



Fakulta elektrotechnická
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Inteligentní monitor provozního stavu kompresoru

Autor práce: Bc. Pavel Špírek

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Pavlíček, Ph.D.

Plzeň 2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel ŠPÍREK**
Osobní číslo: **E12N0057P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Název tématu: **Inteligentní monitor provozního stavu kompresoru**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte funkce kompresorových jednotek a dostupnost ochran a dohledových prvků těchto jednotek.
2. Navrhněte řešení dohledových prvků kompresoru (tlak, teplota, provozní čas, apod.) a jejich on-line monitorování přes Ethernet (např. MSP430Fxxxx + ENC28J60). Diskutujte možnost zobrazování základních údajů na displeji a ukládání naměřených dat.
3. Navrhněte silovou ochranu pro případné odpojení kompresoru od napětí.
4. Dané zapojení realizujte.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vladimír Pavlíček, Ph.D.

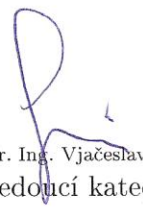
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem a konstrukcí zařízení pro vzálený monitoring a diagnostiku kompaktních kompresorů. Úvodní část je věnována obecnému rozboru problematiky a návrhu celkové koncepce dohledového systému. Dále jsou specifikovány jednotlivé diagnostické funkce, včetně volby vhodných senzorů a měřicích metod. V následující kapitole je popsán praktický návrh hardware diagnostické jednotky založené na mikrokontroléru STM32F407 s jádrem ARM Cortex-M4F a Ethernet řadiči W5100. Firmware mikrokontroléru využívá implementace operačního systému FreeRTOS. Během návrhu byl brán ohled na opakovatelnost výroby, nízkou výrobní cenu a možnost rozšíření systému o další funkce. V rámci práce byla rovněž vytvořena softwarová výbava pro PC, sloužící pro ovládání diagnostické jednotky a on-line vizualizaci dat. V závěru práce jsou shrnuty dosažené výsledky.

Klíčová slova

kompresor, technická diagnostika, STM32, FreeRTOS, Ethernet

Abstract

Špírek, Pavel. Air-pump intelligent monitor unit [Inteligentní monitor provozního stavu kompresoru]. Pilsen, 2014. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Ing. Vladimír Pavlíček, Ph.D.

This thesis deals with a design of a system for remote air-pump supervision and diagnostics. The introduction part is dedicated to general decomposition of given problem and global system design. Next, the individual diagnostics functions are specified, including the choice of suitable sensors and measurement methods. In the following chapter, a practical design of the diagnostics unit is discussed in details. The hardware is based on STM32F407 ARM Cortex-M4F microcontroller and W5100 Ethernet controller. The MCU firmware utilizes FreeRTOS, a real-time OS kernel. The design respects a production repeatability and low total cost. There is also a potential for additional system expansion. In the scope of this thesis, a PC software for diagnostic unit control and on-line data visualization was also developed. In the conclusion part, reached results are summarized.

Keywords

air pump, technical diagnostics, STM32, FreeRTOS, Ethernet

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci 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 závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení §11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení §270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 6. května 2014

Bc. Pavel Špírek

.....
Podpis

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	vii
1 Úvod	1
1.1 Motivace:.....	1
1.2 Cíle práce:.....	1
2 Koncepce systému	2
2.1 Přenos dat přes Ethernet.....	2
2.2 Záznam naměřených dat.....	3
2.3 Připojení senzorů.....	4
2.4 HW Platforma.....	4
2.4.1 Řešení založené na jednodeskovém mikropočítači a MCU.....	4
2.4.2 Řešení s funkcionalitou implementovanou do MCU.....	5
3 Dohledové a diagnostické prvky	6
3.1 Sledované provozní veličiny.....	6
3.1.1 Provozní doba.....	6
3.1.2 Teplota.....	6
3.1.3 Tlak vzduchu.....	6
3.1.4 Vibrodiagnostika.....	6
3.2 Výběr senzorů neelektrických veličin.....	8
3.2.1 Sensory pro měření teploty.....	8
3.2.1.1 Termočlánky.....	8
3.2.1.2 Kovové odporové senzory.....	9
3.2.1.3 Sensory na bázi polovodičů.....	9
3.2.2 Sensory pro měření tlaku ve vzdušníku.....	9
3.2.3 Metody snímání polohy hřídele.....	10
3.2.4 Měření vibrací.....	11

3.2.4.1	Současný stav.....	11
3.2.4.2	Využití akcelerometrů	12
3.2.4.3	Využití snímačů detonačního spalování	12
4	Obvodové řešení.....	13
4.1	Napájecí část.....	13
4.1.1	Zdroj 5V.....	14
4.1.2	Zdroj 3.3V.....	14
4.1.3	Zdroj 5V pro analogové moduly.....	15
4.1.4	Napájení senzorů s proudovým výstupem	15
4.2	Mikrokontrolér	15
4.2.1	Program.....	17
4.3	Ethernet	17
4.4	Senzorová část.....	18
4.4.1	Teplota	18
4.4.2	Chod motoru	19
4.4.3	Tlak ve vzdušníku.....	19
4.4.4	Poloha hřídele	20
4.4.5	Vibrace.....	21
4.5	Mechanická konstrukce	21
5	Popis funkce	23
5.1	Firmware MCU	23
5.1.1	Inicializace.....	23
5.1.2	Proces HTTPserver.....	24
5.1.2.1	Virtuální soubor STATUS.XML	25
5.1.2.2	Virtuální soubor CLOCKSET.HTM	27
5.1.2.3	Virtuální soubor CONTROL.HTM	27
5.1.2.4	Reálný soubor, výpis adresářů	27

5.1.2.5	Neexistující soubor	28
5.1.3	Proces Monitor.....	28
5.1.4	Proces LCDview	28
5.1.5	Proces Samples_Writer.....	29
5.1.6	Proces Guard.....	30
5.1.7	Meziprocesní komunikace	30
5.2	Klientská PC aplikace	31
5.3	Konvertor pro Matlab	32
6	Testování a dosažené výsledky	32
7	Diskuze, návrhy ke zlepšení.....	34
8	Závěr	35
	Literatura.....	37
	Příloha A – Schémata zapojení	39
A.1	Schéma zapojení propojovací desky	39
	Příloha B – Desky plošných spojů.....	40
B.1	Propojovací deska.....	40
B.2	Modul řadiče Wiznet W5100	44
B.3	Modul senzoru polohy hřídele.....	45
B.4	Modul snímače chodu motoru.....	46
B.5	Modul 3-kanálového teploměru	47
B.6	Redukce pro LCD konektor	48
	Příloha C – Seznam zdrojových kódů	49
C.1	Zdrojové kódy programu MCU.....	49
C.1	Zdrojové kódy klientské aplikace.....	50
	Příloha D – Adresářová struktura SD karty	51

Seznam symbolů a zkratek

ADC	Analog-Digital Converter (analogově-číslicový převodník)
BGA	Ball Grid Array (pouzdro součástky)
CAN	Controller Area Network (průmyslová sběrnice)
FAT	File Allocation Table (typ souborového systému)
FFT	Fast Fourier Transform
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HW	Hardware
I ² C	Inter-Integrated Circuit (synchronní sériová sběrnice)
MEMS	Micro Electro-Mechanical System
MCU	Microcontroller Unit (jednočipový mikropočítač)
MKO	Monostabilní klopný obvod
MPU	Microprocessor Unit
RMS	Root Mean Square (Efektivní hodnota signálu)
RTC	Real Time Counter
RTOS	Real-Time Operating System (Operační systém reálného času)
SD	Secure Digital (typ paměťové karty)
SDRAM	Synchronous Dynamic Random Access Memory
SRAM	Static Random Access Memory
USB	Universal Serial Bus
XML	Extensible Markup Language (jazyk pro strukturovaný popis dat)

1 Úvod

1.1 Motivace:

Kompresory a zařízení na úpravu stlačeného vzduchu patří v průmyslu mezi široce používané stroje. Stejně jako u jiných strojů je základním předpokladem pro jejich dlouhou životnost a spolehlivou činnost zajištění vhodných provozních podmínek. Rovněž je nutné provádět pravidelnou revizi a údržbu. Nesplnění některé z těchto podmínek může vyústit v havárii stroje a způsobit tak pozdržení výroby či další ekonomické ztráty. Následná oprava stroje po jeho fatálním selhání rovněž bývá časově i finančně velice náročná. U kompresorů se jedná zejména o případy přehřátí tlakovací jednotky v důsledku jeho přetěžování.

Předejít těmto situacím by umožňoval systém, který by permanentně monitoroval nejdůležitější provozní veličiny kompresoru a prováděl jejich automatickou analýzu. Na základě této analýzy by bylo možné upozornit zodpovědné osoby na vyskytnutý problém či dokonce v krajním případě stroj samočinně odstavit, pokud by hrozilo jeho vážné poškození. Na současném trhu bohužel neexistuje žádné zařízení určené speciálně k tomuto účelu. Několik společností nabízí služby diagnostiky strojů, nicméně tyto služby mají ve většině případů charakter jednorázové obchůzky. Uvedený systém naopak vyžaduje existenci zařízení, které by umožňovalo provozní údaje sledovat trvale. Nutným požadavkem na takové zařízení je jeho cenová dostupnost, aby jej bylo možné dodávat jako příslušenství ke kompresorovým stanicím.

1.2 Cíle práce:

Cílem této práce je navrhnout a realizovat jednotku pro vzdálený monitoring a diagnostiku kompresorových stanic. Zařízení by mělo trvale měřit vybrané provozní veličiny a umožnit jejich vzdálenou vizualizaci prostřednictvím informační sítě Ethernet. Nejdůležitější údaje by rovněž měly být zobrazovány lokálně na LCD.

Další implementovanou funkcí by měl být záznam vibrací stroje společně s úhlem natočení hřídelů motorů, je-li spuštěno tlakování. Následná analýza takto sesbíraných dat by umožnila včasnou detekci a lokalizaci mnoha porouchaných či opotřebovaných částí stroje ještě předtím, než se jejich defekt naplno projeví a upozornila tak na blížící se nutnost servisního zásahu.

Během návrhu by měl být brán zřetel na nízkou koncovou cenu celého systému, která se z velké části odvíjí od počtu a typu použitých senzorů. Důležitá je rovněž opakovatelnost výroby, která souvisí s dostupností použitých komponent. V navrženém zařízení by pokud možno měly být použity pouze standardní a snadno sehnatelné součástky.

2 Koncepce systému

Tato kapitola se věnuje dekompozici problematiky na jednotlivé dílčí problémy a popisuje jejich možná řešení. Následně jsou uvedeny dvě různé možnosti pojetí celého systému, u nichž jsou diskutovány jejich výhody a nevýhody.

Ze zadání vyplývá potřeba vizualizace provozních dat na vzdáleném PC, přičemž data budou přenášena prostřednictvím informační sítě Ethernet. K nejdůležitějším problémům, které je tudíž potřeba vyřešit, patří zejména návrh struktury síťové komunikace. S tou úzce souvisí i možné metody prezentace dat uživateli. Dále je nutné vyřešit otázku záznamu a ukládání těchto dat.

2.1 Přenos dat přes Ethernet

Architektura síťové části se odvíjí zejména od použitého protokolu transportní vrstvy – TCP nebo UDP. UDP je nepotvrzovaný, datagramově orientovaný protokol. Jeho použití je vhodné zejména v aplikacích, kde je nutné zajistit nízkou latenci přenášených dat. Naopak u něj není zajištěno spolehlivé doručení přenášených paketů. Protokol TCP má naproti tomu spojovaný charakter, provádí potvrzování přijatých dat a zajišťuje jejich opětovné odvysílání v případě potřeby. Tím je zajištěna spolehlivost přenosu [6].

Protokol TCP je tedy pro dané nasazení vhodnější, neboť sám o sobě garantuje správnost doručených dat a odpadá tím nutnost tuto funkcionalitu implementovat do protokolů vyšších vrstev.

Vlastností protokolu TCP jsou striktně oddělené role klient – server jednotlivých komunikačních stran. Iniciátorem spojení je vždy klient, naopak server naslouchá a následně reaguje na příchozí požadavky. Je třeba rozdělit tyto funkce mezi navrhovaný monitor provozního stavu stroje (dále uváděn jako MPS) a PC, které bude sloužit k prezentaci provozních dat uživateli (dále jen PC). Technicky realizovatelné možnosti jsou následující:

1. PC - Server, MPS – Klient

V této konfiguraci by navrhované zařízení muselo navázat spojení s vizualizačním PC v případě nutnosti přenosu dat. To s sebou přináší několik problémů. Předně by na PC musela běžet serverová aplikace, což je v některých případech nevhodné vzhledem k nastaveným pravidlům zabezpečení. Dále v případě nutnosti zobrazovat data na více PC by musel MPS navazovat spojení se všemi PC postupně. Tato možnost je tedy zcela vyloučená.

2. PC – Klient, MPS – Server

Funkce serveru by byla implementována přímo v MPS. K tomuto serveru by se připojovaly jednotlivé vizualizační PC v okamžiku, kdy by požadovaly aktuální data.

3. PC – Klient, MPS – Klient, Server běží na vyhrazeném stroji

Toto řešení by poskytovalo největší flexibilitu. Pro funkci serveru by byl vyhrazený samostatný PC, na který navrhované zařízení odesílalo data. Následně by tato data zprostředkovala jednotlivým klientům. Server by zároveň mohl plnit i funkci datového úložiště, která by tudíž nemusela být implementována přímo v MPS. Nutná přítomnost vyhrazeného serveru by však znamenala vyšší provozní náklady.

Jako protokol aplikační vrstvy, který bude sloužit k přenosu dat z MPS do PC byl zvolen HTTP. Předností tohoto protokolu je jeho značná flexibilita a univerzálnost. Hodí jak pro prezentaci dat uživateli, tak pro komunikaci mezi 2 stroji (M2M). Samotná data jsou přenášena ve formátu XML, který je možný na straně PC snadno zpracovat. Bližší informace o struktuře komunikace lze nalézt v kapitole 5.1.2.1.

2.2 Záznam naměřených dat

Množství dat generovaných během činnosti přípravku lze dopředu odhadnout jen orientačně. Výrazně totiž závisí na počtu sledovaných provozních parametrů a způsobu, jakým budou měřeny. Fyzikální veličiny jako například tlak ve vzduchové nádrži, či teploty jednotlivých částí stroje se v průběhu času mění relativně pomalu, pro zachycení jejich průběhu je tedy stačí vzorkovat s periodou cca 1 – 2 Hz. Naopak třeba záznam vibrací stroje společně s polohou pístu pro následnou vibrodiagnostickou analýzu vyžaduje mnohem rychlejší vzorkování. Při uvažování vzorkovací rychlosti 5kHz a velikosti jednoho vzorku 2B vychází datový tok 10kB/s. Pokud bude současně ukládána i okamžitá poloha pístů obou kompresních jednotek daného typu kompresoru s rozlišením 8 bitů, datový tok se zvýší na 20kB/s. Experimentálně zjištěná průměrná doba tlakování ze 6 barů na 8 barů činí přibližně

30 sekund. Jeden záznam tak zabere na paměťovém médiu asi 600kB – do této hodnoty nejsou započteny ostatní „pomalé“ veličiny jako teplota a tlak. Je-li stroj vytížen tak, že provádí tlakování v průměru 10x denně, je odhadovaná denní velikost záznamu 6MB.

Trvalý provoz, ke kterému má být zařízení určeno, nepřipouští k ukládání takto velkých datových toků použít paměti EEPROM nebo SPI Flash z důvodu jejich nedostatečné kapacity (desítky kB, resp. jednotky MB). Pro dostatečný uživatelský komfort by mělo paměťové médium pojmut záznam za období minimálně 1 roku. Jeho kapacita tedy musí dosahovat alespoň 2GB.

Využít je možné například USB Flash Disk nebo paměťovou kartu SD. Oba jmenované druhy paměťových médií vyhovují z hlediska kapacity i potřebné rychlosti. Výhodou je rovněž nízká cena za jednotku paměťové kapacity.

Alternativně se nabízí implementovat funkci logování dat až na druhém konci komunikační linky, tedy na obslužném PC. Tato varianta by byla efektivní zejména v případě, kdy by jako server sloužilo vyhrazené PC. Největším přínosem tohoto řešení by byla možnost ukládat data do některého z rozšířených databázových systémů (MSSQL, SQLite), což by při následném zpracování umožnilo jejich jednodušší správu a vyhledávání.

2.3 Připojení senzorů

Data z jednotlivých senzorů mohou být čtena buďto centrálně jedním mikrokontrolérem, nebo může být vytvořena senzorová síť založená na některé z průmyslových sběrnic (CAN, LIN). Použití senzorové sítě by umožnilo snadné přidávání či odebírání senzorů bez nutnosti modifikace hardware systému. Znamenalo by ale osadit ke každému senzoru separátní mikrokontrolér s příslušným řadičem, což by zvyšovalo cenu takového řešení. Některé měřené veličiny (vibrace) by stejně nebylo možné přes takovou síť přenášet kvůli její nedostatečné přenosové rychlosti. Stejně tak se nepředpokládá velká vzdálenost mezi samotným kompresorem a měřicí jednotkou. Při celkovém počtu osazených senzorů řádově v jednotkách kusů tedy nemá použití senzorové sítě zásadní přínos.

