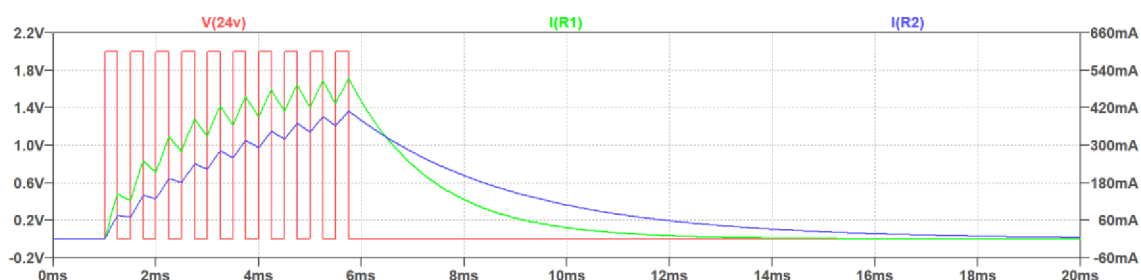
Obrázek 2-9 Použitelné zapojení krokových motorů pro bipolární řízení

Oproti tomu je paralelní zapojení vhodnější spíše do aplikací vyžadující vyšší rychlosti otáčení. To je dáno především nižší časovou konstantou, jelikož vinutí motoru je tvořeno navinutým drátem majícím reálný odpor a indukčnost. Lze ji tedy vypočítat:

$$\tau_c = \frac{L}{R}, \quad [\text{s}], \quad (1.2)$$

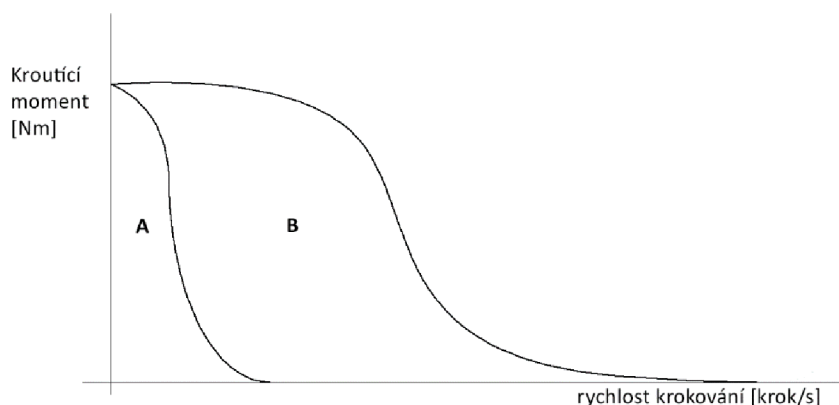
Kde L představuje indukčnost vinutí a R je reálný odpor vinutí. Při stejném napájecím napětí tedy paralelní zapojení vinutí vykazuje nejenom vyšší výkon ve vyšších otáčkách ale také vyšší spotřebu danou nižším celkovým odporem vinutí.

Vzhledem k tomu, že vinutí krokového motoru se chová jako dolní propust, ovlivňuje časová konstanta velikost kroutícího momentu. Pokud dochází k rychlému spínání vinutí výkonovým řídicím obvodem – nejčastěji se tak děje za využití pulzně šířkové modulace – dochází při sepnutí ke skokové změně napětí a k postupnému nárůstu proudu. Na obrázku 2-10 lze vidět srovnání simulace dvou motorů, kdy modrý má dvojnásobnou časovou konstantu oproti zelenému.



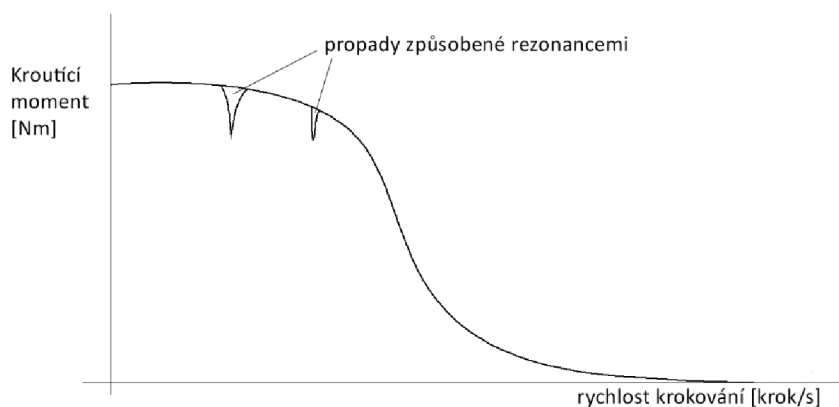
Obrázek 2-10 Srovnání průběhu proudů pro dva motory s rozdílnou časovou konstantou

Je tedy patrné, že při přiloženém pulzně-širokově modulovaném napájecím napětí (červená křivka) dochází u prvního motoru k rychlejšímu nárůstu proudu (zelená křivka) než u motoru s dvojnásobnou časovou konstantou (modrá křivka). Vzhledem k tomu, že časová konstanta motoru je výrobní vlastností (závisí na počtu závitů vinutí a na tloušťce, délce a materiálu vodiče) a rychlost krokování (tzn. délka buzení vinutí) je závislá na požadované rychlosti otáčení, můžeme vyjádřit závislost točivého momentu na rychlosti otáčení motoru takzvanou momentovou charakteristiku (viz obrázek 2-11).



Obrázek 2-11 Příklad momentové charakteristiky krokového motoru

Tuto charakteristiku můžeme rozdělit na dvě hlavní oblasti. Oblast **A** je nazývána rozběhovou oblastí. V této oblasti se může krokový motor roztočit bez ztráty kroku. V oblasti **B** může motor kontrolovaně měnit své otáčky bez ztráty kroku. Proto se této oblasti říká oblast pracovní a v katalogových listech je většinou udávána pouze křivka ohraničující tuto oblast. Výše uvedený příklad je ale pro motor bez rezonancí. V praxi se ale s takovým motorem nesetkáme – prakticky každý krokový motor vykazuje při určité rychlosti rezonance, které se na momentové charakteristice projeví propadem na momentové charakteristice, jak je patrné z obrázku 2-12.



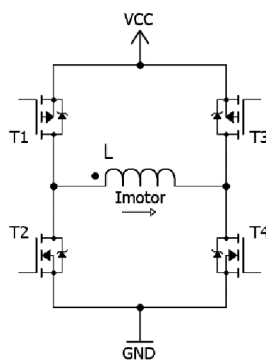
Obrázek 2-12 Příklad momentové charakteristiky krokového motoru

2.2.5 Výkonové řídicí obvody pro hybridní krokové motory

Vzhledem velmi početné skupině různých typů krokových motorů a jejich mnohdy specifickému způsobu zapojení a řízení se v této kapitole zaměříme pouze na řízení hybridních bipolárních krokových motorů.

Slovem bipolární je myšleno využití kladných a záporných pulzů pro buzení jednotlivých vinutí. To nám umožňuje využít pro připojení motoru k řídicí jednotce pouze čtyř vodičů. Nevýhodou je složitější řídicí obvod. V dnešní době je nejběžnější využití polovodičových spínacích prvků (bipolární a unipolární tranzistory) v můstkovém zapojení. To nám dovolí budít vinutí jak kladnými, tak i zápornými pulzy. Pro ovládání námi vybraného motoru tedy využijeme dva polovodičové H mosty (pro každé vinutí jeden). V příkladu funkce budeme uvažovat unipolární tranzistory s intrinzickou diodou.

Na obrázku 2-13 je naznačeno principiální zapojení H mostu. V případě, že chceme vinutí (zde reprezentováno cívkou vzhledem k charakteru vinutí – má konečnou indukčnost a odpor) vybudit ve směru kladného proudu I_{motor} , je zapotřebí sepnout tranzistory T1 a T4. V případě vypnutí tranzistorů se uzavře proud vynucený indukčností vinutí motoru přes diodu tranzistoru T3. Pro záporný proud vinutím motoru $-I_{\text{motor}}$ stačí sepnout dvojici tranzistorů T2 a T3. V žádném případě by nemělo dojít k současnému sepnutí obou tranzistorů v jedné větvi (T1 a T2, T3 a T4), neboť hrozí zničení tranzistorů díky velkému proudu – dojde ke zkratu napájecího zdroje.



Obrázek 2-13 Principiální zapojení H můstku s MOSFET tranzistory

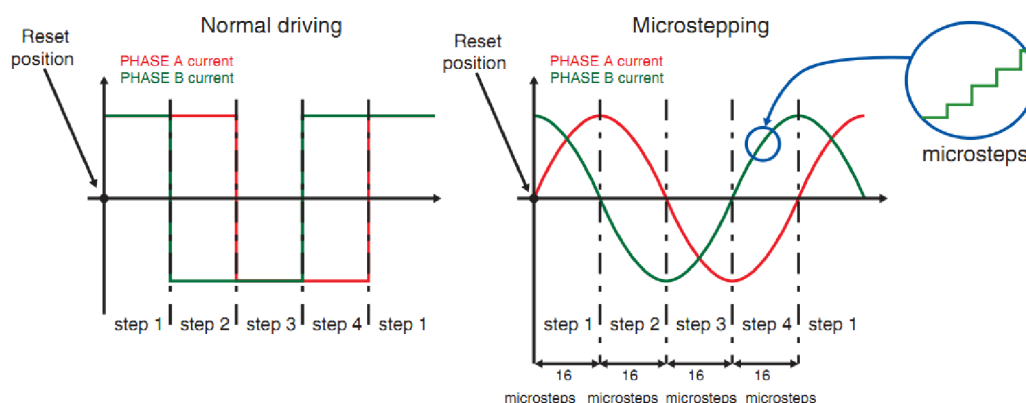
V příkladu byly použity unipolární tranzistory s kanálem N i P. Toto zapojení je výhodné, protože pro buzení tranzistorů T1 a T3 nejsou zapotřebí žádné speciální obvody. Vzhledem k obecně lepším parametrům (větší maximální propustný proud I_{DS} , nižší odpor v sepnutém stavu R_{DSon} atd.) a také k ceně jsou většinou využity pouze tranzistory s N kanálem. Ty v můstkovém zapojení vyžadují speciální obvod pro řízení horních tranzistoru, protože jejich elektroda source je na plovoucím potenciálu. Pro bezpečné sepnutí je tedy nutné, aby do hradla byl dopraven dostatečný náboj (parametr Total Gate Charge v datovém listu tranzistoru). Abychom předešli složitějšímu návrhu, lze využít integrovaných obvodů obsahujících nábojovou pumpu, díky které lze za pomoci

minimálního počtu dalších součástek spínat tranzistory výkonového stupně. Ve většině případů navíc tyto obvody obsahují ochranu proti současnému sepnutí obou tranzistorů ve větvi polomostu tzv. deadtime což je doba po rozepnutí jednoho tranzistoru polomostu, po kterou je zakázáno sepnout tranzistor druhý.

2.2.6 Mikrokrokování

Až doposud jsme předpokládali, že budeme vinutí motoru budit pouze po krocích. Nevýhodou takového buzení je ovšem neplynulý chod motoru při pomalých rychlostech. Motor vykazuje vlastní mechanické rezonance a chová se jako mechanický filtr typu dolní propust. V závislosti na velikosti motoru se rezonanční frekvence motorů pohybují v pásmu od 30 do 150 Hz. Pokud se budící frekvence přibližuje nebo shoduje s rezonanční frekvencí motoru, dochází ke vzniku mechanických rezonancí.

Abychom předešli tomuto nežádoucímu stavu, je možné za využití pulzně šířkové modulace (dále PWM) budit jednotlivá vinutí krokového motoru takzvanými mikrokroky. Jde o vytvoření mezistavů zjemňujících přechody mezi jednotlivými kroky. Pomocí PWM dochází k řízení střední hodnoty proudu jednotlivými vinutími. Na obrázku 2-14 níže je vyobrazen přínos mikrokrokování s 16 stavy.



AM15035v1

Obrázek 2-14 Rozdíl mezi krokovým a mikrokrokovým řízením – převzato z [3]

V ideálním případě je průběh proudu procházejícím vinutí motoru při stabilních otáčkách roven goniometrické funkci sinus. Vzhledem ke konečnému počtu stavů PWM je toto nedosažitelné, avšak moderní řídicí obvody mohou nabídnout až 256 mikrokroků. Při využití motoru s 200 kroky na otáčku dostaneme teoretické rozlišení $0,00703125^\circ$. Je ale třeba vzít v úvahu, že se jedná o systém s otevřenou regulační smyčkou a prakticky nelze takovéto přesnosti dosáhnout. Nutno také podotknout, že při větších rychlostech otáčení je využití mikrokroků neúčinné, a naopak zabraňuje dosažení vyšších rychlostí otáčení.

2.3 Ethernet a jeho využití v průmyslu

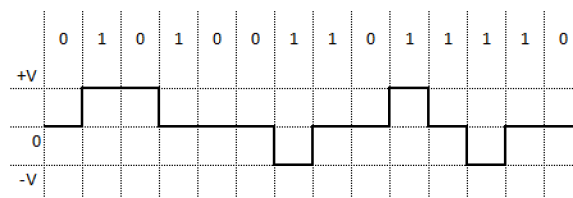
Tato kapitola se zabývá přiblížením technologie Ethernetu a jeho využití v průmyslových aplikacích. Dále se zaměří na přiblížení nejpoužívanějších průmyslových protokolů vystavených na Ethernetu.

2.3.1 Ethernet

Pod pojmem Ethernet se myslí souhrn technologií pro počítačové sítě. Představuje realizaci fyzické a linkové vrstvy referenčního modelu OSI podle standardu IEEE 802.3. Ve standardu jsou tedy popsány jak typy kabelů a konektorů, tak i přístup k přenosovému médiumu a rozdělení typů zařízení a jejich funkce.

Jako přenosová média se využívají metalické a optické kabely. Ve starších verzích standardu jsme se mohli setkat s koaxiálními kabely. Dnes už je ve většině případů využito kabeláže s kroucenými páry, případně kabely s optickým vláknem. Jejich výhodou je vysoká odolnost vůči vnějšímu rušení a galvanické oddělení vysílače a přijímače. Přenosové rychlosti se pohybují od 1 Mbit/s až po 100 Gbit/s v závislosti na použitém přenosovém médiumu. Nejčastěji jsou využívány konektory RJ-45 ve spojení s kabelem UTP Cat.5 a výše. V této práci je předpokládáno využití Fast Ethernet s rychlostí 100 Mbit/s s využitím metalické kabeláže s kroucenými páry.

Vysílání na metalické fyzické lince s rychlostí 100 Mbit/s probíhá kódovaně. Pro to se využívá MLT3 kódování což je dvoustavové kódování využívající úroveň $\pm U$ a 0. Jeho výhodou je neobsahuje stejnosměrnou složku a přenáší synchronizační signál pro obnovení nosné. Principem je, že při logické „1“ dojde při aktivní hraně taktovacího signálu k sestupné hraně zakódovaného signálu. Při logické „0“ a aktivní hraně taktovacího signálu dojde ke hraně náběžné. Na obrázku 2-15 je uveden příklad krátké zakódované sekvence. Z obrázku je patrné, že je potřeba využít další pomocné kódování, aby sekvence končila na nulovém potenciálu. To zajišťuje kódování 4B5B, což čtyř bitovému vstupnímu slovu přiřadí pěti bitové výstupní slovo.



Obrázek 2-15 Kódování MLT-3

Vzhledem k použití v síti více zařízení, sdílející přenosové médium bylo vytvořeno několikero možných přístupů. Hlavním dělením bylo na deterministické (určitý přidělený interval komunikace) a stochastické (založené na náhodnosti). Mezi deterministické typy

přístupu můžeme zařadit především systém řízeného přístupu (Polling) a systém předávání peška (Token passing), jehož držitel má právo na vysílání. Oproti tomu stochastický přístup je založen na nahodilosti. V případě klidu na sdíleném médiu zařízení přestane naslouchat a začne vysílat. V případě, že dojde ke kolizi s jiným vysílajícím zařízením, je vyslán kolizní signál a stanice se odmlčí na náhodnou dobu. Po jejím uplynutí dojde k dalšímu pokusu o vysílání.

Základním blokem dat vysílaným v síti je Ethernetový rámec (obrázek 2-16). Obsahuje hlavičku, sloužící pro synchronizaci, zdrojovou a cílovou adresu, délku dat, samotná přenášená data a taky kontrolu správnosti dat realizovanou 32 bitovým kontrolním součtem.

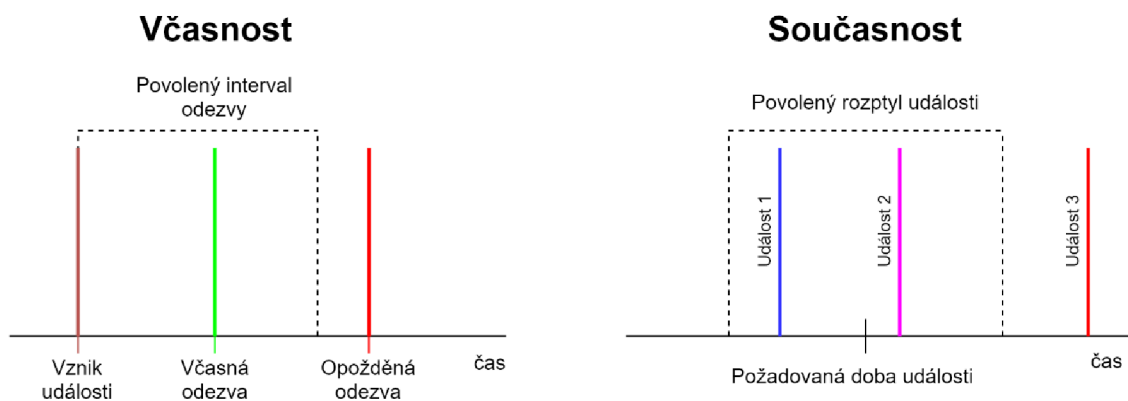
Hlavička 64 bitů	MAC cíle 6 bytů	MAC zdroje 6 bytů	Délka 2 byty	Data 46 - 1500 bytů	CRC32 4 byty
---------------------	--------------------	----------------------	-----------------	------------------------	-----------------

Obrázek 2-16 Struktura Ethernetového rámce

Hlavička obsahuje sekvenci 62 střídajících se logických se logických nul a jedniček zakončenou dvěma po sobě jdoucími jedničkami, které označují začátek rámce. Za nimi je zapsána adresa cílového síťového rozhraní (MAC cíle). Následuje adresa síťového rozhraní zdroje. MAC adresou se myslí jednoznačný unikátní identifikátor přidělený při výrobě zařízení. Další položkou je délka nesoucí informace o velikosti následujícího datového pole. Celý rámec je zakončen kontrolním součinem, díky němuž je možné detekovat vadný rámec.

2.3.2 Průmyslový Ethernet

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, tak přístup jednotlivých zařízení v síti k přenosovému médiu je stochastický. To ale představuje veliký problém v průmyslové aplikaci, kdy pozdní odezva systému může znamenat ohrožení zařízení nebo dokonce lidských životů. Základními požadavky pro průmyslový Ethernet jsou tedy včasnost a současnost. Včasnost je vlastnost splnit požadovanou úlohu případně zajistit odezvu v zadaném čase. Oproti tomu je současnost charakterizována rozptylem reakce od požadovaného okamžiku události (viz obrázek 2-17).



Obrázek 2-17 Včasnost a současnost

Požadavkem tedy není maximalizace rychlosti zpracování ale spíše definování maximální povolené doby odezvy. Tyto požadavky však klasický Ethernet nesplňuje. Pro zlepšení parametrů současného systému se využívá různých modifikací jako například použití vysokorychlostního přenosu dat (1 Gbit/s a více), využití protokolu UDP místo TCP (nespojovaná vs. spojovaná služba), segmentace sítě na časově kritické a časově nekritické segmenty případně synchronizace pomocí protokolu PTP (Precision Time Protocol – synchronizace pomocí distribuovaných hodin reálného času) [4].

Vzhledem k masovému nárůstu různých standardů od různých výrobců byl Mezinárodní elektrotechnickou společností IEC vydán standard IEC 61 158 zastřešující téměř všechny varianty průmyslového Ethernetu. V dalších kapitolách si tedy představíme hlavní zástupce [5].

2.3.3 EtherNet/IP

Vývoj tohoto standardu zajišťuje sdružení ODVA. Základem je přenos pomocí protokolu TCP/IP nebo UDP. Navíc ale obsahuje zapouzdření pomocí protokolu aplikační vrstvy CIP (Control and Information Protocol). Pro zajištění přenosu časově kritických zpráv je využito metody producer-consumer, kdy příjemce (consumer) vybírá data, která mu producent (producer) zaslal, na základě známého identifikátoru. Přenos těchto zpráv je řešen protokolem UDP. Oproti tomu, časově nekritické zprávy jsou řešeny pomocí protokolu TCP/IP.

2.3.4 PROFINet

Standard PROFINet byl vyvinut za spolupráce organizace PNO (Profibus Nutzerorganisation) se společností Siemens.

Opět systém rozděluje zprávy podle požadavku na dodržení doby odezvy a synchronizaci. Zprávy bez požadavku na synchronizaci jsou odesílány standardní cestou protokoly UDP nebo TCP/IP. Časově kritické zprávy ale využívají takzvaného

programového překlenutí síťové a transportní vrstvy. Základem je využití prioritních slotů, kdy jednotlivé rámce v síti obsahují tag popisující prioritu. Ve vyšších verzích je pro zajištění ještě přísnějších požadavků na synchronizaci využívá specializovaného zařízení zajišťující hardwarové překlenutí Vrstev TCP/IP. Běžné zprávy jsou poté přenášeny paralelní cestou pomocí UDP nebo TCP/IP.

2.3.5 Ethernet Powerlink

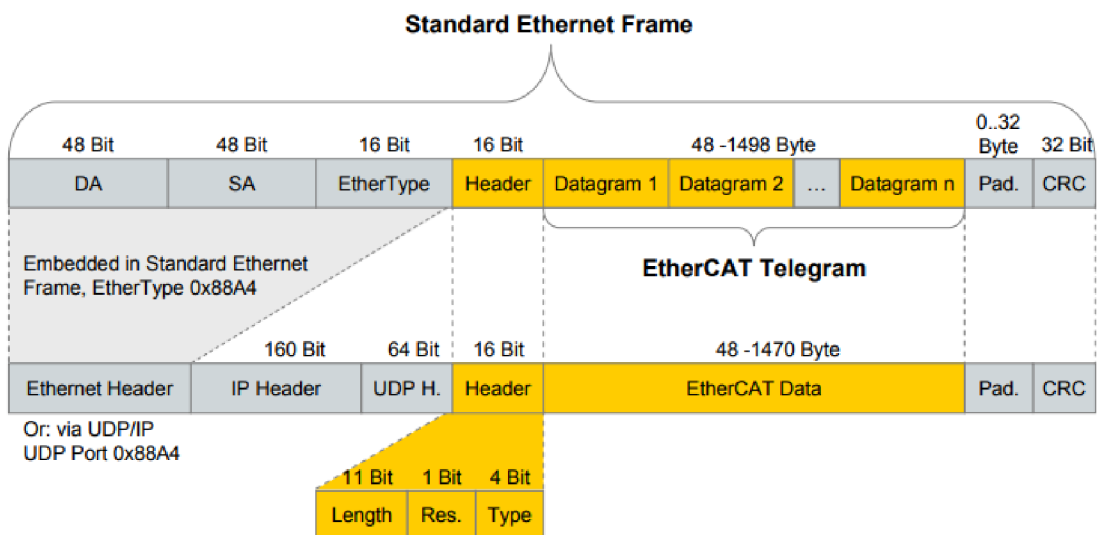
Tento komunikační protokol byl vytvořen firmou Bernecker and Rainer za přičinění výrobců automatizační techniky ve sdružení EPSG (Ethernet Powerlink Standardization Group). Jako u ostatních výše zmíněných systémů, dochází k přenosu časově nekritických zpráv pomocí protokolů TCP/IP nebo UDP. Je využito standardního přístupu k médiu jako u Ethernetu – tedy CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection – mnohonásobný přístup k přenosovému médiu pomocí naslouchání nosné s detekcí kolize). Využívá se řídicí metody (SCNM – Slot Communication Network Management) využívající komunikační zásobník, který řídí přenos dat v síti. Každé připojené zařízení má přesně stanovená práva v síti a může komunikovat s libovolnou stanicí. Přístup k médiu je ale striktně přidělen a nemůže tedy docházet ke kolizím.

2.3.6 EtherCAT

Firma Beckhoff vyvinula standard EtherCat především pro řízení v reálném čase. Nyní již okolo tohoto standardu existuje organizace ETG (EtherCat Technology Group) sdružující přes několik stovek výrobců, používajících tento standard [6].

Hlavním rozdílem oproti jiným průmyslovým variantám postaveným na Ethernetu je především rychlost zpracování obsahu rámce. Ten je zpracováván hned při příjmu, a současně rámec odesílá k dalšímu zařízení. Všechna zařízení tedy obsahují alespoň dva porty a samotné zařízení je průchozí. Vzhledem k tomu, že zdržení jednotlivých rámců v zařízení jsou v jednotkách nanosekund, je rychlost přenosu zprávy ke všem zařízením obrovská. Topologie takovéto sítě je z principu logický kruh. Existují ale zařízení umožňující větvení sítě do složitějších topologií.

Další výhodou tohoto standardu je využití standardního Ethernetového rámce podle normy IEEE 802.3 (viz obrázek 2-18). V datové části Ethernetového rámce je tedy vložena hlavička (Header) popisující délku následujících datagramů a typ dat. Poté jsou již za sebe ukládány jednotlivé datagramy. Výhodou tohoto je plná transparentnost pro systém TCP/IP a tedy využití jeho služeb s výhodou zajištění synchronizace. Navíc lze data monitorovat pomocí jakéhokoliv síťového monitorovacího programu (například WireShark).

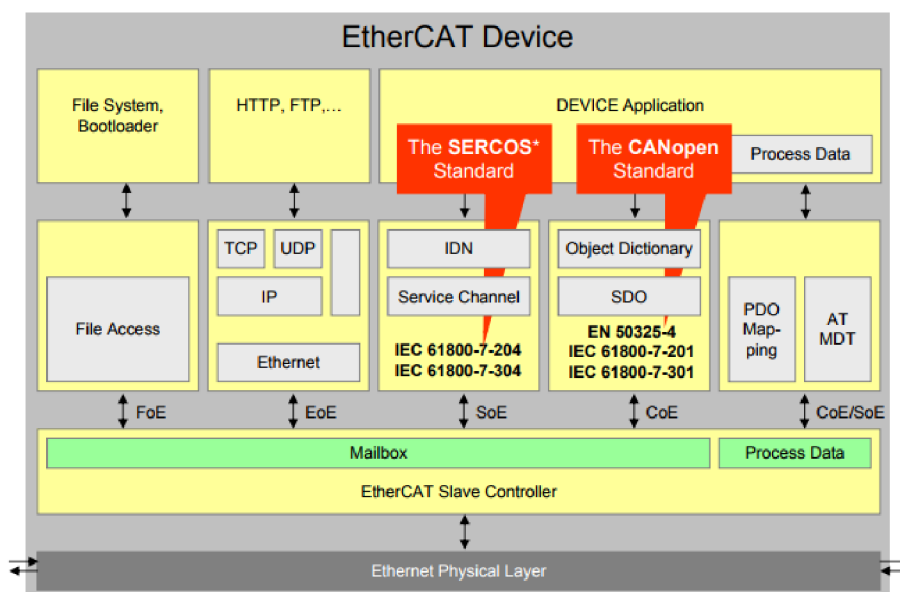


Obrázek 2-18 Struktura rámce EtherCATu – převzato z [7]

Synchronizace mezi jednotlivými zařízeními je navíc zajištěna pomocí měření propagačního času mezi jednotlivými zařízeními (uzly). Dochází k měření času mezi odesláním a příjmem rámce a ke korekci distribuovaného času. Lze tedy dosáhnout

přesnosti synchronizace pod jednu mikrosekundu díky korekci lokálních hodin podřízených stanic.

Pro zajištění podpory zařízení využívaných v průmyslu (vstupně/výstupní moduly, enkodéry, motory atd.) byly vytvořeny protokoly zjednodušující přístup k těmto zařízením (viz obrázek 2-19). V minulosti tyto zařízení byly nejčastěji připojovány na sběrnici CAN, a proto byl stvořen komunikační profil pro protokol CANopen (CANopen over EtherCAT – CoE). Pro možnost řízení pohonů a motorů byl přidán komunikační profil SoE (Servodrive-Profile over EtherCAT) zajišťující možnost využít profily řízení pomocí standardu SERCOS. Navíc jsou implementovány ještě doplňkové protokoly jako například Ethernet over EtherCAT (EoE) umožňující, aby se zařízení chovalo jako uzel Ethernetu. Dalším výhodným protokolem je File Access over EtherCAT (FoE), díky němuž je možné nahrát do zařízení konfigurační soubory nebo soubory zavaděče. Samozřejmě není zapomináno ani na bezpečnost a je tedy implementován protokol Safety over EtherCAT. DO sítě je posílán bezpečnostní rámec a na základě přijímaných dat je vyššími vrstvami vyhodnocován a bezpečně zpracován.



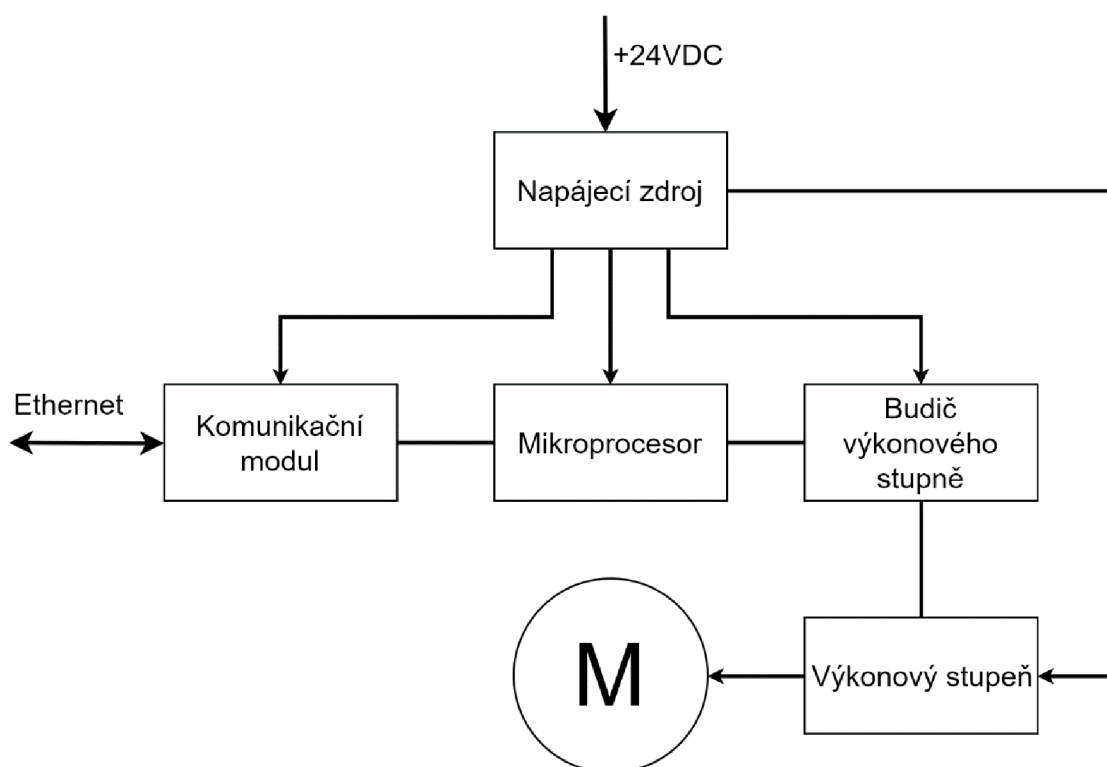
Obrázek 2-19 Struktura podřízeného zařízení podle standardu EtherCAT – převzato z [7]

Vzhledem k vyjmenovaným vlastnostem EtherCATu lze říci, že se jedná o standard určený zejména do aplikací vyžadující komunikaci v reálném čase. Jeho výhodami je transparentnost vůči Ethernetu, a tedy jednoduchá diagnostika, vysoký výkon, zajištěná velmi přesná synchronizace a možnost libovolné topologie se zajištěnou redundancí. Nevýhodou však je náročnost na řídicí a podřízená zařízení, kdy je nutné se uchýlit buď k hradlovým polím (jsou dodávána certifikovaná IP jádra) nebo k již vyvinutým speciálním obvodům (ASIC).

3. VÝBĚR KOMPONENT

V této kapitole se zaměříme na možnosti realizace jednotlivých modulů, výběr součástek a srovnání možných řešení. Nejprve si však představíme blokový model, z něhož bude vycházeno.

Jak lze vidět na obrázku 3-1, že zařízení se bude skládat z pěti hlavních komponent. Uprostřed se nachází mikroprocesor, obstarávající komunikaci mezi budičem výkonového stupně a komunikačním modulem, zajišťujícím komunikaci s nadřazeným zařízením pomocí Ethernetu. O dostatečné napájení a potřebné napěťové úrovni se stará napájecí zdroj, který je také odbočením pro část výkonového stupně budičího krokový motor. Napájecí napětí je voleno na stejnosměrných 24 V.



Obrázek 3-1 Možnosti zapojení řízení krokového motoru

3.1 Komunikace přes EtherCAT

Vzhledem k využití komunikace přes EtherCAT u dalších projektů, a tedy možnosti širšího využití, byl vybrán tento standard pro realizaci komunikace.

Možností, jak realizovat podřízené zařízení (slave) je ve standardu EtherCAT mnoho. Jako první možnost se naskýtá využití mikroprocesoru. Zde se naskýtá možnost využít integrované periferie Ethernet kontroléru. Většina mikroprocesorů, které obsahují tuto periférii, ovšem mají integrovanou pouze linkovou vrstvu a je tedy třeba využít dalšího integrovaného obvodu zajišťujícího fyzickou vrstvu. Problémem je ovšem, že většina takových mikroprocesorů obsahuje pouze jednu Ethernetovou periférii. Jak jsme se dozvěděli v předchozí kapitole, tak EtherCAT standard využívá dva porty a při příjmu dochází současně k odesílání dat pro minimalizaci zpoždění. Při jedné Ethernetové periférii by takováto realizace nebyla možná.

Jako další možnost se jeví využití integrovaných obvodů obsahující fyzickou a linkovou vrstvu. Asi nejznámějším představitelem integrovaných obvodů tohoto typu je ENC28J60. Jedná se o obvod realizující přemostění mezi rozhraním Ethernetu a SPI sběrnici. Při použití moderních mikroprocesorů obsahující řadič přímého přístupu do paměti by šlo realizovat rychlé přeposílání přijatých dat dále. Nelze to ale srovnávat s rychlostí specializovaných obvodů nebo hradlových polí. Navíc je zde další problém, a to nutnost naprogramovat celý standard. Vzhledem k složitosti by toto ale bylo značně neefektivní řešení. Někteří výrobci nabízejí již naprogramované knihovny použitelné pro určité rodiny mikroprocesorů. Výhodou je, že není třeba řešit kompatibilitu se standardem a lze využívat již připravené části kódu. Nevýhodou je ale cena takového řešení, která je obhájitelná až u větších výrobních sérií nebo u vysoce specializovaných aplikací [7].

Tabulka 3-1 Srovnání možností implementace podřízeného zařízení standardu EtherCAT

Typ implementace	Složitost fyzického návrhu	Složitost programu	Zavedené zpoždění	Možnost konfigurace	Cena řešení
Procesor s externí síťovou a linkovou vrstvou	Střední	Střední	Vysoké	Vysoká	Nízká
Hradlové pole s IP jádrem	Vysoká	Jednoduchá	Velmi nízké	Vysoká	Velmi vysoká
Zákaznický integrovaný obvod	Jednoduchá	Jednoduchá	Nízké	Nízká	Nízká

Jako „knihovnu“ (IP jádro) můžeme řešení komunikace přes EtherCAT využít při využití hradlového pole (FPGA). Toto řešení je výhodné, pokud je prioritou přesně deterministické časování, kdy díky diagnostickým nástrojům integrovaných v návrhových systémech pro hradlová pole můžeme zajistit přesné a minimální zpoždění. Výhodou je možnost odladění systému přesně na míru požadované aplikaci. To je vyváжено vysokou cenou vývojových prostředků a samotných hradlových polí.

Nejjednodušším řešením je využití zákaznických integrovaných obvodů (ASIC). Na trhu je větší množství těchto obvodů od různých výrobců. I firma Beckhoff, která vytvořila standard EtherCAT distribuuje vlastní specializované integrované obvody. Většinou se jedná o obvody vybavené Ethernetovou linkovou a u některých také fyzickou vrstvou. Mohou obsahovat jak přímo přístupné vstupně/výstupní porty nebo sběrnice pro připojení k mikroprocesoru. S oblibou je využíváno sériové rozhraní SPI a osmi nebo šestnácti bitové paralelní rozhraní. Výhodou těchto obvodů je jednoduchost jejich implementace. Například pro jednoduchou vstupně/výstupní kartu stačí kromě korektního návrhu zapojení pouze nahrát do zařízení jednoduchý konfigurační soubor. Odpadá tedy nutnost cokoliv programovat.

Pro řešení této práce bylo proto vybráno použití zákaznického obvodu. Vývoj vlastního integrovaného obvodu by vzhledem k předpokládanému počtu vyráběných kusů nebyl rentabilní. Navíc je na trhu k dispozici vícero již hotových řešení, které lze použít. Kritérii uvažovanými při výběru konkrétního typu byly zejména možnost připojení k standardní sběrnici (SPI, I2C, UART atd...), cena a složitost výsledného komunikačního modulu. Samozřejmě by bylo neekonomické využití obvodu, jehož cena by přesáhla cenu ostatních součástí a komponent. Důraz byl také kladen na možnosti návrhu plošného spoje, protože byla uvažována pouze dvouvrstvá deska plošného spoje. Po průzkumu trhu byly brány v potaz hlavně následující integrované obvody (viz tabulka 3-2).

Tabulka 3-2 Srovnání vybraných obvodů pro komunikaci pomocí EtherCATu

Obvod	Velikost DPRAM	Počet GPIO	Sběrnice pro mikroprocesor	Pouzdro	Připojení k síti	Cena [Kč]
ET1100	8 kB	32	Sériová/paralelní 8/16 bitová	BGA128	2-4 E-bus/MII	-
ET1200	1 kB	8-16	Sériová	QFN48	2-3 E-bu/MIIs	-
netX5	6 kB	16	SPI, paralelní 8/16/32 bitová	BGA201	2 MII	-
LAN9252	4 kB	16	SPI (Quad), paralelní 8/16 bitová	QFN64 TQFP64	2 Ethernet, 1 MII	277,-
TMC8460	16 kB	-	SPI	VFGG400	2 MII	1913,-

Pozn.: Ceny jsou uvedeny pro Farnell.com pro 1 kus

Jako první možností se jevílo využití integrovaných obvodů přímo od společnosti Beckhoff a to konkrétně ET1100 nebo menšího zástupce ET1200. Obvod ET1100 byl zavržen kvůli typu pouzdra, které znemožňuje použití dvouvrstvé desky plošného spoje. Jako dostačující se jevil obvod ET1200, jehož hlavní výhodou je miniaturní ale ručně osaditelné pouzdro i pro prototypovou výrobu. Nevýhodou ale je nutnost připojení externí linkové a fyzické vrstvy, která je zajištěna pomocí LVDS. Obvod netX5 byl zamítnut z důvodu velikého a složitého pouzdra a také z důvodu dostupnosti u dodavatelů (Farnell, TME nebo Mouser). Dostupný byl i obvod TMC8460 ale byl zamítnut z důvodu vysoké ceny.

Jako ideální se jevílo použití obvodu LAN9252 od firmy Microchip [8]. Obsahuje 16 konfigurovatelných vstupně/výstupní pinů, možnost připojení mikroprocesoru po sériové sběrnici SPI nebo pomocí 8 nebo 16 bitové paralelní sběrnice. Navíc jsou vyvedeny piny zajišťující synchronizaci a díky nimž lze u připojeného mikroprocesoru vyvolávat přerušeni. Také pouzdro vyhovovalo podmínce pro použití na dvouvrstvé DPS – pro účely testování byla zvolena varianta pouzdra TQFP64 umožňující zapájení mikropájkou bez nutnosti použít horkovzdušnou stanici. Navíc je uživateli k dispozici 4 kB adresovatelné DPRAM. Velice důležitým parametrem byla také dostupnost u dodavatelů a cena.

3.2 Řízení krokového motoru

Vzhledem k požadovanému použití ve víceosém pozičním systému bylo zapotřebí při výběru možného řešení tyto skutečnosti:

- Typ a zapojení použitých krokových motorů
- Velikost napájecího napětí
- Výkonové dimenzování pro použití v různých typech pozičních systémů
- Dosažitelnou přesnost a rychlost otáčení
- Možnosti řízení
- Složitost konstrukce
- Výslednou cenu

První dva požadavky vyplynuly z minulých ověřených konstrukcí pozičních systémů. Napájecí napětí celého systému bylo voleno jako stejnosměrných 24 V. Motory byly použity od různých výrobců s následujícími parametry:

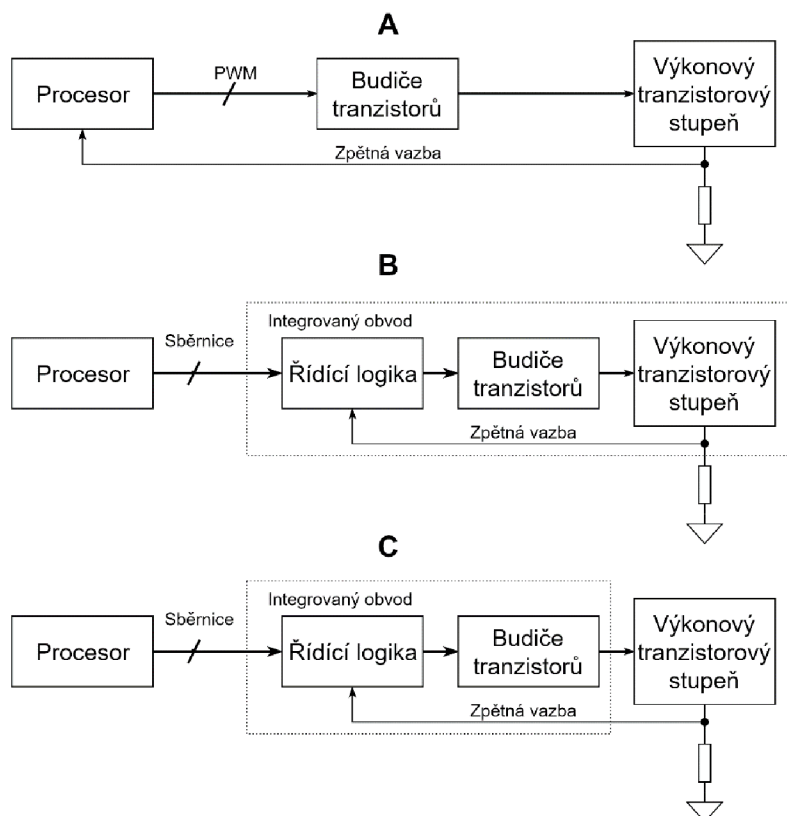
Tabulka 3-3 Parametry použitých krokových motorů

Výrobce	Typ motoru	Statický moment [Nm]	Jmenovitý proud při paralelním zapojení [A]	Indukčnost [mH]	Odpor [Ω]
Microcon	SX17-0905	0,6	1,77	3,2	2
Microcon	SC23-1414	1,4	2,8	2,8	0,85
JUGETEK	23HS4404-K11	1,3	3	1,6	0,55

Výkonové dimenzování tedy bylo přizpůsobeno výběru použitých motorů. Pro zajištění dostatečné výkonové rezervy pro případné silnější motory do budoucna byl zvolen trvalý proud vinutím alespoň 5 A. Zároveň bylo zapotřebí dodržení dostatečné jemnosti pohybu. Podmínkou tedy bylo využití mikrokrokování. Vzhledem ke konstrukci pozičního systému a ke zrychlení odezvy byla důležitým požadavkem také dosažitelná rychlost otáčení. Vzhledem k paralelnímu zapojení vinutí motorů byl předpoklad, že řídicí obvod nebude limitovat parametry motoru.

Požadavek na možnosti řízení zcela jistě koresponduje s požadavky na složitost celého zařízení a taktéž na výslednou cenu. K řešení řízení výkonového stupně bylo tedy možno přistupovat následujícími typologiemi (obrázek 3-2):

- Mikroprocesor řídicí výkonové H můstky přes budiče tranzistorů (A)
- Řídicí integrovaný obvod obsahující výkonové H můstky (B)
- Řídicí integrovaný obvod obsahující budiče tranzistorů (C)



Obrázek 3-2 Možnosti zapojení řízení krokového motoru

První řešení představuje obvodově nejnáročnější zapojení. Sice v návrhu je uvažováno využití mikroprocesoru pro komunikaci s integrovaným obvodem starajícím se o komunikaci po EtherCATu, a využití by představovalo ušetření místa na DPS a využití plného potenciálu mikroprocesoru, bylo toto řešení zamítnuto. Plná kontrola nad procesem řízení krokového motoru nepředstavovala až takový přínos vzhledem k nutnosti naprogramování kompletní ovládací rutiny. Navíc by bylo zapotřebí zajistit kvalitní sepnutí tranzistorů buď pomocí pomocných obvodů nebo využitím patřičných integrovaných obvodů.

Lákavou možností bylo využití integrovaných obvodů obsahujících řídicí logiku i výkonový stupeň. Vyhnuli bychom se tedy složitému návrhu, jak fyzického rozložení na DPS, tak i zdlouhavému programování obsluhy motoru. Většina řídicích obvodů totiž umí řešit nejenom samotnou hardwarovou vrstvu (buzení tranzistorů, zajištění deadtime a ochrany proti nadproudu, přehřátí atd.), ale umožňuje také funkce „vyšší“ vrstvy jako například sadu příkazů, zjednodušujících ovládání motoru. Řadič se tedy umí sám postarat o otočení motoru o určený počet otáček, zajistit rozběhovou a doběhovou křivku anebo přepínat mezi mikrokrokováním a celými kroky pro optimální chod. Hlavní nevýhodou tohoto řešení je ale integrovaný výkonový stupeň, který pro naši není dostatečně výkonově dimenzován. Setkáme se i s obvody slibující vysoké spínací proudy v miniaturních pouzdrech. Většinou ale narazíme na schopnost takového pouzdra odvádět ztrátové teplo. Většina takových součástek totiž jsou vyrobeny technologií

povrchové montáže a jejich chlazení je zajištěno větší ploškou na spodní straně pouzdra, která bývá připájena k DPS. Toto řešení je vhodné při menších ztrátových výkonech maximálně v řádu jednotek Wattů. I tak tyto součástky jsou namáhány vysokou teplotou. Obvykle nepomůže ani přidání chladiče díky vysokému tepelnému odporu mezi chladičem a čipem.

Tento problém lze vyřešit separováním řídicího obvodu a výkonového stupně (obrázek 3-2 C). Získáme tedy výhody jednoduchého řízení a jednoduchého zapojení s možností ovlivnění parametrů výkonového stupně za cenu pokrytí větší plochy DPS. Navíc ovlivněním rozmístění výkonových tranzistorů můžeme zajistit montáž chladiče, nebo i při výběru kvalitních součástek i od použití chladiče upustit. Vybrán byl tedy tento princip zapojení a byla zpracována tabulka integrovaných obvodů zajišťujících vybrané řešení.

Tabulka 3-4 Srovnání vybraných obvodů pro řízení výkonového stupně

Výrobce	Typ	Počet mikrokroků	Řídící sběrnice	Pouzdro	Cena [Kč]
Texas Instruments	DRV8711	256	SPI	HTSSOP38	185,-
STMicroelectronics	L6482	16	SPI	HTSSOP38	161,-
ON Semiconductor	AMIS -30422	128	SPI	QFN48	67,-*

* - při množství 2500ks – ostatní při ceně za 1 kus na Farnell.com

Vzhledem k ceně obvodu AMIS – 30422 je tento obvod jevil jako jasná volba, ovšem je třeba vzít v potaz minimální objednávací množství 2500 kusů. Na první pohled se obvody DRV8711 a L6482 jeví jako parametrově obdobné až na výrazně menší počet mikrokroků obvodu L6482 [3]. Vzhledem k použití, kdy jsou vyžadovány především rychlé změny pozice a vysoká rychlost otáček je výhodnější použití proudového řízení krokového motoru. Tuto podmínku splňují oba vybrané obvody. Konečným rozhodujícím prvkem byla možnost využít řídicí kit STEVAL-PCC009V2 umožňující ovládání výkonového modulu pomocí programu v počítači. Navíc je výrobcem dodávaná knihovna zrychlující vývoj ovladače pro zvolený mikroprocesor.

Výhodou tohoto obvodu je minimální počet externích součástek pro správnou funkci, velký počet konfigurovatelných ochranných, možnost nastavitelných akceleračních i deceleračních profilů a konfigurovatelné budiče tranzistorů. Navíc je možné při nižších rychlostech využívat výhod mikrokroků a při překročení zadaných otáček přejít na krokování po celých krocích. Obvod navíc obsahuje pokročilé možnosti jako počítadlo pozice s nastavitelnou značkou, kdy pomocí jednoho příkazu lze dostat motor například do výchozí pozice. Dalšími příkazy jsou například pojezd určitými otáčkami nebo možnost okamžitého zastavení nebo zastavení po decelerační křivce. Samozřejmostí je nastavení omezení proudu při akceleraci, deceleraci, pohybu i stabilní poloze a diagnostiku zjednodušují vlnky popisující aktuální stav obvodu.

3.3 Výběr řídicího mikroprocesoru

Vzhledem k tomu, že komunikaci po EtherCATu i ovládání výkonové části obstarávají k tomu určené obvody, naskytla se otázka, zda je vůbec nutné využívat dalšího obvodu navíc, když oba obvody komunikují po stejné sběrnici (SPI). Pro zodpovězení této otázky byly navrženy testovací moduly, a byla odzkoušena komunikace s řadičem krokového motoru i s EtherCAT komunikačním modulem. Bylo zjištěno, že použití mikroprocesoru bude nezbytné z důvodu principu komunikace po SPI sběrnici (Master-Slave). Jak řadič krokového motoru, tak komunikační obvod totiž nemohou pracovat jako nadřazené (Master). Použitý procesor tedy bude zastávat funkci překladače dat z komunikačního modulu do příkazů pro řadič krokového modulu.

V průběhu programování a testování prototypů se navíc naskytla otázka použití jiných komunikačních sběrnic pro řízení pozičního systému. Díky vysoké ceně řešení modulu s EtherCAT komunikací bylo vhodné vytvořit také nízkonákladovou variantu, která by dostačovala do zařízení nevyžadujících tak přísné požadavky na synchronizaci. Zároveň byl požadavek na stejný řídicí mikroprocesor pro všechny varianty komunikačních modulů pro zjednodušení a do jisté míry také přenositelnost obslužného kódu. Protože drtivá většina zařízení zadávající firmy je řízena pomocí počítače, padla volba na komunikaci pomocí rozhraní Ethernet. Toto řešení umožňuje eliminovat dodatečné převodníky z jiných sběrnic (USB, RS232 nebo RS485).

Vznikla tedy možnost využít mikroprocesor obsahující Ethernetovou vrstvu (většinou jenom linkovou) s využitím levných externích čipů zajišťujících vrstvu fyzickou. Ty pro komunikaci s mikroprocesorem využívají rozhraní MII (Media-Independent Interface – rozhraní nezávislé na médiu) nebo jeho redukovanou obdobu RMII (Reduced Media-Independent Interface). Pro úsporu pinů mikroprocesoru, a z toho plynoucí menší a levnější pouzdro a jednodušší návrh desky plošného spoje, bylo zvoleno rozhraní RMII [14].

Po uvážení všech výše zmíněných poznatků byly stanoveny požadavky pro výběr konkrétního typu:

- Dvě nezávislé SPI periferie
- Integrovaná Ethernetová linková vrstva
- Dostatečný počet linek externího přerušení
- Dostatečná paměť a rychlost
- Malé pouzdro
- Nízká cena

Vzhledem k tomu, že STMicroelectronics poskytuje k integrovanému obvodu L6482 knihovnu pro řízení a jejich procesory mají rozšířenou podporu v oblasti vývojových kitů

a ukázkových příkladů, byl výběr zúžen na mikroprocesory tohoto výrobce. V široké škále procesorů výrobce není lehké se zorientovat, a proto byl vydán program STM32CUBEMX [9], díky němuž je možné vybrat konkrétní procesor podle požadovaných periférií a jiných vlastností (viz obrázek 3.3). Navíc obsahuje konfigurátor periférií zvoleného procesoru, možnost nastavení taktování a přehled využitých pinů s následným vygenerováním projektu pro různá vývojová prostředí. Příjemným bonusem je také simulace výdrže na baterii při nastavených perifériích nebo úsporných módech.