2.4 HW Platforma

2.4.1 Řešení založené na jednodeskovém mikropočítači a MCU

Pro HW základ celého systému se nabízí použít některý z moderních jednodeskových mikropočítačů založených na mikroprocesoru ARM. Mezi typické zástupce těchto mikropočítačů patří například BeagleBone Black od výrobce CircuitCo nebo Raspberry Pi. Oba jmenované typy umožňují běh specializovaných distribucí operačního systému Linux a

disponují množstvím operační paměti (512MB). Jádro operačního systému Linux ovšem nepracuje v reálném čase, proto jej nelze přímo použít k obsluze jednotlivých senzorů. Pro tento účel ani mikropočítače nedisponují potřebnými perifériemi (AD převodník). Ke čtení dat ze senzorů by jej bylo nutné doplnit nějakým MCU, který je k této funkci vhodnější. MCU by se samotným mikropočítačem komunikoval například přes paralelní paměťové rozhraní nebo sběrnici SPI.

Řešení založené na jednodeskovém mikropočítači by přinášelo výhody zejména díky snadné implementaci síťové funkcionality. Repozitáře příslušných linuxových distribucí obsahují množství kvalitního síťového softwaru, vhodného pro požadované nasazení. Stejně tak umožňují jednoduché připojení paměťových médií, jako jsou USB disky nebo paměťové karty.

Zásadním nedostatkem tohoto řešení je především nejasná dostupnost jmenovaných mikropočítačů v dlouhodobém časovém horizontu, která je nutná pro opakovatelnou výrobu. Zejména první jmenovaný mikropočítač BeagleBone Black se v současné době potýká s nedostatečnými výrobními kapacitami a celosvětově opožděnými dodávkami [8]. Přejít na jiný typ mikropočítače by u již hotového designu byl obtížný, neboť jejich hardware se výrazně odlišuje. Bylo by také možné použít některý z průmyslových mikropočítačů, které jsou zmiňovaným problémem méně ohroženy (například standard PC-104), ty však nevyhovují kvůli své vysoké ceně.

2.4.2 Řešení s funkcionalitou implementovanou do MCU

Alternativou je implementace veškeré požadované funkcionality do mikrokontroléru. Po prozkoumání současné nabídky mikrokontrolérů se tato varianta ukázala jako realizovatelná, použije-li se typ s dostatečným výkonem a výbavou [9]. Na mikrokontroléru je možné spustit některý operační systém reálného času – mezi nejrozšířenější patří například FreeRTOS [10]. Jednotlivé procesy operačního systému mohou zajišťovat požadované úlohy jako čtení dat ze senzorů, síťová komunikace nebo obsluha LCD displeje. Síťovou komunikaci je možné do MCU implementovat s využitím externího řadiče sítě Ethernet. Rovněž čtení a zápis dat na paměťovou kartu typu SD, včetně podpory souborových systémů FAT a FAT32, jsou operace realizovatelné na MCU. Vzhledem k dalším výhodám, jako je nižší konečná cena zařízení, byla pro tvorbu diplomové práce zvolena právě tato varianta.

3 Dohledové a diagnostické prvky

3.1 Sledované provozní veličiny

V této kapitole jsou zvoleny fyzikální veličiny, které budou sledovány a analyzovány během provozu stroje. Soubor měřených parametrů musí být dostatečně obsáhlý, aby měl vypovídající hodnotu při diagnostice stroje. Zároveň je nutné vybrat pouze ty veličiny, které lze spolehlivě měřit pomocí běžně dostupných senzorů.

3.1.1 Provozní doba

Základní sledovaný údaj je provozní doba tlakovacích jednotek. Jedná se o důležité vodítko pro strategické plánování údržby. Ta by měla být prováděna v pravidelných časových intervalech, které se odvíjí od četnosti používání kompresoru.

3.1.2 Teplota

Teplotní charakteristika stroje tvoří další významnou diagnostickou informaci. Nadměrné zahřívání některé funkční části může indikovat závadu nebo nevhodné provozní podmínky. Navrhovaný systém musí umožnit sledování teploty na minimálně třech nejdůležitějších místech každé kompresní jednotky – elektromotoru, válci a výdechu ventilátoru chlazení. Předpokládaná teplota těchto částí by neměla být vyšší než cca 80 – 90°C dle typu kompresoru.

3.1.3 Tlak vzduchu

Průběh tlaku vzduchu ve vzdušníku kompresoru poskytuje informaci o způsobu využívání stroje. Měřením této veličiny je také možné odhalit některé vážné poruchy, například netěsnost výstupního ventilu – projeví se mírným záporným gradientem tlaku vzduchu v době nečinnosti stroje.

3.1.4 Vibrodiagnostika

Nejzásadnějším přínosem navrhovaného systému je však permanentní monitoring vibrací stroje během tlakování – tzv. vibrodiagnostika. Jedná se o metodu diagnostiky provozního a technického stavu točivých strojů, kde je hlavním měřeným parametrem mechanické kmitání. Díky analýze vibrací je možné včasné odhalení a lokalizace mnoha porouchaných částí stroje. Závady, které se nejčastěji projevují zvýšením vibrací jsou zejména [11]:

- Nevyváženost rotorů

- Nesouosost spojek, ložisek, převodů
- Různá mechanická uvolnění
- Poškození valivých ložisek
- Opotřebenění převodů
- Hydraulické a aerodynamické problémy
- Zadírání
- Rezonance
- Deformace

Vyhodnocení vibrací může probíhat buďto v časové nebo ve frekvenční oblasti. Vibrační analýza v časové oblasti je používána zejména v souvislosti s posouzením celkového stavu stroje. Zabývá se zkoumáním parametrů signálu, jako je amplituda, střední hodnota a efektivní hodnota. Frekvenční analýza se naopak používá v případech, kdy je třeba určit konkrétní poruchu. Měřený signál je pomocí FFT převeden do frekvenční oblasti, kde se následně analyzují jednotlivé části spektra. Bližší informace o frekvenční diagnostice vibrací lze nalézt v [11] a [13].

Metodika hodnocení úrovně vibrací točivých strojů je definována normou ISO 10816. Tato norma jako vstupní parametr bere efektivní hodnotu rychlosti vibrací ve frekvenčním pásmu 10Hz – 1kHz. Naměřenou rychlost vibrací je pak možné porovnat s tabulkou, která pro jednotlivé kategorie strojů rozlišuje hodnoty vibrací na stupnici „dobré“ až „nepřípustné“. Běžně používané kompresorové stanice spadají do kategorie Třída 1 – malé stroje (do 15kW), případně Třída 2 – stroje střední velikosti (15kW – 300kW).

VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816					
Machine		Class I small machines	Class II medium machines	Class III large rigid foundation	Class IV large soft foundation
in/s	mm/s				
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28			
	0.02	0.45			
	0.03	0.71		good	
	0.04	1.12			
	0.07	1.80			
	0.11	2.80		satisfactory	
	0.18	4.50			
	0.28	7.10		unsatisfactory	
	0.44	11.2			
	0.70	18.0			
	0.71	28.0		unacceptable	
	1.10	45.0			

Obr. 3.1 Hodnocení úrovně vibrací dle ISO 10816 (Zdroj: [12])

Záznam průběhu vibrací při každém tlakování rovněž umožní tvorbu trendů. Ty poskytují informaci o vývoji velikosti vibrací v čase a na jejich základě lze například odhadnout naléhavost provedení servisního zásahu. Společně s ostatními uchovávanými provozními parametry je také možné určit přesný čas vzniku problému a odhalit možnou příčinu.

Hodnotnou informaci pro vibrodiagnostiku přináší uchovávání polohy pístu (resp. úhlu natočení hřídele elektromotoru) synchronně se záznamem průběhu vibrací. Znalost časového průběhu vibrací v souvislosti s okamžitou polohou pístu může usnadnit detekci některých poruch, zejména opotřebovaných ložisek klikového hřídele nebo ventilů. Navrhované zařízení tedy bude implementovat i tuto funkci.

3.2 Výběr senzorů neelektrických veličin

3.2.1 Senzory pro měření teploty

Senzorů pro snímání teploty existuje na trhu mnoho typů, odlišujících se jak mechanickou konstrukcí, tak fyzikálním principem činnosti. Podle posledního jmenovaného kritéria lze snímače teploty rozdělit na 3 nejrozšířenější skupiny – termočlánky, kovové odporové senzory a polovodičové senzory.

3.2.1.1 Termočlánky

Termočlánky jsou v průmyslu používány zejména díky své schopnosti měřit relativně vysoké teploty – až 1250°C v případě nejrozšířenějšího typu „K“ [1]. V průmyslovém

provedení mají termočlánky většinou podobu teplotní sondy v podobě úzké trubičky. Toto provedení je vhodné spíše pro měření teploty kapalin a plynů, než kovových povrchů. Připočteme-li navíc vysokou náročnost zpracování výstupního signálu (je vyžadován precizní přístrojový zesilovač), nutnost kompenzovat teplotu studeného konce a vysokou cenu termočlánků, není tento způsob snímání teploty pro danou aplikaci příliš vhodný.

3.2.1.2 Kovové odporové senzory

Jako další metoda se nabízí využít kovové odporové senzory teploty. Do této skupiny patří především platinové senzory Pt100 a Pt1000. Tyto senzory mohou být použity k měření teplot až do 500°C. Mechanicky jsou tyto snímače provedeny jako keramická destička s napařenou vrstvou platiny. Tato konstrukce je již výrazně vhodnější pro měření teplot kovových povrchů. Výhodou je taktéž dobrá linearita převodu v požadovaném rozsahu od 0°C do 100°C. Stále však zůstává nutnost použití měřicího můstku a precizních analogových obvodů pro zpracování výstupního signálu. Taktéž je nutné kompenzovat odpor přírodních vodičů [1].

3.2.1.3 Senzory na bázi polovodičů

Do poslední skupiny je možné zařadit především termistory a senzory s P-N přechodem. Výhodou termistorů je především nízká cena a dostupnost senzorů ve vhodném konstrukčním provedení – například typ EPCOS B57045K v podobě šestihranu se závitem M3. Tyto vlastnosti jsou na druhé straně vyváženy silně nelineární převodní charakteristikou a především vysokými výrobními tolerancemi (běžně 10 – 20%), které by vyžadovaly kusovou kalibraci každého senzoru.

Nejvýhodněji z hlediska svých vlastností vychází snímání teploty měřením úbytku napětí na přechodu P-N v propustném směru. K tomuto účelu lze využít prakticky libovolnou součástku obsahující alespoň jeden P-N přechod – například diodu nebo bipolární tranzistor. Další předností tohoto řešení je dostupnost integrovaných obvodů pro zpracování signálu z několika diodových čidel a výstupem dat na digitální sběrnici.

3.2.2 Senzory pro měření tlaku ve vzdušníku

Tlak ve vzduchové nádrži kompresoru je měřen přes rozbočovací T-článek umístěný před redukčním ventilem. K měření tlaku je s ohledem na bezpečnost prakticky nutné použít převodník tlaku v průmyslové podobě, vybavený standardizovaným šroubením G1/4“ nebo G1/2“. Zásadní problém těchto senzorů je vysoká cena v řádu tisíců Kč. Zde však náhrada není možná. Existují sice levnější modulové senzory v provedení do desky plošných spojů

[2], mají ale nízký rozsah (zpravidla do 4 barů) a zcela nevhodnou konstrukci, která by se ke standardnímu šroubení upevňovala jen velmi těžko.



Obr. 3.2 Kompaktní senzor tlaku Danfoss MBS 3000 (Zdroj: [7])

3.2.3 Metody snímání polohy hřídele

Senzor pro snímání polohy hřídele motoru musí vykazovat především vysokou odolnost proti vibracím. Z tohoto důvodu by bylo nejvhodnější použít průmyslové rotační snímače absolutní polohy, které se vyznačují robustní konstrukcí. Tyto snímače pracují na magnetickém či optickém principu a poskytují rozlišení polohy na 10 – 13 bitů [3]. Výstup dat je digitální – buďto paralelní v grayově kódu nebo sériový přes sběrnici SPI či SSI. Zásadním problémem těchto senzorů je však značně vysoká cena, která je zcela v rozporu s celkovou koncepcí zařízení.

Bylo tedy přistoupeno k výzkumu alternativních metod, které by umožňovaly snímat polohu hřídele pomocí levnějších prvků, při současném zachování spolehlivosti a informační hodnoty pro vibrodiagnostiku stroje.

Prvotní myšlenkou byla výroba vlastního čidla v kompaktní podobě, pracujícího na optickém principu, které by se stejně jako průmyslové typy upevnilo na hřídel stroje. Tento způsob ale byl brzy zavržen, neboť s dostupnými prostředky by se nepodařilo vyrobit čidlo dostatečně odolné proti vibracím a tím pádem ani spolehlivé.

Jako další možnost se nabízelo využít pravidelného tvaru chladicí vrtule, která je u daného typu kompresoru upevněna na hřídeli motoru pod plastovým krytem. Vytvořený senzor by tedy snímal polohu lopatek pod tímto krytem. Nabízí se několik fyzikálních principů, jak by takový senzor mohl pracovat – optický, magnetický, nebo kapacitní.

Optický způsob snímání by vyžadoval precizní zaměření zdroje světla (ať už LED nebo laseru) vůči přijímači a miniaturním zrcátkům nalepeným na koncích lopatek vrtule. Uvážíme-li velmi silné vibrace tělesa kompresní jednotky, potýkalo by se toto řešení s častými poruchami. Experimentováno bylo i s monolitickými reflexními čidly, zde byl zase

problém s jejich nedostatečnou rozlišovací schopností mezi odrazivým/neodrazivým povrchem v případě snímání z požadované vzdálenosti 10 – 15mm.

V případě kapacitního snímání se nepodařilo nalézt senzor s dostatečnou šířkou pásma. Je-li kompresní jednotka poháněna 4pólovým asynchronním motorem s rychlostí přibližně 1500ot/min a chladicí vrtule má 10 lopatek, je nutné polohu vzorkovat s frekvencí alespoň 500Hz ($1500/60 \cdot 2$). Cenově dostupné převodníky kapacity však dosahují rychlosti maximálně 200Hz [4].

Nejlepších výsledků bylo dosaženo se snímáním na magnetickém principu. Na konce lopatek chladicí vrtule byly nalepeny malé neodymové permanentní magnety s rozměry 5x5x5mm. Přítomnost magnetického pole je poté snímána hallovými sondami, umístěnými na vnějším povrchu plastového krytu motoru. Použijí-li se ke snímání 2 hallovy sondy, která jsou vůči ose hřídele vzájemně posunutá o vhodný prostorový úhel, je možné polohu hřídele rozlišit na počet intervalů rovný dvojnásobku počtu lopatek vrtule.

$$\frac{360^\circ}{10 \cdot 2} = 18^\circ$$

V případě 10-lopátkové vrtule tento úhel činí 18°, což poskytuje rozlišení polohy na 20 intervalů. Na jedné z lopatek je nalepen ještě druhý permanentní magnet, který slouží jako reference „nulové“ polohy a je snímán samostatnou hallovou sondou. Rozlišení na 20 intervalů je sice výrazně méně, než by bylo možné dosáhnout s průmyslovými senzory, stále se však jedná o hodnotnou informaci pro vibrodiagnostiku. Testování na reálném kompresoru ukázalo, že měření je spolehlivé a jedná se o perspektivní způsob snímání polohy hřídele s velice nízkými ekonomickými náklady. Metodu však není možné aplikovat univerzálně, je vázána na konkrétní konstrukční řešení kompresorové stanice.

3.2.4 Měření vibrací

3.2.4.1 Současný stav

Problematika diagnostiky vibrací kompresoru již byla v minulosti na ZČU řešena v rámci výzkumné činnosti Ing. Oldřicha Turečka, Ph.D., Ing. Jiřího Švarného, Ph.D. a Ing. Jana Hrubého, CSc. Publikovaný článek „Ekonomické řešení diagnostiky vibrací kompresoru“ [5] se zabývá vývojem cenově dostupného vibrodiagnostického systému, včetně výběru vhodných senzorů a obvodového řešení diagnostické jednotky.

V článku jsou uvažovány 3 možné metody snímání vibrací – průmyslové akcelerometry s napět'ovým výstupem, MEMS akcelerometry a senzory detonačního spalování z automobilu.

3.2.4.2 Využití akcelerometrů

Akcelerometry s napět'ovým výstupem by byly pro danou aplikaci vhodné díky svému frekvenčnímu rozsahu, dobré linearitě a nízké výstupní impedanci. Vážným nedostatkem je však jejich vysoká cena, která je zcela v rozporu s původními požadavky.

MEMS akcelerometry jsou naopak velmi levné, jejich mechanické provedení ale nicméně příliš vhodné pro plánované nasazení – samotné pouzdro čipu nelze jednoduše upevnit k tělesu kompresoru, a při dalších mechanických úpravách nutných pro využití tohoto typu senzoru by zase mohl vyvstat problém s časovou stabilitou takového řešení [5].

3.2.4.3 Využití snímačů detonačního spalování

Následně bylo experimentováno s nestandardním využitím snímačů detonačního spalování („senzorů klepání“) z automobilu. Tyto snímače pracují na piezoelektrickém principu a vzhledem k jejich původu jsou dobře a robustně mechanicky vyřešené. Výhodou je rovněž jejich cena, která je na rozdíl od akcelerometrů s napět'ovým výstupem výrazně nižší a pohybuje se v relaci přibližně 1000Kč.

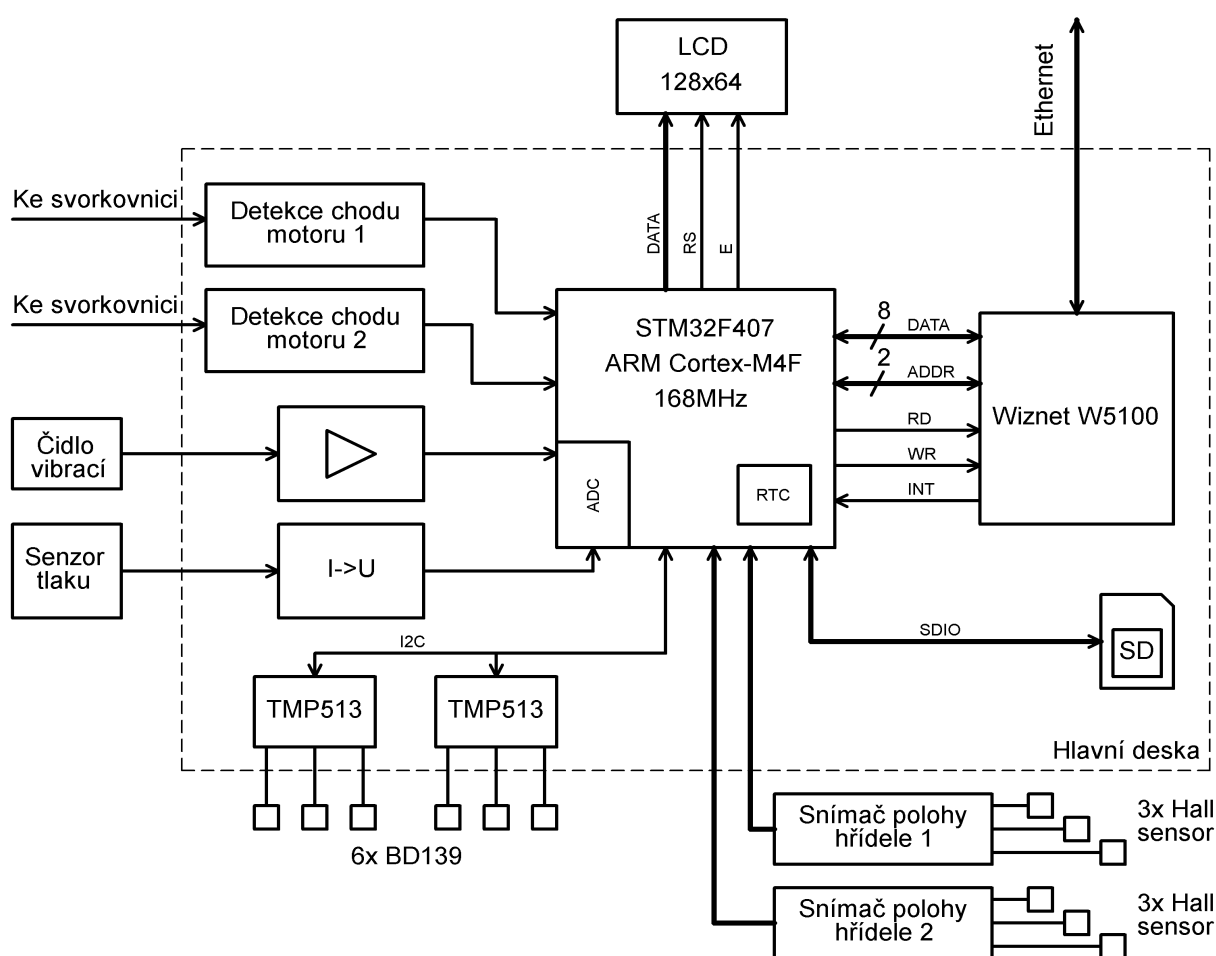
Problémy však činí nedostupnost specifikací, především frekvenčních charakteristik k těmto sensorům. Následná měření několika typů snímačů klepání na vibrační stoličce však ukázala velmi dobrou linearitu frekvenční charakteristiky v rozsahu 10Hz – 10kHz. To ovšem platí pouze za předpokladu, že je dodržena dostatečně vysoká vstupní impedance následujícího zesilovače – měla by činit alespoň $2M\Omega$ [5].

Vzhledem k dalším jmenovaným výhodám, především dobré mechanické konstrukci a přijatelné ceně, se snímače detonačního spalování jeví pro danou aplikaci jako perspektivní typ senzoru.



Obr. 3.3 Snímač klepání BOSCH 030 905 377 D

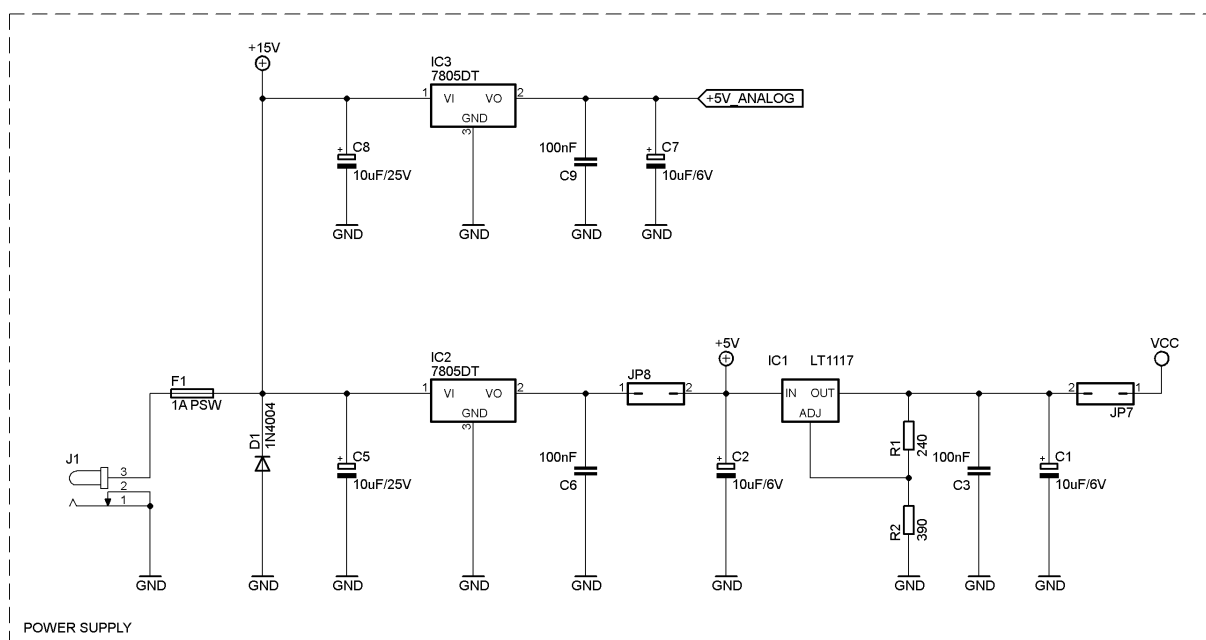
4 Obvodové řešení



Obr. 4.1 Celkové blokové schéma

4.1 Napájecí část

V návrhu jsou k napájení jednotlivých subsystémů použity celkem 4 napájecí větve. Detailnímu popisu napájecích zdrojů se věnují následující odstavce.



Obr. 4.2 Schéma zapojení napájecích zdrojů

4.1.1 Zdroj 5V

Pro napájení LCD displeje a snímačů polohy hřídele je vyžadováno napájecí napětí o hodnotě 5V. Proudový odběr těchto komponent by podle odhadu neměl přesáhnout 200mA.

Tato 5V větev také zároveň bude sloužit jako zdroj napětí pro následující 3,3V stupeň, kde je předpokládán odběr mnohem vyšší. Požadovaný stabilizátor měl být schopen dodat proud o hodnotě 1A, při uvažování výrazné rezervy.

Jelikož se předpokládá napájení celého zařízení z elektrické rozvodné sítě pomocí externího zdroje s výstupním napětím 15V, nejsou tudíž kladeny žádné zvláštní požadavky na účinnost zdrojové části. Na tomto místě tedy vyhoví běžný lineární stabilizátor typu 7805 ve standardním zapojení. Konkrétně byla zvolena jeho SMD varianta v pouzdře DPAK.

4.1.2 Zdroj 3.3V

Napájecí větev 3,3V slouží pro napájení MCU, Ethernetového řadiče, SD karty, teplotních snímačů a snímačů chodu motoru.

Na desce MCU vývojového kitu je již v základu osazen stabilizátor LD3985. Jeho maximální výstupní proud 150mA je však pro napájení všech zmiňovaných komponent současně nedostatečný a je tedy třeba ho vyřadit a nahradit výkonnějším typem. V navržené koncepci zdroje je napětí 3,3V vytvářeno z 5V větve, kvůli rovnoměrnějšímu rozložení výkonových ztrát. Na tomto místě je tudíž nutné použít stabilizátor s nízkým úbytkem (LDO), který bude schopný pracovat s rozdílem vstupního a výstupního napětí menším než 1,7V. Vybrán byl stabilizátor LT1117 od společnosti Linear Technology, u něhož minimální úbytek

činí 1V – 1,2V v závislosti na odebíraném proudu. Maximální výstupní proud stabilizátoru 800mA by měl opět dostačovat se značnou rezervou.

4.1.3 Zdroj 5V pro analogové moduly

Výstupní signál některých použitých senzorů je třeba nejdříve přizpůsobit pomocí analogových obvodů, aby mohl být dále zpracován mikrokontrolérem. Jelikož analogové obvody jsou velice náchylné na průnik rušení z napájecího rozvodu, byla pro ně vytvořena oddělená napájecí větev s napětím 5V. Toto napětí je – stejně jako v případě větve pro digitální obvody – vytvářeno stabilizátorem typu 7805 z vnějšího zdroje napájení 15V.

4.1.4 Napájení senzorů s proudovým výstupem

Průmyslové senzory neelektrických veličin s proudovým výstupem 4 – 20mA vyžadují ke své činnosti minimální napětí pohybující-se obvykle v rozmezí 10 – 15V. V konkrétním případě senzoru Danfoss MBS3000, použitého k měření tlaku ve vzdušniku, výrobce uvádí jako minimální napájecí napětí 10V. Při uvažovaném maximálním úbytku 3V na snímacím rezistoru 150Ω tak minimální výstupní napětí napájecího zdroje musí činit 13V. Senzor je tedy možné napájet přímo z vnějšího 15V zdroje. Pro omezení průniku rušení je do napájecí větve zařazen LC člen s nízkým zlomovým kmitočtem, který je pro maximální efektivitu umístěn až na samotném sensorovém modulu. Jelikož bude tento senzor připojen ke vzdušniku kompresoru přes nevodivou hadici s rychlospojkami, není potřeba napětí galvanicky oddělovat. V případě, že by u jiného typu senzoru či způsobu připojení bylo třeba napájení galvanicky oddělit, může být přímo na sensorový modul umístěn integrovaný DC-DC měnič s převodem 1:1.

4.2 Mikrokontrolér

Výběru správného typu mikrokontroléru je třeba věnovat zvýšenou pozornost, protože při zvolené koncepci přístroje bude zajišťovat veškeré systémové úlohy – čtení dat ze senzorů, jejich vizualizaci na LCD displeji, záznam dat na SD kartu a komunikaci přes síť Ethernet. Je třeba zvolit MCU s dostatečným výkonem i periferní výbavou, aby byl schopen všechny vyjmenované činnosti vykonávat v dostatečně rychlém cyklu. Nutnou podmínkou je taktéž existence portu operačního systému FreeRTOS. V níže uvedeném seznamu jsou blíže specifikovány veškeré požadavky kladené na MCU.

1. Programová paměť – min. 128kB

- Samotný operační systém spotřebuje, dle konkrétního portu, až 32kB programové paměti. Je nutné připočítat dostatečnou rezervu pro různé look-up tabulky, řetězce apod.
2. SRAM – min. 128kB
 - Minimálně 32kB pro heap operačního systému FreeRTOS a stacky jednotlivých procesů
 - 8kB pro buffer HTTP serveru
 - 64kB buffer pro vzorkovaná data pomocí ADC
 3. Dostatečný počet I/O pinů
 - Pouzdro TQFP100 nebo větší
 4. ADC
 - Pro vzorkování vibrací a dat ze senzorů s analogovým výstupem
 - Rychlost min 5kS/s, rozlišení alespoň 12 bitů
 5. Řadič sběrnice I²C
 - Komunikace se senzory teploty
 6. DMA kanál
 - Počítá se s přesuny velkých bloků dat při čtení/zápisu dat na SD kartu a komunikaci s přes Ethernet
 7. Řadič externích statických RAM
 - Pro rychlou komunikaci s externím řadičem sítě Ethernet přes paralelní 8-bitové rozhraní
 8. (volitelně) Podpora SDIO sběrnice
 - Čtení a zápis dat na paměťovou kartu SD lze sice provádět i přes sběrnici SPI, která je implementována celé řadě MCU, komunikace přes nativní 4-bitové SDIO rozhraní je však mnohonásobně rychlejší
 9. (volitelně) Integrovaný čítač reálného času – RTC
 - RTC je potřebný kvůli ukládání časových značek k zaznamenávaným datům ze senzorů

Z uvedeného seznamu je zřejmé, že MCU vyhovující pro danou aplikaci musí splňovat celou řadu náročných kritérií. Takových není na trhu mnoho, výběr se omezuje prakticky výhradně na mikrokontroléry s jádrem ARM Cortex-M4.

Zvolen byl typ STM32F407 od společnosti ST Microelectronics, který beze zbytku splňuje všechny vytyčené požadavky. Jedná se o mikrokontrolér založený na jádře ARM

Cortex-M4F, obsahující 1MB programové paměti a 192kB statické RAM. Maximální pracovní kmitočet jádra dosahuje 168MHz. Vliv na volbu toho typu měla i dostupnost vývojového kitu STM32F4DISCOVERY, na kterém je osazen mikrokontrolér v pouzdře TQFP100. Kit rovněž obsahuje debugger pro daný MCU.

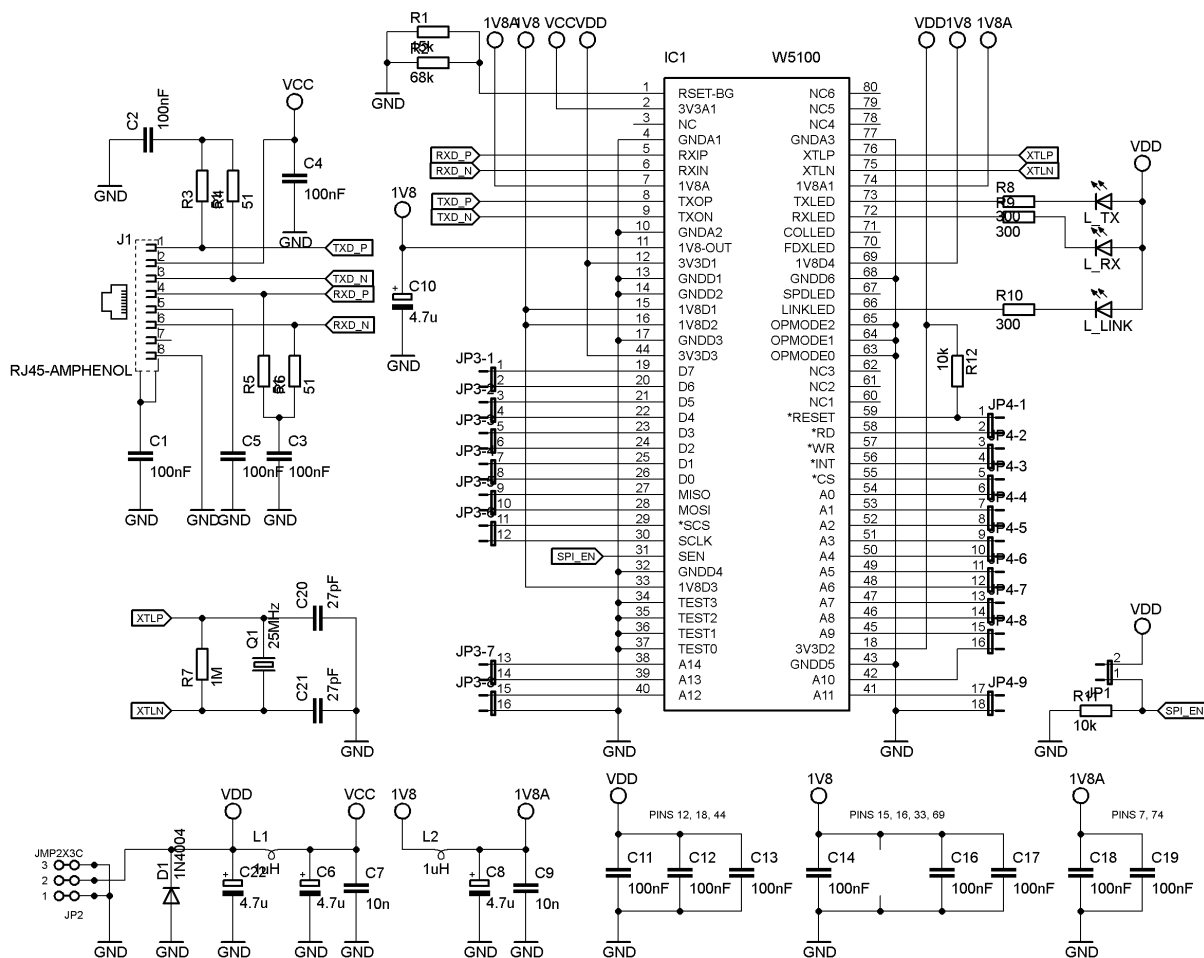
4.2.1 Program

Software pro mikrokontrolér je napsán v jazyce C. Program byl přeložen pomocí kompilátoru Keil MDK-ARM, který je integrován ve vývojovém prostředí uVision 4. Přeložený program zabírá v MCU přibližně 57kB programové paměti a využívá veškerou dostupnou RAM (128kB). Detailnímu popisu architektury a funkce softwaru v MCU je věnována kapitola 5.1.