* Part No	Reference	Unit Price for 10kU (US\$)	Package	Flash	RAM	IO	Freq.
STM32F107R8	STM32F107R8Tx	3.049	LQFP64	128 kBytes	64 kBytes	51	72 MHz
STM32F107VB	STM32F107VBTx	3.381	LQFP100	128 kBytes	64 kBytes	82	72 MHz
STM32F107RC	STM32F107RCTx	3.459	LQFP64	256 kBytes	64 kBytes	51	72 MHz
STM32F107VC	STM32F107VCHx	3.748	LFPGA100	256 kBytes	64 kBytes	82	72 MHz
STM32F107VCT	STM32F107VCTx	3.748	LQFP100	256 kBytes	64 kBytes	82	72 MHz
STM32F207VC	STM32F207VCTx	4.559	LQFP100	256 kBytes	128 kBytes	82	120 MHz
STM32F207VE	STM32F207VETx	5.114	LQFP100	512 kBytes	128 kBytes	82	120 MHz
STM32F207ZC	STM32F207ZCTx	5.276	LQFP144	256 kBytes	128 kBytes	114	120 MHz
STM32F217VE	STM32F217VETx	5.461	LQFP100	512 kBytes	128 kBytes	82	120 MHz
STM32F207IC	STM32F207ICTx	5.508	UFPGA176	256 kBytes	128 kBytes	140	120 MHz
STM32F207IC	STM32F207ICTx	5.508	LQFP176	256 kBytes	128 kBytes	140	120 MHz

Obrázek 3-3 Mikroprocesory navržené programem STM32CUBEMX

Na obrázku 3.3 lze vidět mikroprocesory splňující výše definované požadavky na periférie, pouzdro a cenu. Po ověření dostupnosti a ceny byla zvolena varianta STM32F107RC [15]. Jedná se o mikroprocesor s ARM jádrem Cortex M3 z řady STM32F1 Mainstream Connectivity Line. Jde o řadu zaměřenou především na široké možnosti komunikačních rozhraní nabízející dostatečný výkon a spoustu různých periférií. Zmíňme alespoň dva 12bitové AD převodníky a jeden DA převodník, dvě sběrnice I2C, tři SPI, pět UART, 7 časovačů s pokročilými funkcemi, obvod reálného času a jednotku přímého přístupu do paměti. Jádro dokáže pracovat na taktu 72 MHz a disponuje 64 kB paměti RAM a 256 KB paměti FLASH. To vše v pouzdře LQFP64.

3.4 Napájecí obvody

Z použitých součástek vyplynuly požadavky na napájecí napětí a to 3,3 V. Vzhledem k hlavnímu napájecímu napětí 24 V bylo třeba určit přibližné proudové odběry jednotlivých bloků. Při tvorbě tabulky 2.5 bylo vycházeno z datových listů zvolených součástek a v úvahu byly brány maximální možné odběry při mezních podmínkách. Splněním těchto podmínek s dostatečnou rezervou bude zajištěna dostatečná spolehlivost.

Tabulka 3-5 Předpokládané maximální proudové odběry součástek

Použitý obvod	Maximální odběr [mA]
LAN9252	603
L6482	200
STM32F107RC	150
SUMA	953

Z tabulky je patrné, že největším odběratelem je obvod pro komunikaci po EtherCATu. Je ale nutno dodat, že se jedná o maximální možný špičkový odběr při vysílání. Navíc tento obvod umožňuje pracovat ve třech úsporných módech, čímž se spotřeba dostatečně sníží. Navíc odesílání neprobíhá neustále, tudíž střední hodnota odběru bude zcela jistě menší. Odběr obvodu L6482 je dosti závislý na nastavení budičů tranzistorů. V našem případě budou využívány vyšší budičí proudy, a proto je předpoklad odběru ve stovkách miliampér. Hodnota u odběru řídicího mikroprocesor je značně nadhodnocená a vzhledem k nevyužití všech vnitřních periférií (zakázáním taktovacího signálu do periférií lze uspořit množství energie) lze tuto hodnotu brát jako zahrnutí všech ostatních podpůrných a signalizačních obvodů.

Napájecí zdroj tedy bude dimenzován na proud 1 A. Vzhledem k velikému rozdílu napájecích hladin a vysokému odebíranému proudu bylo zamítnuto využití lineárního stabilizátoru. Výkonovou ztrátu můžeme zjednodušeně vyjádřit jako součin předpokládaného odebíraného proudu a rozdílu napájecích hladin:

$$P_D = (V_{CC} - V_{DD}) \cdot I_{CELK} = (24 - 3,3) \cdot 1 = 20,7 \text{ W}, \quad (1.1)$$

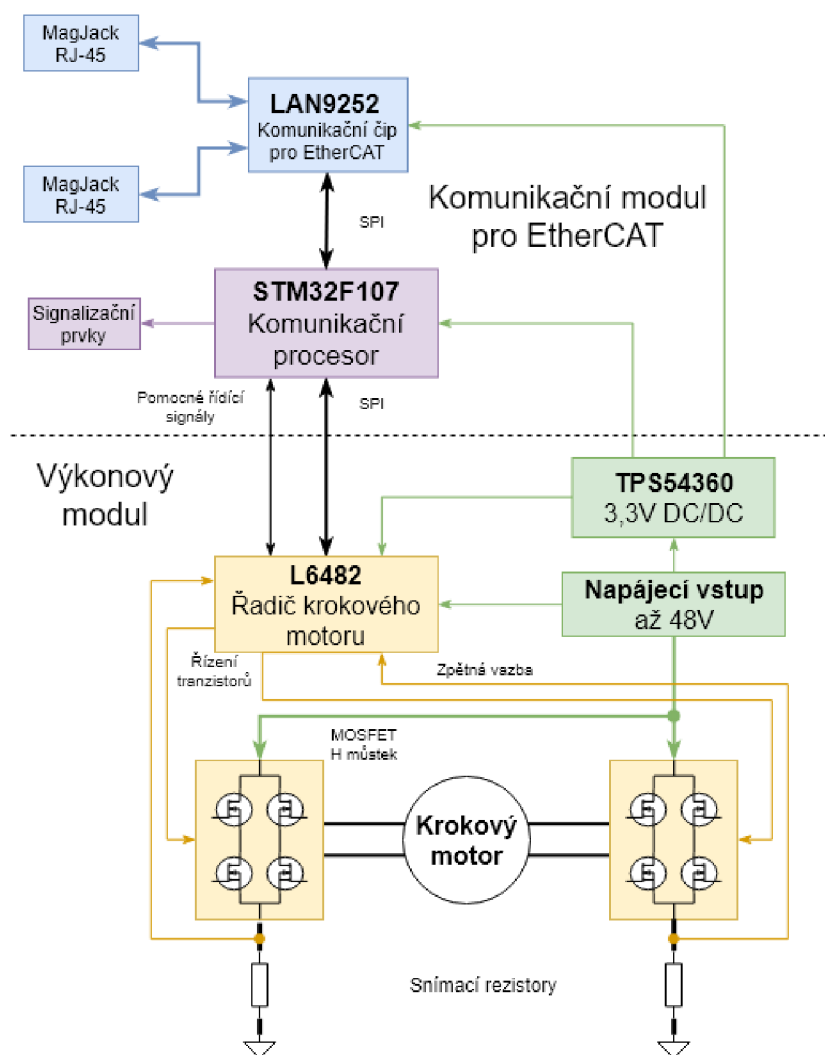
kde P_D je celkový ztrátový výkon, V_{CC} a V_{DD} jsou napájecí hladiny 24 V a 3,3 V a I_{CELK} je celkový maximální odběr. Využití lineárního stabilizátoru je tedy vysoce neefektivní. Zvolena byla tedy spínaná architektura a jelikož výstupní napětí je menší než napětí vstupní, tak jde o zapojení snižujícího měniče (step-down). Jako nejjednodušší možnost se nabízí použití měničů MC34063 apod. Ty ale vzhledem velkému výstupnímu proudu použity nebudou. Navíc je jejich spínací frekvence na dnešní dobu malá (desítky kHz) a tudíž by součástky LC filtru zabíraly příliš mnoho místa.

Zvolen byl proto měnič TPS54360 [14] od společnosti Texas Instruments. Jeho hlavními přednostmi je nastavitelná spínací frekvence až 2,5 MHz, velký vstupní rozsah napětí (až 60 V) a spínací proud až 3,5 A.

4. NÁVRH ZAPOJENÍ

Tato kapitola je zaměřena na návrh obvodového řešení s využitím komponent vybraných v kapitole předchozí. Je zde představeno blokové schéma výsledného zařízení s rozdělením na jednotlivé moduly starající se o konkrétní funkce. Také obsahuje popis funkčních částí modulů.

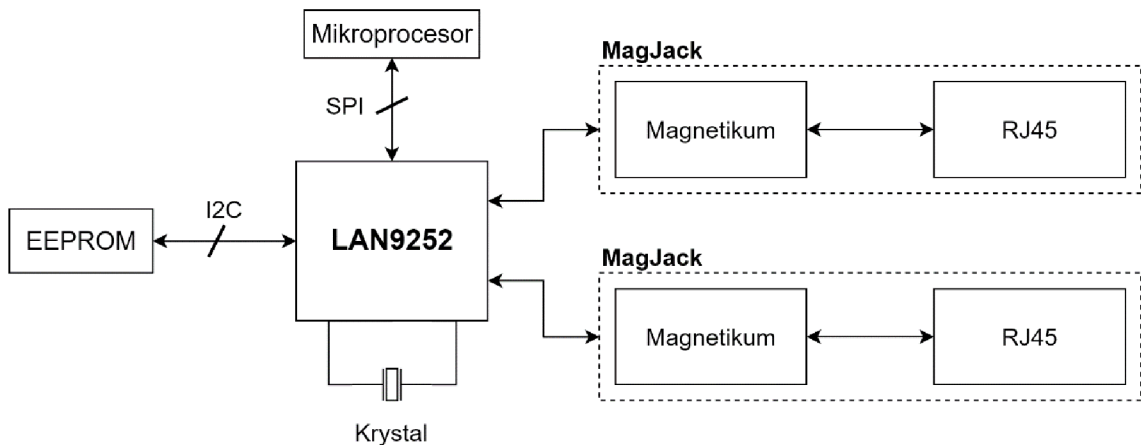
V předchozí kapitole bylo nastíněno obecné blokové schéma, z něhož se vycházelo při výběru komponent. Nyní už tedy lze blokové schéma konkretizovat viz. obrázek 4-1. Jedná se o variantu s EtherCATovým komunikačním modulem. Rozdělení na moduly je na obrázku naznačeno přerušovanou čarou. Komunikační modul pro Ethernet je v podstatě totožný – liší se pouze komunikačním rozhraním mezi mikroprocesorem a obvodem fyzické vrstvy Ethernetu a obsahuje pouze jeden MagJack konektor RJ45.



Obrázek 4-1 Blokové schéma zařízení doplněné o vybrané obvody a propojení s komunikačním modulem pro EtherCAT

4.1 Zapojení komunikačního obvodu LAN9252

Komunikační obvod LAN9252 je integrovaný obvod podřízeného zařízení na EtherCATu obsahující dva porty na Ethernetové fyzické vrstvě. Principiální propojení jednotlivých bloků je patrné z obrázku 4-2.



Obrázek 4-2 Blokové schéma zapojení obvodu LAN9252

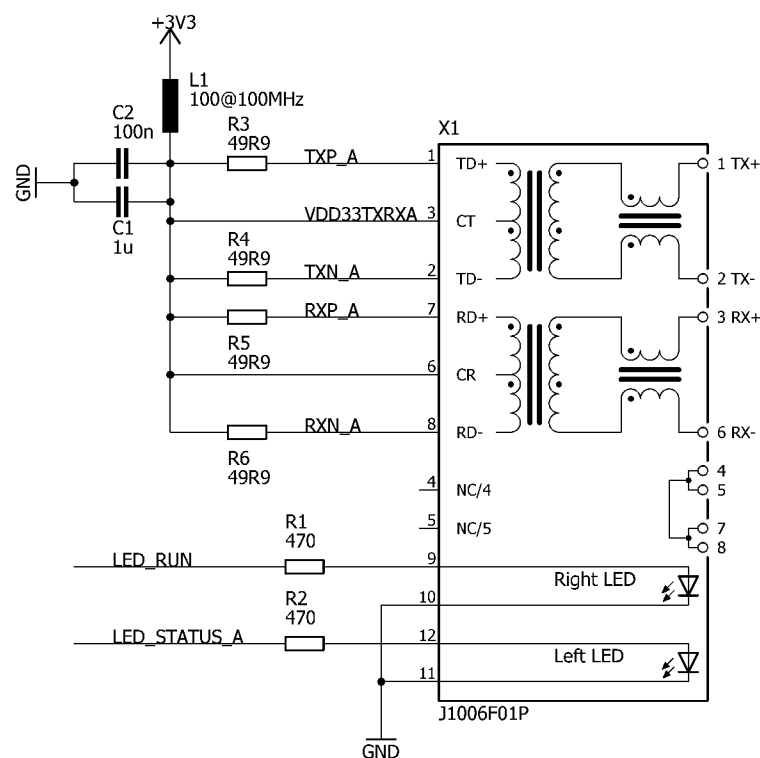
Veškerá konfigurace obvodu je ukládána do vnější EEPROM paměti pomocí sběrnice I2C. Nastavené lze provádět pomocí programu EtherCAT Slave Configurator dodávaného společností Beckhoff za využitím síťové karty na PC simulující chování EtherCAT řídicího zařízení (Master). Po nastavení požadovaných parametrů (význam, velikost a obsazení registrů, synchronizace atd.) je možné konfigurační soubor pomocí EtherCAT rozhraní zapsat do paměti EEPROM. Díky tomu obvod po korektní startovací sekvenci načte konfigurační data a může se chovat dle zadaných požadavků.

Jelikož jádro obvodu pracuje na napájecím napětí 1,2 V, jsou v zařízení obsaženy regulátory snižující napětí z vnějších 3,3 V. Vzhledem k vysokým přenosovým rychlostem na SPI sběrnici a na Ethernetovém rozhraní je zapotřebí zajistit, aby se rušení generované těmito přenosy nepromítlo do napájecí větve, kde by mohlo dojít k zarušení ostatních sběrnic. Proto jsou v těsné blízkosti pouzdra zapojeny keramické blokovací kondenzátory s kvalitním dielektrikem v kombinaci s feritovými perlami. Dohromady se jedná o zapojení LC filtru typu dolní propust omezující pronikání vysokofrekvenčního rušení.

Pro taktování jádra čipu je využitý vnější krystalový oscilátor s frekvencí 25 MHz. Díky vnitřnímu obvodu fázového závěsu (PLL) je možné využívat i krystalové oscilátory s menší přesností (maximálně však s odchylkou ± 40 ppm).

Vyvedeny jsou tedy diferenciální páry pro vysílání i příjem (plně duplexní přenos) pro oba porty. Protože norma Ethernetu zavádí galvanické oddělení komunikačního média pomocí transformátorů, je zapotřebí využít buď k tomu určených miniaturních transformátorů (často se vyskytující v pouzdrech podobných běžným integrovaným

obvodům) nebo využít RJ-45 konektorů s integrovaným transformátorovým obvodem takzvaných MagJack konektorů. Signál z RJ-45 konektoru tedy putuje na první transformátor, díky kterému je potlačeno souhlasné rušení. Další transformátor už se stará o samotné galvanické oddělení. Protože je ale signál z obvodů zajišťujících fyzickou vrstvu Ethernetu veden jako signál diferenciální, je na sekundární straně vinutí s vyvedeným středem. Na střed je připojeno napájecí napětí 3,3 V přes patřičnou filtraci. Rezistory R3 až R6 zajišťují impedanční přizpůsobení diferenciálního vedení k charakteristické impedanci 100 Ω. Běžnou praxí je taktéž, že obsahují indikační LED pro rychlou optickou signalizaci stavu spojení. Pro omezení proudu indikačními diodami jsou využity rezistory R1 a R2 – viz obrázek 4-3.



Obrázek 4-3 Principiální zapojení Ethernetových portů s MagJack konektorem

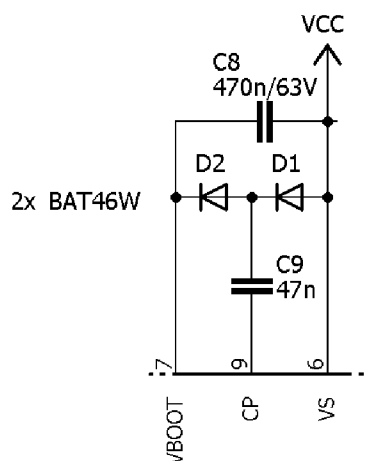
Jak již bylo zmíněno, pro komunikaci s řídicím procesorem je využita sběrnice SPI pracující na principu Master-Slave. Jedná se o sériovou sběrnici využívající adresování pomocí speciálního vodiče (CS – chip select). Pro komunikaci jsou vyhrazeny vodiče MOSI a MISO (Master Output Slave Input a Master Input Slave Output) pro plně duplexní přenos řízený taktovacím vodičem SCLK. Pro zajištění synchronizace jsou obsaženy další pomocné signály jako IRQ vyvolávající přerušování řídicího procesoru a signály SYNC0 a SYNC1 indikující výskyt časové události. Tyto signály budou připojeny na externí přerušování řídicího procesoru pro zajištění vyvolání přerušování zpracovávajícího programu.

4.2 Zapojení výkonového modulu s obvodem L6482

Zapojení řadiče krokového motoru L6482 díky integraci většiny potřebných součástek do těla čipu nevyžaduje mnoho dalších součástek. Obvodové řešení řadiče krokového motoru tedy můžeme rozdělit na napájecí, komunikační a výkonovou část.

Pro napájení obvodu je potřeba pouze hlavní napájecí napětí, z kterého bude napájen i krokový motor. Díky dvěma vnitřním napěťovým regulátorům se řídicí obvod postará o vytvoření napěťových úrovní pro řízení spínání MOSFET tranzistorů a druhý stabilizátor může být využit pro napájení řídicího procesoru nebo jiných dalších obvodů (výstupní napětí je rovno 3,3V). Vzhledem k velikému proudovému odběru komunikačního obvodu ale nebude druhý stabilizátor využit. V těsné blízkosti napájecích pinů jsou opět umístěny blokovací keramické kondenzátory s jedním filtračním elektrolytickým kondenzátorem.

Zajímavým zapojením je obvod nábojové pumpy, díky níž si řídicí obvod dokáže vyrobit vyšší napětí pro sepnutí horního tranzistoru. Toto zapojení se skládá z dvojice diod v jednom pouzdru a dvou keramických kondenzátorů viz obrázek 4-4. Principem je periodické přepínání pinu CP mezi 0 a 24 V realizované tranzistorovým polomostem v obvodu. Díky tomu při napětí 0 V na pinu CP dochází skrze levou část diody D1 k nabíjení kondenzátoru C17. Při přepnutí pinu CP na úroveň 24 V náboj nashromážděný v kondenzátoru C17 přeteče do kondenzátoru C18 skrze pravou propustně polarizovanou část diody D1. Na kondenzátoru C18 tedy dojde k zvýšení napětí nad úroveň napájecího napětí 24 V. Napětí na pinu VBOOT je poté využito ke spínání horních tranzistorů ve výkonové části.



Obrázek 4-4 Zapojení obvodu nábojové pumpy

Pro komunikaci s řídicím procesorem je opět využita sběrnice SPI. Díky ní je možné konfigurovat parametry řadiče a také posílat příkazy. Navíc jsou vyvedeny pomocné signály popisující stav zařízení (!BUSY), nastalou událost (!FLAG) nebo možnost nouzového zastavení (SW) či zjednodušeného řízení pomocí taktovacího signálu (STCK). Samotné jádro pro svůj chod vyžaduje přítomnost hodinového signálu. Ten však nemusí

být nutně generován řídicím procesorem nebo tvořen za využití krystalového oscilátoru – ve struktuře obvodu je interní 16 MHz oscilátor. Navíc je možné zapnout výstup hodinového signálu například pro synchronizaci s jiným zařízením.

Díky integrovanému budiči výkonových tranzistorů je připojení vnějších h můstků z unipolárních tranzistorů velice jednoduché. Neobešlo se však bez nezbytných částí zaručujících bezpečný a bezproblémový chod. Nejprve byly definovány požadavky na unipolární výkonové tranzistory s N kanálem. Je třeba zajistit, aby:

- trvalý tranzistor (I_D) byl větší než uvažovaný proud motorem,
- maximální povolené napětí mezi elektrodou drain a source (V_{DSMAX}) bylo alespoň 2x větší než napájecí napětí,
- odpor v sepnutém stavu (R_{DSON}) byl řádu jednotek miliohmů pro minimalizaci statických ztrát,
- celkový náboj řídicí elektrody gate tranzistoru byl minimální kvůli rychlému spínání a minimálním dynamickým ztrátám,
- pouzdro tranzistoru umožňovalo dobrý odvod ztrátového tepla a případně i montáž chladiče.

Po průzkumu trhu bylo patrné, že splnit napěťové a proudové dimenzování nebude problém. Většina vybraných tranzistorů s odporem v sepnutém stavu pod 10 mΩ byla dodávána až na výjimky v pouzdře TO263. Konkrétně byl vybrán typ IPD048N06L3 vyráběný společností Infineon. Jeho základní parametry můžeme vidět v tabulce 4-2.

Tabulka 4-1 Základní parametry tranzistoru IPD048N06L3

Trvalý proud I _D	90 A
Maximální napětí V _{DS}	60 V
Odpor v sepnutém stavu R _{DSON}	3,7 mΩ
Prahové napětí V _{GS}	1,7 V
Celkový náboj hradla C _G	37 nC

Vzhledem k programovatelnému budiči tranzistorů v obvodu L6482 je možné nastavit velikost proudu dodávaného do elektrody gate tranzistoru při požadavku na sepnutí. Jelikož náboj můžeme vyjádřit jako:

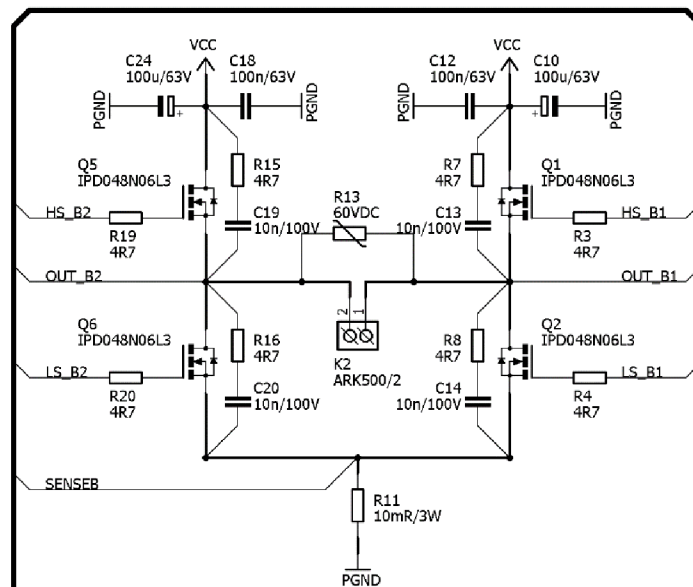
$$Q = I \cdot t, \quad [C] \quad (3.1)$$

kde I je elektrický proud a t je čas, můžeme vyjádřit dobu potřebnou k sepnutí tranzistoru. Platí tedy, že pro minimalizaci spínacích ztrát je potřebné minimalizovat přechodnou dobu mezi rozepnutým a sepnutým stavem. Toho lze u použitého obvodu

dosáhnout při použití maximálního dovoleného proudu budiče tranzistoru. Pro ochranu tranzistorů byly přidány ochranné omezující rezistory do série s elektrodou gate tranzistorů.

Jak už bylo zmíněno v předchozích kapitolách, elektricky ekvivalentním zapojením vinutí krokového motoru je sériová kombinace ideálního rezistoru a cívky. Problém s tímto zapojením nastává ve chvíli, kdy potřebujeme rozepnout spínací prvek. Dochází ke vzniku vysokonapěťových špiček, které mohou zničit spínací tranzistory. Pro utlumení těchto přechodových jevů je využito paralelně zapojených RC článků, které při rozeptnutí zátěže přeberou proud cívky a začnou se nabíjet. Sériové zapojení rezistoru, odrušovacího kondenzátoru a vinutí motoru představuje sériový rezonanční obvod. Díky tomu dochází k postupnému utlumování kmitů.

Vzhledem k tomu, že dochází k případům, že napěťové špičky dosahovaly vysokých hodnot a docházelo ke zničení spínacích výkonových tranzistorů, byl paralelně k vinutí motoru přidán varistor. Jeho funkcí je, že při zvýšení napětí přes danou hodnotu dojde k snížení odporu součástky. Při napěťových špičkách tedy dojde k vyzáření přebytečné energie ve formě tepla.



Obrázek 4-5 Zapojení H můstku s výkonovými tranzistory a ochranami

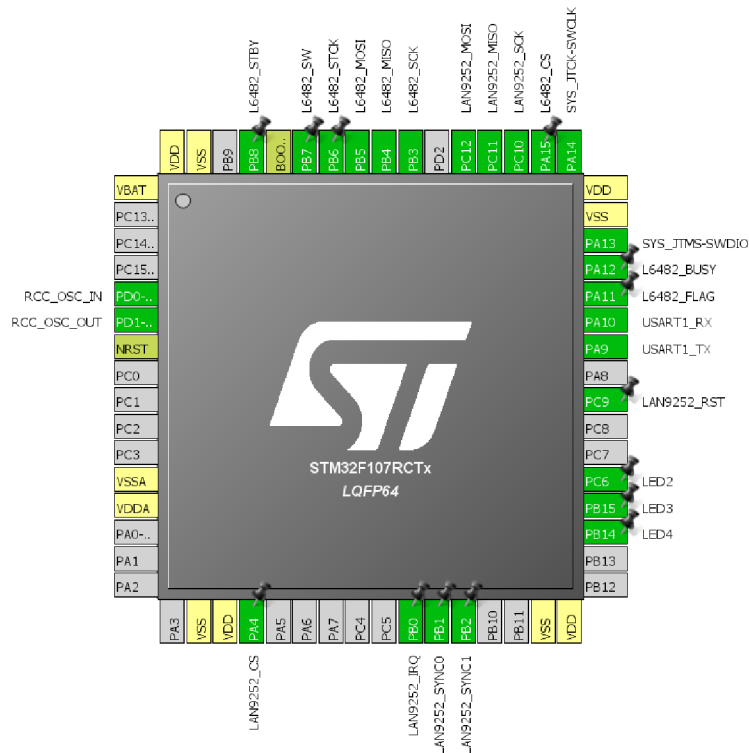
Jelikož se jedná o spínaný systém řízení, je třeba vzít v potaz i změny na napájecí větvi při okamžicích spínání můstku. V případě měkkého napěťového zdroje (s vyšším vnitřním odporem) dochází v okamžiku sepnutí tranzistorů k poklesu napětí na napájecí větvi a ke vzniku rušení. To je možné do určité míry eliminovat vhodným umístěním filtračních kondenzátorů, které v okamžik sepnutí poskytnou potřebný náboj. Na napájecí větvi tedy nedochází k tak strmým změnám napětí a produkované rušení je menší. Aby filtrační kondenzátory splnily svůj účel, je zapotřebí vybírat typy s nižším ekvivalentním odporem případně použít baterii více kondenzátorů zapojených paralelně.