4.3 Ethernet

Komunikace senzorové jednotky s řídicím PC je zprostředkována obvodem Wiznet W5100. Jedná se o řadič sítě Ethernet kompatibilní se standardy IEEE 802.3 10BASE-T a 802.3u 100BASE-TX. Obvod obsahuje integrovaný TCP/IP stack podporující protokoly TCP, UDP (transportní vrstva), IPv4, ARP a ICMP (síťová vrstva).

Připojení k mikrokontroléru je možné buďto přes paralelní 8-bitové paměťové rozhraní nebo sběrnici SPI. V tomto návrhu je obvod připojen k MCU přes paralelní rozhraní s nepřímým adresováním, přičemž ke čtení a zápisu dat je využit řadič statických pamětí (FSMC) obsažený v MCU. Díky tomuto způsobu připojení jsou interní registry obvodu W5100 mapovány do adresního prostoru mikrokontroléru a přenos dat tak může probíhat velmi rychle a efektivně.

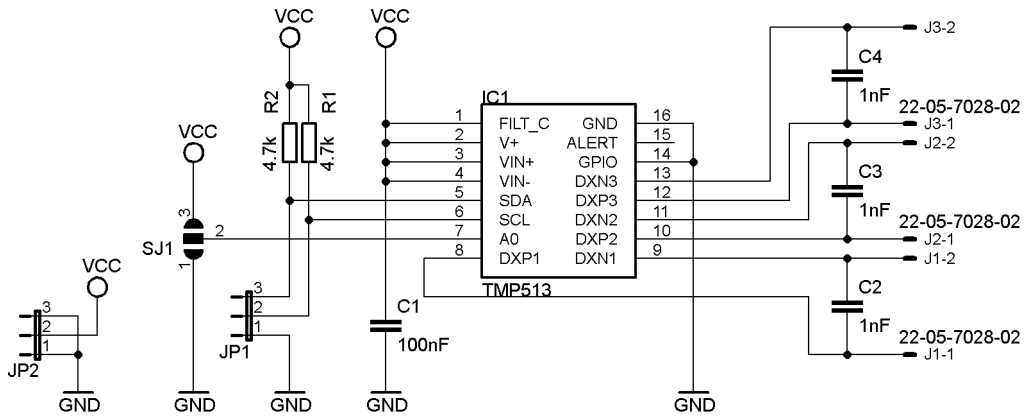


Obr. 4.3 Modul Ethernet komunikace s řadičem W5100

4.4 Senzorová část

4.4.1 Teplota

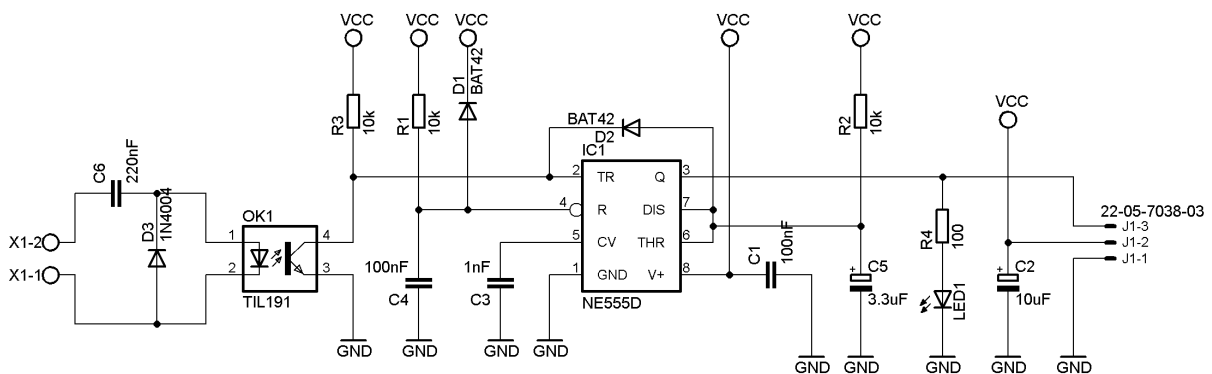
Pro měření teplot kompresních jednotek byl vybrán integrovaný obvod TMP513 od společnosti Texas Instruments. Jedná se o 3-kanálový teploměr s výstupem přes I²C sběrnici. Obvod měří teplotu P-N přechodu v dynamickém režimu a obsahuje automatickou korekci odporu přívodních vodičů. Jako čidla jsou použity levné bipolární tranzistory BD139 v pouzdře TO-126, které lze skrz otvor jednoduše přichytit šroubem ke kovovému povrchu motoru.



Obr. 4.4 Schéma zapojení modulu pro měření teplot

4.4.2 Chod motoru

Chod motoru kompresní jednotky je sledován zjišťováním přítomnosti napětí na jeho svorkách. K tomuto účelu byl vyvinut přípravek, jehož schéma je na Obr. 4.5.



Obr. 4.5 Snímač chodu motoru

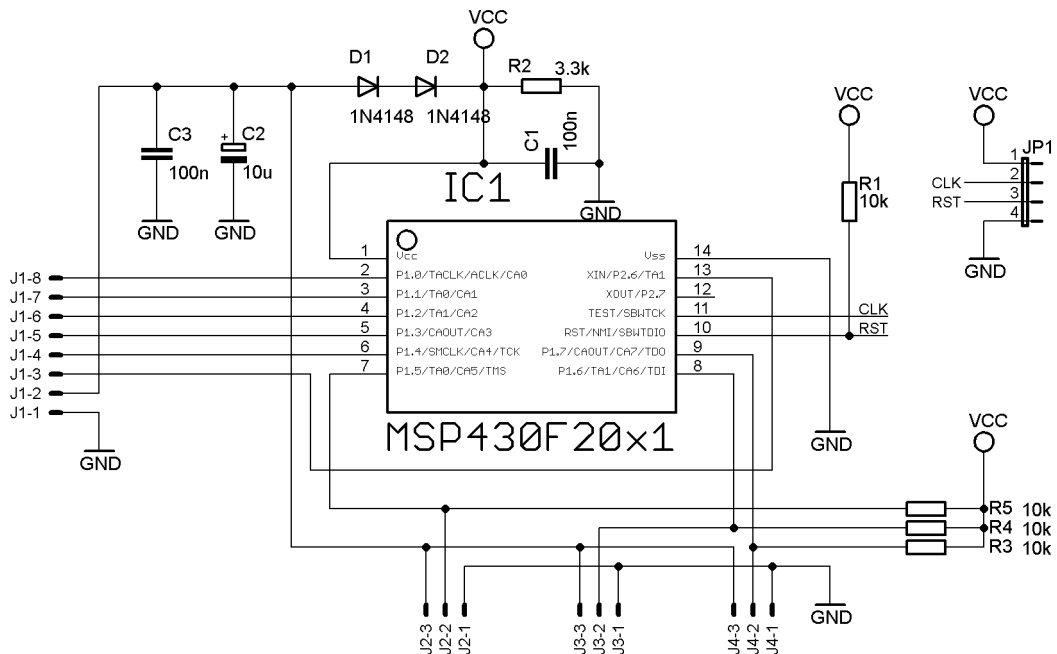
Napětí na svorkách je snímáno přes optočlen. Na jeho výstupní stranu je připojen integrovaný obvod NE555 zapojený jako zvonuspustitelný MKO. Perioda klopného obvodu je určena součástkami R2 a C5 a v tomto případě dosahuje cca 36ms. V případě spuštění motoru je MKO spuštěn uzemněním vstupu „TRIGGER“ a poté znovu-spouštěn s každou periodou síťového kmitočtu (20ms). Po vypnutí motoru a uplynutí 36ms se výstup MKO přeplojí zpět do stavu log. 0. Na výstupu snímače se tedy již nachází dvoustavový logický signál log. 1 – motor běží a log. 0 – motor neběží.

4.4.3 Tlak ve vzdušníku

Vybrán byl senzor Danfoss MBS3000, model 060G1133. Jedná se o převodník absolutního (barometrického) tlaku s rozsahem 0-16bar a upevněním pomocí šroubení G1/2“. Výstup je analogový v podobě proudové smyčky 4-20mA, která je v průmyslu velmi rozšířená.

4.4.4 Poloha hřídele

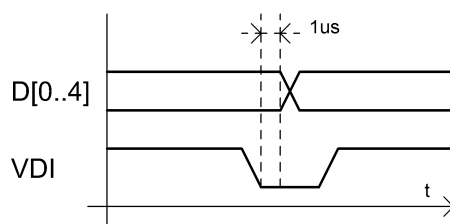
Aby se hlavní mikrokontrolér nemusel zabývat analýzou signálů z hallových sond a měl k dispozici již kompletní informaci o poloze, byl k tomuto účelu vyvinut přípravek, jehož schéma je na Obr. 4.6.



Obr. 4.6 Senzor polohy - elektronická část

Základem je 16-bitový mikrokontrolér MSP430G2001. Jedná se o nejzákladnější model s 512B programové paměti a 64B RAM. Oproti konkurenčním typům má výhodu v tom, že spouštění externího přerušení je možné z každého I/O pinu a není omezeno jenom na 1 či 2 vyhrazené vstupy. Pro danou aplikaci je to zřejmá výhoda.

Výstup polohy je 5-bitový paralelní v Grayově kódu. Aby se zamezilo možnému špatnému sejmutí polohy při přechodu mezi stavy 19→0, v důsledku nepřesného souběhu signálů, je výstup doplněn ještě signálem VDI (Valid Data Indicator). Tento signál je v úrovni log. 1 pokaždé, jsou-li platná data na vodičích D0 – D4. Do úrovně log. 0 přejde tento signál nejpozději 1μs před libovolnou změnou na datových vodičích. V úrovni log. 0 se také signál nachází po spuštění, kdy ještě nebyla zasynchronizována nulová poloha.



Obr. 4.7 Časování signálů senzoru polohy

4.4.5 Vibrace

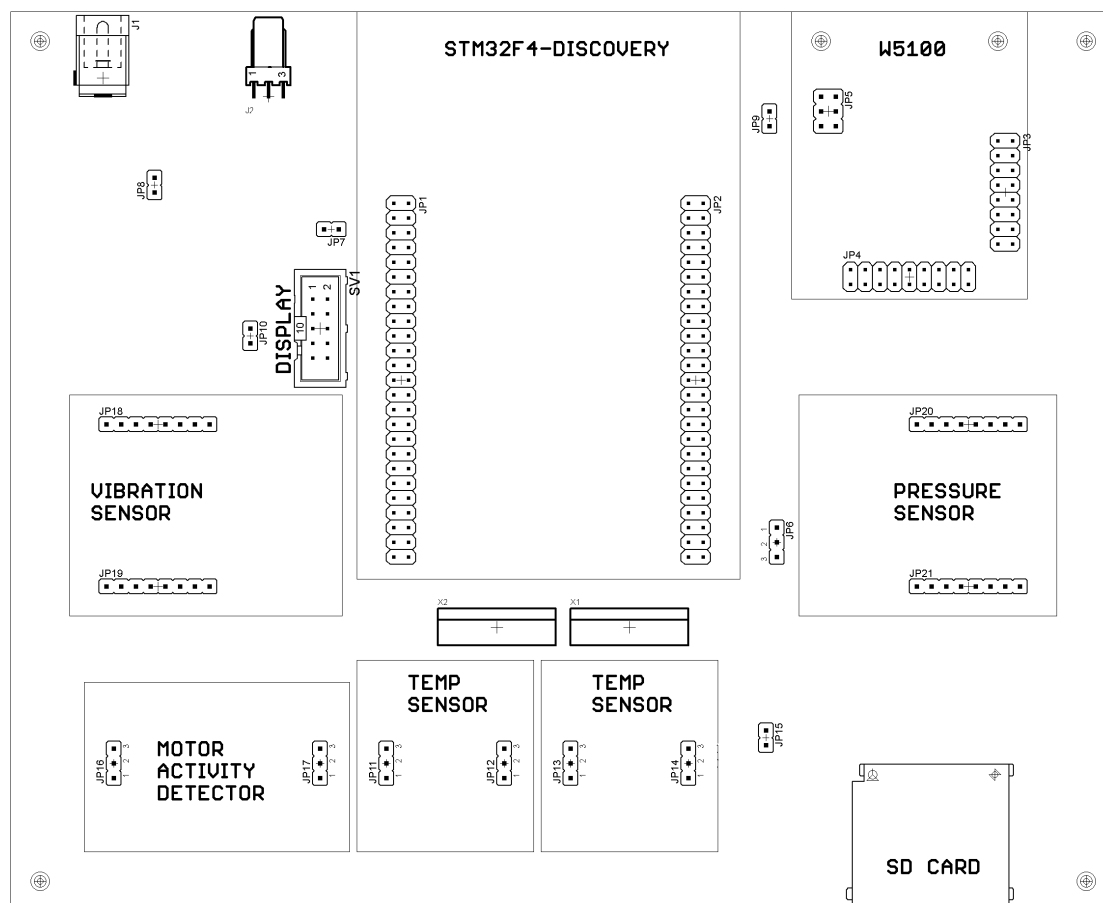
K měření vibrací kompresoru je využita diagnostická jednotka vyvinutá v rámci [5]. Výstup tohoto modulu je připojen ke vstupu 12-bitového interního A/D převodníku procesoru STM32F407.

4.5 Mechanická konstrukce

Sestavený funkční vzorek je koncipován modulárně. Základ tvoří deska plošných spojů o rozměrech přibližně 190 mm x 160 mm, do které je prostřednictvím dutinkových lišt nasunut kit STM32F4DISCOVERY s hlavním MCU a jednotlivé moduly se senzory. Na samotné základní desce jsou osazeny pouze napájecí zdroje a slot pro paměťovou SD kartu. Kromě toho tato deska obsahuje propoje mezi jednotlivými moduly a tvoří tedy jakýsi backplane celého zařízení. V rozích desky jsou vyvrtány 4 otvory o průměru 3 mm, skrz které je nad deskou pomocí distančních sloupků M3 upevněn plát z čirého PMMA.

Toto řešení poskytuje několik výhodných vlastností – v případě, že by vlastnosti některého sensorového modulu nebyly vyhovující, je možné tento modul snadno nahradit jiným bez nutnosti náročného re-designu celého zařízení.

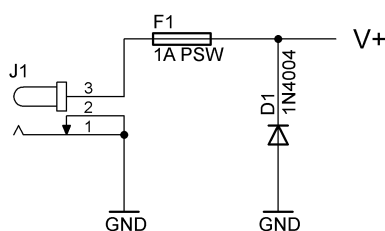
LCD displej, který zobrazuje základní provozní údaje, není umístěn přímo na základní desce, ale je k ní připojen 10-žilovým plochým kabelem se samořeznými konektory PCF. Samotný displej je potom zespodu přišroubován pod průhledný PMMA kryt.



Obr. 4.8 Rozložení modulů a konektorů na základní desce

Zařízení je napájeno prostřednictvím konektoru J1 na základní desce. Jedná se o standardní souosý konektor pro malá napětí s vnějším průměrem 5,5 mm a vnitřním 2,1 mm. Napájecí napětí se může pohybovat v rozsahu 15V – 20V, nejsou-li použity žádné senzory s výstupem 4 – 20 mA, je možné toto napětí snížit až na 9V. Zapojení napájecího konektoru je znázorněno na Obr. 4.9.

Na vstupu napájení je osazena dioda chránící proti přepólování a vratná pojistka o nominální hodnotě 1A.



Obr. 4.9 Napájecí konektor

5 Popis funkce

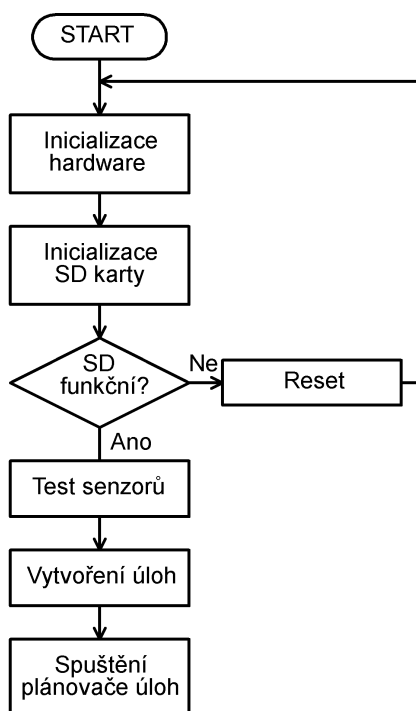
5.1 Firmware MCU

Firmware mikrokontroléru je založen na portu operačního systému FreeRTOS pro jádro Cortex-M4F. Využití operačního systému umožnilo oddělení jednotlivých činností prováděných mikrokontrolérem do nezávislých úloh. Funkce jednotlivých úloh je detailně popsána v následujících podkapitolách.

5.1.1 Inicializace

Před spuštěním samotného plánovače úloh operačního systému FreeRTOS je provedena nízkourovňová inicializace jednotlivých periférií procesoru. Následně je zkontrolována přítomnost paměťové karty SD a provedeno připojení souborového systému. Selže-li tato operace, je spuštění systému zastaveno a uživatel je o vzniklé chybě informován prostřednictvím LCD. Přítomnost funkční paměťové karty je pro činnost systému nezbytná, neboť jsou na ní uložena konfigurační data pro řadič Ethernetu. Po uplynutí časového intervalu přibližně 8 sekund je MCU resetován a program opětovně spuštěn.