Protože řadič L6482 využívá proudového řízení motoru, je využito snímacích rezistorů, na nichž je sledován úbytek úměrný proudu motorem. Zvolena byla konkrétně hodnota 10 mΩ aby nedocházelo k velkým tepelným ztrátám na rezistoru, a tedy k tepelnému namáhání a ohřívání okolních součástek.

4.3 Zapojení řídicího mikroprocesoru

Hlavní funkcí řídicího mikroprocesoru bude překlad přijatých zpráv na řídicí příkazy pro řadič krokového motoru. Z hlediska obvodového zapojení jde o katalogové zapojení využívající vnější krystalový oscilátor na frekvenci 8 MHz. Pro jednoduchost a přenositelnost kódu mezi jednotlivými komunikačními moduly bylo obvodové zapojení navrženo využívající stejné piny na obou modulech.

Oba moduly tedy sdílí stejné zapojení výše zmíněného krystalového oscilátoru, pomocných indikačních LED2 až LED4, programovací SWD konektor (piny SYS_JTCK-SWDIO a SYS_JTMS-SWDIO) a konektor s vyvedeným sériovým portem (USART1_TX a USART1_RX) pro usnadnění testování. Také pro propojení s výkonovým modulem pomocí pinové lišty jsou využity stejné piny i SPI periferie. Na obrázku 4-6 níže je vidět využití jednotlivých pinů mikroprocesoru STM32F107RC na komunikačním modulu s EtherCAT rozhraním.

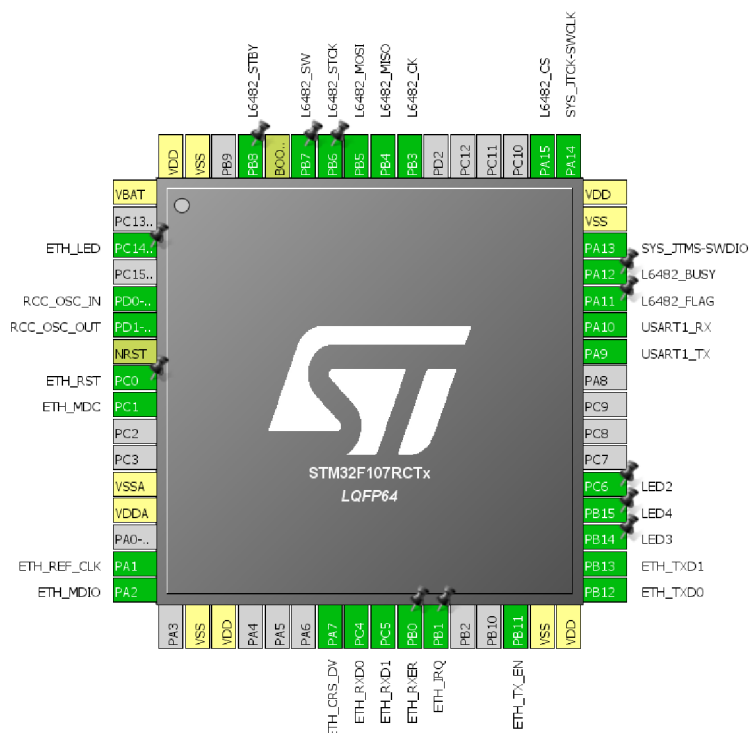


Obrázek 4-6 Využití pinů mikroprocesoru STM32F107RC na komunikačním modulu s EtherCAT rozhraním

Piny RCC_OSC_IN a RCC_OSC_OUT slouží k připojení externího krystalového oscilátoru. Komunikace s obvodem LAN9252 probíhá pomocí sběrnice SPI3. Využívá se jak plně duplexní komunikace (datové piny LAN9252_MOSI a LAN9252_MISO, taktovací LAN9252_SCLK a LAN9252_CS pro aktivaci komunikace) s využitím pomocných signálů pro aktivaci externího přerušení mikroprocesoru (piny LAN9252_IRQ, LAN9252_SYNC0 a LAN9252_SYNC1). Pro reset obvodu slouží pin LAN9252_RST.

Pro komunikaci s řadičem krokového motoru L6482 je vyhrazena periferie SPI1 taktěž pracující v plně duplexním módu (datové piny L6482_MOSI a L6482_MISO, taktovací L6482_SCLK a LAN9252_CS pro aktivaci komunikace). Pin L6482_STBY slouží k resetu řadiče. Protože lze řadič ovládat také pomocí krokovacích pulzů, je využit časovač TIM4, jehož první kanál je vyveden na pinu L6482_STCK. Pomocí pinu L6482_SW je možné simulovat událost jako například sepnutí koncového spínače. Aktivitu řadiče (například akcelerace a decelerace motoru anebo vykonávání příkazu) je možné sledovat na pinu L6482_BUSY. V případě, že dojde k vyvolání alarmu (například překročením maximálního proudu motoru, přehříváním řadiče nebo špatným příkazem) může se vyvolat externí přerušení mikroprocesoru díky pinu L6482_FLAG.

Oproti tomu pinů mikroprocesoru na modulu s rozhraním Ethernet (viz obrázek 4-7) je obsazeno mnohem více. To je zapříčiněno hlavně rozhraním RMII. I přesto, že se jedná o redukované rozhraní, zabírá celkem 13 pinů.

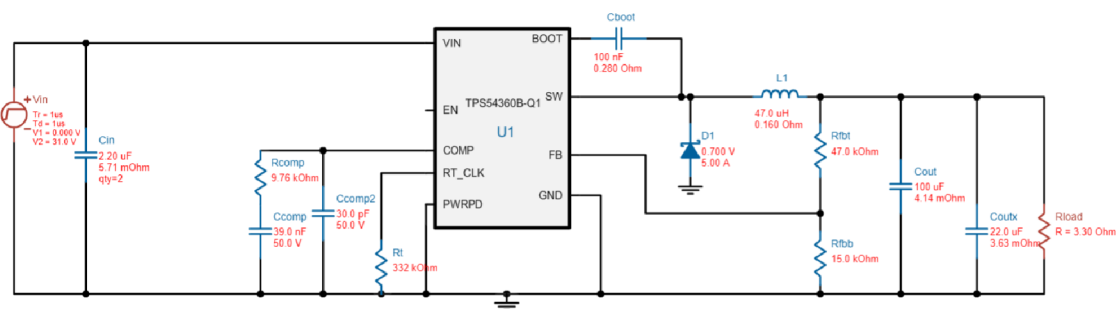


Obrázek 4-7 Využití pinů mikroprocesoru STM32F107RC na komunikačním modulu s Ethernet rozhraním

Pin ETH_LED slouží pouze k řízení druhé LED na RJ-45 konektoru a ETH_RST k resetu obvodu fyzické vrstvy. Ten využívá synchronizačního signálu ETH_REF_CLK s kmitočtem 25 MHz, indikačního ETH_CRS_DV signalizující přítomnost nosné, ETH_RXER indikující chybu příjmu a ETH_TX_EN pro povolení vysílání. Pro ovládání obvodu fyzické vrstvy Ethernetu jsou využity piny ETH_MDIO a ETH_MC představující jednosměrnou sériovou komunikaci. Pro samotný přenos dat jsou využity ETH_TXD0 a ETH_TXD1 pro vysílání a ETH_RXD0 a ETH_RXD1 pro příjem. Obvod také může zažádat mikroprocesor o přerušeni pomocí ETH_IRQ.

4.4 Zapojení snižujícího měniče s obvodem TPS54360

Pro vytvoření napájecí hladiny 3,3 V byl v předchozí kapitole vybrán obvod TPS54360. Návrh napájecího obvodu s tímto měničem je velice jednoduchý díky podpoře výrobce (Texas Instruments). Ten na svých internetových stránkách poskytuje nástroj WEBENCH Designer umožňující návrh zapojení podle zadaných požadavků. Na obrázku 4-8 je navrhnuté obvodové zapojení pomocí nástroje WEBENCH.

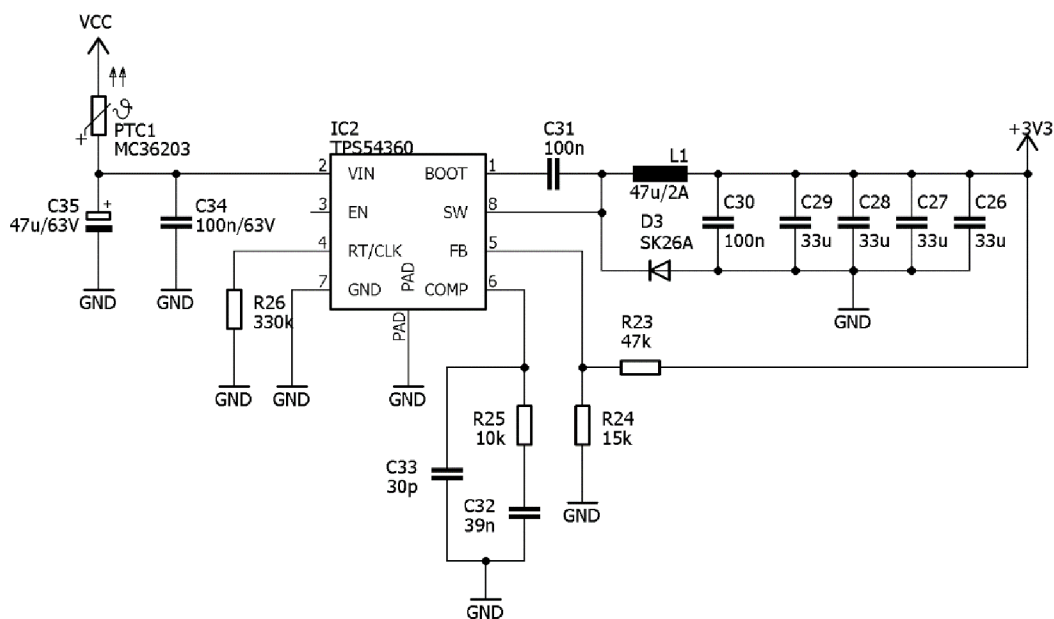


Obrázek 4-8 Zapojení snižujícího měniče z programu WEBENCH

Toto zapojení je vhodným odrazovým můstkem pro vlastní návrh. Jeho nevýhodou je časté používání nestandardních hodnot a typů součástek, což by při slepém nakopírování vedlo ke značnému zvýšení ceny napájecího obvodu. Například u pinu ENA není na první pohled patrné, zda není v simulaci uvažován nebo zda jde o záměrné nezapojení pinu. V datovém listu je uvedeno, že ve vnitřní struktuře je implementován proudový zdroj, a tedy při nezapojeném pinu ENA je obvod aktivní. Navíc bylo zadáno veliké rozpětí vstupního napětí (od 12 do 50 V), kdy simulace uvažuje pouze střední hodnotu. Při simulaci s předpokládanou nejčastěji využitou napájecí úrovní 24 V se výsledky lišily a bylo tedy nutné je korigovat. Předpokládaná spínací frekvence byla 300 kHz.

Pokud se podíváme na obrázek 4-9 obsahující obvodové zapojení měniče s reálnými součástkami, lze si na první pohled všimnout odlišností. Důležitým prvkem z hlediska ochrany je pozitivní termistor PTC1. Kdyby došlo ke zkratu a proražení snižujícího měniče dojde k omezení proudu. Oproti navrhovanému schématu je jako filtrační kondenzátor použit stejný typ, jaký je osazen i na výkonovém modulu. Sekunduje mu opět keramický blokovací kondenzátoru proti vysokofrekvenčnímu rušení. Protože

sníživací měnič z principu využívá horní spínač, je opět využito integrované nábojové pumpy v měniči zajišťující sepnutí tranzistoru. Jak dioda D3, tak i cívka L1 by měly být proudově dimenzovány alespoň na 2 A. Poté následuje baterie filtračních kondenzátorů z důvodu snížení ekvivalentního sériového odporu, a v důsledku tedy lepšímu pokrytí špičkových odběrů. Zpětná vazba je řešena pomocí odporového děliče s využitím součástek z řady E12.



Obrázek 4-9 Zapojení sníživacího měniče s reálnými součástkami

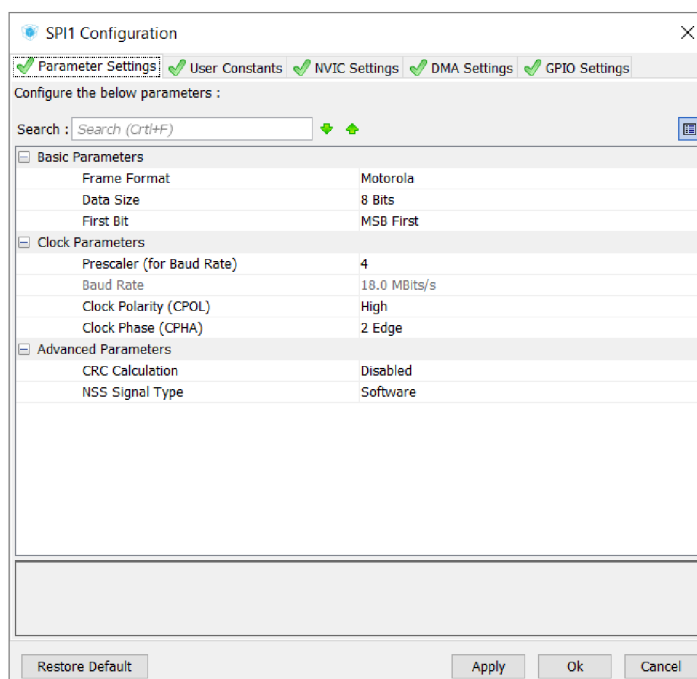
5. POPIS PROGRAMU MIKROPROCESORU

5.1 Konfigurace použitých periférií mikroprocesoru

Veškerá konfigurace periférií byla prováděna přes program STM32CUBEMX. Ten se postaral o korektní nastavení potřebných periférií a vygenerování projektu pro vývojové prostředí. Psaní kódu a odladění probíhalo ve vývojovém prostředí EmBitz jehož hlavními výhodami je jednoduchost, rychlost odezvy na uživatele a bezplatnost. Je také potřeba zmínit, že k tomu byly využity HAL (Hardware Abstraction Layer) knihovny umožňující jednoduchou přenositelnost kódu mezi jednotlivými produktovými řadami výrobce. To bylo prakticky ověřeno při testování prototypů a následné úpravě kódu pro finální moduly.

5.1.1 SPI sběrnice

SPI sběrnice je využita ke komunikaci s EtherCAT obvodem a řadičem krokového motoru. Využity jsou SPI periferie SPI1 a SPI3 v režimu správce komunikace (Master). Jejich funkce i registry jsou totožné. Jediným podstatným rozdílem je vnitřní připojení k taktovacím signálům. SPI1 bere taktovací signál z vnitřní sběrnice APB2 s maximální frekvencí až 72 MHz. Oproti tomu je SPI3 napojena na sběrnici APB1 s maximální frekvencí pouze 36 MHz. Hlavním rozdílem v nastavení bude tedy rozdílná předdělička pro dosažení stejné maximální propustnosti 18 Mbit/s. Nastavení lze vidět na obrázku 5-1 níže.



Obrázek 5-1 Nastavení periferie SPI1 v programu STM32CUBEMX

Komunikace po sběrnici probíhá v 8bitových slovech, kdy jako první bit je volen nejvíce významný bit (MSB). Dále je volena předdělička na hodnotu 4 pro dosažení požadované bitové rychlosti. Clock Polarity udává, v jaké logické hodnotě je taktovací signál při nečinnosti na sběrnici. V našem případě je volena logická jednička tedy možnost High. Možnost Clock Phase umožňuje zvolit hranu na niž budou přenášena data platná. Dle datových listů obou obvodů byla zvolena možnost druhé hrany (náběžné). Zbývají už pouze pokročilá nastavení a konkrétně ochrana pomocí cyklické redundantní kontroly (CRC), která není využita (Disabled) a možnost automatického řízení aktivačního signálu NSS Signal Type. Protože výběr provádíme v programu, je vybrána možnost Software.

Po vygenerování projektu dojde k vytvoření inicializačních funkcí pro každou nakonfigurovanou a povolenou periférii. Díky HAL knihovně je i ruční změna konfigurace rychlá a jednoduchá, protože není třeba znát přesný význam bitů v registrech. Konfigurace probíhá pomocí přiřazení předdefinovaných konstant do nadefinované struktury odpovídající typu periférie (v našem případě SPI). Výsledný kód tedy vypadá takto:

```
/* SPI1 init function */
static void MX_SPI1_Init(void) {

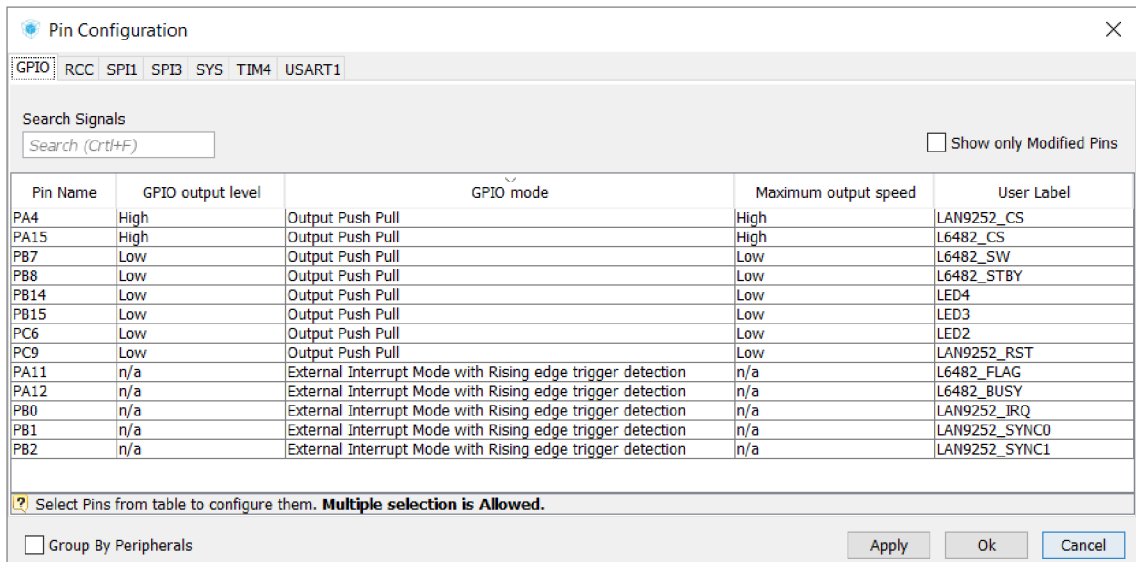
    /* SPI1 parameter configuration*/
    hspi1.Instance = SPI1;
    hspi1.Init.Mode = SPI_MODE_MASTER;
    hspi1.Init.Direction = SPI_DIRECTION_2LINES;
    hspi1.Init.DataSize = SPI_DATASIZE_8BIT;
    hspi1.Init.CLKPolarity = SPI_POLARITY_HIGH;
    hspi1.Init.CLKPhase = SPI_PHASE_2EDGE;
    hspi1.Init.NSS = SPI_NSS_SOFT;
    hspi1.Init.BaudRatePrescaler = SPI_BAUDRATEPRESCALER_4;
    hspi1.Init.FirstBit = SPI_FIRSTBIT_MSB;
    hspi1.Init.TIMode = SPI_TIMODE_DISABLE;
    hspi1.Init.CRCCalculation = SPI_CRCCALCULATION_DISABLE;
    hspi1.Init.CRCPolynomial = 10;

    if (HAL_SPI_Init(&hspi1) != HAL_OK) {
        _Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
    }
}
```

Z vygenerovaného kódu je patrné, že dochází k nastavení dalších parametrů, které nebylo možné nastavit a jejichž význam při daném použití nemá smysl (nastavení polynomu CRC). Navíc je testována úspěšnost nastavení a případně je vyvolána chybová funkce.

5.1.2 Vstupní a výstupní piny

Všechny ostatní piny, které jsou použity a současně nejsou využívány jinou periferií je nutné nakonfigurovat podle smyslu jejich použití. Přehled všech použitých pinů na modulu pro komunikaci přes EtherCAT s jejich nastavením je na obrázku 5-2.



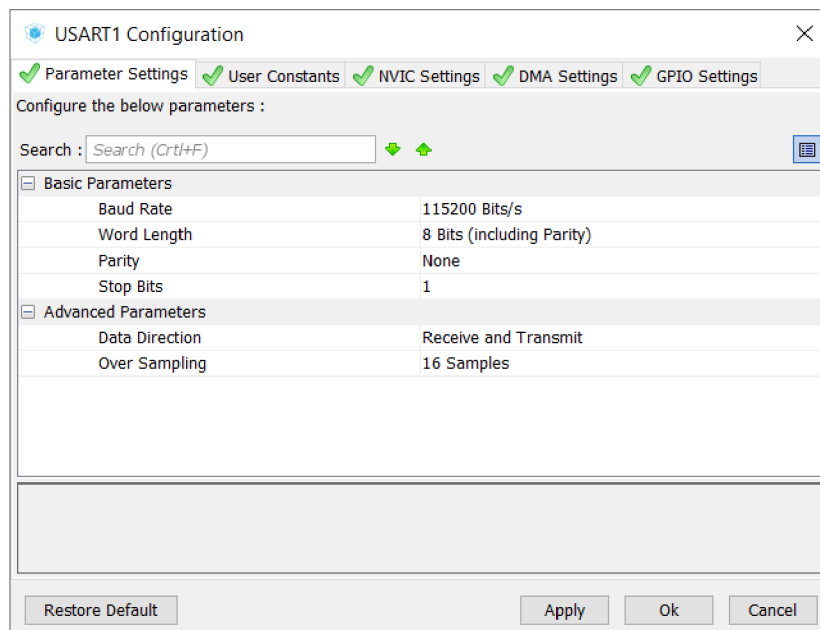
Obrázek 5-2 Nastavení vstupních a výstupních pinů v programu STM32CUBEMX

Nejjednodušší nastavení představují LED2 až LED4, L6482_SW, L6482_STBY a LAN9252_RST. Jde o prosté výstupní piny, od kterých není vyžadována vysoká rychlost změny. Proto jsou nastaveny na malou výstupní rychlost v režimu Push-Pull (výstup je tvořen tranzistorovým polomostem). Protože prakticky stejná funkce vyžadována od pinů L6482_CS a LAN9252_CS jsou nakonfigurovány obdobně se změnou maximální výstupní rychlosti. Zde je volena maximální dostupná rychlost, aby nedocházelo k zpomalení komunikace.

Zbylé piny byly nastaveny jako vstupní s napojením na jednotku externího přerušení. Díky tomu je minimalizována reakční doba na událost, která vyvolala přerušení. Navíc lze z vstupních pinů načítat aktuální stav v případě, že přerušení nebude vyvoláno.

5.1.3 Sériová linka USART1

Pro jednodušší odladění programu a případnou diagnostiku byla na desku plošného spoje přidána miniaturní pinová lišta s vyvedeným sériovým rozhraním. Přestože je kapitola nazvána USART1, je využito pouze asynchronního přenosu pomocí 2 vodičů (vysílací TX a přijímací RX). Pinová lišta ještě obsahuje napájecí a zemní pin. Otevírá se tedy možnost pro budoucí rozšíření například o logovací zařízení nebo pokročilou diagnostiku. Proto bylo zvoleno nastavení s běžnou rychlostí 115200 baud (viz. obrázek 5-3 níže).



Obrázek 5-3 Nastavení vstupních a výstupních pinů v programu STM32CUBEMX

Protože ale vybraný mikroprocesor umožňuje ladění programu na cílovém zařízení s možností virtuální sériové linky přes připojený programátor, nebylo komunikace pomocí této periferie využito.

5.2 Obsluha LAN9252

Obvod LAN9252 se z programátorského hlediska chová buď jako 16kanálová vstupně/výstupní jednotka, kdy na jednotlivé piny je možno číst a zapisovat z EtherCAT Master zařízení, nebo jako konfigurovatelná paměť přístupná pro různých sběrnicích. Na výběr je mezi HBI nebo různými typy SPI (až 4 datové sériové kanály pro příjem a další 4 pro vysílání).

Nejprve je zapotřebí vytvořit konfigurační soubor, kterým specifikujeme obsazení uživatelské paměti, název a identifikační číslo výrobce a typu zařízení a také ostatní nastavení (využití synchronizace, typ komunikačního rozhraní apod.). Tomu bude věnována pozornost v jedné z následujících kapitol. Výsledkem je konfigurační binární soubor, který se pomocí EtherCATu pošle do obvodu LAN9252, který ho uloží do připojené externí EEPROM paměti. Po reinicializaci se zařízení hlásí pod novým názvem a pomocí konfiguračních programů v PC lze zařízení detekovat a vyčíst nastavené rozložení paměti.

Vnitřní paměť je v obvodu LAN9252 rozdělena na přímo a nepřímo adresovatelnou. Přímou adresovatelnou paměť obsahuje především registry obsahující název a revizi čipu, testovací sekvenci (výhodná pro ověření správného naprogramování přijímacích funkcí), registry týkající se přerušení a hardwarového nastavení. Rovněž se tam nachází registry klíčové pro přístup do nepřímo adresovatelné paměti (jak uživatelské paměti, tak i samotného jádra). Využit lze i přístup přes vyrovnávací paměť typu FIFO (First Input First Output).