Pokud je detekována správná činnost SD karty, provede přístroj test správného připojení a funkčnosti jednotlivých senzorů. Výsledek testu je následně zobrazen na LCD. Následně jsou vytvořeny jednotlivé úlohy operačního systému a provedeno spuštění plánovače úloh. Činnost mikrokontroléru po startu je znázorněna na Obr. 5.1.



Obr. 5.1 Činnost programu MCU během inicializace

5.1.2 Proces HTTPserver

Úloha HTTPserver zajišťuje veškerou síťovou komunikaci mikrokontroléru prostřednictvím protokolu HTTP. Server implementuje HTTP verze 1.0 včetně podpory perzistentních spojení (Connection: Keep-Alive), zpracování GET parametrů a korektního hlášení velikosti a typu přenášeného souboru (podporovány jsou typy text/html, text/plain, application/xml a application/octet-stream). Názvy souborů nejsou case-sensitive.

Po spuštění je provedeno nastavení parametrů Ethernetového řadiče Wiznet W5100. Následně je otevřen TCP socket na portu 80. Poté server začne vyčkávat na příchozí spojení. Během tohoto vyčkávání je proces uspán, aby zbytečně nezabíral procesorový čas dalším úlohám.

Příchozí požadavek způsobí změnu stavu TCP spojení, kterou řadič W5100 indikuje přechodem signálu /INT do úrovně log. 0. Tato změna na MCU vyvolá externí přerušení, v němž je proces HTTPserver probuzen nastavením semaforu HTTP_req_sem. Po probuzení server vyčte hlavičku příchozího HTTP požadavku z interního bufferru řadiče a provede její zpracování. Pokud se jedná o platný požadavek, přistoupí server k jeho obslužení. V opačném případě je zavřeno TCP spojení s klientem a server začne vyčkávat na nový požadavek. V závislosti na vyžádaném souboru může nastat několik různých situací.

5.1.2.1 Virtuální soubor STATUS.XML

V případě dotazu na soubor status.xml je klientovi zaslán XML dokument, který ve své struktuře obsahuje aktuální údaje o sledovaném kompresoru. Mezi tyto údaje patří systémový čas, informace o připojení kompresoru k rozvodné síti (zda nebyl nouzově odpojen), aktuální operační stav tlakovacích jednotek a kompletní data ze senzorů. Šablona dokumentu je uložena v programové paměti mikrokontroléru, čímž je eliminována nutnost jí načítat z SD karty při každém požadavku. Příklad XML dokumentu je uveden níže.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<apm>
  <general>
    <sysdate>21.2.2014 16:52</sysdate>
    <dateset>1</dateset>
  </general>
  <pump no="1">
    <info>
      <opStatus>0</opStatus>
      <tankPres>7500</tankPres>
      <tAmb>22</tAmb>
      <unitsNo>2</unitsNo>
    </info>
    <unit no="1">
      <running>0</running>
      <opSeconds>260000</opSeconds>
      <t1>30</t1>
      <t2>35</t2>
      <tOut>32</tOut>
    </unit>
    <unit no="2">
      <running>1</running>
      <opSeconds>259200</opSeconds>
      <t1>70</t1>
      <t2>85</t2>
      <tOut>75</tOut>
    </unit>
  </pump>
</apm>
```

Objektový model dokumentu v zásadě odpovídá konstrukci reálného kompresoru. Hlavní element `<apm>` v sobě obsahuje uzel s obecnými informacemi o systému (`<general>`), zejména aktuálně nastaveným časem, a uzel `<pump>` s provozním stavem kompresoru. Podřízené prvky uzlu `<pump>` popisují stav jednotlivých částí sledovaného stroje.

`<info>`

Obsahuje informace společné pro všechny kompresory. Podřízené prvky jsou `<opStatus>`, `<tankPres>`, `<tAmb>` a `<unitsNo>`.

<opStatus>

Definuje momentální stav připojení kompresoru k elektrické rozvodné síti. Příпустné hodnoty jsou 0 (připojeno), -1 (nouzově odpojeno) a -2 (manuálně odpojeno).

<tankPres>

Číslo udává tlak vzduchu ve vzdušníku v milibarech (mBar).

<tAmb>

Aktuální teplota prostředí, ve kterém je kompresor umístěn, ve stupních celsia.

<unitsNo>

Definuje počet tlakovacích jednotek monitorovaného kompresoru.

<unit>

Obsahuje stav jedné tlakovací jednotky. Podřízené prvky jsou **<running>**, **<opSeconds>**, **<t1>**, **<t2>** a **<tOut>**.

<running>

Tato hodnota vyjadřuje, zda příslušná kompresní jednotka momentálně provádí tlakování vzduchu nebo je v nečinnosti. Příпустné hodnoty jsou 0 (nečinná) nebo 1 (tlakuje).

<opSeconds>

Udává celkový čas v sekundách, po který byla kompresní jednotka v provozu, resp. prováděla tlakování.

<t1>, <t2> a <tOut>

Hodnoty těchto prvků vyjadřují aktuální teplotu elektromotoru, válce a vzduhu vyfukovaného výdechem chladícího ventilátoru (v tomto pořadí).

Z výše uvedeného popisu vyplývá, že struktura přenášených provozních dat je navržena velmi flexibilně a je možné jí použít pro kompresory s různým konstrukčním uspořádáním. Vyhovující je rovněž v případě rozšíření systému o monitorování více kompresorů zároveň.

5.1.2.2 Virtuální soubor *CLOCKSET.HTM*

Tato stránka slouží k nastavení systémových hodin. Čas je zadán pomocí množiny 5 GET parametrů. Jejich názvy, význam a rozsah možných hodnot uvádí následující tabulka.

Tab. 1 Popis GET parametrů k nastavení času

Název parametru	Hodnota	Význam
d	0 – 31	Den v měsíci
o	1 – 12	Měsíc
y	2000 – 2099	Rok
h	0 – 23	Hodina
m	0 – 59	Minuta

Proběhne-li nastavení času úspěšně, je serverem vrácen textový řetězec „OK Date successfully set.“, v případě selhání operace v důsledku neplatné hodnoty některého z parametrů je potom vrácen řetězec „ERR Date set failed!“.

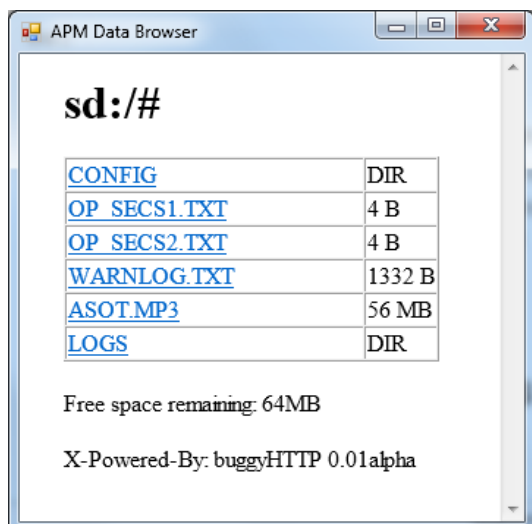
5.1.2.3 Virtuální soubor *CONTROL.HTM*

Pomocí stránky *CONTROL.HTM* je ovládán stykač na napájecím přívodu kompresoru. Soubor je nutné dotazovat s GET parametrem *os*, přičemž jako jeho hodnota se uvede číslo z množiny {0, -1, -2}. Význam těchto hodnot je shodný s parametrem *<opStatus>* stavového XML dokumentu, který je popsán v kapitole 5.1.2.1.

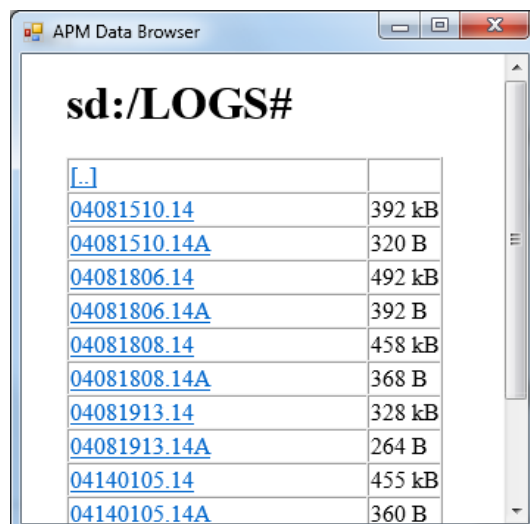
V případě úspěšné změny stavu napájení odpoví server řetězcem „OK Pump turned on.“ nebo „OK Pump turned off.“, podle zadaného parametru. Při neúspěchu, například zadáním čísla mimo definovanou množinu, je vrácen řetězec „ERR Error changing power state!“.

5.1.2.4 Reálný soubor, výpis adresářů

V případě, že se název požadovaného souboru neshoduje s žádným z výše uvedených speciálních jmen, funguje proces jako běžný HTTP server umožňující download souborů z SD karty. Tato funkcionality je vhodná zejména pro vzdálené stahování záznamů provozních veličin, je však samozřejmě možné i další využití. Pro tento účel byla rovněž implementována funkce výpisu a procházení adresářů. Výpis adresáře je vrácen jako běžná HTML stránka.



Obr. 5.2 Výpis kořenového adresáře



Obr. 5.3 Výpis podadresáře naměřených dat

Rychlost přenosu souborů z SD karty dosahuje přibližně 7 – 10 Mb/s, což je pro stahování uložených logů o průměrné velikosti 600kB více než dostatečné. V případě nutnosti by bylo možné výrazné zrychlení použitím 4-bitového režimu SDIO sběrnice, zrychlením komunikace s Ethernet radičem nebo použitím dvojitého bufferování.

5.1.2.5 Neexistující soubor

V ostatních případech je klientovi vrácena odpověď se stavovým kódem 404 a zaslána jednoduchá HTML stránka informující uživatele o vzniklé situaci.

5.1.3 Proces Monitor

Tato úloha zajišťuje čtení dat z jednotlivých senzorů a ukládání změřených hodnot do globální struktury APM_struct. Odtud pak mohou být provozní data čtena ostatními procesy. Přístup ke sdílené paměti je mezi procesy synchronizován pomocí mutexů, čímž je zajištěna konzistence dat. Při spuštění tlakování některé kompresní jednotky je prováděn záznam tlaku vzduchu a teplot do lokálního bufferu, který je po vypnutí motoru následně uložen na SD kartu. Současně jsou na SD kartě aktualizovány soubory s provozním časem kompresních jednotek. Proces Monitor je vykonáván periodicky každých 500 ms.

5.1.4 Proces LCDview

Úloha LCDview slouží k vizualizaci vybraných provozních veličin na lokálním grafickém LCD displeji. Provozní data jsou vyčítána z globální sdílené paměti. Aby proces neblokoval přístup ke sdílené paměti příliš dlouho kvůli pomalému výpisu na LCD, vytvoří nejdříve její lokální kopii. Během samotné práce s LCD je pak již přístupováno pouze

k datům této kopie. Textové řetězce jsou vypsané fontem o velikosti 8 x 6 pixelů nejdříve do lokálního framebufferu, který je následně najednou vykreslen na LCD. Perioda překreslování displeje je 1 sekunda.

Za normálního provozního stavu je na LCD zobrazována IP adresa přístroje v počítačové síti, aktuálně nastavený čas a tlak vzduchu ve vzdušníku. Dále jsou zobrazeny teploty jednotlivých částí kompresních jednotek a jejich celkový provozní čas.

Dojde-li k nouzovému odstavení stroje vlivem přehřátí, je uživatel vyrozuměn o nastalé situaci blikajícím textem „Emergency shutdown“. Společně s ním je také zobrazován čas, kdy k odstavení došlo.



Obr. 5.4 LCD - běžný stav



Obr. 5.5 LCD - odstavení

5.1.5 Proces *Samples_Writer*

Tento proces má na starost zápis vzorků vibrací z interního bufferu v MCU na SD kartu. Proces je spouštěn zápisem struktury datového typu `bufs_state_t` do fronty `bufs_state_fifo`. Struktura obsahuje následující prvky:

```
samples_buf_t* buf_to_write
```

Ukazatel na buffer, který se má zapsat do souboru na SD kartě.

```
uint16_t samples_count <0 - 10000>
```

Počet vzorků v bufferu.

```
uint8_t is_first <0 - 1>
```

Tento prvek říká procesu, jestli se jedná o první zapisovaný buffer v sérii. V případě, že jde o první zapisovaná data, vytvoří proces na SD kartě nový soubor pojmenovaný podle

aktuálního času a datumu. Formát jména je DDMMhhmm.YY (D – den, M – měsíc, Y – rok, h – hodina, m – minuta).