5.2.1 Zápis a čtení dat z uživatelské paměti

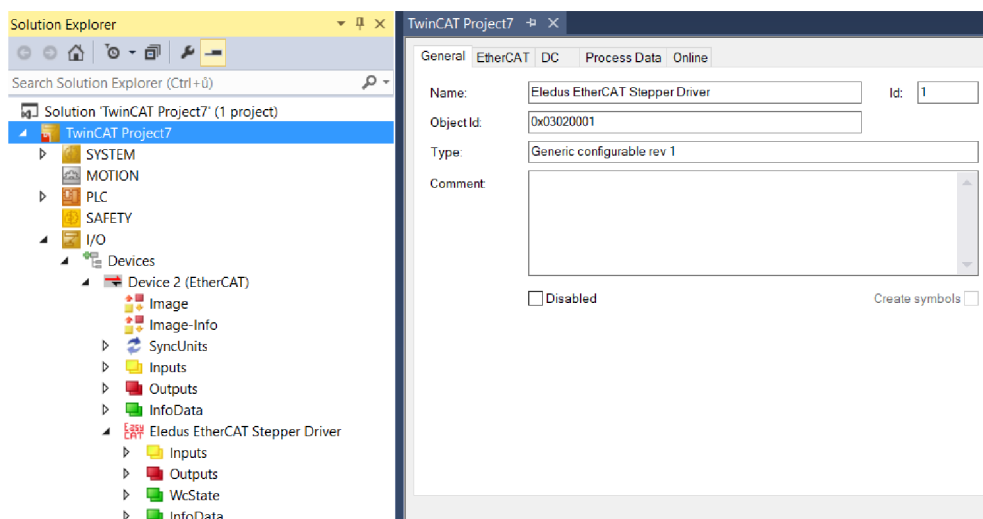
Před započítím čtení nebo zápisu do uživatelské paměti je třeba přerušit aktuálně probíhající přenos do vyrovnávací paměti. To je provedeno nastavením příslušného bitu v řídicím registru (konkrétně ECAT_PRAM_WR_CMD pro zápis nebo ECAT_PRAM_RD_CMD pro čtení). Následně je do adresního registru proveden zápis požadované adresy a délka přenášeného bloku. Vzhledem k velikosti vyrovnávací paměti je možné v jednom kroku přenést maximálně 64 Bytů dat. Poté se zápisem do řídicího registru aktivuje přenos dat do vyrovnávací paměti. Zda jsou data připravena k vyčtení je kontrolováno čtením příslušného bitu řídicího registru. Po potvrzení platnosti lze vyčíst nebo zapsat daný blok dat. V případě, že je zapotřebí přenášet větší rámce dat, je nutné rozdělit rámec na bloky a postup opakovat.

5.2.2 Konfigurace Slave zařízení

Aby bylo možné přenášet data pomocí protokolu EtherCAT je nutné nakonfigurovat obvod LAN9252. Obvod umožňuje více typů komunikačních sběrnic (i možnost nevyužít ani jednu) s nebo bez využití synchronizačních pulzů. Pro demonstraci komunikace bylo zvoleno, že obvod bude komunikovat po sběrnici SPI, a navíc bude využíváno synchronizačních pulzů generovaných obvodem k aktualizaci dat z řadiče krokového motoru L6482.

Každému výrobcí a jeho zařízení využívající protokol EtherCAT je přiřazeno jedinečné identifikační číslo, podle kterého je v řídicím zařízení načten konfigurační soubor. V případě, že není dostupný, jde vyčíst nastavení také z EEPROM paměti. V rámci prototypového testování bylo využito konfiguračního souboru dostupného k vývojovým deskám firmy AB&T Srl. Ty obsahují předem připravené konfigurace pro vstupní a výstupní bloky velikosti 32 až 128 bytů. Navíc je přidán soubor konfigurace bez specifikované velikosti paměti. Ten byl využit pro nakonfigurování testovacího nastavení v programu TwinCAT.

Při spuštění programu TwinCAT XAE (ovládání modulů balíčku programů implementovaných do rozhraní vývojového prostředí Visual Studio 2013) a spuštění skenování dostupných vstupně/výstupních zařízení je nutné zvolit síťové rozhraní Ethernetu případně doinstalovat ovladač umožňující využívat síťové rozhraní pro komunikaci pomocí protokolu EtherCAT. Poté dojde k nalezení zařízení a případnému spuštění módu volného běhu. Z obrázku 5-4 je vidět, že nastavení je rozděleno do několika záložek. Nejdůležitějšími jsou zejména *EtherCAT*, *DC* a *Process Data*.



Obrázek 5-4 Nalezené zařízení s testovací konfigurací

Záložka *EtherCAT* umožňuje otevřít pokročilá nastavení jako například chování v jednotlivých stavech, nastavení synchronizačních manažerů, identifikace a v mimo jiné také možnost zaslat konfigurační binární soubor do EEPROM paměti. Nejprve byl ale upraven obraz paměti v záložce *Process Data*. Paměť je rozdělena na vstupní a výstupní část, kdy vstupní slouží k zrcadlení registrů obvodu L6482 a výstupní pro zadání příkazu a jeho potvrzení (viz obrázek 5-5). Pro přenos dat jsou standardně synchronizační manažery SM1 pro vstupní a SM0 pro výstupní část. Změna obsahu paměti se provádí výběrem požadované části v okně *PDO List* a editací v okně *PDO Content*.

Sync Manager:				PDO List					
SM	Size	Type	Flags	Index	Size	Name	Flags	SM	SU
0	5	Outputs		0x1A00	100.0	Inputs	M	1	0
1	100	Inputs		0x1600	4.1	Outputs	M	0	0

PDO Assignment				PDO Content (0x1A00):			
Index	Size	Offs	Name	Type			
0x0005:01	4.0	0.0	ABS_POS	DWORD			
0x0005:02	4.0	4.0	EL_POS	DWORD			
0x0005:03	4.0	8.0	MARK	DWORD			
0x0005:04	4.0	12.0	SPEED	DWORD			

Obrázek 5-5 Záložka Process Data

Po nadefinování velikosti, adresy a názvu přenášených dat byly nakonfigurovány synchronizační pulzy. Vzhledem k periodě základního synchronizačního signálu 10 ms je signál SYNC 0 volen stejné velikosti a je brán přímo ze základního synchronizačního signálu (obrázek 5-6). Signál SYNC 1 je poté odvozen z velikosti cyklu SYNC 0 jako desetinasobek. Díky tomu je možné rozdělení na více a méně důležitá přenášená data a úspora přenosu mezi řadičem krokového motoru a mikroprocesorem. Možnost využití zařízení jako referenčního taktovacího signálu nebyla využita.

Distributed Clock

Cyclic Mode
 Operation Mode: DC_Sync
 Enable Sync Unit Cycle (µs): 10000

SYNC 0
 Cycle Time (µs):
 Sync Unit Cycle x 1 10000
 User Defined
 Shift Time (µs):
 User Defined 0
 + SYNC0 Cycle x 0 0
 Based on Input Reference
 = 0

Enable SYNC 0

SYNC 1
 Sync Unit Cycle
 SYNC 0 Cycle x 10 Cycle Time (µs): 100000
 Shift Time (µs): 0

Enable SYNC 1

Use as potential Reference Clock

Obrázek 5-6 Nastavení synchronizace testovací konfigurace

5.3 Obsluha L6482

Řadič krokového motoru je tvořen souborem registrů přístupných pomocí rozhraní SPI. Po zapnutí zařízení je nejprve třeba řadič nastavit s ohledem na použitý krokový motor. To se provádí pomocí souboru příkazů daných výrobcem. Pomocí příkazů můžeme měnit nebo vyčítat nastavení případně stav řadiče a řídit otáčení motoru. Protože řadič obsahuje pokročilou řídicí logiku umožňující například pohyb o určitý počet kroků s nastavitelnými akceleračními i deceleračními křivkami je výsledný program na mikroprocesoru o to jednodušší.

5.3.1 Registry obvodu L6482

Na obrázku 5-7 je vidět kompletní mapu registrů obvodu L6482. Tato kapitola bude věnována základnímu popisu jednotlivých registrů a vlivu jejich nastavení na funkci zařízení a běh motoru.

Registry s adresou 01 a 02 je označen jako ABS_POS a EL_POS a slouží k indikaci pozice, což je při použití v pozičním systémem výhodné. Následující registr označený jako MARK umožňuje nastavit určitou absolutní pozici (například výchozí) a pomocí jednoho příkazu na tuto pozici provést pohyb. Dalších 6 registrů se týkají rychlostních parametrů. První z nich, označený jako SPEED, udává aktuální rychlost otáčení motoru. Poté následuje dvojice ACC a DEC, pomocí nichž můžeme nastavit akcelerační a decelerační zrychlení. Protože krokové motory s rostoucí rychlostí otáčení ztrácejí kroutící moment, je vhodné omezit maximální otáčky pomocí registru MAX_SPEED. Díky tomu dojde například při odeslání příkazu pro otáčení se zadanou vyšší rychlostí k saturaci na hodnotu obsaženou v registru MAX_SPEED. V některých aplikacích může být potřeba aby se motor nikdy nepřestal otáčet. Pro toto slouží registr MIN_SPEED. Vzhledem ke konstrukci krokových motorů je při určité rychlosti výhodnější přejít z režimu mikrokrokování do režimu celých kroků. Hranice mezi těmito režimy řízení je nastavitelná registrem FS_SPD.

Address [Hex]	Register name	Register function	Len. [bit]	Reset [Hex]	Reset value	Remarks ⁽¹⁾
h01	ABS_POS	Current position	22	000000	0	R, WS
h02	EL_POS	Electrical position	9	000	0	R, WS
h03	MARK	Mark position	22	000000	0	R, WR
h04	SPEED	Current speed	20	000000	0 step/tick (0 step/s)	R
h05	ACC	Acceleration	12	08A	125.5e-12 step/tick ² (2008 step/s ²)	R, WS
h06	DEC	Deceleration	12	08A	125.5e-12 step/tick ² (2008 step/s ²)	R, WS
h07	MAX_SPEED	Maximum speed	10	041	248e-6 step/tick (991.8 step/s)	R, WR
h08	MIN_SPEED	Minimum speed	12	000	0 step/tick (0 step/s)	R, WS
h15	FS_SPD	Full-step speed	11	027	150.7e-6 step/tick (602.7 step/s)	R, WR
h09	TVAL_HOLD	Holding reference voltage	7	29	328 mV	R, WR
h0A	TVAL_RUN	Constant speed reference voltage	7	29	328 mV	R, WR
h0B	TVAL_ACC	Acceleration starting reference voltage	7	29	328 mV	R, WR
h0C	TVAL_DEC	Deceleration starting reference voltage	7	29	328 mV	R, WR
h0D	RESERVED	-	16	-	-	-
h0E	T_FAST	Fast decay settings	8	19	1 μs / 5 μs	R, WH
h0F	TON_MIN	Minimum on-time	8	29	20.5 μs	R, WH
h10	TOFF_MIN	Minimum off-time	8	29	20.5 μs	R, WH
h11	RESERVED	-	8	-	-	-
h12	ADC_OUT	ADC output	5	XX ⁽²⁾	0	R
h13	OCD_TH	OCD threshold	5	8	281.25 mV	R, WR
h14	RESERVED	-	8	-	-	-
h16	STEP_MODE	Step mode	8	7	16 μsteps, SYNC mode disabled	R, WH
h17	ALARM_EN	Alarms enabled	8	FF	All alarms enabled	R, WS
h18	GATECFG1	Gate driver configuration	11	0	I _{gate} = 4 mA, t _{CC} = 125 ns, no boost	R, WH
h19	GATECFG2	Gate driver configuration	8	0	t _{BLANK} = 125 ns, t _{DT} = 125 ns	R, WH
h1A	CONFIG	IC configuration	16	2C88	Internal 16 MHz oscillator (OSCOU _T at 2 MHz), SW event causes HardStop, motor supply voltage compensation disabled, overcurrent shutdown, V _{CC} = 7.5 V, UVLO threshold low, t _{SW} = 44 μs	R, WH
h1B	STATUS	Status	16	XXXX ⁽²⁾	High impedance state, motor stopped, reverse direction, all fault flags released UVLO/Reset flag set	R

Obrázek 5-7 Mapa registrů obvodu L6482 – převzato z [3]

Řídící algoritmus založený na zpětné vazbě ze snímacích rezistorů lze ovlivnit nastavením registrů TVAL_HOLD, TVAL_RUN, TVAL_ACC a TVAL_DEC. Díky nim lze ovlivnit velikost proudu při různých fázích řízení. Následující trojice registrů se týká časových vlastností regulace. V registru T_FAST se nastavuje maximální doba rychlého doběhu využitého regulačním systémem. Dvojici TON_MIN a TOFF_MIN jsou ovlivněny minimální doby sepnutí a rozepnutí výkonových tranzistorů čímž je ovlivněna maximální velikost spínací frekvence. Protože řadič obsahuje pomocný AD převodník, je jeho aktuální hodnota uložena v registru ADC_OUT. Toho lze s výhodou využít například k měření aktuální hodnoty napájecího napětí. Následuje velmi důležitý registr ACD_TH nastavující prahovou hodnotu proudu motorem, kdy dojde k aktivaci alarmu. Jednotlivé zdroje alarmu je možné maskovat pomocí registru ALARM_EN. Díky registru STEP_MODE jde nastavit počet mikrokroků a také možnost synchronizovat více řadičů

pomocí výstupu synchronizačního signálu. Obvod obsahuje pokročilé budiče výkonových tranzistorů, které jsou tvořeny programovatelnými proudovými zdroji. Ty jsou konfigurovatelné pomocí registrů GATECFG1 a GATECFG2. Lze nastavit například velikost proudu do elektrody gate nebo dobu trvání mezi vypnutím jednoho a sepnutím druhého tranzistoru v polomostu (deadtime). Registrem CONFIG lze nastavit chování řadiče na různé události, zapnout a vypnout možnosti pokročilého řízení a nastavit zdroj taktovacího signálu.

Posledním a velmi důležitým je registr STATUS obsahující vlajky popisující stav řadiče. Obrázku 5-8 zobrazuje rozložení vlajek v registru STATUS

Bit 15	Bit 14	Bit 13	Bit 12	Bit 11	Bit 10	Bit 9	Bit 8
Unused	Unused	OCD	TH_STATUS		UVLO_ADC	UVLO	STCK_MOD
Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
CMD_ERROR	MOT_STATUS		DIR	SW_ENV	SW_F	BUSY	HiZ

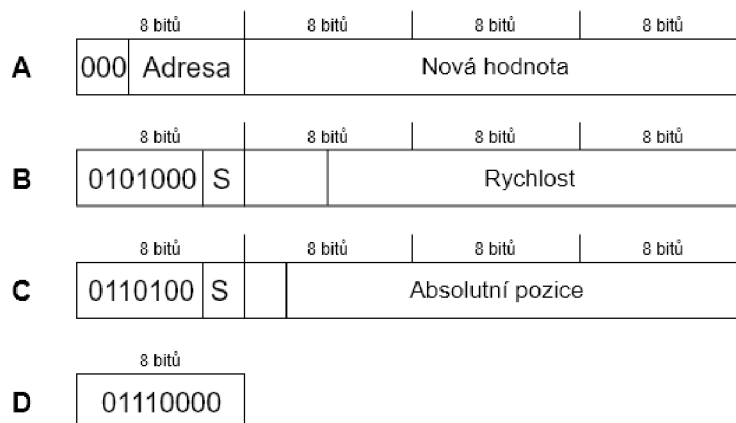
Obrázek 5-8 Význam bitů v registru STATUS obvodu L6482 – převzato z [3]

Bit OCD signalizuje překročení proudu nastaveného v registru OCD_TH. Dibit TH_STATUS značí, zda nedochází k přehřívání řadiče a případně dochází k vypnutí výkonových můstků nebo i celého zařízení. Bity UVLO_ADC a UVLO signalizují nízké napětí buď na AD převodníku nebo na napájecí větvi. Vlajka STCK_MOC je aktivní, pokud je zařízení řízeno vnějším krokovacím signálem. Následuje bit CMD_ERROR signalizující nesprávný příkaz nebo chybu při komunikaci. Dibit MOT_STATUS informuje, v jaké fázi pohybu se motor aktuálně nachází (zastaveno, akcelerace, decelerace nebo stabilní rychlost). V kombinaci s bitem DIR (značí směr otáčení) poskytují informace o stavu pohybu motoru. Bity SW_ENV a SW_F se týkají vstupu SW a informují o sepnutí (sestupné hraně) a aktuálním stavu spínače. Bit BUSY supluje signál L6482_BUSY. Stav výkonového stupně značí bit HiZ. Je-li v logické jedničce je výkonový stupeň v režimu vysoké impedance.

5.3.2 Příkazy ovládání motoru

Po korektním nastavení motoru je možné přistoupit k samotnému ovládání pohybu motoru. K tomu slouží soubor příkazů rozlišitelných pomocí prvního bajtu (nejvíce významného) až 32bitového slova. V druhé části slova se většinou nachází parametry příkazu nebo se vůbec nevysílají (jako například u jednoduchých příkazů typu Stop nebo Reset). Pro ilustraci bude uvedeno pár příkladů příkazů.

Jako první je uveden příkaz pro nastavení registru určité adresy. Příkaz je identifikován prvními třemi bity (všechny nulové). Za nimi je vysílána adresa registru, jehož hodnota bude měněna. Poté je vysílán nový obsah registru. Strukturu příkazu je možné vidět na obrázku 5-9 A.



Obrázek 5-9 Příklad struktury příkazů obvodu L6482

Na obrázku 5-9 jsou uvedeny příkazy pro běh s nastavenou rychlostí a směrem (B) a pohyb na absolutní pozice se zadaným směrem, po kterém se má pozice dosáhnout (C). Písmenem S je označen bit, udávající směr otáčení. Je také patrné, že parametry rychlosti a absolutní pozice jsou zarovnány vpravo v 32bitovém slově. Na zbylé bity bez významu se při zpracování nebere ohled. Posledním ukázkovým příkazem je příkaz zastavení s deceleračním profilem (viz obrázek 5-9 D). Po jeho provedení motor zastaví a je fixován v zastaveném stavu zádržným proudem. Protože tento příkaz neobsahuje žádné parametry stačí k jeho úspěšnému vykonání vyslat pouze jeden bajt.

Z programového hlediska byla využita knihovna cSpin dodávaná výrobcem starající se o počáteční konfiguraci do počátečního stavu a korektní zaslání všech dostupných příkazů. Pro její použití bylo třeba modifikovat odesílací funkce, jelikož knihovna využívala starší knihovny SPL (Standard Peripheral Library), které neumožňovaly až tak pokročilou abstrakci. Pro ilustraci jsou níže uvedeny funkce zajišťující provedení výše zobrazených příkazů:

```

/* Nastavení registru adresy param na hodnotu value*/
void cSPIN_Set_Param(cSPIN_Registers_TypeDef param, uint32_t value)

/* Nastavení běhu motoru rychlostí speed směrem direction*/
void cSPIN_Run(cSPIN_Direction_TypeDef direction, uint32_t speed)

/* Přesun motoru na absolutní pozici abs_pos směrem direction*/
void cSPIN_Go_To_Dir(cSPIN_Direction_TypeDef direction, uint32_t
abs_pos)

/* Zastavení motoru s držením pozice*/
void cSPIN_Soft_Stop(void)

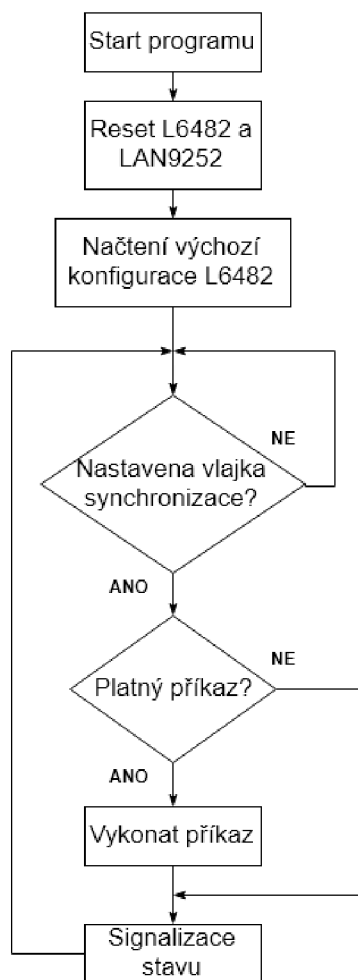
```

5.4 Ukázkový program

Cílem ukázkového programu je demonstrovat funkčnost celého zařízení. Pro testování bylo využito programu TwinCAT 3 [9]. Jedná se vývojové prostředí pro průmyslovou automatizaci umožňující počítači fungovat jako PLC (Programmable Logic Controller – programovatelný logický automat) s připojitelnými řídicími a vstupně/výstupními jednotkami pomocí různých sběrnic. Navíc je možné pro účely konfigurace a omezeného testovacího provozu pomocí protokolu EtherCAT využívat běžné síťové. Program vytvoří server, jemuž je možné přiřadit systémové zdroje a který se stará o běh vytvořeného programu a správu komunikace. V našem případě je využit pouze modul, zajišťující komunikaci a konfiguraci vstupně/výstupních zařízení.

Jak je vidět na obrázku 5-10, ovládací program mikroprocesoru je principiálně velice jednoduchý. Po připojení napájecího napětí dojde k startu programu na mikroprocesoru. Vzhledem k nastavení vstupně výstupních pinů je řadič krokového motoru L6482 i komunikační obvod LAN9252 (případně obvod fyzické vrstvy Ethernetu) držen ve stavu resetu. Po nastavení všech potřebných periférií mikroprocesoru, které je signalizováno rozsvícením LED4, dojde k uvolnění resetu obvodu L6482. Rozsvítí je LED3, po které je vloženo čekání délky 1ms před nastavením výchozích parametrů do registrů obvodu L6482. Po něm je volána funkce inicializace komunikace s obvodem LAN9252. V ní se provede uvolnění hardwarového resetu tohoto obvodu a provedení resetu softwarově pomocí zápisu do konfiguračních registrů. Pro ověření správnosti komunikace jsou vyčteny registry se známým a definovaným obsahem (Byte Order Test Register obsahující hodnotu 0x12345678). Pokud jsou přijatá data shodná s nadefinovanými a zároveň nedojde k vypršení časového limitu, je navázána komunikace.

Poté už program běží v nekonečné smyčce čekající na vlajky signalizující synchronizaci. Ty jsou nastaveny při vyvolání přerušení pomocí signálů SYNC0 a SYNC1 z obvodu LAN9252. Synchronizační pulzy jsou nastaveny ve programu TwinCAT tak, aby k přerušení na signálu SYNC0 docházelo co 10 ms a na signálu SYNC1 co 100ms. Díky tomu je možné řešit rychlou aktualizaci dat, u kterých se předpokládá, že se budou měnit častěji a jejichž aktuálnost je kritická. Jde především o aktuální pozici a rychlost a status řadiče. Zbylé registry, u nichž se nepředpokládá častá změna je tedy možné aktualizovat až při přerušení vyvolané signálem SYNC1. Díky tomu je uspořena přenosová kapacita a je ji možné využít k přenosu kritických dat.



Obrázek 5-10 Vývojový diagram programu mikroprocesoru

V případě, že je nastavena vlajka synchronizace, provede se načtení dat z řadiče L6482 na základě zdroje přerušení. Taktéž se načtou stavy signálů BUSY a FLAG připojených na vstupní piny mikroprocesoru. O přenos dat do obvodu LAN9252 se stará funkce EtherCAT_RefreshData(). Ta na základě operačního stavu a watchdogu EtherCAT kontroléru provede zápis a vyčtení dat z uživatelské paměti. Data pro čtení a zápis se ukládají do polí BufferIn a BufferOut. V případě že je do zařízení odeslán příkaz (z EtherCAT Master zařízení), dojde k jeho dekódování mikroprocesorem a pokud je navíc splněna podmínka, že došlo ke změně druhé pomocné proměnné, provede se požadovaný příkaz. Navíc jsou vyhodnocovány další příznaky využití například pro signalizaci.

6. MĚŘENÍ

Zařízení bylo podrobena měřením zkoumajícím nastavené parametry řadiče krokového motoru pro konkrétní typ využívaný v pozičních systémech, teplotní závislosti pro různá nastavení a napájecí hladiny a také bylo zkoumáno vyzařování rušení s ohledem na elektromagnetickou kompatibilitu. K tomu bylo využito laboratorního vybavení zadávající firmy – konkrétně se jednalo o osciloskop Rigol DS1054, laboratorní zdroj B&K Precision 9110 a multimetr Unit UT139 s termočlánkem typu K. Pro testování byl využit krokový motor Microcon SX17-0905.

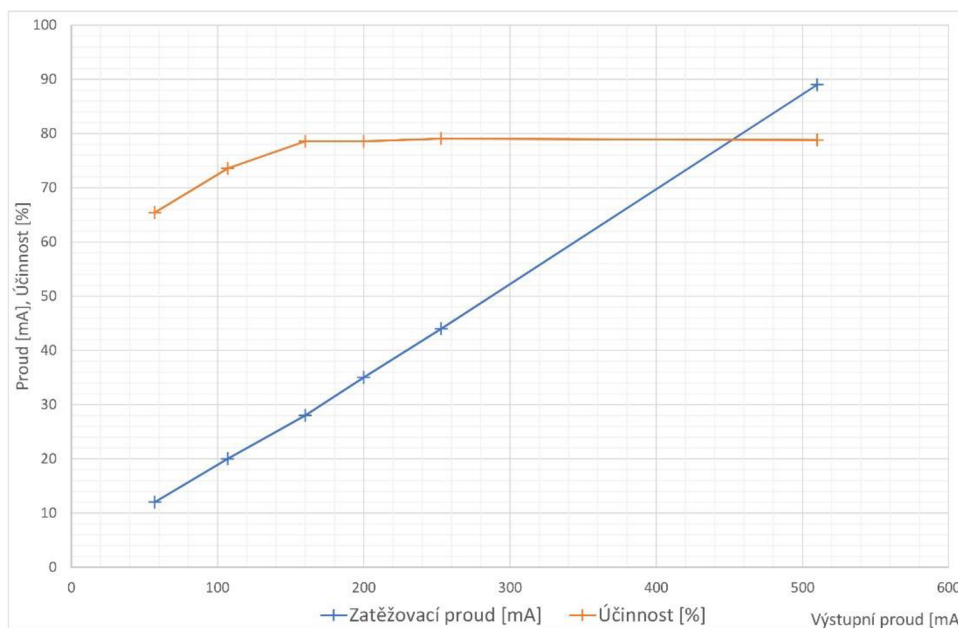
6.1 Testování měniče TPS54360

Před připojením komunikačního modulu a testováním řadiče krokového motoru bylo nutné ověřit správnou funkci měniče napětí TPS54360. V případě chybného zapojení, vady kusu nebo nesprávného osazení by totiž mohlo dojít k zničení dalších připojených obvodů. K výkonovému modulu tedy nebyl připojen motor, řadič L6482 se nacházel ve stavu resetu a nebyl osazen žádný komunikační modul. Pro nastavení výstupního proudu byly využity výkonové rezistory s dostatečným výkonovým dimenzováním. Výstupní proud byl tedy řízen pomocí kombinací sério-paralelního zapojování jednotlivých rezistorů. V tabulce 6-1 níže lze vidět změřenou účinnost a úroveň výstupního rušení pro dané výstupní proudy. Navíc byla kontrolována teplota jednotlivých součástek (zejména měniče, cívky a Shottkyho diody). Měření bylo prováděno při napájecím napětí 24 V za zdroje B&K Precision jehož hodnota výstupního rušení byla 7,2 mV_{RMS} a 27 mV_{P-P} při okolní teplotě 24,7 °C.