```
uint8_t is_last <0 - 1>
```

Hodnota je nastavena na 1 v okamžiku, kdy se jedná o poslední zapisovaná data v sérii. Proces po skončení zápisu dat z bufferu zavře soubor, do kterého bylo zapisováno.

Úloha `Samples_Writer` má nastavenou nejvyšší prioritu, neboť zápis dat z bufferu na SD kartu musí proběhnout v dostatečně krátkém čase – maximálně 2 sekundy, jsou-li vibrace stroje společně s polohou pístů vzorkovány s frekvencí 5 kHz a délka jednoho bufferu činí 10000 vzorků. Není tedy vhodné, aby byl proces zápisu přerušován méně významnými úlohami.

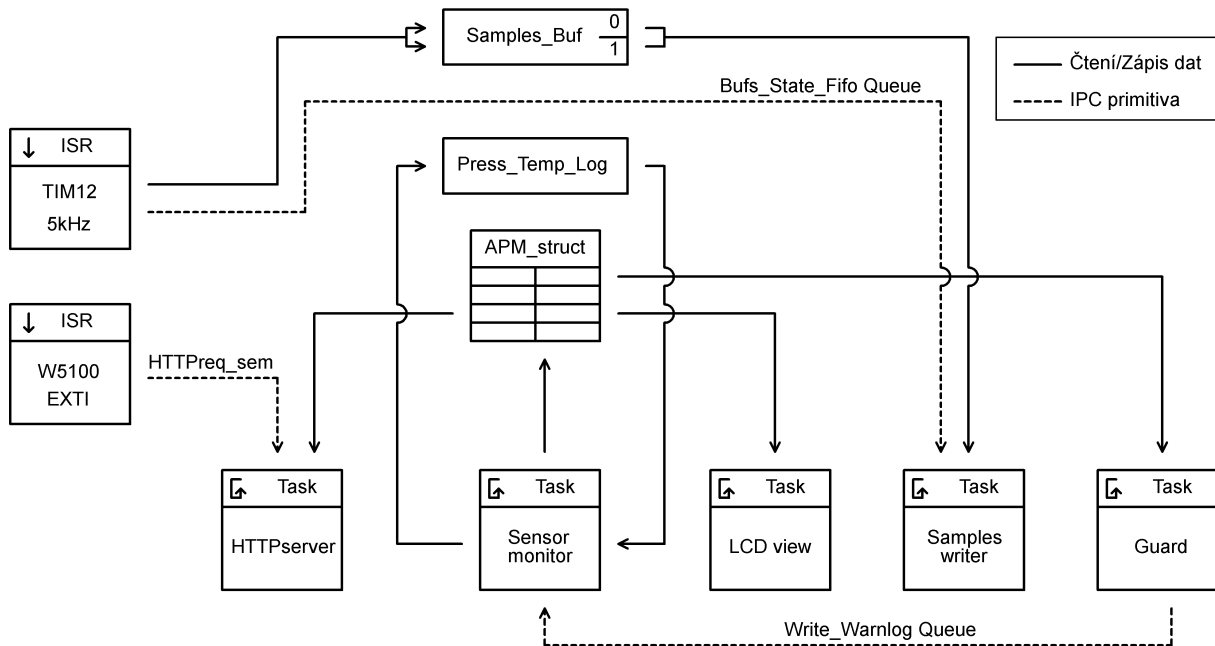
Samotné vzorkování dat probíhá v ISR, které je spouštěno s frekvencí 5kHz reload událostí časovače TIM12. Protože je současně snímána okamžitá poloha hřídelů obou elektromotorů z GPIO, včetně nutného maskování, nelze k přenosu dat z ADC do bufferu využít DMA. Aby nebylo vzorkování dat prostřednictvím ADC blokováno během zápisu na SD kartu, je v aplikaci využito dvojité bufferování.

5.1.6 Proces Guard

Proces Guard porovnává naměřené teploty všech částí kompresoru s uživatelsky nastavenou hranicí. V případě, že některá hodnota tuto hranici překročí, je výstup ovládání stykače přepnut do úrovně log. 0. a zároveň nastaveno příslušné pole `op_status` ve sdílené globální struktuře na stav „Nouzově odpojeno“. Procesu Monitor je do fronty `Write_Warnlog` zaslán požadavek k zápisu nastalé události do logu na SD kartě.

5.1.7 Meziprocesní komunikace

Struktura předávání a sdílení dat mezi jednotlivými procesy je přehledově znázorněna na Obr. 5.6. Bližší informace k funkci jednotlivých procesů je možné nalézt v příslušných kapitolách uvedených výše.



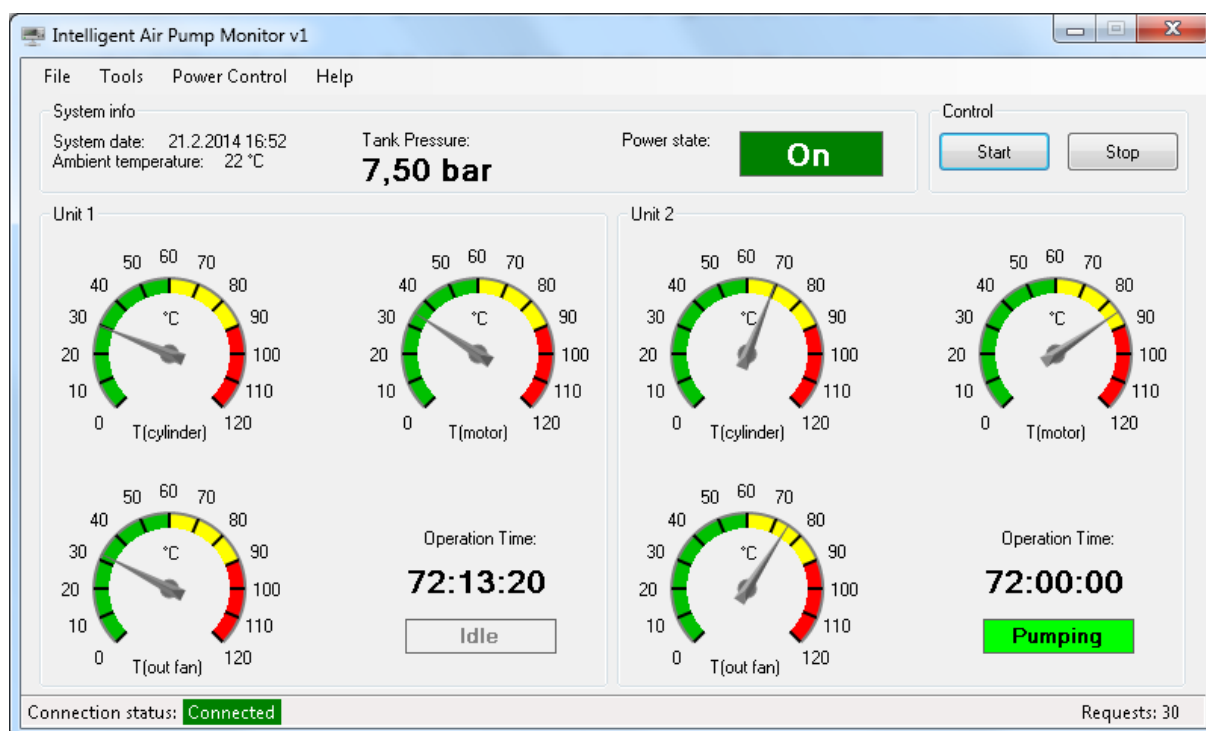
Obr. 5.6 Struktura meziprocenční komunikace

5.2 Klientská PC aplikace

Pro účely vzdálené vizualizace provozního stavu kompresoru na PC byla vytvořena specializovaná aplikace – tlustý klient. Tato aplikace zprostředkovává uživateli navrženého systému veškerou potřebnou interaktivitu s monitorovací jednotkou. Mezi nejpodstatnější funkce klientské aplikace patří zejména:

- On-line vizualizace veškerých provozních veličin
- Download vibrodiagnostických záznamů do PC za účelem další analýzy
- Nastavení systémového data a času monitorovací jednotky
- Vzdálené řízení napájení stroje z elektrické rozvodné sítě pomocí stykače

Aplikace je vytvořena v programovacím jazyce C# s využitím frameworku .NET ve verzi 4.0. Spustit aplikaci je možné v operačních systémech MS Windows od verze XP nebo novějších. Funkčnost současné verze aplikace byla také testována na operačním systému Ubuntu Linux 12.04 s nainstalovanou alternativní běhovou platformou Mono ve verzi 3.2.5.



Obr. 5.7 Klientská aplikace pro PC

5.3 Konvertor pro Matlab

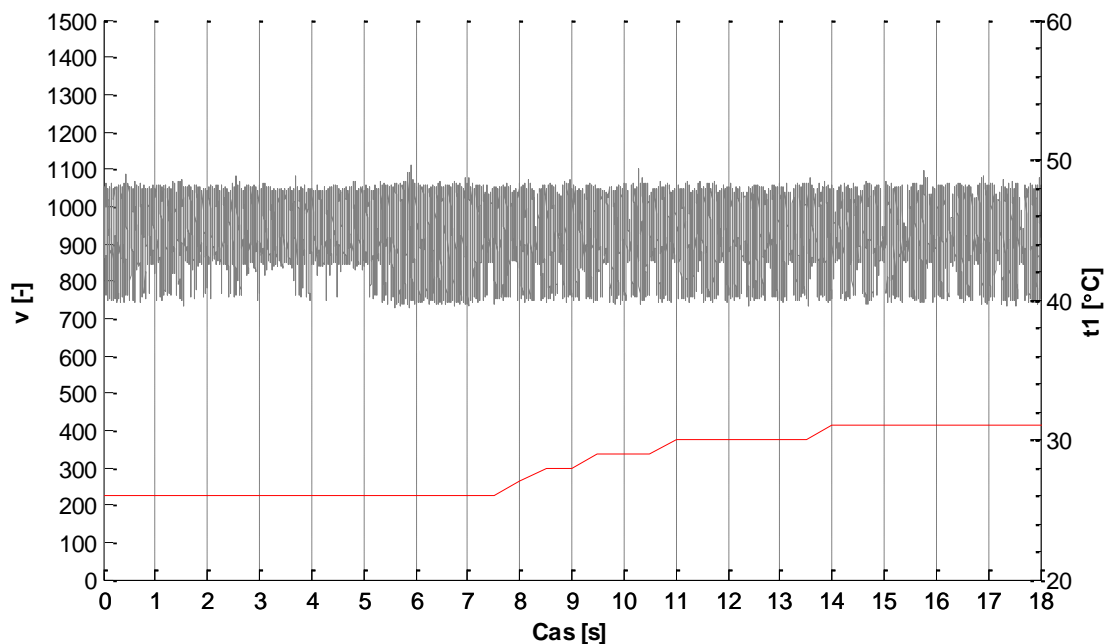
V rámci diplomové práce byl rovněž vytvořen nástroj pro převod uložených vibrodiagnostických záznamů do formátu .m file. Tyto soubory lze následně importovat do výpočetního softwaru Matlab, kde je možné získaná data pohodlně zpracovávat. Pro účely technické diagnostiky lze například vypočítat frekvenční spektrum vibrací pomocí FFT nebo jejich efektivní hodnotu pro porovnání s normou ISO 10816. Užitečná je také schopnost tvorby grafů s časovým průběhem ostatních provozních veličin, jako je teplota a tlak.

6 Testování a dosažené výsledky

Během vývoje systému ještě nebyly k dispozici všechny senzory, průběžné testování sensorové jednotky tedy probíhalo s využitím syntetického testeru. Na druhé vývojové desce STM32-DISCOVERY byl vytvořen speciální testovací program, který svojí činností simuloval chování reálného kompresoru. Tento testovací přípravek byl následně připojen ke vstupům sensorové jednotky, které poskytoval stimuly odpovídající předpokládaným výstupům chybějících senzorů. Simulovány byly například činnosti sepnutí a vypnutí motorů tlakovacích jednotek nebo analogový výstupní signál ze snímačů vibrací a tlaku vzduchu.

Po odladění všech chyb v software, které se projeví během průběžných testů, bylo možné přistoupit k provedení komplexní zkoušky celého systému. Po dobu celkem 24 hodin bylo opakovaně v 10-minutových intervalech sensorové jednotce simulováno spouštění tlakování kompresní jednotky, vždy po dobu 30 sekund. Tato situace může přibližně odpovídat provoznímu využití stroje v průmyslu. Současně s tímto probíhala on-line vizualizace provozních veličin kompresoru po síti Ethernet prostřednictvím klientské aplikace popsané v kapitole 5.2. Po skončení testu byla zkontrolována korektnost uložení všech záznamů časových průběhů provozních veličin na SD kartu a ověřena integrita souborového systému. Nebyly zjištěny žádné problémy – došlo ke správnému uložení všech záznamů, rovněž souborový systém na SD kartě nevykazoval žádné chyby. Po dobu trvání testu byla funkční i on-line vizualizace stavu kompresoru. Nakonec byla vyzkoušena funkce odpojení kompresoru v případě přehřátí – při překročení nastavené hranice došlo ke správnému nastavení výstupu ovládání stykače.

Na obrázku níže je uveden příklad grafu zhotoveného z dat naměřených během posledního testu. Horní křivka zachycuje průběh signálu z A/D převodníku sloužícího k digitalizaci průběhu vibrací stroje. V tomto případě se zatím jedná pouze o surové vzorky z ADC bez příslušné kalibrace na velikost rychlosti či zrychlení. Na spodní křivce je paralelně znázorněn vývoj teploty na jednom z připojených teplotních sensorů. Po uplynutí časového intervalu 7 sekund byl sensor teploty mírně zahříván, až po 18 sekundách došlo k přesáhnutí nastavené prahové teploty 31°C. Graf byl vytvořen pomocí softwaru Matlab s využitím konvertoru popsaného v kapitole 5.3. Možnosti grafických výstupů jsou díky tomu velmi široké.



Obr. 6.1 Ukázka výstupních dat

7 Diskuze, návrhy ke zlepšení

Zvolená koncepce monitorovací jednotky s funkcionalitou implementovanou do jednoho MCU se ukázala jako realizovatelná a plně funkční, což bylo ověřeno testováním. Zároveň však přináší některé restriktce, jež bylo nutné během vývoje vzít v úvahu.

Poněkud omezující se ukázala zejména velikost operační paměti integrované v MCU (128kB + 64kB). Záznamy provozních veličin je tak nutné průběžně ukládat na SD kartu a není nad nimi možné provádět složitější matematické výpočty přímo v MCU. Stejně tak bufferům komunikačních protokolů bylo možné přiřadit pouze omezené množství paměti. Tento problém by se v případné další iteraci vývojového cyklu dal vyřešit několika způsoby.