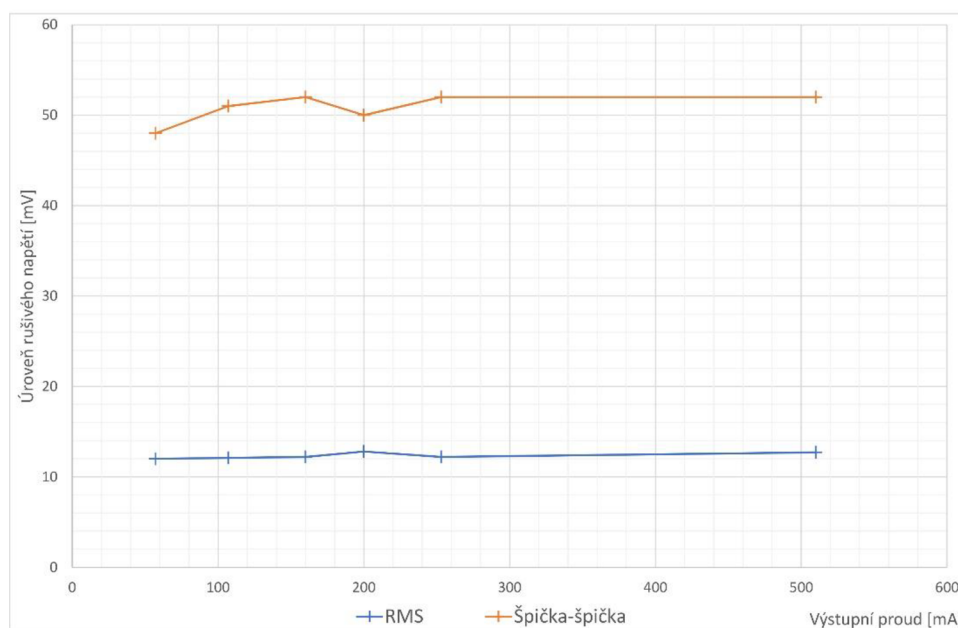
Tabulka 6-1 Závislost účinnosti, úroveň rušení a teploty pouzdra měniče TPS54360

Zatěžovací proud [mA]	Vstupní proud [mA]	Účinnost [%]	Úroveň rušení [mV]		Teplota měniče [°C]
			RMS	Špička-špička	
57,1	12	65,4	12	48	27
107	20	73,6	12,1	51	28
160	28	78,6	12,2	52	29
200	35	78,6	12,8	50	29
253	44	79,1	12,2	52	29
510	89	78,8	12,7	52	32

Na obrázcích 6-1 a 6-2 jsou tyto závislosti vyneseny do grafu. Je patrné, že měnič dosahuje účinnosti 79 %. Díky tomu nedochází k velikým výkonovým ztrátám, které by se projevíly zahříváním měniče, cívky nebo Shottkyho diody. To ostatně potvrzují teploty naměřené na pouzdru měniče.



Obrázek 6-1 Závislost vstupního proudu a účinnosti na požadovaném výstupním proudu měniče TPS54360



Obrázek 6-2 Závislost úrovně výstupního rušivého napětí na požadovaném výstupním proudu měniče TPS54360

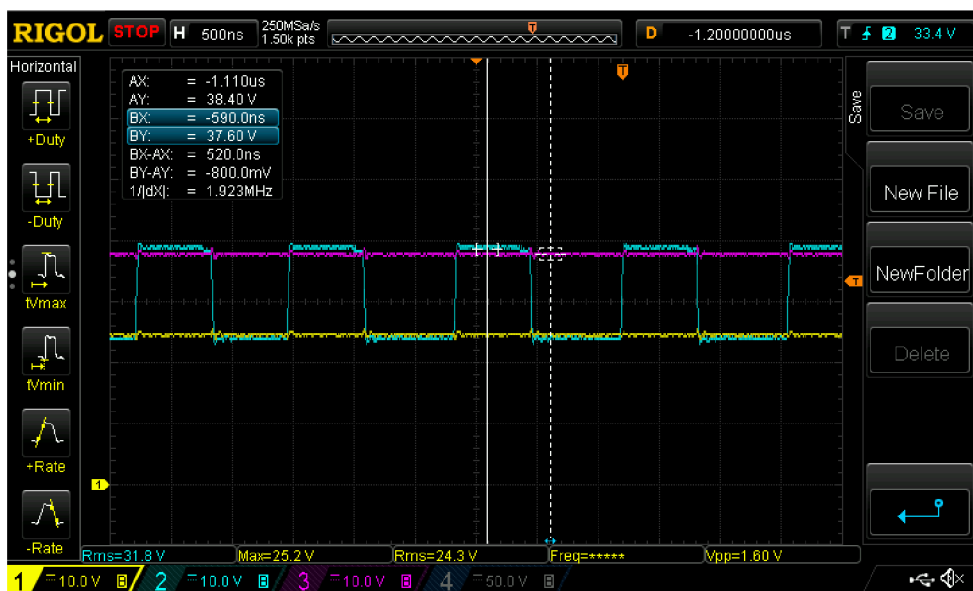
Z obrázku 6-2 je zřetelná nezávislost úrovně výstupního rušení na odebíraném proudu. Vzhledem k použití dalších odrušovacích prvků v blízkosti kritických obvodů lze očekávat, že toto rušení neovlivní funkci zařízení.

6.2 Testování řadiče L6482

Ověření korektní funkčnosti bylo rozděleno do několika částí podle charakteru měření a měřeného funkčního bloku.

6.2.1 Nábojová pumpa

Již při testování prototypu výkonového modulu došlo k zničení Shottkyho diod, využívaných k vytvoření napětí vyššího než napájecí. To bylo z počátku přisouzeno nedostatečné proudové dimenzaci použité dvojité diody BAS40-04 (maximální propustný proud $I_F = 200 \text{ mA}$ a úbytek v propustném směru $V_F = 1 \text{ V}$). Ta byla na prototypu nahrazena dvojicí diod MBR0530 ($I_F = 500 \text{ mA}$, $V_F = 0,375 \text{ V}$ a maximální napětí v závěrném směru $V_{RRM} = 30 \text{ V}$). Vzhledem k navýšení požadavku na rozsah napájecího až na 50 V byla nahrazena typem BAS16H s $V_{RRM} = 85 \text{ V}$. Obrázek 6-2 popisuje průběhy napětí na bloku nábojové pumpy.



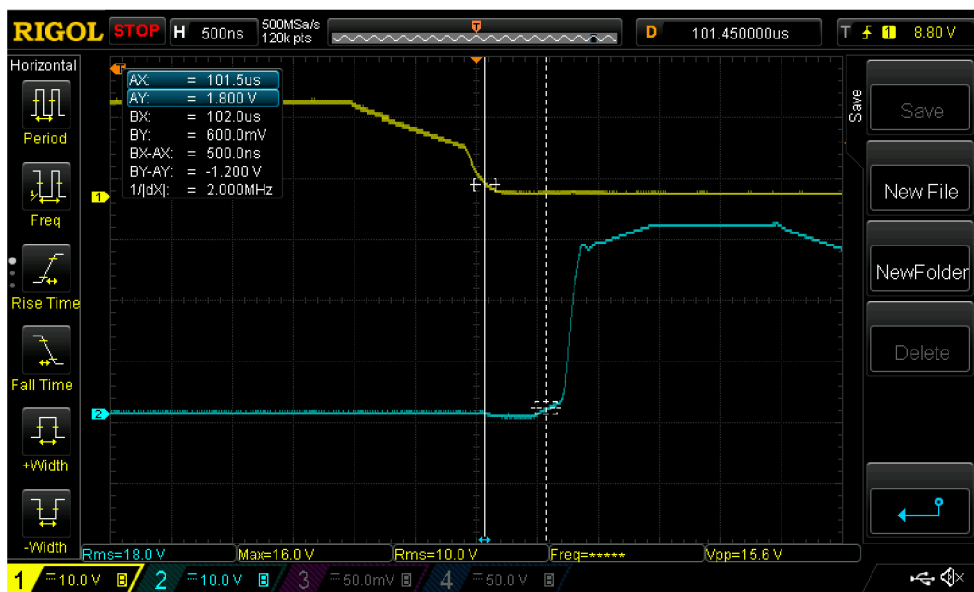
Obrázek 6-3 Průběhy napětí na bloku nábojové pumpy bez zatížení

Na prvním kanálu (žlutě) je pro ilustraci zobrazena napájecí úroveň 24 V . Obdélkový průběh na kanálu dva (tyrkysově) zobrazuje napětí za diodou D1 na kondenzátoru C9 (viz přílohy). Na třetím (fialovém) kanálu je napětí využité pro spínání horních tranzistorů. Toto napětí se téměř rovná horní úrovni obdélkového signálu kanálu dva, protože při pořízení snímku byl motor v klidu. Při běhu motoru se napětí snížilo z původních $37,6 \text{ V}$ na $34,8 \text{ V}$ (při proudu do elektrody gate 64 mA po dobu $1 \mu\text{s}$).

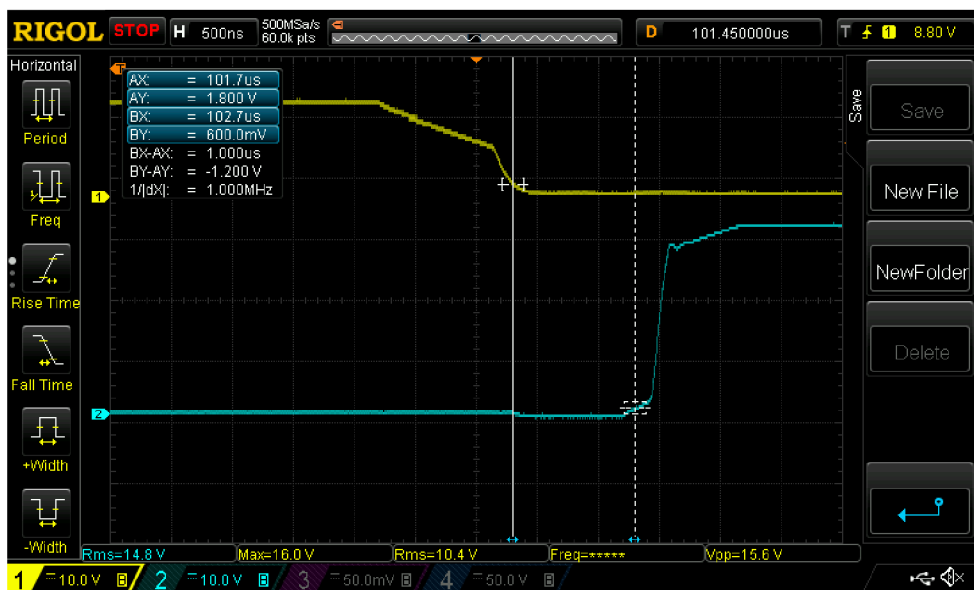
6.3 Proudové zdroje pro spínání výkonového stupně

Vzhledem k možnostem nastavení různých parametrů části budiče výkonových tranzistorů bylo provedeno kontrolní měření ověřující vliv nastavení na chování řadiče a výkonového stupně.

Protože lze nastavit různé časové parametry, byl pro demonstraci vybrán deadtime. Na obrázku 6-4 a 6-5 jsou zaznamenány případy pro 500 ns a 1000 ns. Z měření je patrné, že nastavené hodnoty odpovídají reálným hodnotám s minimální odchylkou.

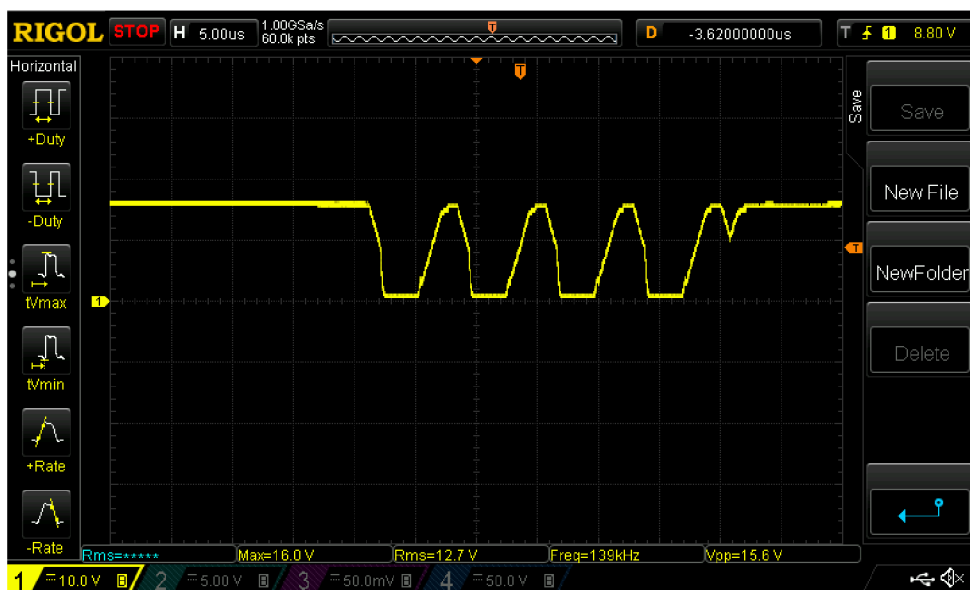


Obrázek 6-4 Nastavení deadtime pro 500 ns

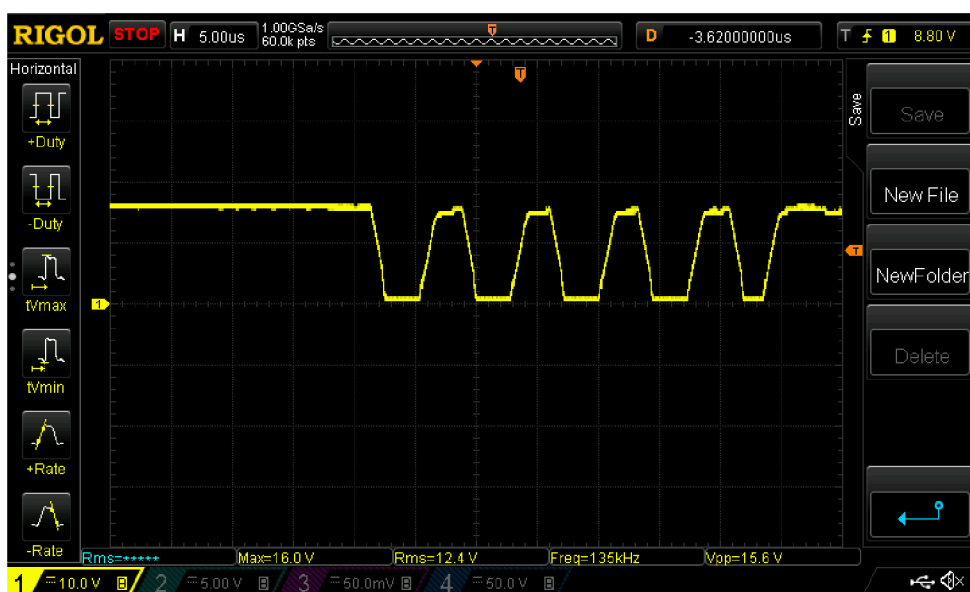


Obrázek 6-5 Nastavení deadtime pro 1000 ns

Protože byly použity výkonové tranzistory s vysokou celkovou kapacitou elektrody gate (až 50 nC), byla pozorovatelná rozdílná strmost při spínání tranzistorů. Příkladem je obrázek 6-6 a 6-7, kdy byl volen proud 64 a 96 mA po dobu 1 μ s. Při pomalém spínání dochází k nárůstu ztrát daných přechodem mezi stavy sepnutého a rozepnutého tranzistoru. Vzhledem, k dimenzování výkonových tranzistorů a uvažovaným proudům se ale ukázalo, že rozdíl ve ztrátovém výkonu se projevil především na samotném řadiči než na výkonových tranzistorech.



Obrázek 6-6 Průběh napětí na elektrodě gate tranzistoru při nastaveném proudu 64 mA



Obrázek 6-7 Průběh napětí na elektrodě gate tranzistoru při nastaveném proudu 96 mA

6.3.1 Ztrátový výkon řadiče L6482

Parametry mající vliv na vyzařování tepla jsou zejména spínací frekvence pulzně šířkové modulace, úroveň napájecího napětí a velikost nastaveného proudu pro buzení výkonových tranzistorů.

Měření závislosti teploty pouzdra obvodu bylo provedeno v závislosti na spínací frekvenci pro běžné průmyslové hladiny napájecích napětí. Měření bylo provedeno při konstantní rychlosti otáčení motoru 600 kroky za sekundu. Buzení výkonových tranzistorů bylo nastaveno na 64 mA po dobu 1 μ s. Proud motoru byl přitom omezen na hodnotu 780 mA. Navíc byla zaznamenána hodnota celkového proudu odebíraného ze zdroje. Při měření byla teplota okolí rovna 21 °C.

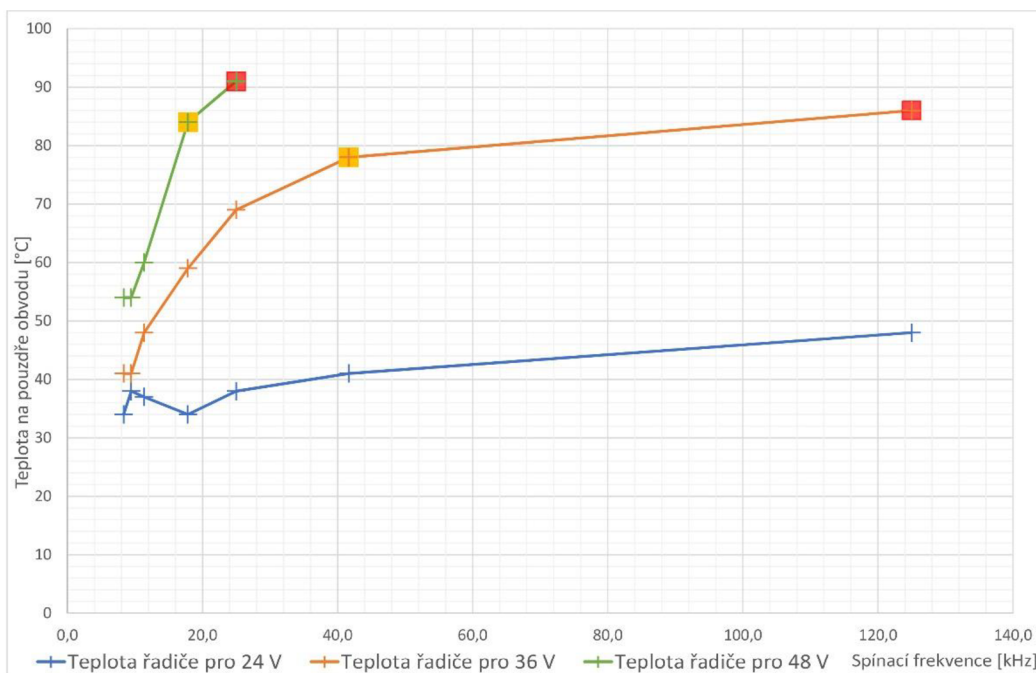
Tabulka 6-2 Závislost teploty a odebíraného proudu na spínací frekvenci

Spínací frekvence [kHz]	Napájecí napětí 24 V		Napájecí napětí 36 V		Napájecí napětí 48 V	
	Teplota řadiče [°C]	Proud ze zdroje [mA]	Teplota řadiče [°C]	Proud ze zdroje [mA]	Teplota řadiče [°C]	Proud ze zdroje [mA]
8,3	34	52	41	61	54	90
9,4	38	90	41	64	54	90
11,4	37	89	48	90	60	113
17,9	34	65	59	137	84*	203
25,0	38	80	69	176	91**	245
41,7	41	105	78*	211	-	-
125,0	48	188	86**	246	-	-

* - Nastavení vlajky Thermal Warning

** - Nastavení vlajky Thermal Shutdown a vypnutí výkonového stupně

Z tabulky 6-2 a souvisejícího grafu na obrázku 6-8 je patrné, že obvod bez problému pracuje při napájecím napětí 24 V. Při zvýšení na 36 V docházelo při nejvyšších pracovních frekvencích k nastavení signalizační vlajky přehřívání, která je definována pro 135 °C na čipu. K úplnému vypnutí došlo při spínací frekvenci 125 kHz. U nejvyššího testovaného napájecího napětí 48 V tento jev nastal již při frekvenci 25 kHz. Nutno zdůraznit, že při této frekvenci testovací motor Microcon SX17-0905 vykazoval nejhladší chod bez vibrací a výpadků. Při zastavení se teplota po chvíli ustálila na hodnotu 34 °C.



Obrázek 6-8 Závislosti teploty řadiče na spínací frekvenci a napájecím napětí

Z toho plyne, že největší podíl na celkových tepelných ztrátách můžeme přisoudit dynamickým ztrátám. Protože je ale obvod řízení spínání výkonových tranzistorů napájen pomocí interního lineárního regulátoru z hlavního napájecího napětí, bylo měřeno, jaký vliv má nastavení proudu pro buzení výkonových tranzistorů. Protože byla uvažována konstantní doba buzení, nebylo v tomto měření vždy zajištěno spolehlivé sepnutí výkonových tranzistorů. Naopak pokud jsou tranzistory sepnuty rychleji (napětí na elektrodě gate výkonových tranzistorů se blíží pomocnému napájecímu napětí budiče (nastaveno 15 V) je nastaven udržovací proud 1 mA. Tento jev nastal při nastaveném nejvyšším proudu 96 mA což dosvědčují i nižší teploty na čipu. Navíc lze nastavit zrychlené vypínání, kdy je po nastavitelnou dobu z řídicí elektrody tranzistoru odsáván proud 100 mA (více v [11]). Srovnání při nastaveném napájecím napětí 24 V, spínací frekvenci 41,7 kHz a době buzení 1 μ s. Srovnání ukazuje tabulka 6-3.

Tabulka 6-3 Závislost teploty vybraných součástek na budícím proudu výkonových tranzistorů

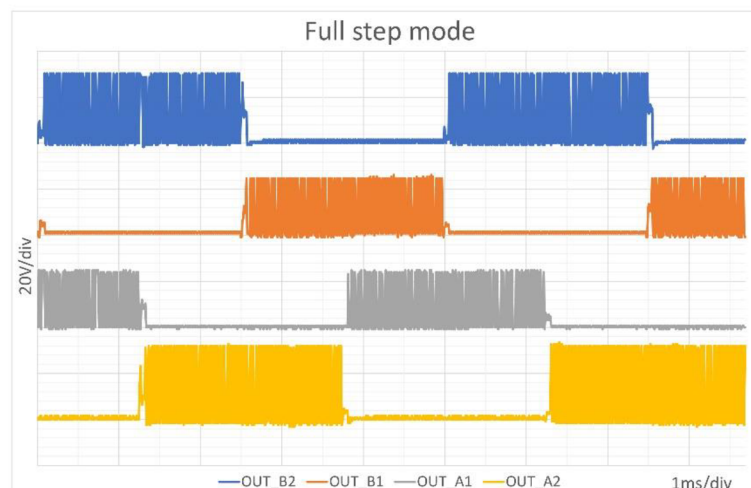
Budící proud tranzistoru [mA]	Povrchová teplota [°C]			
	Řadič L6482	Výkonové tranzistory	Diody v nábojové pumpě	Proudové snímací rezistory
24	52	46	38	39
32	65	51	45	41
64	83	51	54	41
96	49	40	38	36

6.3.2 Vliv mikrokrokování na běh motoru

Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, mikrokrokování přináší zjemnění otáčení. Při vyšších rychlostech ale dochází k snížení maximálního kroutícího momentu. Protože je možné řadičem přepínat mezi celými kroky a až 16 mikrokroky byly změřeny průběhy napětí při obou režimech. Na obrázku 6-9 je vidět průběhy napětí při využití krokování. Oproti tomu na obrázku 6-10 jsou znázorněny průběhy napětí při celých krocích.



Obrázek 6-9 Napětí na cívkách motoru při běhu s mikrokrokováním



Obrázek 6-10 Napětí na cívkách motoru při běhu s celými kroky

Z obrázků je patrné, že při celých krocích má motor pouze 4 stavy. Oproti tomu při mikrokrokování je proud cívkami motoru tvarován, aby se přiblížil grafu funkce sinus s vzájemným posuvem o 90° .

6.4 Analýza vyslaného EtherCAT rámce

Pro zaznamenání komunikace, která probíhala mezi počítačem s programem TwinCAT 3 [10] a testovaným zařízením byl využit program Wireshark [12]. Na počítači bylo spuštěno virtuální řídicí EtherCAT zařízení, díky kterému bylo možno konfigurovat zařízení a také s ním komunikovat. Pro zjednodušení byly vyslány pouze 2 příkazy – rozjezd na určitou rychlost a poté zastavení bez následného držení motoru. Zachycená komunikace je součástí příloh na CD.