Použitý mikrokontrolér STM32F407 by například bylo možné nahradit novějším typem STM32F429, který jako jeden z mála typů MCU na trhu obsahuje řadič dynamických pamětí SDRAM. Velikosti podporovaných SDRAM se pohybují řádově v jednotkách až desítkách MB a jejich cena je velmi nízká. Nižší rychlost oproti interní SRAM nepředstavuje pro účely bufferování dat zásadní problém. Bylo by pak například možné při spuštění tlakování kompresní jednotky ukládat navzorkovaný průběh vibrací pouze do RAM a na SD kartu přesunout až následně.

Dále se nabízí zvážit možnost vlastní implementace aplikačního mikroprocesoru do systému. Na tomto MPU by bylo možné spustit operační systém na bázi jádra Linux, který by

zajišťoval činnosti spojené se síťovou komunikací a ukládáním dat. Velkou předností tohoto řešení by byla především snadná budoucí rozšiřitelnost systému o další funkce, jako je například automatizovaná analýza měřených dat. Současně by se předešlo možným problémům spojeným s využitím existujících jednodeskových mikropočítačů, které jsou diskutovány v kapitole 2.4. K aplikačnímu MPU by bylo pouze nutné připojit mikrokontrolér vyhrazený pro real-time operace, jako je čtení a vzorkování dat ze senzorů. Na trhu však není dostupných mnoho typů MPU využitelných pro prototypovou výrobu. Většina jich je dostupná pouze v pouzdrech BGA, která nejsou vhodná pro vývoj, a výrobce k neposkytuje potřebnou dokumentaci. Jedním z vhodných kandidátů by mohl být například Freescale i.MX233. Jedná se o MPU založený na jádře ARM9, vyráběný v pouzdře LQFP128 a s otevřenou dokumentací [15]. Pro tento MPU rovněž existují již připravené obrazy několika distribucí operačního systému Linux, nebylo by tudíž nutné obtížné vytváření vlastního portu.

Další rozšiřování funkcionality je samozřejmě možné i u klientské aplikace, sloužící k on-line vizualizace provozních veličin a interakci systému s uživatelem. Nabízí se například implementace trendů či podpory databázového systému.

8 Závěr

V rámci diplomové práce byl proveden návrh elektronického systému pro vzdálený monitoring a diagnostiku kompresorových stanic. Navržený systém implementuje kompletní soubor funkcí specifikovaných v zadání. Umožňuje on-line zobrazování vybraných provozních parametrů kompresoru prostřednictvím informační sítě Ethernet a zajišťuje jeho odstavení v případě, že teplota některé součásti stroje překročí nastavenou mez. Díky tomu je kompresor chráněn před hrozícím přehřátím. Nejdůležitější provozní veličiny jsou rovněž vizualizovány na lokálním grafickém LCD.

Kromě toho byly navíc implementovány i některé další funkce využitelné pro technickou diagnostiku stroje. Mezi ně patří především snímání vibrací stroje v době, kdy kompresní jednotky provádí tlakování vzduchu a jejich záznam na SD kartu společně s průběhy ostatních měřených veličin. Díky těmto záznamům je možné průběžně provádět vibrodiagnostiku stroje. Výsledky této diagnostické metody reflektují skutečný technický stav stroje a umožňují včasné odhalení mnoha blížících se závad.

Navržený systém je složen ze dvou částí – HW jednotky a klientské aplikace běžící na PC.

HW jednotka provádí čtení dat z jednotlivých senzorů, jejich zprostředkování uživateli (lokálně na LCD nebo vzdáleně prostřednictvím Ethernetu) a ukládání na paměťovou SD kartu. Díky moderní součástkové základně bylo možné veškerou požadovanou funkcionalitu integrovat do jednoho MCU, což má příznivý vliv i na konečnou cenu celého zařízení. Při výběru nejdůležitějších komponent byla brána v úvahu rovněž opakovatelnost výroby a možnost budoucího rozšíření o další funkce. Sestavený funkční vzorek má modulární koncepci, která se ve vývojovém stadiu osvědčila díky možnosti snadné výměny a testování jednotlivých funkčních celků. Modularitu by bylo vhodné zachovat i u finálního produktu, kdy by umožnila přizpůsobit systém odlišným konstrukčním řešením různých typů kompresorů.

Další realizovanou částí je klientská aplikace, která běží na PC a slouží v navrženém systému ke vzdálené interaktivitě uživatele se samotnou HW jednotkou. Tato aplikace umožňuje zobrazení aktuálních hodnot všech sledovaných provozních veličin a download jejich záznamů z SD karty do PC. Rovněž obsahuje funkci pro manuální řízení napájení kompresoru pomocí stykače. Klientskou aplikaci doplňuje utilita pro import uložených vibrodiagnostických záznamů do prostředí Matlab.

Komunikace mezi HW jednotkou a PC je založena na aplikačním protokolu HTTP, přičemž samotná data jsou strukturována ve formátu XML. Díky tomu je zajištěna značná flexibilita při případném rozšiřování systému o další funkce.

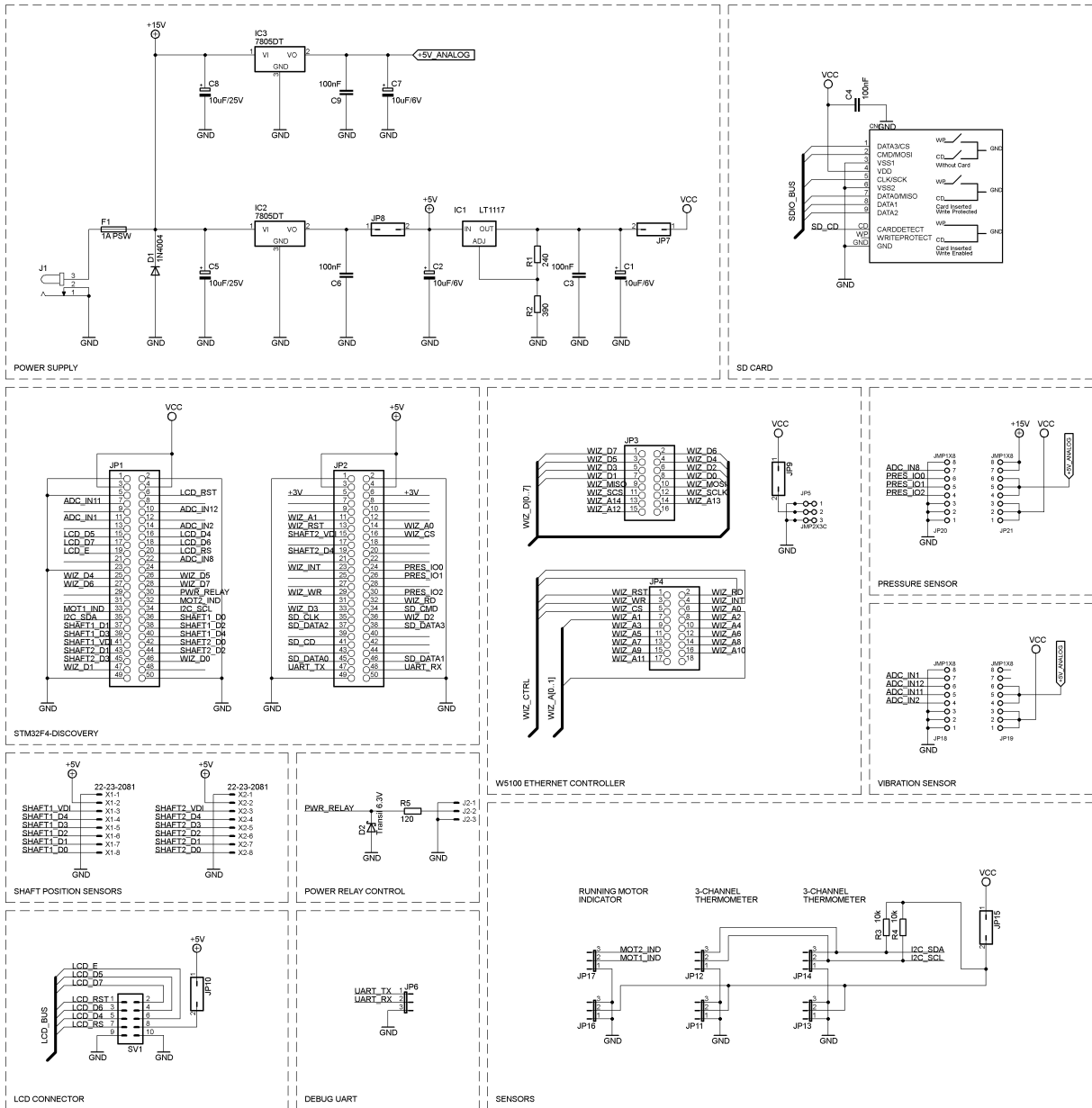
Literatura

- [1] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1996, 315 s. ISBN 80-01-01500-9.
- [2] Pressure Sensors. FREESCALE SEMICONDUCTOR, Inc. *Freescale Semiconductor / Embedded Processing Solutions* [online]. 2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.freescale.com/webapp/sps/site/taxonomy.jsp?code=DRSNSPRSSR>
- [3] MEGATRON, s.r.o. *Průvodce nabídkou produktů: Přesné rotační a lineární snímače polohy, Potenciometrické ovládací prvky, Kolektory* [online]. Praha, 2011 [cit. 2.5.2014]. Dostupné z: <http://www.megatron.cz/download/katalogy/pruvodce-nabidkou-produktu-rotalin.pdf>
- [4] Capacitance to Digital Converters. ANALOG DEVICES, Inc. *Analog Devices / Semiconductors and Signal Processing ICs* [online]. 2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.analog.com/en/analog-to-digital-converters/capacitance-to-digital-converters/products/index.html>
- [5] TUREČEK, Oldřich, Jiří ŠVARNÝ a Jan HRUBÝ. Ekonomické řešení diagnostiky vibrační kompresoru. *Electroscope*. 2012, roč. 2012, č. 3, s. 1-6. ISSN: 1802-4564. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/695/r6c4c1.pdf?sequence=1>
- [6] KABELOVÁ, Alena a Libor DOSTÁLEK. *Velký průvodce protokoly TCP/IP a systémem DNS*. 5., aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2008, 488 s. ISBN 978-80-251-2236-5.
- [7] Snímač tlaku pro všeobecné průmyslové aplikace, typ MBS 3000 a MBS 3050. DANFOSS A/S. *Česká Republika - Danfoss* [online]. 2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.ra.danfoss.com/TechnicalInfo/Literature/Manuals/04/IC.PD.P20.A5.48.pdf>
- [8] Availability - how come nobody has any BeagleBone Black to sell?. In: *Skupiny Google: BeagleBoard* [online]. 2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: [https://groups.google.com/forum/#!topic/beagleboard/Z3JfUIkxOl8\[1-25-false\]](https://groups.google.com/forum/#!topic/beagleboard/Z3JfUIkxOl8[1-25-false])