Jak bylo zmíněno v kapitole 2.3.6, při komunikaci pomocí EtherCAT protokolu je využit standardní Ethernet rámec obsahující Ethernetovou, IP a UDP hlavičku a zarovnání s detekcí chyb pomocí CRC. Na místě přenášených dat se nachází EtherCAT hlavička a přenášené datagramy. Příklad zachyceného rámce je na obrázku 6-11.

```
> Frame 43771: 204 bytes on wire (1632 bits), 204 bytes captured (1632 bits) on interface 0
> Ethernet II, Src: Beckhoff_01:00:00 (01:01:05:01:00:00), Dst: 02:00:00:00:00:00 (02:00:00:00:00:00)
v EtherCAT frame header
  .... .000 1011 1100 = Length: 0x0bc
  .... 0... .. = Reserved: Valid (0x0)
  0001 .... .. = Type: EtherCAT command (0x1)
v EtherCAT datagram(s): 6 Cmds, SumLen 116, 'NOP'...
  > EtherCAT datagram: Cmd: 'NOP' (0), Len: 4, Adp 0x0, Ado 0x900, Cnt 0
  > EtherCAT datagram: Cmd: 'ARMW' (13), Len: 4, Adp 0x1, Ado 0x910, Cnt 1
  > EtherCAT datagram: Cmd: 'LRD' (10), Len: 1, Addr 0x900000, Cnt 0
  > EtherCAT datagram: Cmd: 'LRD' (10), Len: 100, Addr 0x1000000, Cnt 1
  > EtherCAT datagram: Cmd: 'FPWR' (5), Len: 5, Adp 0x3e9, Ado 0x1000, Cnt 1
  > EtherCAT datagram: Cmd: 'BRD' (7), Len: 2, Adp 0x1, Ado 0x130, Cnt 1
```

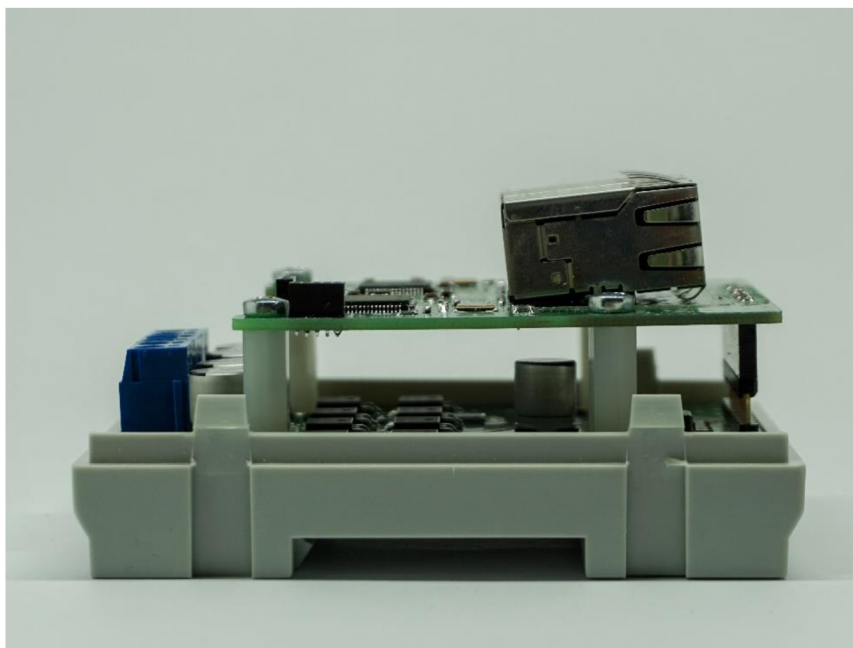
Obrázek 6-11 Zachycený rámec EtherCAT protokolu

Z obrázku výše je jasně viditelné rozdělení na část Ethernetových hlaviček a dat přenášených pomocí EtherCATu. Celkem bylo přenášeno 6 příkazů. Protože jsou přenášená data rozdělena do dvou příkazů podle směru komunikace (z nadřazeného do podřízeného a opačně), jsou pro obousměrnou komunikaci využity dva příkazy. Úlohou testovacího programu bylo číst konfigurační registry řadiče krokového motoru a současně přijímat a interpretovat zasílané příkazy. Paměť obvodu komunikace LAN9252 byla tedy rozdělena na vstupní (registry L6482 a pomocný registr) a výstupní data (registr pro příkaz a bit potvrzení platnosti) z pohledu řídicího zařízení. Pro zjednodušení byly všechny registry uvažovány jako 32bitové – v součtu jde o 100 bajtů vstupních dat. Oproti tomu pro registr příkazů je využito 32bitové slovo (z důvodu přenosu parametrů některých příkazů) a pro ověření platnosti stačí pouze jeden bit. Se zarovnáním jde o 5 bajtů.

7. ZÁVĚR

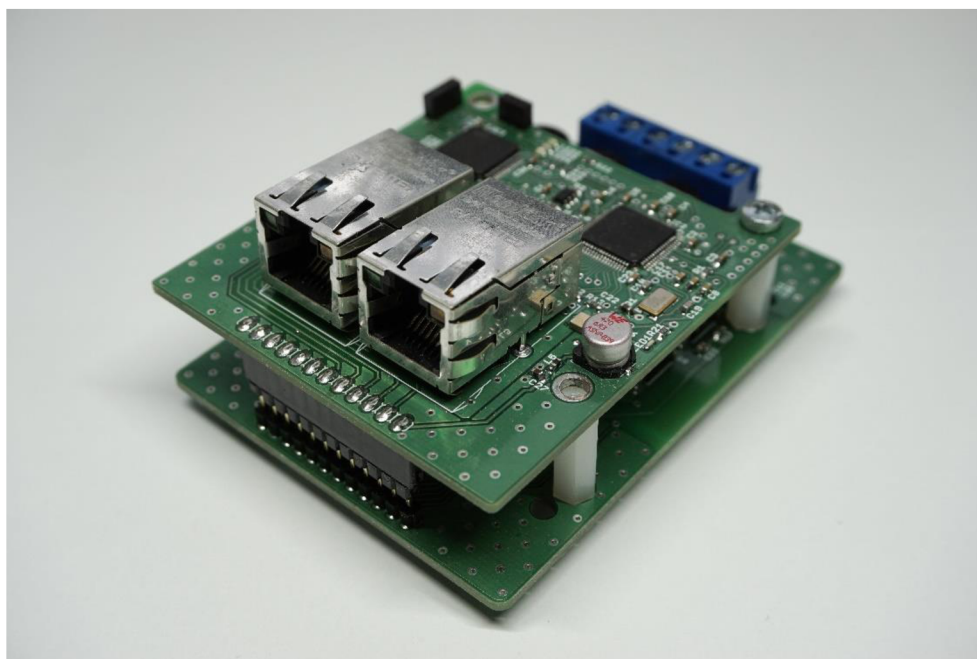
Cílem této diplomové práce bylo navrhnout obvodové zapojení modulu řízení krokového motoru pomocí Ethernetu pro využití v pozičních systémech. V této práci je zahrnut teoretický rozbor zadání obsahující princip funkce jednotlivých typů krokových motorů, jejich zapojení a řízení. Dále jsou popsány řídicí a výkonové obvody. Taktéž pojednává o možnostech průmyslového Ethernetu a využitelných protokolech se zaměřením na protokol EtherCAT využitý v této práci.

V dalších kapitolách je nastíněno předpokládané blokové schéma zapojení modulu. U každého funkčního bloku byly vybrány klíčové parametry a podle nich byl vybrán konkrétní typ součástky použitý v daném bloku. Následoval popis obvodové zapojení jednotlivých bloků a jejich principiální funkce. Pro ověření deklarovaných parametrů a způsobů komunikace byly navrženy testovací prototypy, na kterých byly provedeny základní testy. Stěžejním zjištěním pro výkonový modul bylo především ověření tepelných ztrát na výkonových tranzistorech a na jejich budiči. Díky tomu bylo rozhodnuto, že není nutné osazovat chladič výkonových tranzistorů. Navíc bylo rozhodnuto, že vzhledem k širokému rozsahu napájecího napětí řadiče L6482 bude zařízení dimenzováno na použití s průmyslovými napájecími zdroji s napětím až 48 V. To se projevilo především na dimenzování elektrolytických kondenzátorů a měniče pro napětí 3,3 V. Bylo také nutné upravit rozložení na desce plošného spoje (především kvůli velikosti elektrolytických kondenzátorů) se zachovanou možností instalace chladiče výkonových tranzistorů. Vzhledem k montáži do standardní modulové krabičky na DIN lištu se předpokládalo pouze pasivní chlazení (viz. obrázek 7-1).



Obrázek 7-1 Profil zařízení zabudovaného do krabičky na DIN lištu

Problémem se ukázalo pouze nadměrné zahřívání samotného řadiče L6482 při vyšším napájecím napětí, vyšších budících proudech výkonových tranzistorů a kratších periodách spínání. To je přisuzováno využití vnitřních lineárních regulátorů pro pomocné napěťové hladiny. Vzhledem k maximálním deklarovaným ztrátám na pouzdře obvodu činícím až 4 W to nepředstavuje hrozbu pro spolehlivost zařízení. Jedná se ale o námět na vylepšení pro další verze zařízení. Jako velmi výhodné řešení se ukázala separace výkonových a komunikačních obvodů. A to nejen z hlediska osazení modulů s různými komunikačními rozhraními (obrázek 7-2 – osazený EtherCAT modul), ale také při minimalizaci ovlivňování rušením z výkonových obvodů.



Obrázek 7-2 Fotografie zařízení bez krabičky

Díky dosavadní orientaci konstrukce produktů firmy ELEDUS s.r.o. s důrazem na ovládání jednotlivých funkčních bloků pomocí síťových zařízení byly vytvořeny konstrukční podklady pro druhý komunikační modul využívající Ethernetovou periférii mikroprocesoru připojenou k vnějšímu obvodu fyzické vrstvy Ethernetu. Toto řešení je výhodné zejména pro aplikace nevyžadující synchronnost jednotlivých os, čímž dojde k značnému zlevnění zařízení, nemluvě o možnosti řízení z jakéhokoliv síťového zařízení bez nutnosti specializovaného řídicího programu nebo zařízení.

Literatura

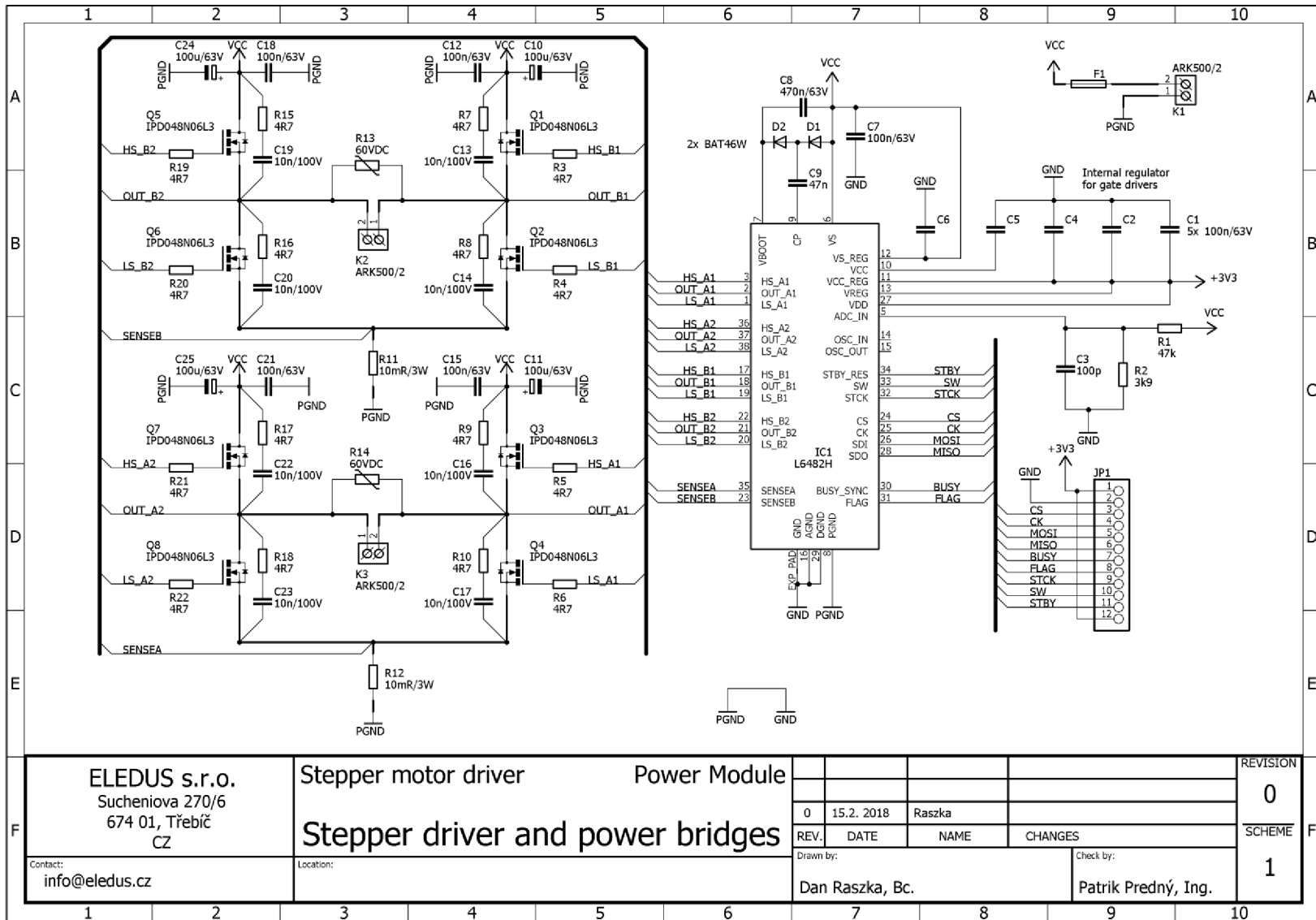
- [1] ACARNLEY, P. P. *Stepping motors: a guide to theory and practice*. 4th edition. United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2007. ISBN 978-0-85296-417-0.
- [2] Krokové motory: Typy motorů. *RoboDoupě* [online]. [cit. 2017-11-23]. Dostupné z: <http://robodoupe.cz/2013/krokove-motory-1-tytu-motoru/>
- [3] *L6482: Microstepping motor controller with motion engine and SPI* [online]. Revision 6. www.st.com, 2015 [cit. 2017-11-27]. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/08/7b/6c/c9/3f/a5/43/7d/DM00067131.pdf/files/DM00067131.pdf/jcr:content/translations/en.DM00067131.pdf>
- [4] ZEŽULKA, F. a O. HYNČICA. Průmyslový Ethernet IV: Principy průmyslového Ethernetu. *AUTOMA* [online]. **2007**(10), 57-60 [cit. 2017-11-27]. Dostupné z: <http://www.uamt.feec.vutbr.cz/~zezulka/download/KPPA/A100757-IV.pdf>
- [5] ZEŽULKA, F. a HYNČICA O. Průmyslový Ethernet VII: Přehled současných standardů [online]. *Automa*, 2008, 16(2), 26-29 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: http://www.uamt.feec.vutbr.cz/~zezulka/download/KPPA/A02_08s26-VII.pdf
- [6] *EtherCAT: The Ethernet Fieldbus* [online]. EtherCAT Technology Group, 2009 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: https://www.ethercat.org/pdf/english/EtherCAT_Introduction_0905.pdf
- [7] *EtherCAT Slave Implementation Guide* [online]. In: . EtherCAT Technology Group, 2012, s. 59 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: http://www.ethercat.org/pdf/english/ETG2200_V2i0i0_SlaveImplementationGuide.pdf
- [8] *LAN9252: 2/3-Port EtherCAT® Slave Controller with Integrated Ethernet PHYs* [online]. DS00001909A (04-08-15). 2015 [cit. 2017-11-30]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/00001909A.pdf>
- [9] STM32CubeMX: STM32Cube initialization code generator. STMicroelectronics [online]. [cit. 2017-11-30]. Dostupné z: <http://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>
- [10] TwinCAT 3. *Beckhoff New Automation Technology* [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/english.asp?twincat/twincat-3.htm>
- [11] *AN4354: L648x devices: gate drivers setup* [online]. 2.0. STMicroelectronics, 2015 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/7b/b8/0f/20/90/4b/4e/0f/DM00095008.pdf/files/DM00095008.pdf/jcr:content/translations/en.DM00095008.pdf
- [12] *Wireshark: Network protocol analyzer* [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://www.wireshark.org/>
- [13] SIMMONS, M. *AN1120: Ethernet Theory of Operation* [online]. Microchip Technology, 2008 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01120a.pdf>
- [14] *TPS54360B-Q1: 60 V Input, 3.5 A, Step Down DC-DC Converter with Eco-mode™* [online]. 2017 [cit. 2018-02-16]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps54360b-q1.pdf>

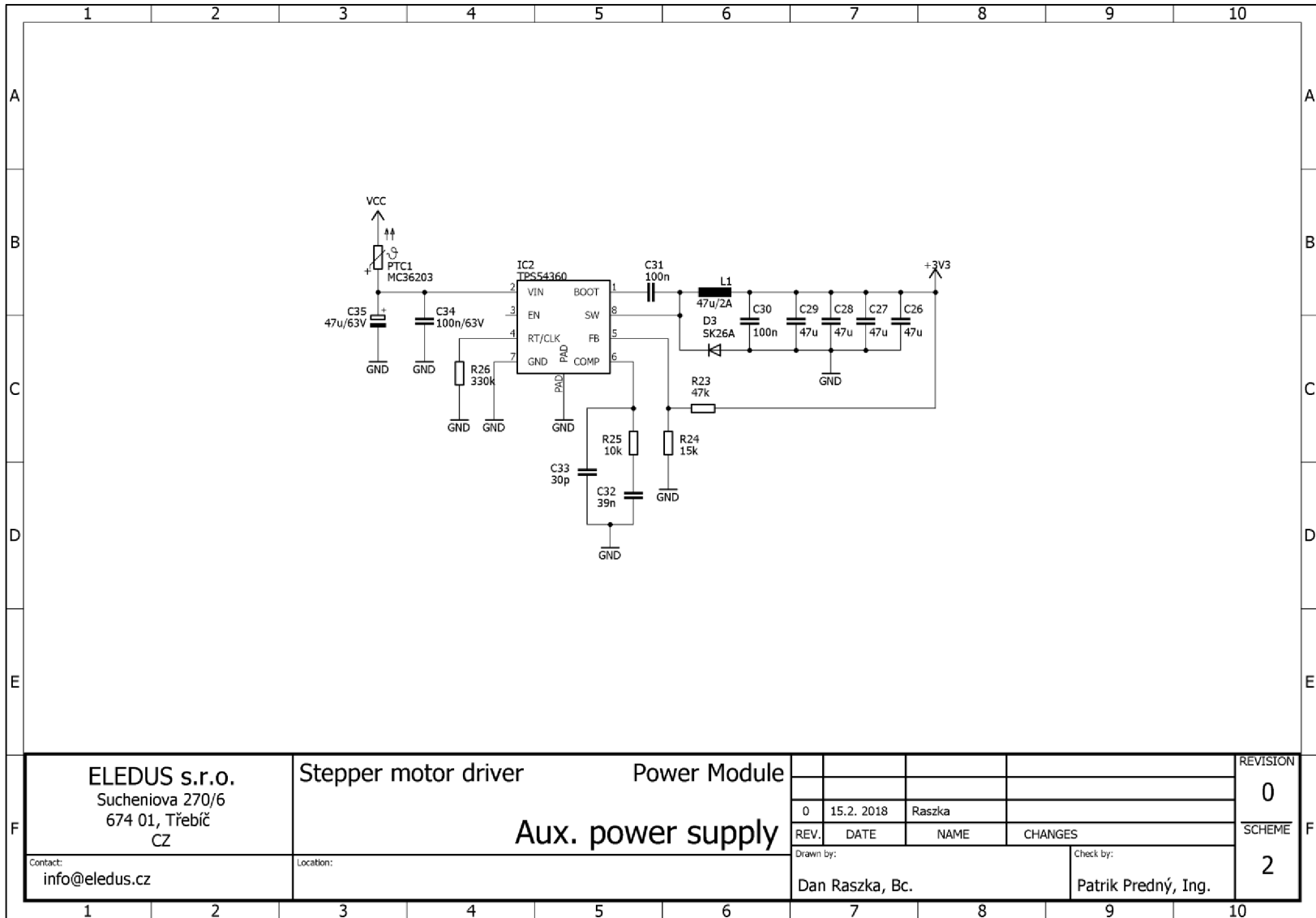
- [15] *STM32F107xx: Datasheet - production data* [online]. 10. 2017 [cit. 2018-2-24]. Dostupné z:
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/e4/f3/1a/89/5a/02/46/ae/CD00220364.pdf/files/CD00220364.pdf/jcr:content/translations/en.CD00220364.pdf>

Seznam příloh

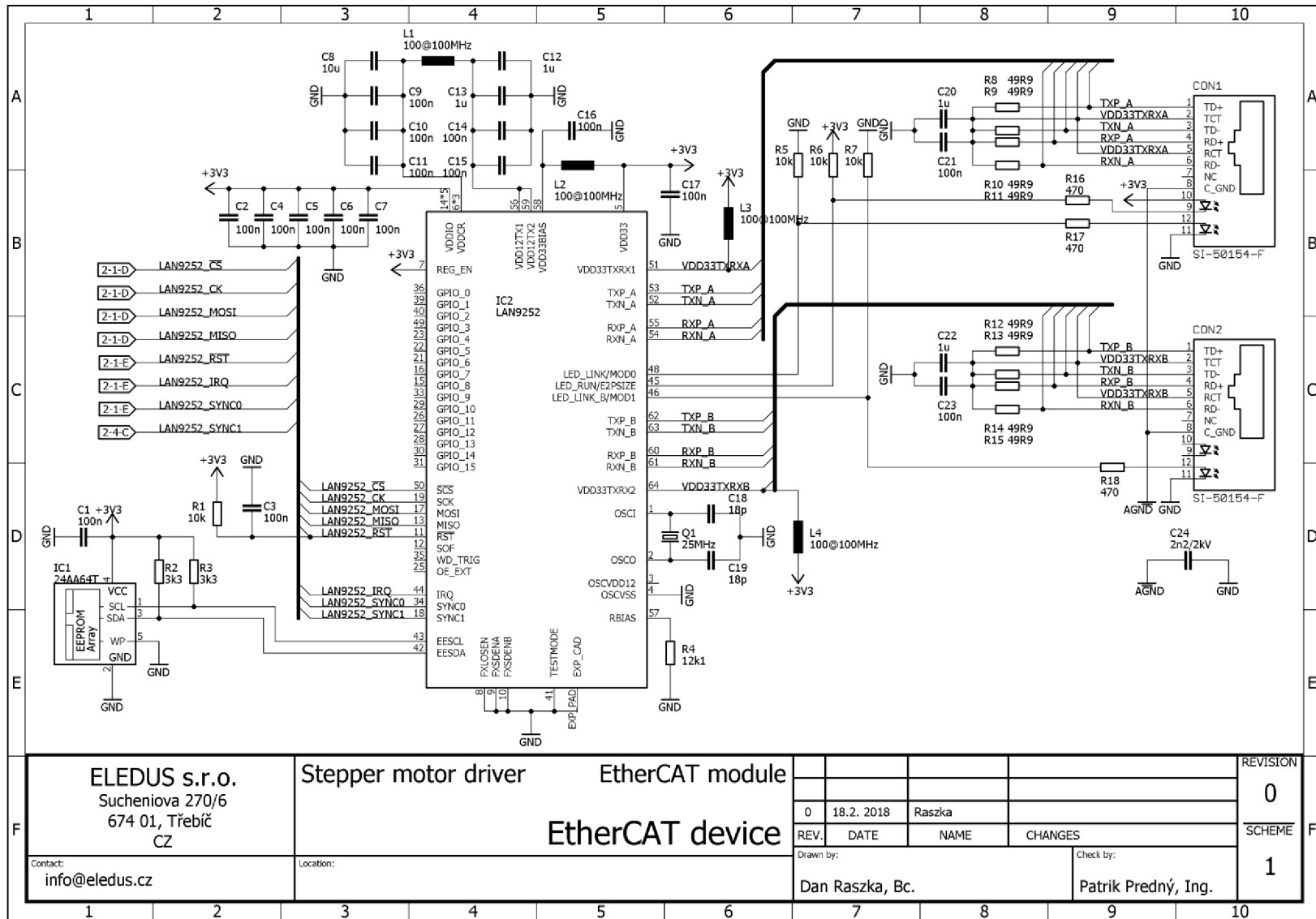
Příloha 1 - Schémata zapojení modulů	75
Příloha 2 - Předlohy desek plošných spojů	81
Příloha 3 - Osazovací plány	84
Příloha 4 - Seznamy součástek	87
Příloha 5 - Seznam příloh na CD	90

Příloha 1 - Schémata zapojení modulů

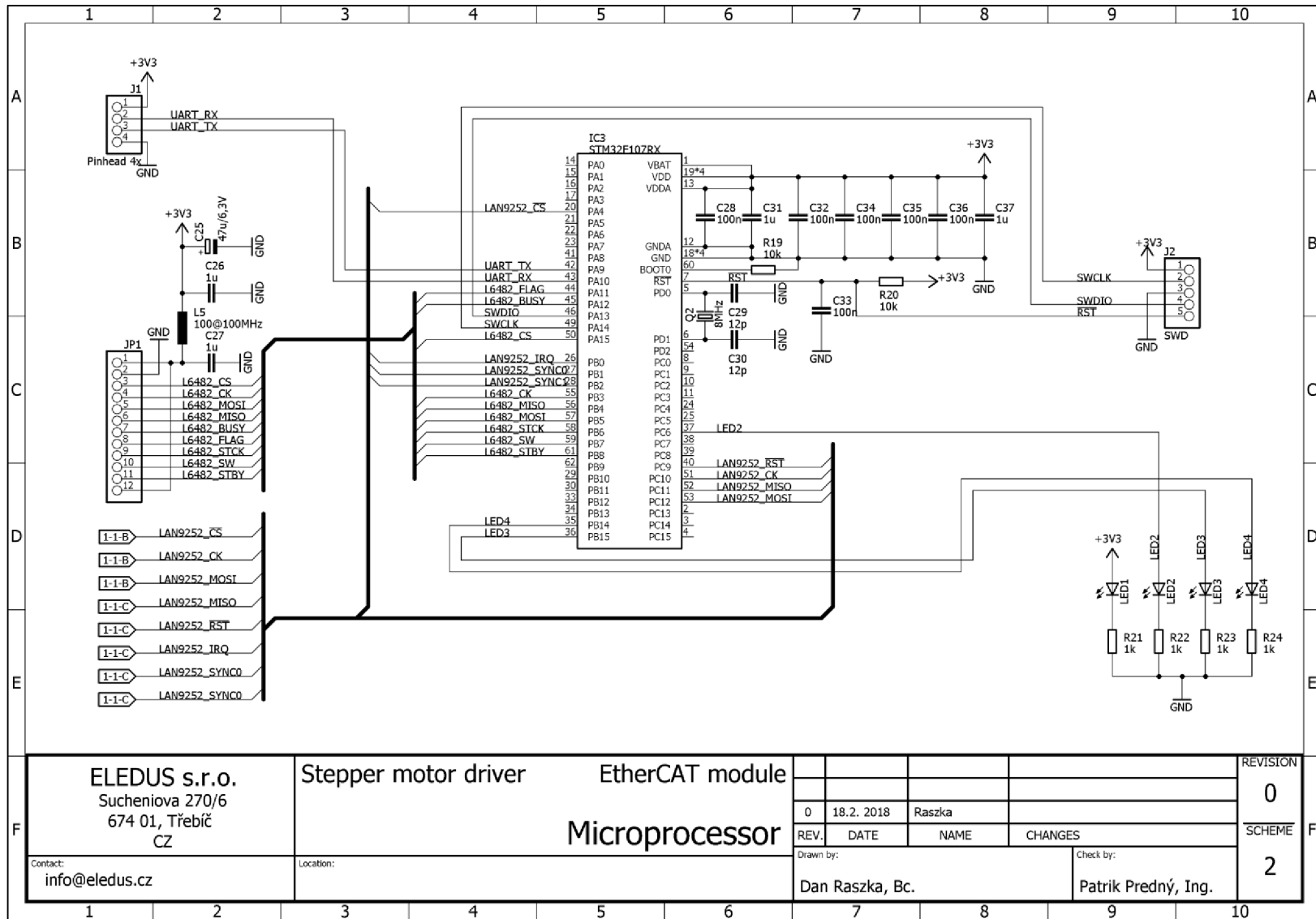




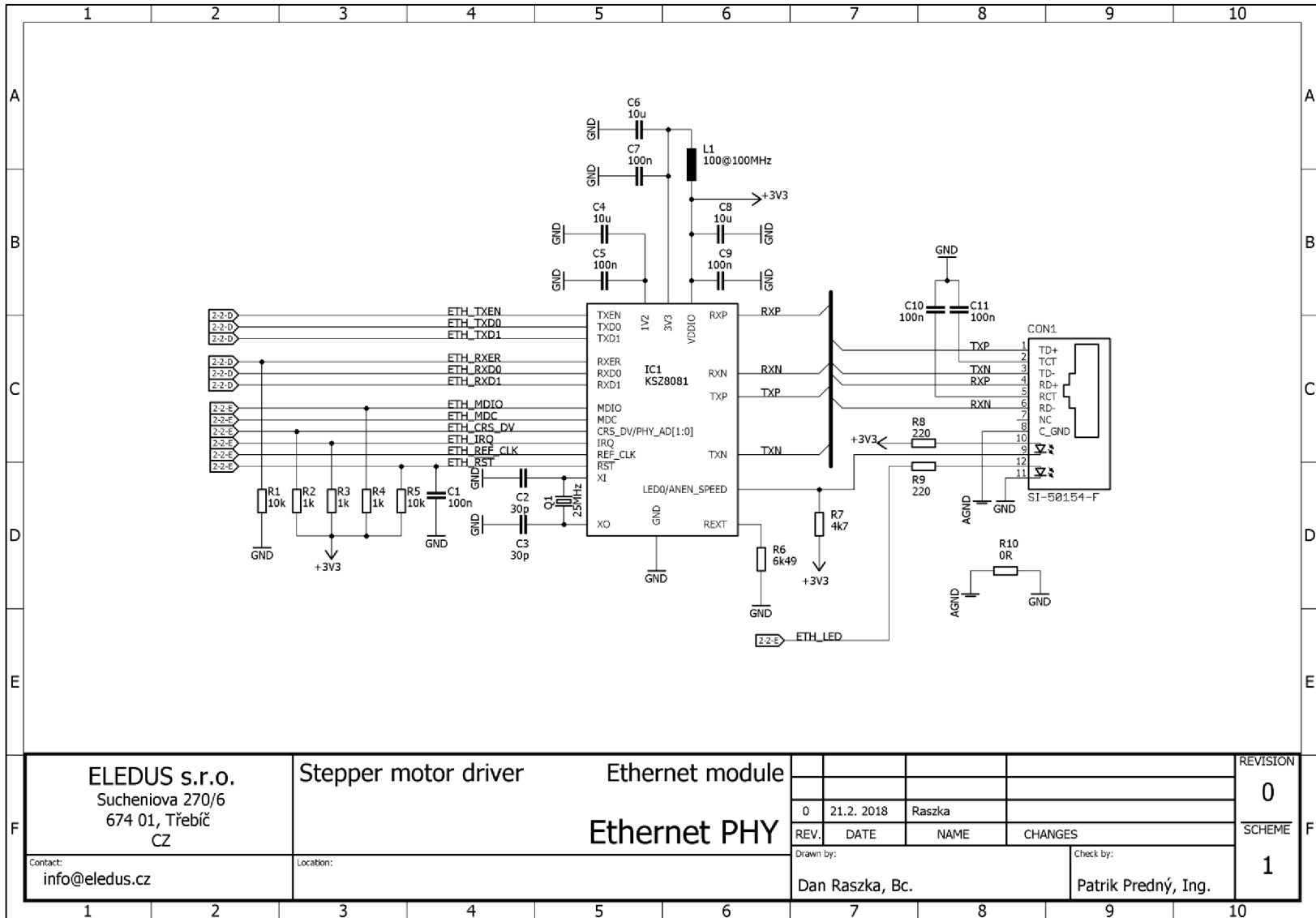
F	ELEDUS s.r.o. Sucheniova 270/6 674 01, Třebíč CZ	Stepper motor driver	Power Module		REVISION	
			Aux. power supply		0	
			REV.	DATE	NAME	CHANGES
			Drawn by: Dan Raszka, Bc.		Check by: Patrik Predný, Ing.	



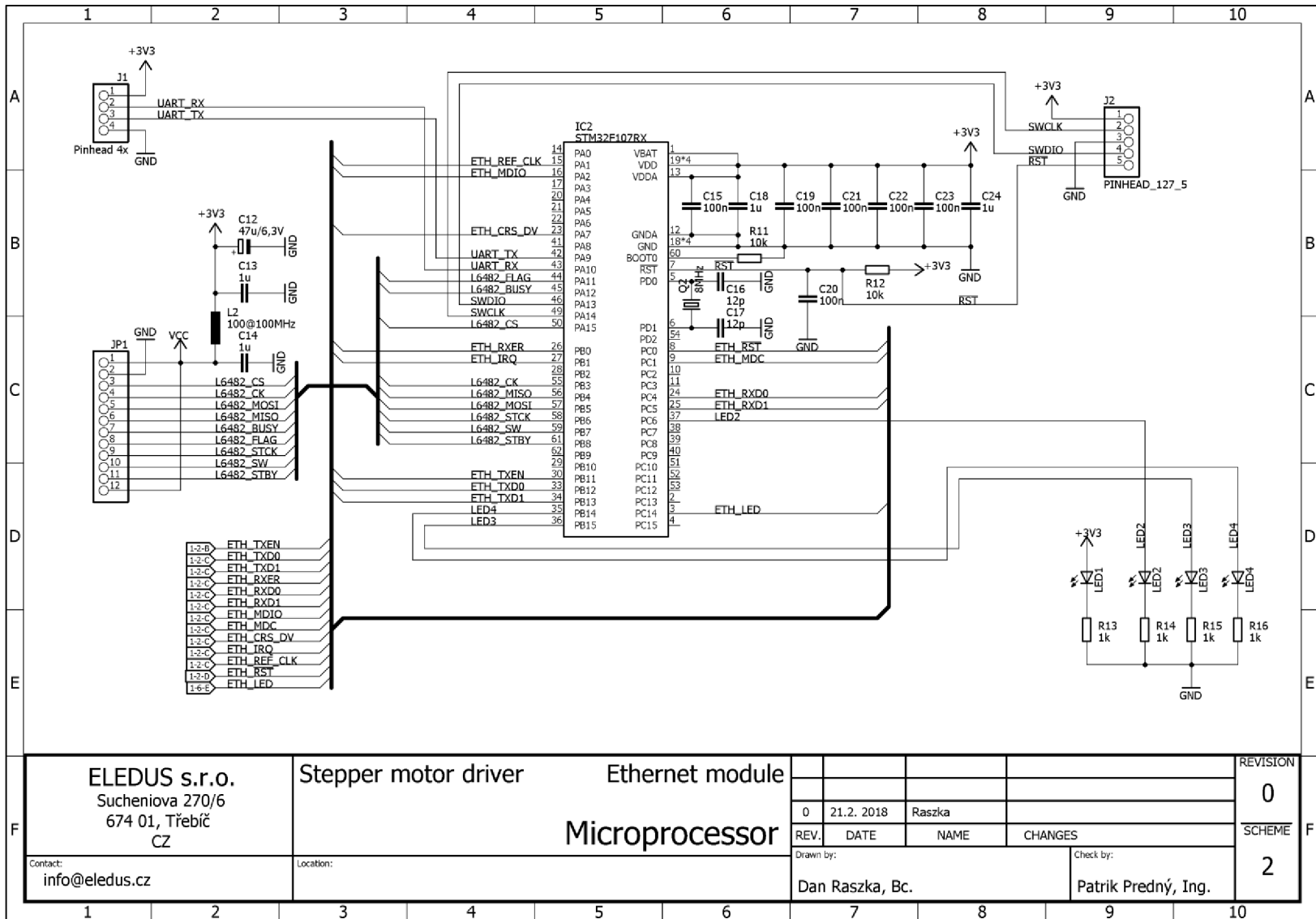
F	ELEDUS s.r.o. Sucheniova 270/6 674 01, Třebíč CZ		Stepper motor driver		EtherCAT module		REVISION	
	Contact: info@eledus.cz		Location:		EtherCAT device		0	
							1	
	REV.		DATE		NAME		CHANGES	
Dan Raszka, Bc.		18.2. 2018		Raszka				
Drawn by:		Check by:						
Dan Raszka, Bc.		Patrik Predný, Ing.						



F	ELEDUS s.r.o. Sucheniova 270/6 674 01, Třebíč CZ		Stepper motor driver		EtherCAT module		REVISION			
	Contact: info@eledus.cz		Location:		0		0			
					REV. DATE NAME CHANGES		SCHEME			
					Drawn by: Dan Raszka, Bc.		Check by: Patrik Predný, Ing.			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10



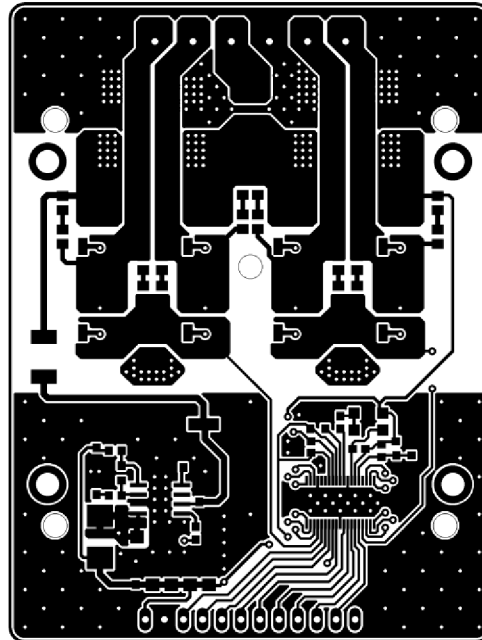
F	ELEDUS s.r.o. Sucheniova 270/6 674 01, Třebíč CZ Contact: info@eledus.cz	Stepper motor driver Location:	Ethernet module			REVISION
			Ethernet PHY			0
			REV.	DATE	NAME	CHANGES
			Drawn by: Dan Raszka, Bc.	Check by: Patrik Predný, Ing.	1	



F	ELEDUS s.r.o. Sucheniova 270/6 674 01, Třebíč CZ		Stepper motor driver		Ethernet module		REVISION			
	Contact: info@eledus.cz		Location:		REV. DATE NAME CHANGES		0			
					0 21.2. 2018 Raszka		SCHEME			
					Drawn by: Dan Raszka, Bc.		Check by: Patrik Predný, Ing.			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

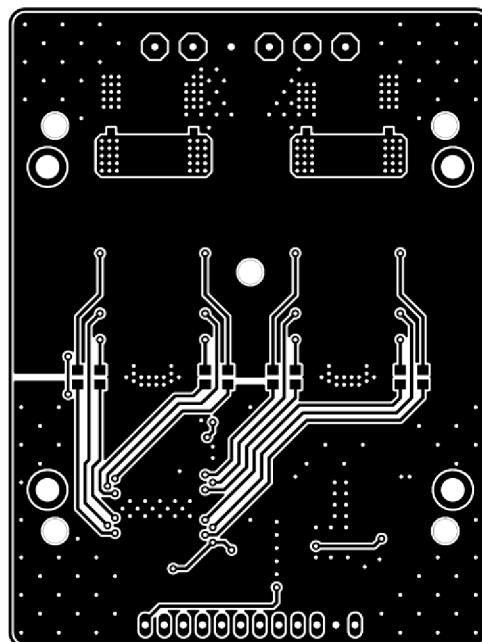
Příloha 2 - Předlohy desek plošných spojů

Deska plošného spoje výkonového modulu – strana součástek



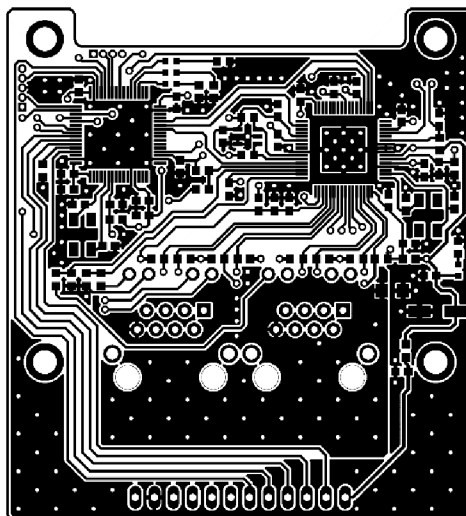
Rozměr desky 64 x 85, měřítko M1:1

Deska plošného spoje výkonového modulu – strana spojů



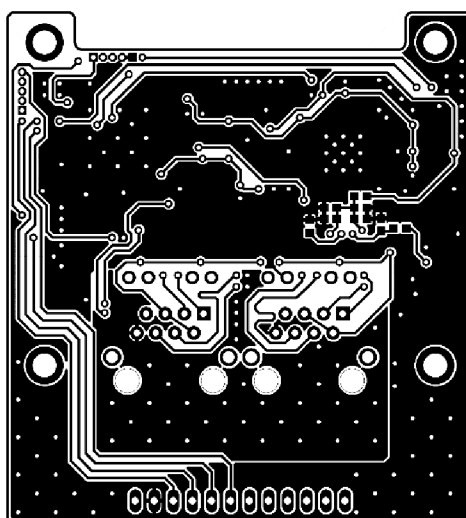
Rozměr desky 64 x 85, měřítko M1:1

Deska plošného spoje EtherCAT modulu – strana součástek



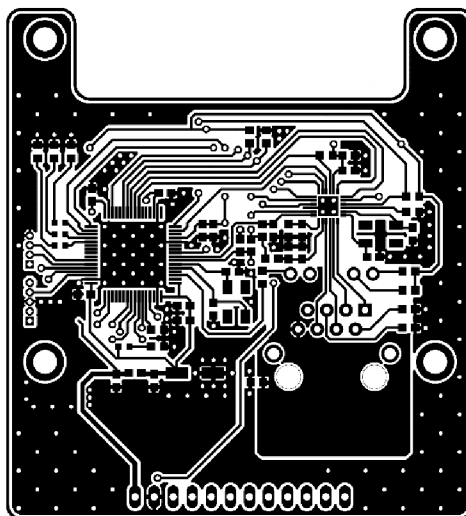
Rozměr desky 62 x 68, měřítko M1:1

Deska plošného spoje EtherCAT modulu – strana spojů



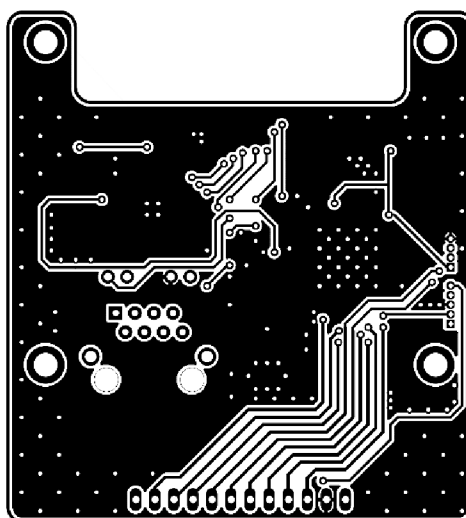
Rozměr desky 62 x 68, měřítko M1:1

Deska plošného spoje Ethernet modulu – strana součástek



Rozměr desky 62 x 68, měřítko M1:1

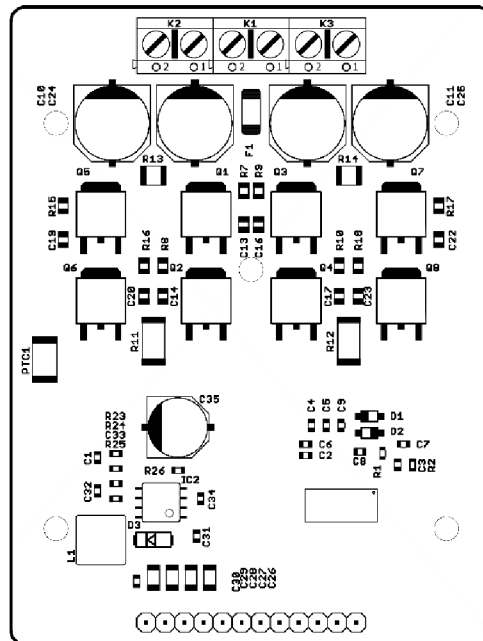
Deska plošného spoje Ethernet modulu – strana spojů



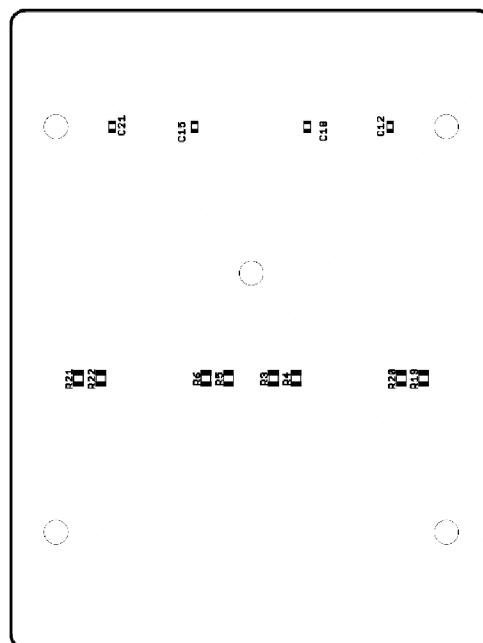
Rozměr desky 62 x 68, měřítko M1:1

Příloha 3 - Osazovací plány

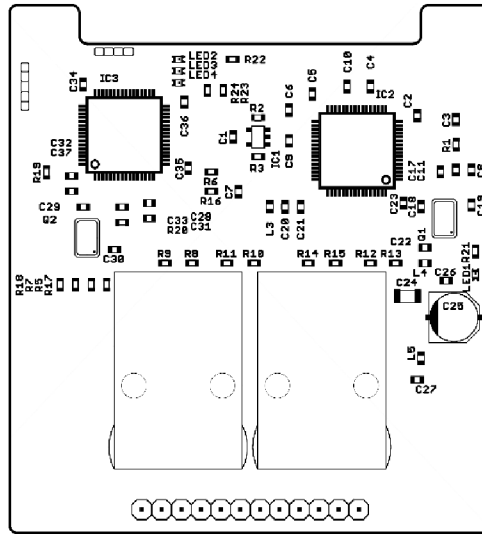
Osazovací plán výkonového modulu – strana součástek



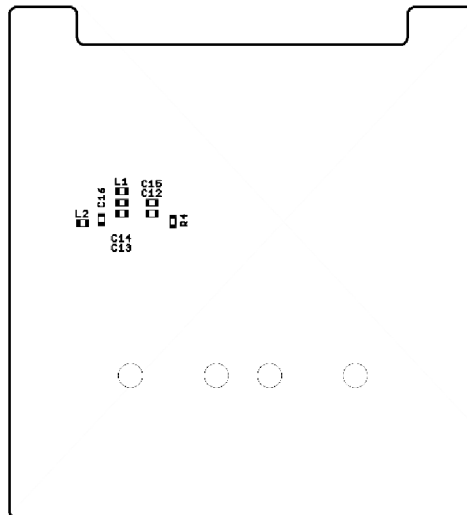
Osazovací plán výkonového modulu – strana spojů



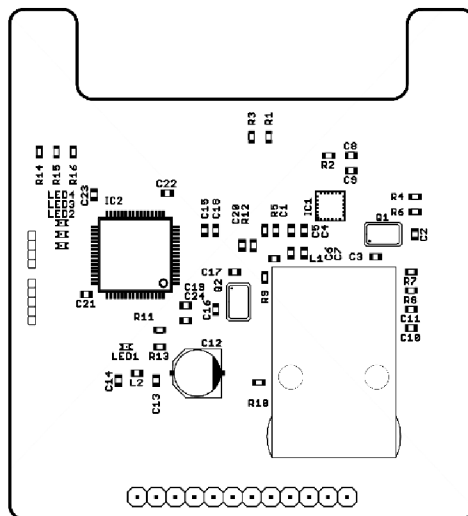
Osazovací plán EtherCAT modulu – strana součástek



Osazovací plán EtherCAT modulu – strana spojů



Osazovací plán Ethernet modulu – strana součástek



Příloha 4 - Seznamy součástek

Seznam součástek výkonového modulu

Počet kusů	Hodnota	Pouzdro	Označení	Popis
11	100n/63V	C0603	C1, C2, C4, C5, C6, C7, C12, C15, C18, C21, C34	Keramický kondenzátor
4	100u/63V	Panasonic G	C10, C11, C24, C25	Elektrolytický kondenzátor
8	100n/100V	C0805	C13, C14, C16, C17, C19, C20, C22, C23	Keramický kondenzátor
4	47u	C1206	C26, C27, C28, C29	Tantalový kondenzátor
1	100p	C0603	C3	Keramický kondenzátor
2	100n	C0603	C30, C31	Keramický kondenzátor
1	39n	C0603	C32	Keramický kondenzátor
1	30p	C0603	C33	Keramický kondenzátor
1	47u/63V	Panasonic F	C35	Elektrolytický kondenzátor
1	470n/63V	C0603	C8	Keramický kondenzátor
1	47n	C0603	C9	Keramický kondenzátor
2	BAT54W	SOD-123	D1, D2	Shottkyho dioda
1	SK26A	DO-214AC	D3	Shottkyho dioda
1	7A	2410	F1	Pojistka tavná
1	L6482	HTSSOP38	IC1	Řadič krokového motoru
1	TPS54360	SOP08	IC2	DC/DC měnič
1		1x12	JP1	Pinová lišta (rozteč 2,54mm)
3	ARK500/2	ARK500/2	K1, K2, K3	Šroubovací svorkovnice
1	47u/2A	SRP7050TA	L1	Tlumivka
1	MC36203	MC36	PTC1	Pozitivní termistor
8	IPD048N06L3	IPD048N06L3	Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8	Tranzistor unipolární
2	47k	R0603	R1, R23	Rezistor
2	10mR/3W	R2512	R11, R12	Výkonový snímací rezistor
2	60VDC	CN1210	R13, R14	Varistor
1	3k9	R0603	R2	Rezistor
1	15k	R0603	R24	Rezistor
1	10k	R0603	R25	Rezistor
1	330k	R0603	R26	Rezistor
16	4R7	R0805	R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10, R15, R16, R17, R18, R19, R20, R21, R22	Rezistor

Seznam součástek EtherCAT modulu

Počet kusů	Hodnota	Pouzdro	Označení	Popis
22	100n	C0603	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C9, C10, C11, C14, C15, C16, C17, C21, C23, C28, C32, C33, C34, C35, C36	Keramický kondenzátor
8	1u	C0603	C12, C13, C20, C22, C26, C27, C31, C37	Keramický kondenzátor
2	18p	C0603	C18, C19	Keramický kondenzátor
1	2n2/2kV	C1206	C24	Keramický kondenzátor
1	47u/6,3V	Panasonic D	C25	Elektrolytický kondenzátor
2	12p	C0603	C29, C30	Keramický kondenzátor
1	10u	C0603	C8	Keramický kondenzátor
2	SI-0154-F	SI-0154-F	CON1, CON2	RJ45 MagJack konektor
1	24AA64T	SOT23-5L	IC1	EEPROM Paměť
1	LAN9252	TQFP64	IC2	EtherCAT kontrolér
1	STM32F107RC	TQFP64	IC3	Řídící mikroprocesor
1	UART	1x4	J1	Dutinková lišta (rozteč 1,27mm)
1	SWD	1x5	J2	Dutinková lišta (rozteč 1,27mm)
1		1x12	JP1	Dutinková lišta (rozteč 2,54mm)
5	100@100MHz	L0603	L1, L2, L3, L4, L5	Feritová perla
4		0603	LED1, LED2, LED3, LED4	LED
1	25MHz	ABM3B	Q1	Krystalový oscilátor
1	8MHz	ABM3B	Q2	Krystalový oscilátor
6	10k	R0603	R1, R5, R6, R7, R19, R20	Rezistor
3	470	R0603	R16, R17, R18	Rezistor
2	3k3	R0603	R2, R3	Rezistor
4	1k	R0603	R21, R22, R23, R24	Rezistor
1	12k1	R0603	R4	Rezistor
8	49R9	R0603	R8, R9, R10, R11, R12, R13, R14, R15	Rezistor

Seznam součástek Ethernet modulu

Počet kusů	Hodnota	Pouzdro	Označení	Popis
12	100n	C0603	C1, C5, C7, C9, C10, C11, C15, C19, C20, C21, C22, C23	Keramický kondenzátor
1	47u/6,3V	Panasonic D	C12	Elektrolytický kondenzátor
4	1u	C0603	C13, C14, C18, C24	Keramický kondenzátor
2	12p	C0603	C16, C17	Keramický kondenzátor
2	30p	C0603	C2, C3	Keramický kondenzátor
3	10u	C00603	C4, C6, C8	Keramický kondenzátor
1	SI-50154F	SI-50154F	CON1	RJ45 MagJack konektor
1	KSZ8081RNA	TQFN24-EP	IC1	Obvod Ethernetové fyzické vrstvy
1	STM32F107RC	TQFP64	IC2	Řídící mikroprocesor
1	UART	1x4	J1	Dutinková lišta (rozteč 1,27mm)
1	SWD	1x5	J2	Dutinková lišta (rozteč 1,27mm)
1		1x12	JP1	Dutinková lišta (rozteč 2,54mm)
2	100@100MHz	L0603	L1, L2	Feritová perla
4		0603	LED1, LED2, LED3, LED4	LED
1	25MHz	ABM3B	Q1	Krystalový oscilátor
1	8MHz	ABM3B	Q2	Krystalový oscilátor
4	10k	R0603	R1, R5, R11, R12	Rezistor
1		R0603	R10	Rezistor
7		R0603	R2, R3, R4, R13, R14, R15, R16	Rezistor
1		R0603	R6	Rezistor
1		R0603	R7	Rezistor
2		R0603	R8, R9	Rezistor

Příloha 5 - Seznam příloh na CD

Fotografie hotového zařízení a jednotlivých modulů

Schémata zapojení jednotlivých modulů

Návrhy desek plošných spojů s výrobními daty

Zdrojový kód testovacího programu

Měřená data a zachycená komunikace pomocí programu Wireshark