- [9] STM32F4 Series: STM32 F4 series of high-performance MCUs with DSP and FPU

- instructions. STMICROELECTRONICS. *STMicroelectronics* [online]. 2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.st.com/web/en/catalog/mmc/FM141/SC1169/SS1577>
- [10] *FreeRTOS - Market leading RTOS (Real Time Operating System) for embedded systems with Internet of Things extensions* [online]. 2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.freertos.org>
- [11] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY. *Vibrodiagnostika elektrických strojů* [online]. 2013, 6 s. [cit. 2.5.2014]. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/images_laboratory/Diagnostika/Files/04_Vibrodiagnostika_elektrickyh_stroju.pdf
- [12] ISO 10816 Vibration Severity Standards. *Reliabilitydirectstore.com* [online]. 2012 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <https://www.reliabilitydirectstore.com/articles.asp?id=122>
- [13] STRACHOŇ, Martin. *Vibrodiagnostika průmyslových strojů*. Zlín, 2009. Dostupné z: https://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/8859/strachon_2009_dp.pdf. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky.
- [14] W5100 Datasheet. WIZNET CO., Ltd. *Innovative Embedded Networking : Device Server, WiFi, Ethernet* [online]. 2011 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: http://www.wiznet.co.kr/UpLoad_Files/ReferenceFiles/W5100_Datasheet_v1.2.4.pdf
- [15] IMX233: Applications Processor. FREESCALE SEMICONDUCTOR, Inc. *Freescale Semiconductor | Embedded Processing Solutions* [online]. 2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=i.MX233

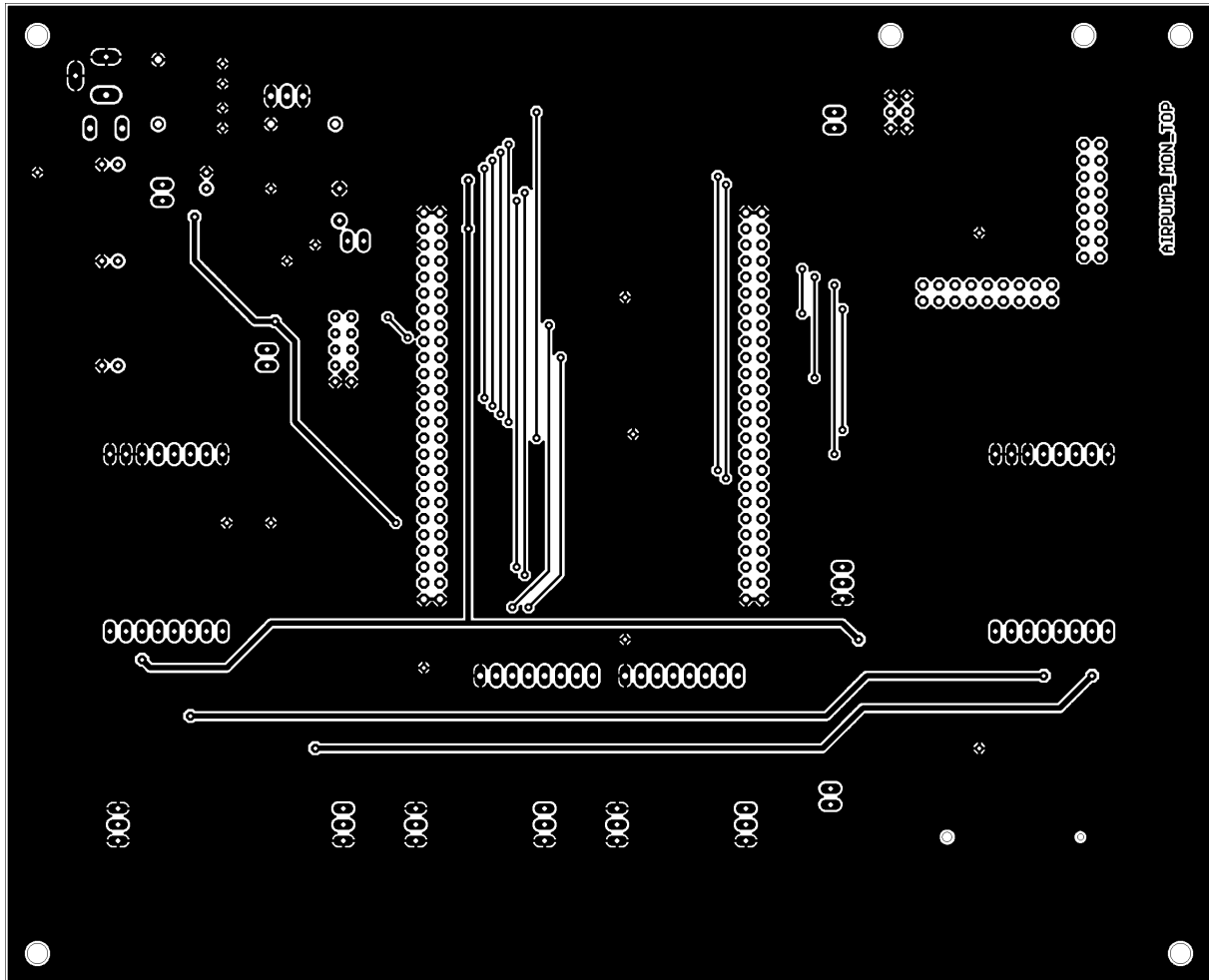
Příloha A – Schémata zapojení

A.1 Schéma zapojení propojovací desky

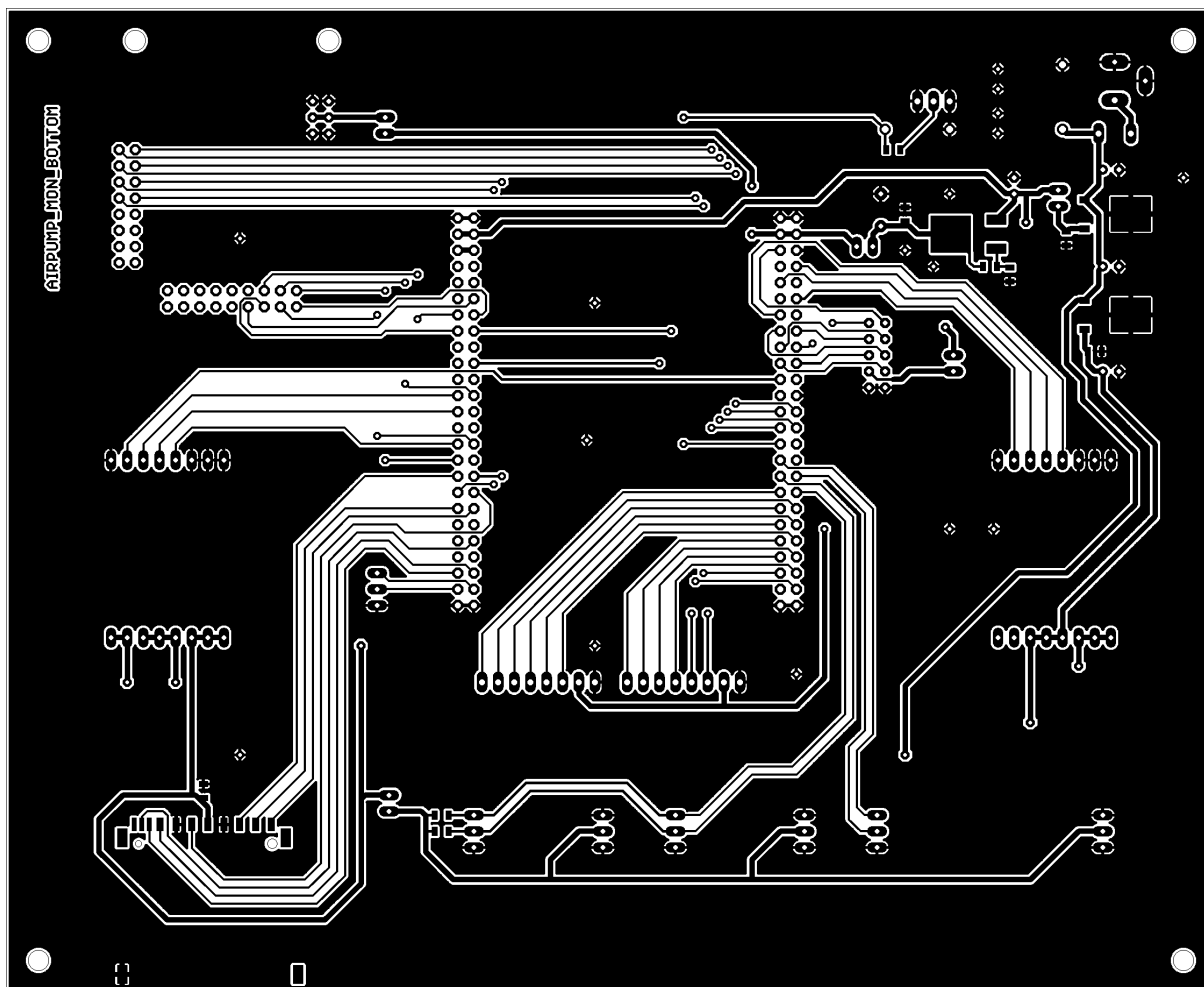


Příloha B – Desky plošných spojů

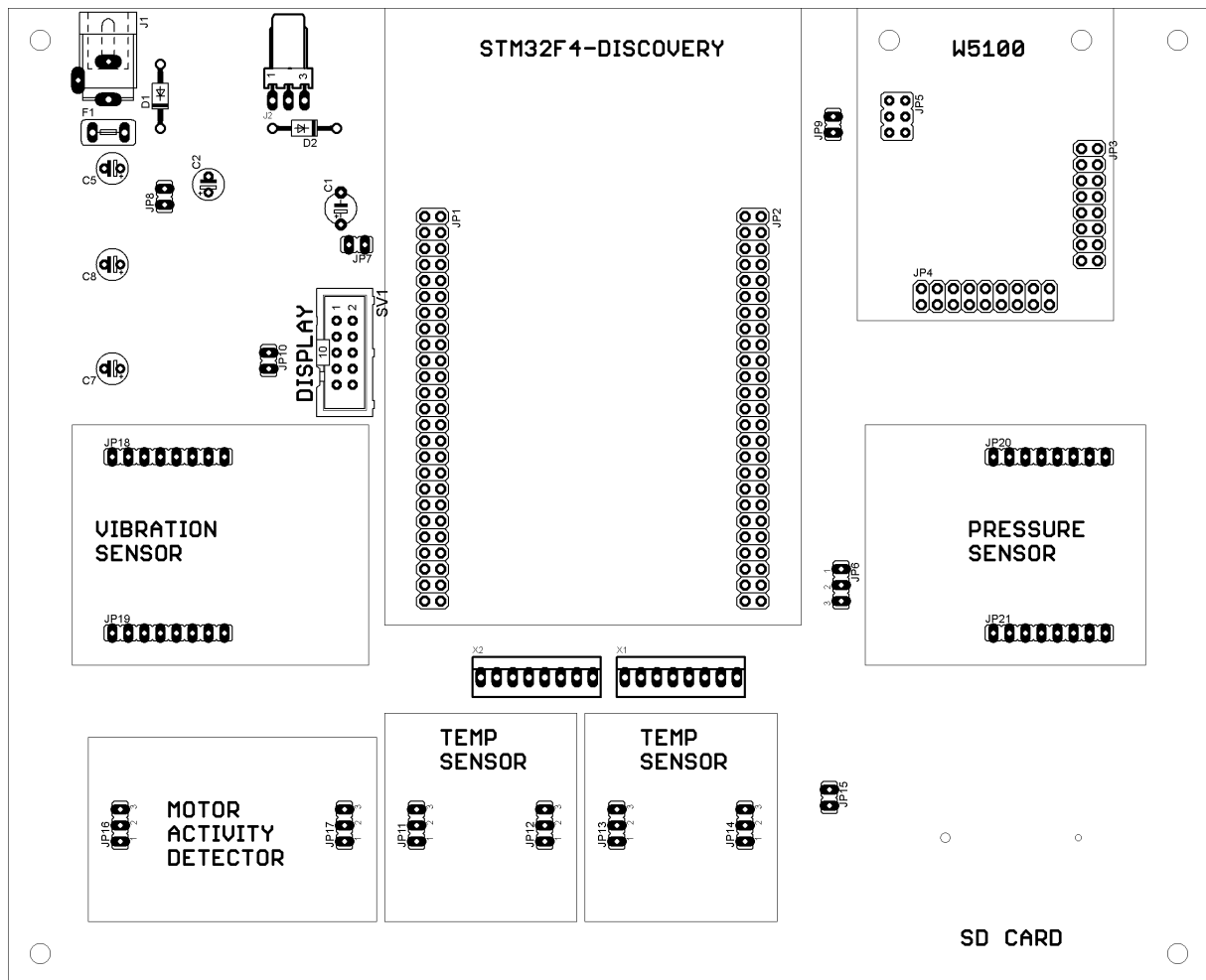
B.1 Propojovací deska



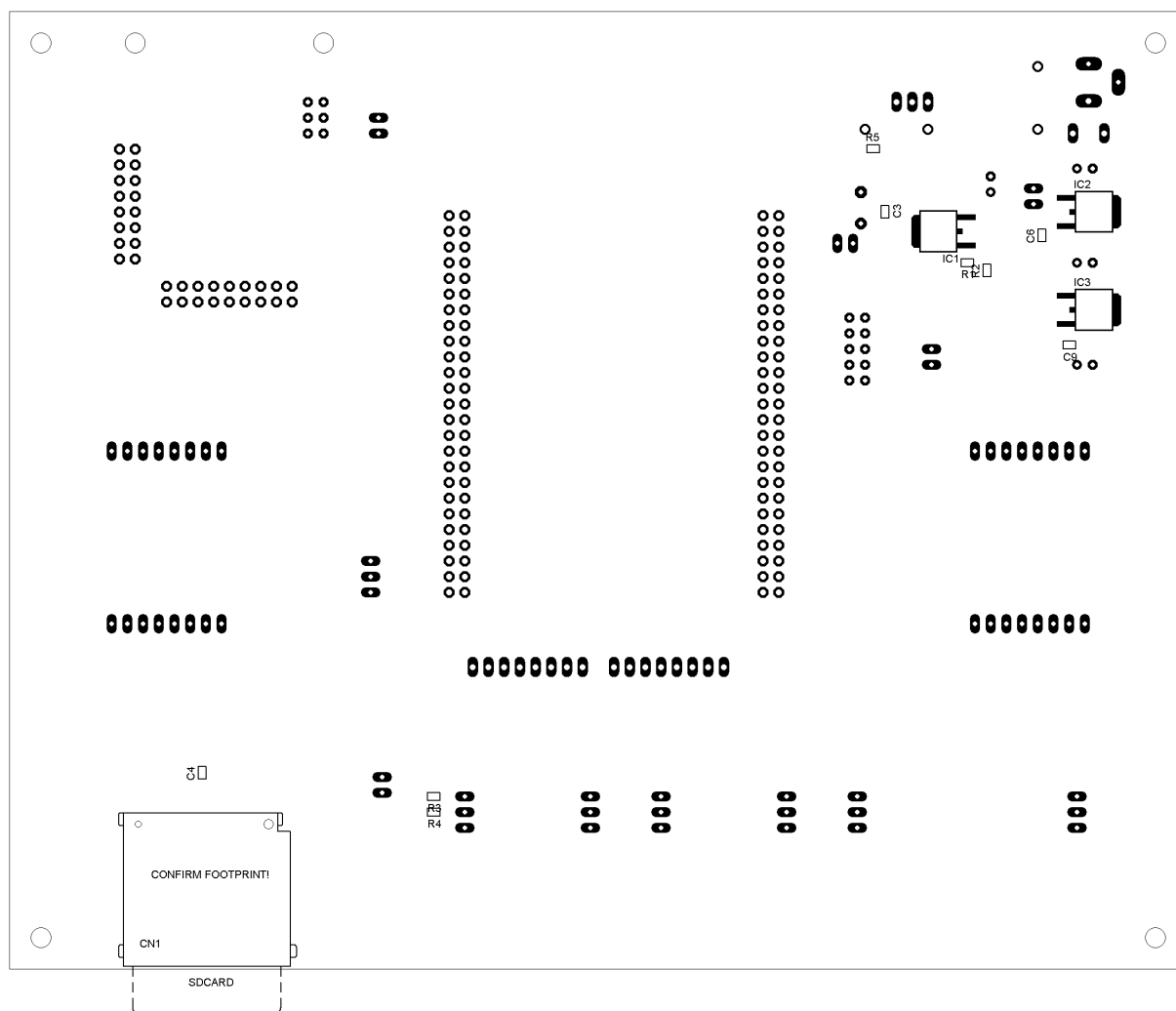
Obr. B.1 Propojovací deska – vrstva Top



Obr. B.2 Propojovací deska – vrstva Bottom

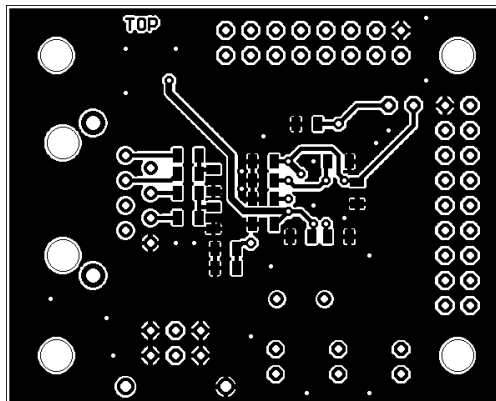


Obr. B.3 Propojovací deska – vrstva Top, osazovací výkres

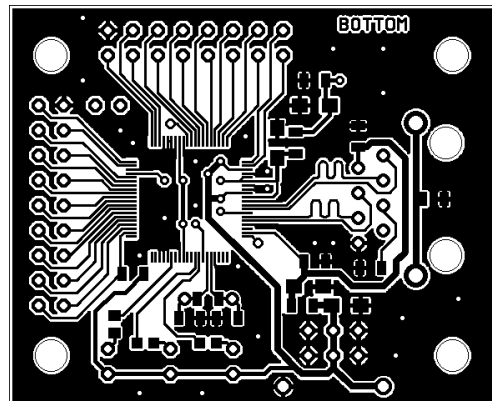


Obr. B.4 Propojovací deska – vrstva Bottom, osazovací výkres

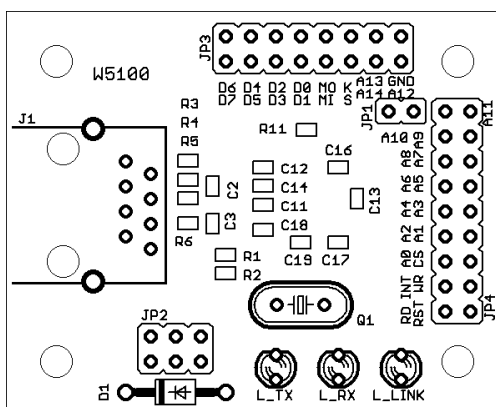
B.2 Modul řadiče Wiznet W5100



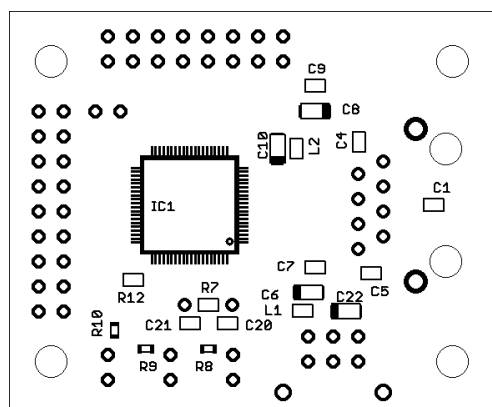
Obr. B.5 Modul W5100 - vrstva Top



Obr. B.6 Modul W5100 - vrstva Bottom

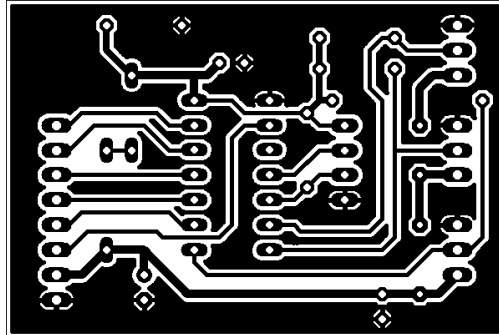


Obr. B.7 Modul W5100 – vrstva Top,
osazovací výkres

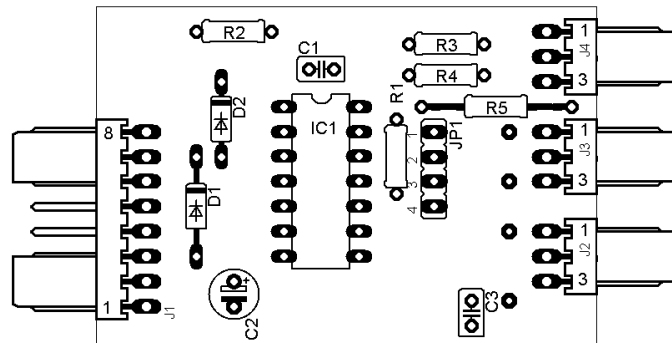


Obr. B.8 Modul W5100 – vrstva Bottom,
osazovací výkres

B.3 Modul senzoru polohy hřídele

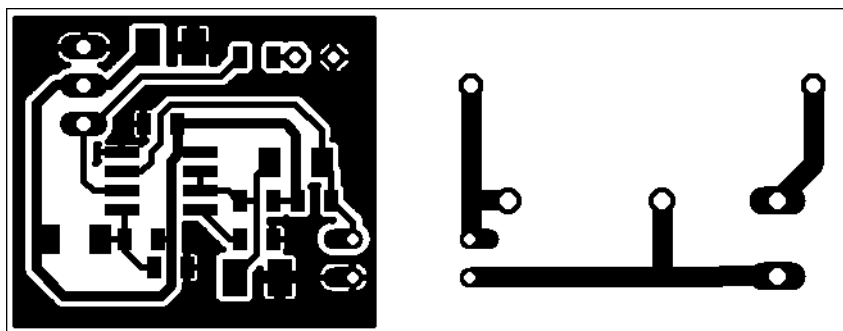


Obr. B.9 Senzor polohy hřídele - vrstva Bottom

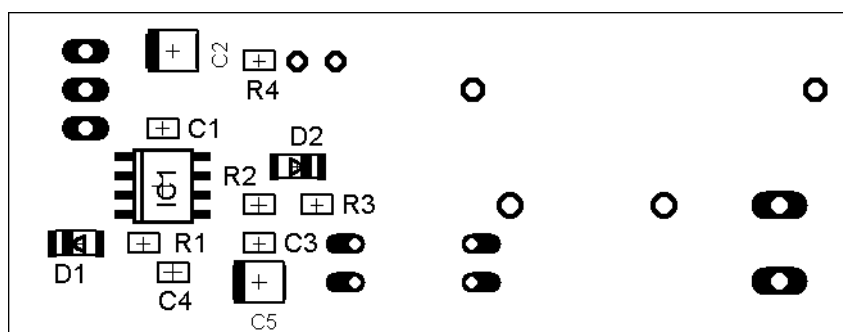


Obr. B.10 Senzor polohy hřídele - vrstva Top, osazovací výkres

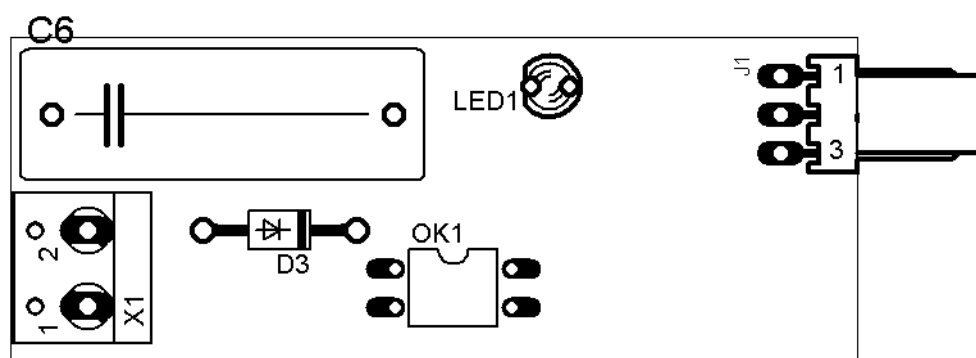
B.4 Modul snímače chodu motoru



Obr. B.11 Snímač chodu motoru - vrstva Bottom

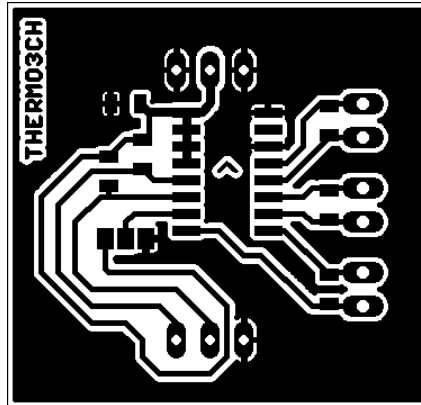


Obr. B.12 Snímač chodu motoru - vrstva Bottom, osazovací výkres

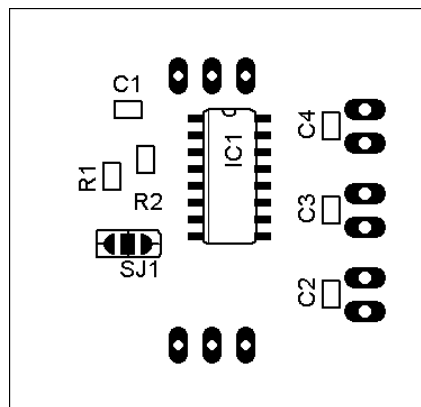


Obr. B.13 Snímač chodu motoru - vrstva Top, osazovací výkres

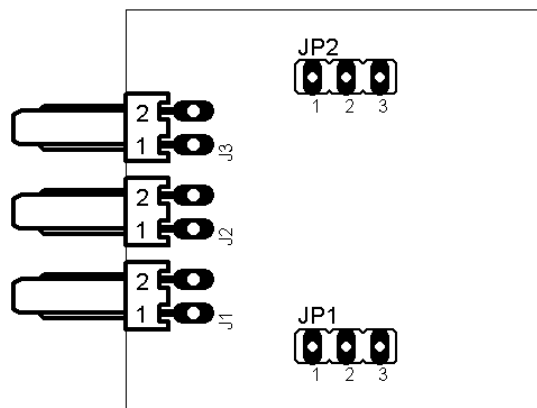
B.5 Modul 3-kanálového teploměru



Obr. B.14 3-kanálový teploměr - vrstva Bottom

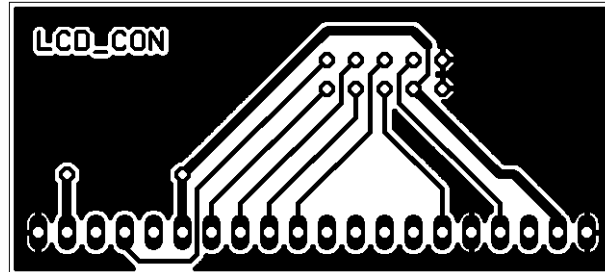


Obr. B.15 3-kanálový teploměr - vrstva Bottom, osazovací výkres

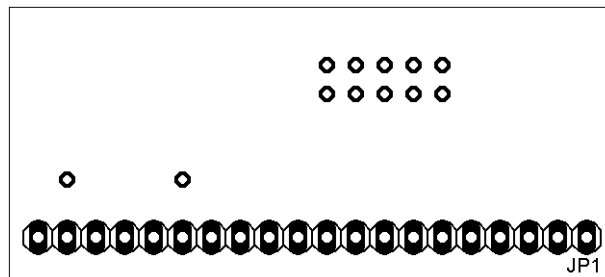


Obr. B.16 3-kanálový teploměr - vrstva Top, osazovací výkres

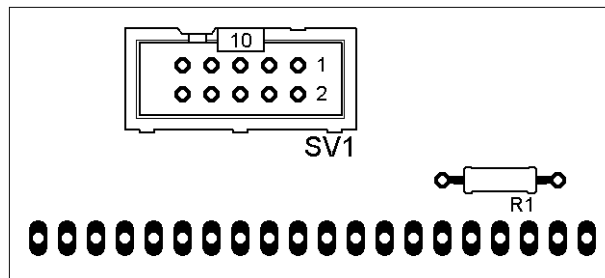
B.6 Redukce pro LCD konektor



Obr. B.17 LCD redukce - vrstva Top



Obr. B.18 LCD redukce - vrstva Top, osazovací výkres



Obr. B.19 LCD redukce - vrstva Bottom, osazovací výkres

Příloha C – Seznam zdrojových kódů

Kompletní zdrojové kódy jsou vzhledem k jejich rozsahu umístěny na přiloženém CD.

C.1 Zdrojové kódy programu MCU

main.c

Inicializace hardware, test senzorů po spuštění, vytvoření úloh operačního systému FreeRTOS.

delay.c

Funkce časových zpoždění a timeoutů.

lcd_ST7920.c

Ovladač grafického LCD displeje s řadičem ST7920. Obsahuje funkce pro výpis textu písmem o velikosti 8x8 a 7x5 bodů.

sens_pressure.c

Funkce pro čtení dat z analogového senzoru tlaku pomocí ADC.

shaft_sensor.c

Obsahuje funkce pro čtení dat ze senzoru polohy hřídele a jejich konverzi z grayova kódu do binárního.

string2.c

Doplňující funkce pro práci s textovými řetězci.

test.c

Procedura k otestování funkčnosti senzorů po spuštění programu.

tmp513.c

Obsahuje funkce pro práci s I²C teplotními senzory TMP513.

tasks/guard.c

FreeRTOS proces k ochraně kompresoru před přehřátím.

tasks/HTTPserver.c

FreeRTOS proces implementující síťové funkce.

tasks/lcd_view.c

FreeRTOS proces zajišťující vizualizaci provozních veličin na lokálním LCD.

tasks/monitor.c

FreeRTOS proces zajišťující čtení dat ze senzorů.

tasks/samples_writer.c

FreeRTOS proces pro zápis vzorků vibrací na SD kartu.

C.1 Zdrojové kódy klientské aplikace

Form1.cs

Hlavní okno klientské aplikace.

Form2.cs

Formulář pro nastavení parametrů síťové komunikace.

Form3.cs

Formulář pro nastavení systémového času a data v sensorové jednotce.

Form4.cs

Okno k procházení a stahování diagnostických záznamů z SD karty.

TypesAndExceptions.cs

Definice datových objektů a výjimek.

AboutBox1.cs

Okno s informacemi o aplikaci.

Příloha D – Adresářová struktura SD karty

/ (Kořenový adresář):

opsecs1.txt (textový)

Provozní čas 1. tlakovací jednotky v sekundách

opsecs2.txt (textový)

Provozní čas 2. tlakovací jednotky v sekundách

warnlog.txt (textový)

Pokud dojde k přehřátí kompresoru, je do tohoto souboru událost zaznamenána (čas, datum a nejvyšší dosažená teplota)

/LOGS:

DDMMhhmm.YY (binární)

Obsahuje uložený záznam vibrací stroje společně s okamžitou polohou hřídele ($f_{vz} = 5$ kHz). Bližší informace o formátování lze nalézt v kapitole 5.1.5.

DDMMhhmm.YYA (binární)

Obsahuje separátně uložený záznam průběhu teplot a tlaku vzduchu ($f_{vz} = 2$ Hz).

/CONFIG/NET:

hw.txt (textový)

Slouží pro nastavení HW adresy (MAC) použitého Ethernet řadiče.

ip.txt (textový)

Slouží pro nastavení parametrů IP protokolu (adresy a masky podsítě) daného zařízení v síti Ethernet.

1. řádek – IP adresa

2. řádek – maska podsítě

3. řádek – výchozí brána